

Федеральное агентство по образованию



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

Кафедра электротехники и электроники

В.П. Катушкин, В.В. Романенко

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие для студентов заочной формы обучения



Санкт-Петербург
2008

УДК 621.3

Электротехника и электроника: Учебное пособие/ Катушкин В.П., Романенко В.В. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2008. – 86 .

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».

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)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЧАСТЬ 1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	
Тема 1. Цепи однофазного переменного тока.....	5
Тема 2. Цепи трехфазного переменного тока.....	16
Тема 3. Трансформаторы.....	21
Тема 4. Электродвигатели.....	25
ЧАСТЬ 2. ЭЛЕКТРОНИКА	
Тема 5. Выпрямительные устройства.....	37
Тема 6. Усилители.....	46
Тема 7. Многокаскадные усилители.....	52
ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ.....	58
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ.....	66
ЛИТЕРАТУРА ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА».....	83
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА».....	84

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, выбор вариантов по которым приведен ниже, 3 лабораторные работы и сдают итоговый экзамен по курсу.

А	Б	В	Г	Д	Е	Ё	Ж	З	И	Й	К	Л	М	Н
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
О	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Э	Ю	Я
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

ЧАСТЬ 1 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Тема 1 Цепи однофазного переменного тока

Переменный ток Основные понятия и определения

В технике переменный ток – это ток, периодически изменяющийся по величине и направлению (обычно по синусоидальному закону).

Мгновенное значение ЭДС в витке генератора переменного тока

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi)$$

E_m – амплитуда (максимальное значение гармонической функции)

$(\omega t + \psi)$ – фаза колебания

ψ – начальная фаза (при $t = 0$)

T – период колебания (время полного цикла колебания)

$f = 1 / T$ – циклическая частота (число циклов в сек.)

$\omega = 2\pi / T = 2\pi f$ – угловая частота – скорость изменения фазы колебания.

Для различных значений ЭДС, тока и напряжения принято использовать следующие обозначения:

e, i, u – мгновенные значения ЭДС, тока и напряжения

E_m, I_m, U_m – амплитудные значения ЭДС, тока и напряжения

E_{cp}, I_{cp}, U_{cp} – средние значения ЭДС, тока и напряжения

E, I, U – действующие значения ЭДС, тока и напряжения.

Среднее значение синусоидального тока характеризует изменение заряда за время Δt ($\Delta Q = I_{cp} \Delta t$)

$$I_{cp\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} i dt$$

Известно, что среднее значение любой гармонической функции за период равно нулю. Поэтому принято определять среднее значение переменного тока на интервале $T/2$. После простейшего интегрирования получим:

$$I_{cp} = \frac{2I_m}{\pi} \quad E_{cp} = \frac{2E_m}{\pi} \quad U_{cp} = \frac{2U_m}{\pi}$$

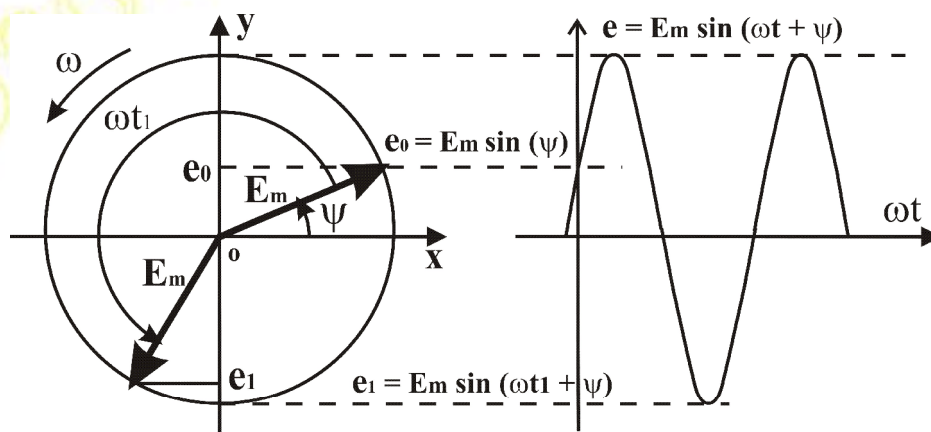
Средние значения дают возможность легко рассчитать суммарный заряд при электролизе, при зарядке аккумулятора, при анализе выпрямительных устройствах и т.д.

Действующее значение переменного тока I равно такому постоянному току I_0 , который обеспечивает равное тепловое или энергетическое воздействие. Если посчитать энергию постоянного и переменного тока за половину периода, то после интегрирования мы получим следующее выражение для действующего значения тока (аналогично определяются действующие значения ЭДС и напряжения)

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Векторное изображение гармонических функций

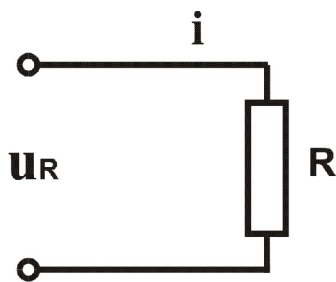
Если гармоническую функцию изобразить в виде вектора с длиной, равной его амплитуде, и вращать этот вектор против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω то в любой момент времени проекция этого вектора на вертикальную ось OY будет равна мгновенному значению этой гармонической функции.



Векторное представление позволяет избавиться от проблем, связанных со сложением гармонических функций с различными амплитудами, и перейти к их векторному суммированию. Естественно, что при этом приходится учитывать их взаимную ориентацию, но это один из наиболее простых и наглядных способов расчета цепей переменного тока.

Из курса физики известно, что для мгновенных значений в цепях переменного тока справедливы все законы постоянного тока (Ома, Кирхгофа и т.д.). Эти же законы будут справедливы и для амплитудных и действующих значений при условии векторного сложения входящих в них величин.

Цепь переменного тока с активным сопротивлением



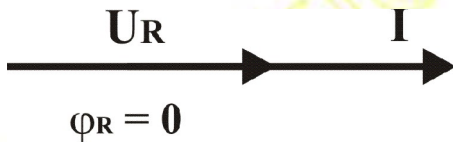
$$i = I_m \sin(\omega t)$$

$$u_R = ? \quad \varphi_R = ?$$

$$u = iR = RI_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

$$U_R = \frac{I_m R}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_R = I R$$

Закон Ома для действующих значений $I = \frac{U_R}{R}$



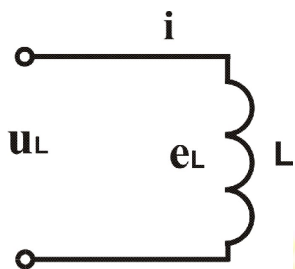
$$i = I_m \sin(\omega t)$$

$$u_R = U_{mR} \sin \omega t$$

На активном сопротивлении напряжение и ток совпадают по фазе, т. е. угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi_R = 0$

Цепь переменного тока с индуктивностью

Идеальная индуктивность ($L = \text{const}, R_L = 0$)



$$i = I_m \sin(\omega t)$$

$$u_L = ? \quad \varphi_L = ?$$

При любом изменении тока в катушке индуктивности возникает ЭДС самоиндукции (закон Фарадея) которая противодействует этому изменению (правило Ленца).

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t = E_{mL} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Индуктивное падение напряжения можно найти из II закона Кирхгофа для данной цепи

$$u_L + e_L = 0 \Rightarrow u_L = -e_L = -\omega L I_m \cos \omega t = U_{mL} \sin(\omega t + \pi/2)$$

$$U_L = \frac{\sqrt{2} I_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_L = I \omega L = I X_L$$

Закон Ома для цепи с индуктивностью $I = \frac{U_L}{X_L}$

$X_L = \omega L = 2\pi fL$ – реактивное индуктивное сопротивление

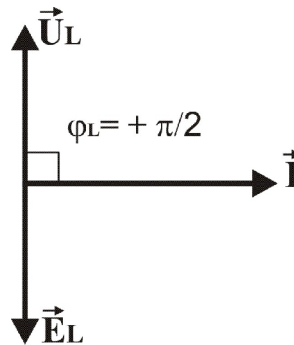
$X_L = [\text{Ом}]$; $L = [\text{Генри}]$; $f = [\text{Гц}]$

Физический смысл индуктивного сопротивления – в возникновении ЭДС самоиндукции, препятствующей изменению тока.

$$i = I_m \sin(\omega t)$$

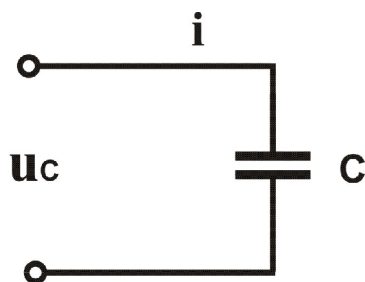
$$e_L = E_{mL} \sin(\omega t - \pi/2)$$

$$u_L = U_{mL} \sin(\omega t + \pi/2)$$



На индуктивности напряжение опережает ток на 90° , т. е. угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi_L = +\pi/2$

Цепь переменного тока с емкостью



$$i = I_m \sin(\omega t)$$

$$u_C = ? \quad \varphi_C = ?$$

Заряд конденсатора $Q = C U$. Изменение заряда $dq = C du_C$
 Это же изменение заряда $dq = i dt \Rightarrow i dt = C du_C$

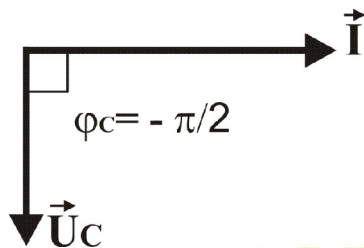
$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{I_m \sin(\omega t - \pi/2)}{\omega C} = U_{mC} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$U_C = \frac{I_m}{f \sqrt{2}} \Rightarrow U_C = \frac{I}{\omega C} = I X_C$$

Закон Ома для цепи с емкостью $I = \frac{U_C}{X_C}$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ – реактивное емкостное сопротивление}$$

$$X_C = [\text{Ом}] ; C = [\text{фарада}] ; f = [\text{Гц}]$$

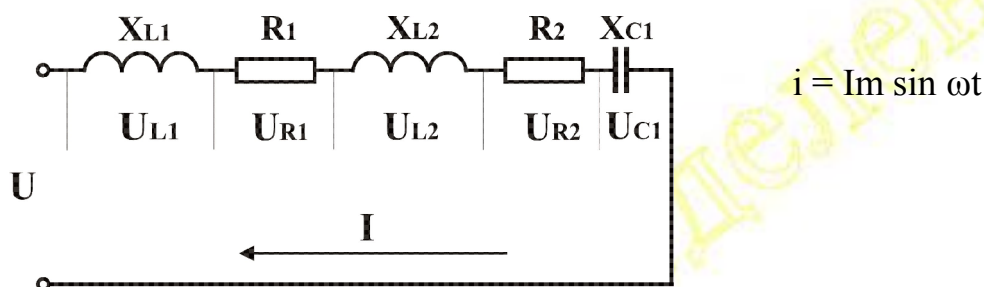


$$i = I_m \sin(\omega t)$$

$$u_C = U_{mC} \sin(\omega t - \pi/2)$$

На конденсаторе напряжение отстает от тока на 90° , т.е. угол сдвига фаз между током и напряжением $\varphi_C = -\pi/2$

Цепь переменного тока при последовательном соединении элементов



При последовательном соединении элементов ток на всех участках цепи одинаков. Действующее значение тока $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ и угловую частоту ω можно найти, используя закон изменения тока $i = I_m \sin \omega t$

Падение напряжения на каждом элементе цепи можно определить из закона Ома

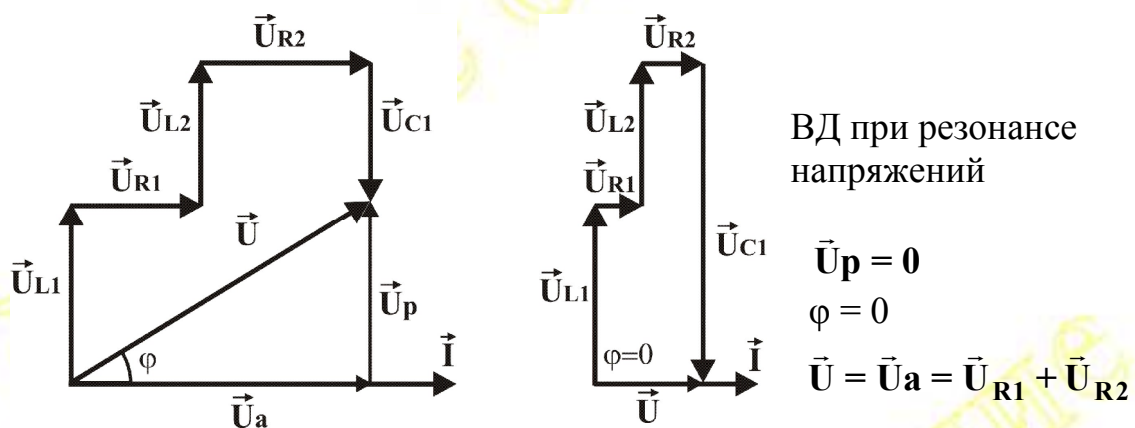
$$U_R = I R ; U_L = I X_L = I 2\pi f L = I \omega L ; U_C = I X_C = \frac{I}{2f \sqrt{2} C} = \frac{I}{f \sqrt{2} C}$$

Приложенное напряжение U равно геометрической сумме падений напряжения на каждом элементе последовательной цепи (II закона Кирхгофа).

$\vec{U} = \vec{U}_{L1} + \vec{U}_{R1} + \vec{U}_{L2} + \vec{U}_{R2} + \vec{U}_{C1}$ – сумма геометрическая (векторная), следовательно, необходимо построить векторную диаграмму (ВД)

Порядок построения ВД:

1. Строим вектор тока \vec{I}
2. Относительно вектора тока строим вектор падения напряжения на первом элементе цепи, учитывая **величину** и **направление** угла сдвига фаз между током и напряжением.
3. Из конца этого вектора аналогично строим вектор падения напряжения на следующем элементе цепи и т.д. – в результате получим векторную сумму падений напряжения на всех элементах цепи, т.е. приложенное напряжение \vec{U} .



Численное значение приложенного напряжения U можно определить из ВД

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{(\sum U_R)^2 + (\sum U_L - \sum U_C)^2} = \sqrt{(\sum IR)^2 + (\sum IX_L - \sum IX_C)^2}$$

$$= I \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X_L - \sum X_C)^2} = I \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} = IZ$$

Где: $Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}$ – полное сопротивление цепи

$R_{\Sigma} = \sum R$ – эквивалентное активное сопротивление цепи

$X_{\Sigma} = (\sum X_L - \sum X_C)$ – эквивалентное реактивное сопротивление цепи

Резонанс в последовательной цепи (резонанс напряжений)

При резонансе напряжений сумма индуктивных напряжений равна сумме емкостных, следовательно, эквивалентное реактивное напряжение

$$U_p = \sum U_L - \sum U_C = 0 \quad \text{– условие резонанса напряжений}$$

Следовательно, при резонансе напряжений

$$\sum U_L = \sum U_C$$

$$\sum X_L = \sum X_C$$

Приложенное напряжение $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = U_a = \sum U_R$ – равно активному.

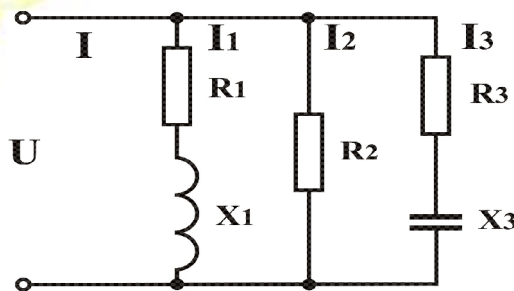
Полное сопротивление цепи $Z_0 = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} = R_{\Sigma} = \sum R$ – равно сумме активных сопротивлений и минимально, т.е. всю цепь можно заменить эквивалентным активным сопротивлением R_{Σ} .

Ток в цепи $I_0 = \frac{U}{Z_0} = \frac{U}{R_{\Sigma}}$ – максимален, и падение напряжения на

отдельных реактивных элементах может быть больше приложенного напряжения (см. ВД при резонансе).

При резонансе напряжений приложенное напряжение совпадает по фазе с током ($\varphi = 0$), т.е. несмотря на наличие реактивных элементов, цепь ведет себя как чисто активный приемник.

Цепь переменного тока при параллельном соединении элементов



При параллельном соединении элементов напряжение на каждой ветви схемы одинаково и равно приложенному. Каждая ветвь схемы представляет из себя последовательное соединение элементов, следовательно, можно для каждой из ветвей найти полное сопротивление Z , ток I и угол сдвига фаз φ

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}; \quad I = \frac{U}{Z_1}; \quad \varphi_1 = \arccos \frac{R_1}{Z_1}$$

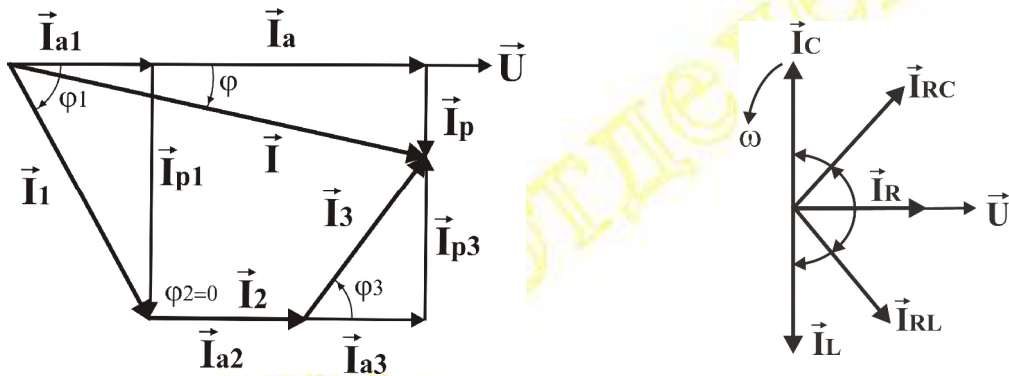
Аналогично можно определить Z , I и φ для остальных ветвей

По I закону Кирхгофа ток в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме токов в ветвях $\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$ – сумма геометрическая (векторная), следовательно, необходимо построить векторную диаграмму (ВД).

Порядок построения ВД:

4. Строим вектор напряжения \vec{U}

5. Относительно вектора напряжения строим вектор тока первой ветви \vec{I}_1 , учитывая **величину** и **направление** угла сдвига фаз между током и напряжением φ_1 .
6. Из конца этого вектора строим вектор тока второй ветви и т.д. – в результате получим векторную сумму токов в ветвях, т.е. ток в неразветвленной части цепи.



Численное значение полного тока I можно определить из ВД, если разложить ток каждой ветви на две составляющие

Например, для первой ветви

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = U g_1 \text{ – активная составляющая тока } I_1$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{X_1}{Z_1} = U \frac{X_1}{Z_1^2} = U b_1 \text{ – реактивная составляющая тока } I_1$$

$$g = \frac{R}{Z^2} \text{ – активная проводимость отдельной ветви}$$

$$b = \frac{X}{Z^2} \text{ – реактивная проводимость отдельной ветви}$$

Аналогично можно разложить на составляющие токи всех ветвей

Тогда из ВД, учитывая, что емкостные и индуктивные токи направлены в противоположные стороны, получим

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(\sum I_R)^2 + (\sum I_L - \sum I_C)^2} = \sqrt{(\sum U g)^2 + (\sum U b_L - \sum U b_C)^2} \\ &= \\ &= U \sqrt{(\sum g)^2 + (\sum b_L - \sum b_C)^2} = U \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2} = u y \end{aligned}$$

Где: $I_a = \sum I_R$ – активная составляющая полного тока

$I_p = \sum I_L - \sum I_C$ – реактивная составляющая полного тока

$g_{\Sigma} = \sum g$ – эквивалентная активная проводимость цепи

$b_{\Sigma} = (\sum b_L - \sum b_C)$ – эквивалентная реактивная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2} \quad - \text{ полная проводимость цепи}$$

Резонанс в параллельной цепи (резонанс токов)

При резонансе токов сумма индуктивных токов равна сумме емкостных, следовательно, реактивная составляющая полного тока

$$I_p = \sum I_L - \sum I_C = 0 \quad - \text{ условие резонанса токов}$$

Следовательно, при резонансе токов

$$\begin{aligned} \sum I_L &= \sum I_C \\ \sum b_L &= \sum b_C \end{aligned}$$

Полный ток (в неразветвленной части цепи) $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = I_a = \sum I_a$ - равен активному, т.е. сумме активных токов всех ветвей.

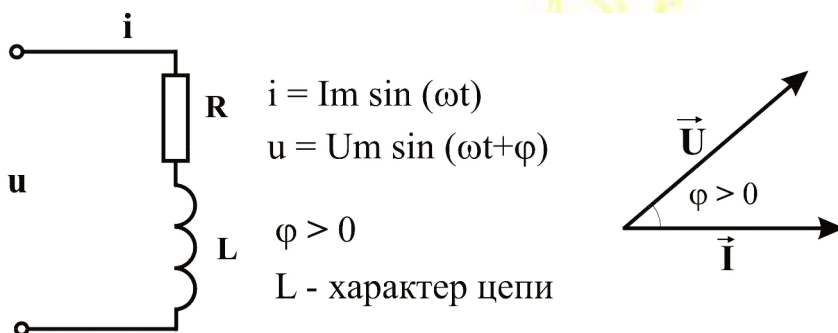
Полная проводимость цепи $y_0 = \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2} = g_{\Sigma} = \sum g$ - равно сумме активных проводимостей всех ветвей и минимальна.

Ток в цепи $I_0 = U y_0 = U g_{\Sigma}$ - минимален, т.е. параллельная цепь при резонансе обладает минимальной проводимостью, т.е. максимальным сопротивлением.

При резонансе токов полный ток совпадает по фазе с приложенным напряжением ($\varphi = 0$), т.е. вся цепь имеет чисто активный характер.

Энергия и мощность в цепи переменного тока

Различия между активными и реактивными сопротивлениями не ограничиваются наличием сдвига фаз. Оказывается, что реактивные элементы (конденсаторы и катушки) не потребляют энергию. Энергия этих элементов в определенные промежутки времени полностью возвращается источнику.

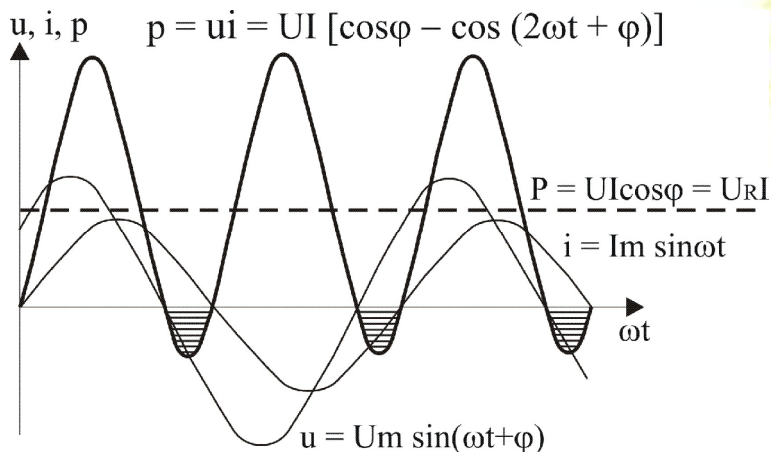


Работа электрического тока $dA = u i dt$

Мгновенная электрическая мощность, т.е. скорость совершения работы

$$\begin{aligned} p &= u i = U_m \sin(\omega t + \varphi) I_m \sin \omega t = \dots = UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \\ &= UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) + UI \sin \varphi \sin 2\omega t = p_a + p_p \end{aligned}$$

Из математического выражения для мгновенной мощности p и графика ее изменения видно, что это гармоническая функция с частотой изменения 2ω (т.е. в два раза выше частоты сети) и амплитудой UI . За период изменения мгновенная мощность имеет как положительные значения, когда энергия поступает в цепь, так и отрицательные, когда энергия, запасенная в магнитном поле, возвращается источнику.



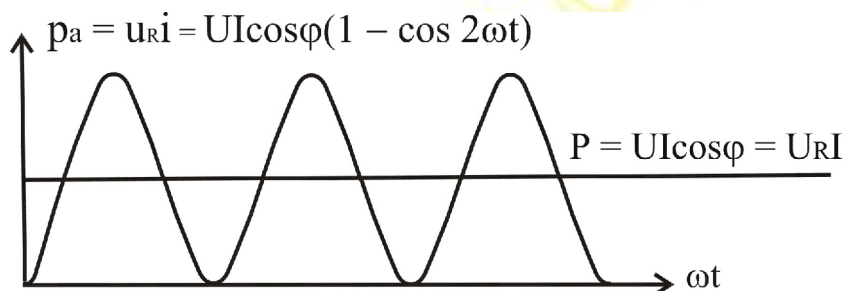
Среднее значение за период

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = UI \cos\varphi = UR I$$

$P = UI \cos\varphi = UR I$ – средняя активная мощность – средняя скорость потребления энергии.

Мгновенную мощность можно представить в виде двух слагаемых $p = p_a + p_p$

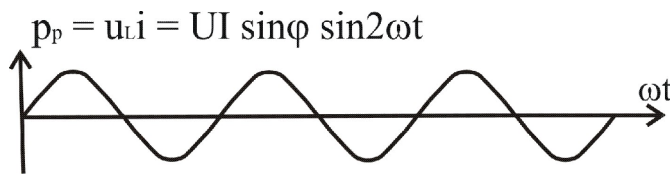
1. Мгновенная активная мощность $p_a = UI \cos\varphi (1 - \cos 2\omega t)$ – для рассматриваемой нагрузки это мгновенная мощность, которая выделяется на активном сопротивлении R .



p_a – это гармоническая функция с частотой изменения 2ω и средним значением $P = UI \cos\varphi = UR I$

$p_a \geq 0$ – всегда положительна, т.е. активная мощность характеризует потребляемую энергию, которая необратимо преобразуется в другие виды – тепловую, механическую и т.д.

2. Мгновенная реактивная мощность – $p_p = UI \sin \varphi \sin 2\omega t$ – это строго гармоническая функция – среднее значение за период равно 0.



Реактивная энергия не потребляется, происходит периодический обмен этой энергией между источником и реактивными элементами цепи – индуктивностями и конденсаторами (или между ними).

Реактивная энергия – это энергия электрического поля конденсаторов или магнитного поля катушек индуктивности. Частота изменения 2ω – в два раза выше частоты сети, амплитуда $Q = U I \sin \varphi = U_L I$

Таким образом, в цепях переменного тока мы имеем три различные мощности:

Активная мощность $P = U I \cos \varphi$ [Ватт]

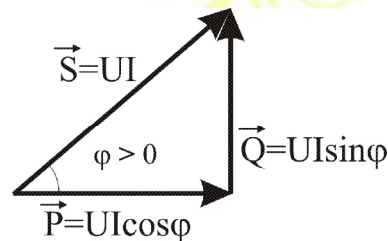
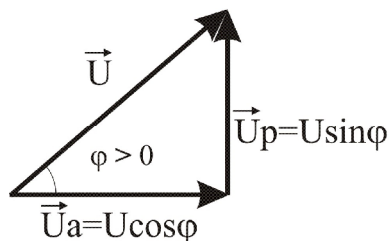
Реактивная мощность $Q = U I \sin \varphi$ [ВАр]

Полная мощность $S = U I$ [ВА]

S – это геометрическая сумма активной и реактивной мощности, характеризует полную энергию, передаваемую по ЛЭП.

Но $P \perp Q$ – ортогональны (см. закон изменения мгновенной мощности)

$$\Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U I$$



Удобные формулы для расчета мощности

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R = U^2 g$$

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X = U^2 b$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI = I^2 Z = U^2 y$$

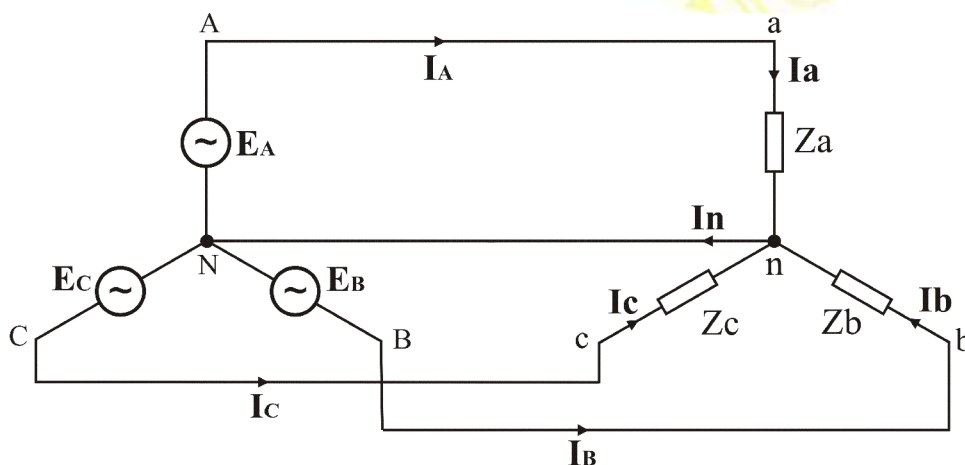
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} = \frac{g}{y} \text{ – коэффициент мощности, показывает, какую}$$

часть от полной энергии, передаваемой по линии, составляет активная, т.е. потребляемая или полезная энергия.

Тема 2 Цепи трехфазного переменного тока

Основные понятия и определения

Система трехфазного электропитания состоит из трехфазного генератора, линии электропередачи (ЛЭП) и трехфазного приемника.



Статор трехфазного генератора имеет три обмотки с одинаковым числом витков, соединенные звездой. Обмотки смещены в пространстве на 120° . При вращении якоря, создающего постоянное магнитное поле, в обмотках статора индуцируются три ЭДС ($\vec{E}_A, \vec{E}_B, \vec{E}_C$), одинаковые по величине, но сдвинутые по фазе на 120° .

$$e_A = E_m \sin(\omega t)$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Z_a, Z_b, Z_c – сопротивления (фазы) трехфазного приемника, соединенного звездой.

A-a, B-b, C-c – линейные провода (линии), соединяющие начала обмоток генератора со свободными концами трехфазного приемника.

N, n – общие или нейтральные точки генератора и нагрузки.

N – n – нейтральный или нулевой провод, соединяющий эти точки.

$\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$ – линейные токи – токи в линиях электропередачи.

$\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c$ – фазные токи – токи в фазах приемника.

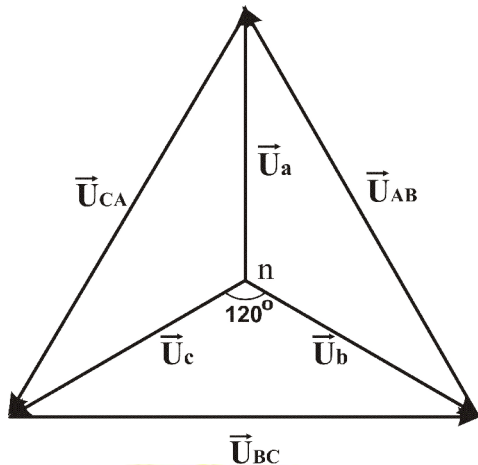
\vec{I}_n – ток в нейтральном проводе.

$\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$ – фазные напряжения – разность потенциалов между нейтральным проводом и соответствующей линией.

$\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{BC}, \vec{U}_{CA}$ – линейные напряжения – разность потенциалов между соответствующими линиями.

Трехфазное соединение звездой с нейтральным проводом

В звезде с нейтральным проводом каждая фаза нагрузки с помощью нейтрального провода и соответствующей линии независимо подключена к своему генератору. Следовательно, если не учитывать малые падения напряжения в линии, фазные напряжения, также как ЭДС генератора равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° .



$$\vec{U}_a \cong \vec{E}_A, \quad \vec{U}_b \cong \vec{E}_B, \quad \vec{U}_c \cong \vec{E}_C$$

Соответственно, линейные напряжения

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_a - \vec{U}_b$$

$$\vec{U}_{BC} = \vec{U}_b - \vec{U}_c$$

$$\vec{U}_{CA} = \vec{U}_c - \vec{U}_a$$

Из векторной диаграммы линейных и фазных напряжений можно найти соотношение между ними. По теореме косинусов для любого линейного напряжения (учитывая, что $\cos 120^\circ = -0.5$) получим

$$U_{BC} = \sqrt{U_b^2 + U_c^2 - 2U_b U_c \cos 120^\circ} = U_b \sqrt{3} = U_c \sqrt{3}$$

Следовательно, в звезде с нейтральным проводом при любой нагрузке линейные напряжения (U_L) равны по величине и в $\sqrt{3}$ раз больше фазных (U_ϕ).

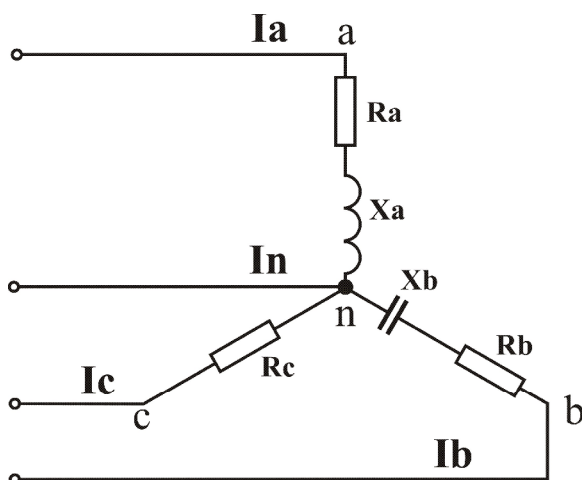
$$U_L = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = \sqrt{3} U_\phi = \sqrt{3} U_a = \sqrt{3} U_b = \sqrt{3} U_c$$

Из схемы соединения нагрузки звездой следует, что линейные токи равны соответствующим фазным

$$\vec{I}_A = \vec{I}_a, \quad \vec{I}_B = \vec{I}_b, \quad \vec{I}_C = \vec{I}_c$$

Ток в нейтральном проводе можно определить из I закона Кирхгофа для нейтральной точки нагрузки "n" $\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c$ – сумма геометрическая (векторная), следовательно, для определения I_n нужно построить векторную диаграмму.

Пример расчета трехфазной нагрузки, соединенной звездой с нейтральным проводом



Пусть известно линейное напряжение и сопротивления всех фаз

1. Определяем фазные напряжения
 $U_a = U_b = U_c = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$
2. Определяем сопротивления фаз, фазные токи и углы сдвига фаз между током и напряжением

$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + X_a^2}; \quad I_a = \frac{U_a}{Z_a} \quad \varphi_a = \arccos \frac{R_a}{Z_a}$$

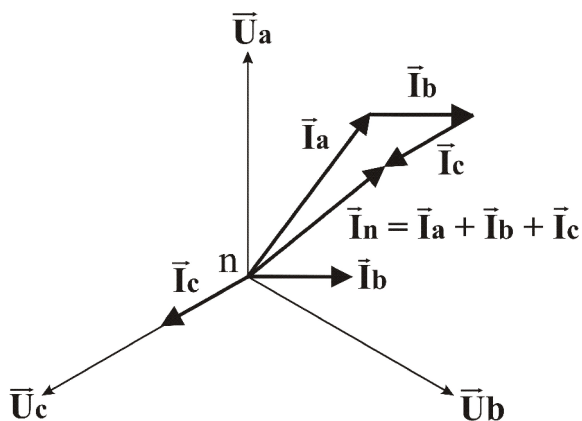
Аналогично определяются $Z_b, I_b, \varphi_b; Z_c, I_c, \varphi_c$

3. Ток в нейтральном проводе определяется по векторной диаграмме (ВД)

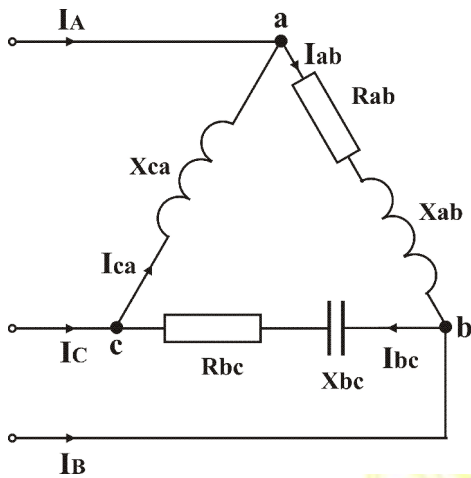
Порядок построения ВД

- 3.1. Строим 3 вектора фазных напряжений $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$ со сдвигом на 120°
- 3.2. Относительно каждого из этих напряжений строим фазные токи $\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c$, учитывая **величину** и **направление** угла сдвига фаз между током и напряжением.
- 3.3. Складываем геометрически фазные токи и находим ток в нейтральном проводе

$$\vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = \vec{I}_n$$



Трехфазное соединение нагрузки треугольником



При соединении нагрузки треугольником каждая фаза нагрузки включена между двумя линейными проводами, следовательно, фазные напряжения равны соответствующим линейным

$$\begin{aligned}\vec{U}_{ab} &= \vec{U}_{AB} \\ \vec{U}_{bc} &= \vec{U}_{BC} \\ \vec{U}_{ca} &= \vec{U}_{CA}\end{aligned}$$

Пример расчета трехфазной нагрузки, соединенной треугольником.

1. Определяем сопротивления фаз (Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca}), фазные токи и углы сдвига фаз между током и напряжением

$$Z_{ab} = \sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}; \quad I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} \quad \varphi_{ab} = \arccos \frac{R_{ab}}{Z_{ab}}$$

Аналогично определяются Z_{bc} , I_{bc} , φ_{bc} ; Z_{ca} , I_{ca} , φ_{ca}

2. Линейные токи можно определить по векторной диаграмме (ВД) на основании I закона Кирхгофа в векторной форме

Для узла "а"

$$\vec{I}_A + \vec{I}_{ca} = \vec{I}_{ab} \Rightarrow \vec{I}_A = \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca}$$

Аналогично для узлов "b" и "c" получим

$$\vec{I}_B = \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab};$$

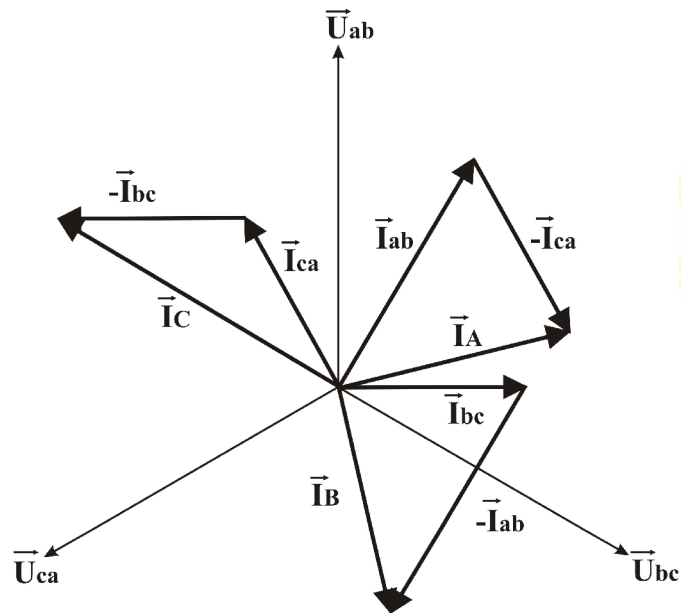
$$\vec{I}_C = \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc}$$

Порядок построения ВД

2.1. Строим 3 вектора фазных напряжений \vec{U}_{ab} , \vec{U}_{bc} , \vec{U}_{ca} со сдвигом на 120°

2.2. Относительно каждого из этих напряжений строим фазные токи \vec{I}_{ab} , \vec{I}_{bc} , \vec{I}_{ca} , учитывая величину и направление угла сдвига фаз между током и напряжением.

2.3. Строим вектор линейного тока \vec{I}_A по соотношению $\vec{I}_A = \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca}$ – из фазного тока \vec{I}_{ab} вычитаем фазный ток \vec{I}_{ca} (т.е. из конца вектора \vec{I}_{ab} строим вектор минус \vec{I}_{ca}) – получаем линейный ток \vec{I}_A . Аналогично находим линейные токи $\vec{I}_B = \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab}$ и $\vec{I}_C = \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc}$.



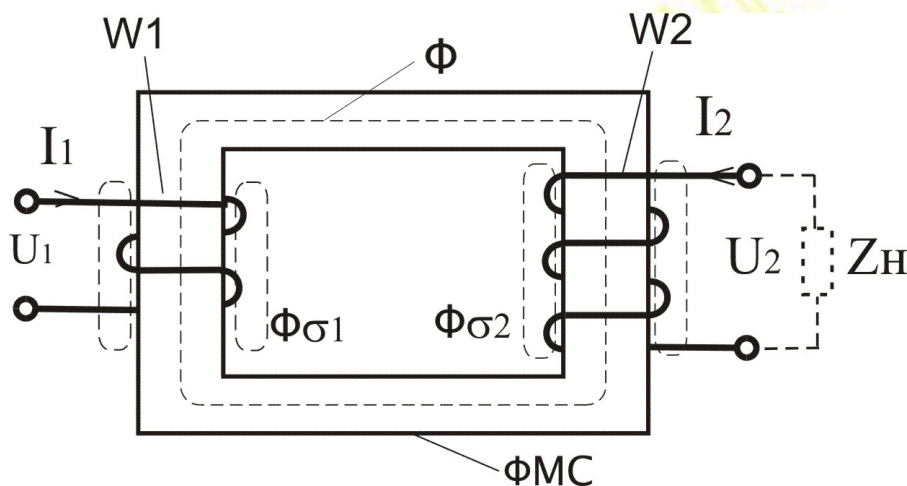
При обрыве одной из фаз ток в этой фазе равен 0, токи в двух оставшихся фазах и все фазные напряжения не изменяются. Линейные токи определяются по векторной диаграмме, как и в предыдущем случае.

При обрыве линейного провода система перестает быть трехфазной. Схема представляет из себя две параллельные ветви, включенные между двумя оставшимися линейными проводами. Фазные и линейные токи можно определить на основе методов расчета цепи с параллельным соединением элементов.

Тема 3 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

Принцип действия + при подключении ко вторичной обмотке нагрузки Z_H 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

$$E = 4.44 W f \Phi_m \quad (3.1)$$

2. Коэффициент трансформации

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \quad (3.2)$$

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

$$\vec{I}_1 W_1 + \vec{I}_2 W_2 = \vec{I}_{10} W_1 \quad (3.3)$$

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

$$\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 - \vec{E}_{\sigma 1} + \vec{I}_1 r_{m1} = -\vec{E}_1 + \vec{I}_1 x_{\sigma 1} + \vec{I}_1 r_{m1} \quad (3.4)$$

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 ($I_1 x_{\sigma 1} = -E_{\sigma 1}$)

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

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 + \vec{E}_{\sigma 2} - \vec{I}_2 r_{m2} = \vec{E}_2 - \vec{I}_2 x_{\sigma 2} - \vec{I}_2 r_{m2} \quad (3.5)$$

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 ($I_1 x_{\sigma 2} = -E_{\sigma 2}$)

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

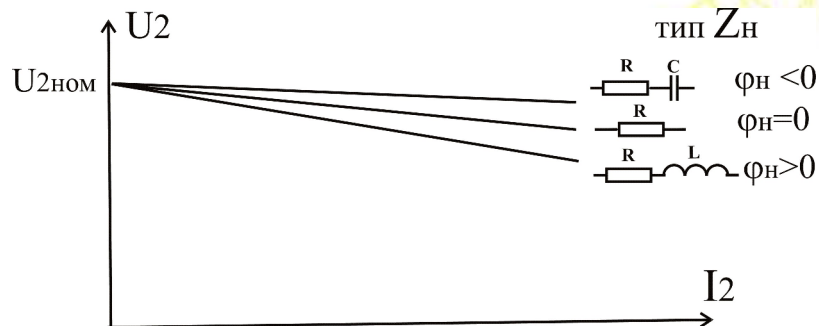
Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 от тока во вторичной обмотке I_2 ($U_2 = f(I_2)$), т.е. внешняя характеристика показывает, как изменяется напряжение на выходе трансформатора U_2 при увеличении тока нагрузки I_2 (при постоянном характере нагрузки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

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - \vec{I}_2 x_{f2} - \vec{I}_2 r_{m2} = \vec{E}_2 - r \vec{I}_2 \quad (3.6)$$

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 4 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

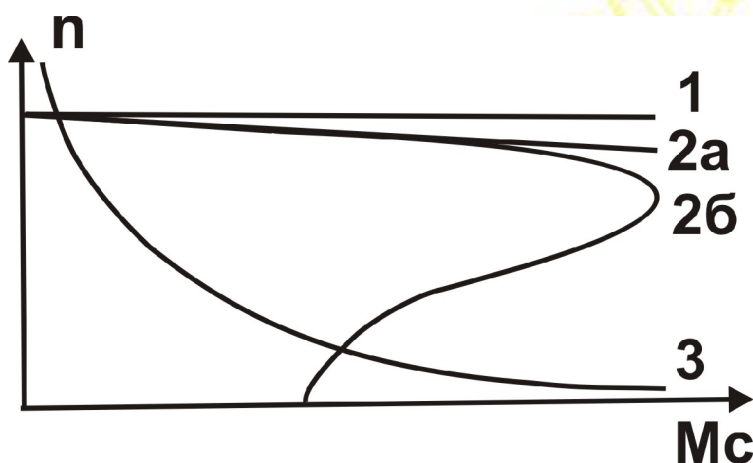
Электропривод – это совокупность ЭД, системы передач и ИМ. Работа электропривода определяется МХ ЭД и ИМ. Физически для ЭД частота вращения зависит от нагрузки (т.е. от момента сопротивления на валу). А для ИМ момент сопротивления зависит от частоты вращения, но принято их строить в единой системе координат



$$n = f(M_c) \quad n - [\text{об/мин}]; \quad M_c - [\text{Нм}]$$

Механическая характеристика – это зависимость числа оборотов от момента (сопротивления) на валу электропривода. В установившемся режиме $M_{вр} = M_c$, $n = \text{const}$ – условие устойчивого вращения электропривода.

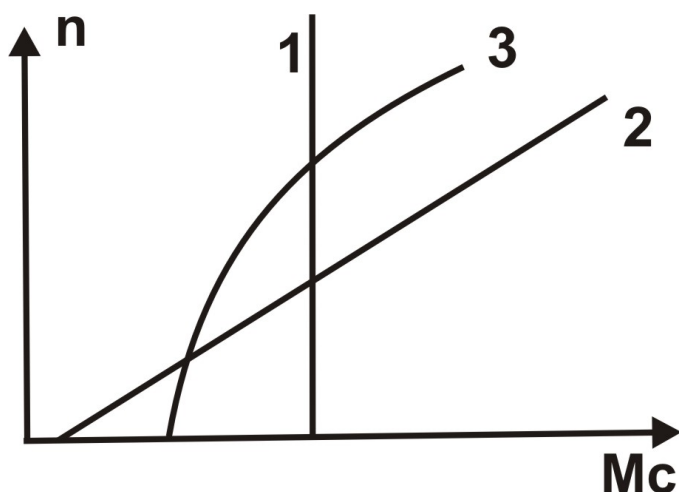
Основные типы МХ ЭД



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

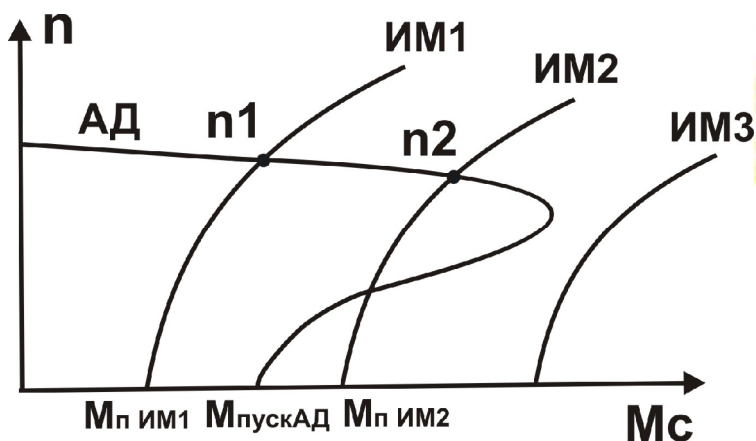
3. ЭД с мягкой МХ – n резко падает с ростом M_c – ДПТ с последовательным возбуждением.

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 ($M_{\text{пускАД}} > M_{\text{пИМ1}}$) и устойчивое вращение со скоростью n_1 ($M_{\text{АД}} = M_{\text{ИМ1}}$)

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

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

Асинхронные двигатели (АД).

Устройство и принцип действия АД.

Работа 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 (число обмоток / 3)

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (4.1)$$

(3 обм.) $p=1$ $n_1 = 3000$ об/мин

(6 обм.) $p=2$ $n_1 = 1500$ об/мин

.....
(18 обм.) $p=6$ $n_1 = 500$ об/мин

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 .

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (4.2)$$

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

$$E_{2S} = E_2 S \quad (4.3)$$

$$f_{2S} = f_2 S \quad (4.4)$$

$$X_{2S} = X_2 S \quad (4.5)$$

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

$$\vec{E}_{2S} = \vec{E}_2 S = \vec{I}_2 r_{m2} + \vec{I}_2 x_{2S} \quad (4.6)$$

Из (4.6) ток ротора I_2

$$I_2 = \frac{E_2 S}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 S)^2}} = \frac{E_2 S}{Z_2} \quad (4.7)$$

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

Момент вращения АД

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

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

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

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

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

$$M_{вр} = C'' \frac{U_1^2 r_2 S}{r_2^2 + (x_2 S)^2} \quad (4.8)$$

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

$$S_{кр} = r_2 / x_2$$

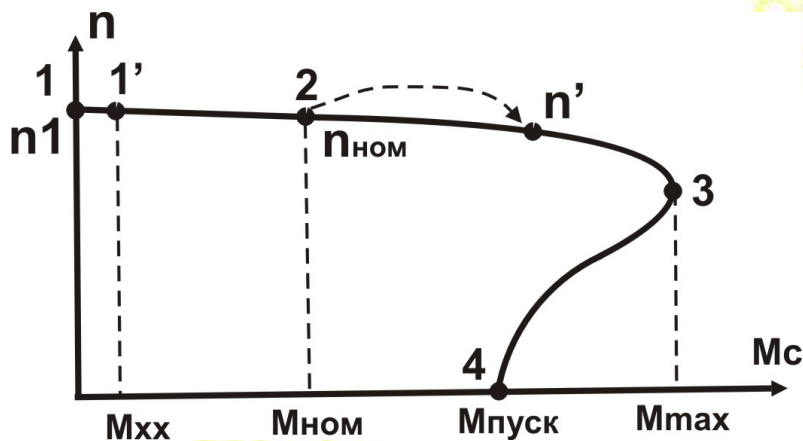
Подставив $S_{кр}$ в уравнение 4.8 получим

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

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 $n = n_{кр}; S = S_{кр} = 0,1-0,5; M_{вр} = M_{max}$

$M_{\max}/M_{\text{ном}} = 2 - 2,5$ – перегрузочная способность АД
 (.)4 – пусковой режим $n = 0$; $S = S_{\text{пуск}} = 1$; $M_{\text{вр}} = M_{\text{пуск}}$

$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 1,8 - 2$ – кратность пускового момента

Рабочий участок МХ 1 – 3. На этом участке при $\uparrow M_{\text{С им}} \text{ АД}$ сбрасывает обороты $n \Rightarrow (n_1 - n) \uparrow, \Rightarrow d\Phi/dt \uparrow, \Rightarrow E_2 \uparrow, \Rightarrow I_2 \uparrow, \Rightarrow M_{\text{вр}} \uparrow$ и (.) равновесия $M_{\text{вр АД}} = M_{\text{С им}}$ смещается по МХ в область с меньшей скоростью, но большим $M_{\text{вр}}$. При $M_{\text{С им}} > M_{\max}$ 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 $(n_1 - n) - \max, \Rightarrow d\Phi/dt - \max, \Rightarrow \text{ЭДС } E_2 - \max \Rightarrow$ токи ротора I_2 и статора $I_1 - \max$.

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

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

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 (4.7)
$$I_2 = \frac{E_2 S}{Z_2} = \frac{E_2 S}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 S)^2}}$$

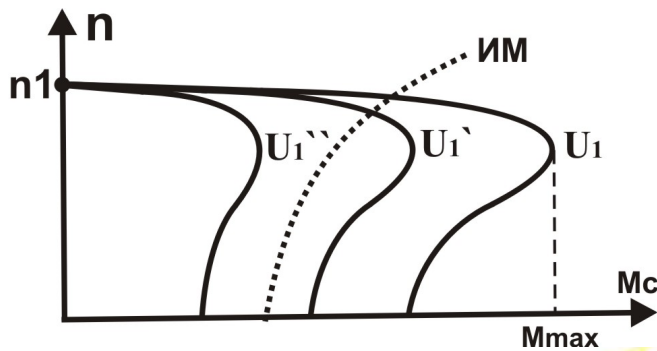
Есть два пути уменьшения I_2 ($\Rightarrow I_1$)

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

1. Способы, основанные на уменьшении напряжения питания статора U_1

!!! $M_{\text{вр}} \sim U_1^2$, \Rightarrow все методы, основанные на $\downarrow U_1$ в приводят к резкому уменьшению $M_{\text{вр}}$.

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 ($U_1 = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$), после разгона АД переключить обмотки на треугольник ($U_1 = U_{\text{л}}$). При пуске напряжение \downarrow в $\sqrt{3}$ раз, а $M_{\text{вр}} \downarrow$ в 3 раза.

2. Методы, основанные на \uparrow сопротивления ротора r_2

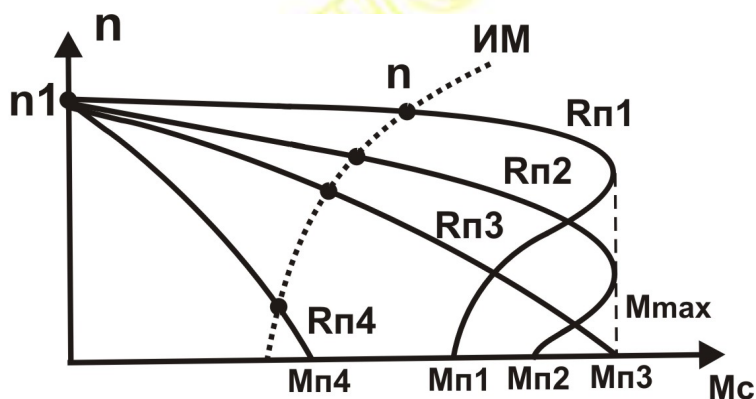
1. Короткозамкнутый ротор с улучшенными пусковыми характеристиками – имеет две клетки с разным сопротивлением. При пуске ток течет по клетке с большим сопротивлением, после разгона частота тока в роторе резко падает, и ток течет по клетке с малым сопротивлением.

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

– 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 $M_{\Pi 3} > M_{\Pi 2} > M_{\Pi 1}$ 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

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \Rightarrow \text{два пути:}$$

1. Изменение частоты сети f_1

+ 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

$p=1$	$n_1=3000$
$p=2$	$n_1=1500$ и т.д.

– нужен АД со сложным статором (с большим числом 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:

+ 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 $n_{\text{ном}} < 3000$ об/мин

Двигатели постоянного тока (ДПТ)

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_J подводится постоянный ток I_J .

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_J . Сила взаимодействия тока якоря I_J и МП Φ (сила Ампера) создает момент вращения.

Основные уравнения ДПТ.

$$M_{\text{ВР}} \sim F_A \sim I_J \Phi \Rightarrow M_{\text{ВР}} = C_M I_J \Phi \quad (4.9)$$

При вращении якоря в МП в нем индуцируется ЭДС индукции E_J

$$E_J \sim d\Phi/dt \sim \Phi \text{ и } n \Rightarrow E_J = C_E \Phi n \quad (4.10)$$

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

$$I_J = \frac{U_J - E_J}{r_J} \quad \text{уравнение цепи якоря} \quad (4.11)$$

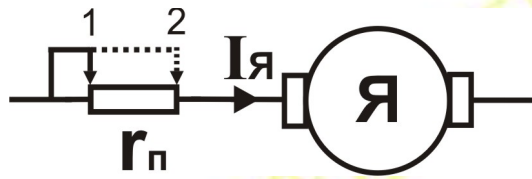
Пуск ДПТ

При пуске ДПТ якорь неподвижен $\Rightarrow n = 0 \Rightarrow E_J = C_E \Phi n = 0 \Rightarrow$

$$I_{J \text{ ПУСК}} = (U_J - E_J) / r_J = U_J / r_J \gg I_{J \text{ НОМ}} \quad (\text{в } 10 - 20 \text{ раз})$$

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



Регулирование скорости ДПТ

Из (4.10) $E_{\text{я}} = C_E \Phi n$

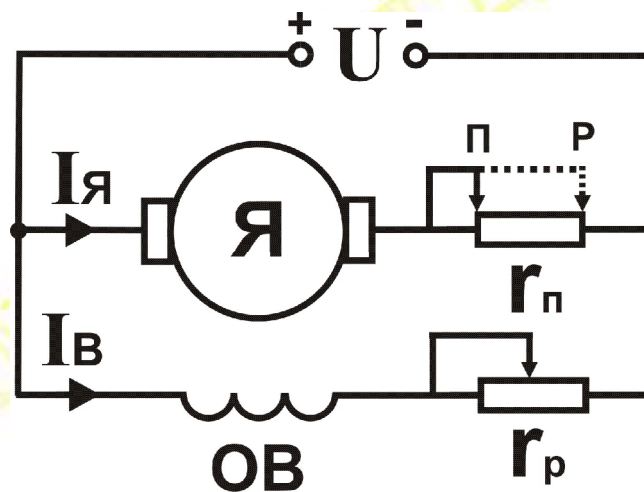
Из (4.11) $E_{\text{я}} = U_{\text{я}} - I_{\text{я}} r_{\text{я}}$

$$\Rightarrow n = \frac{E_{\text{я}}}{C_E \Phi} = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_E \Phi} \quad (4.12)$$

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. 4.12). 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 $\Rightarrow I_{\text{в}}$ и Φ не зависят от $I_{\text{я}}$, т.е. от нагрузки ДПТ.

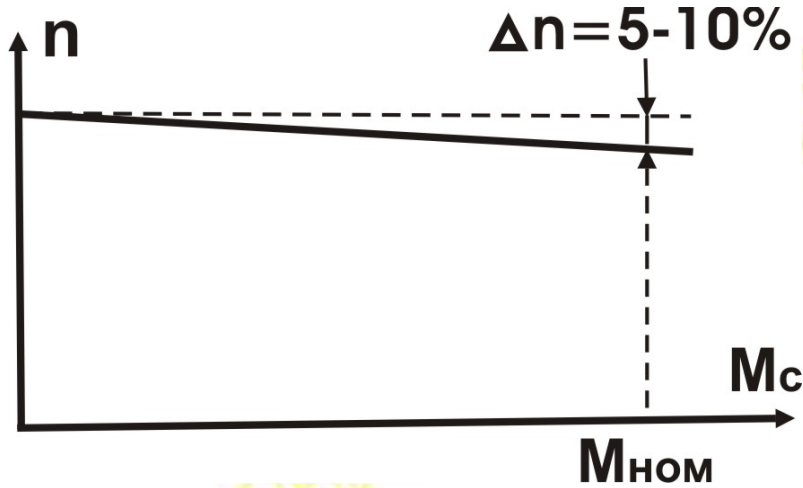
$\Phi = \text{const}$; $M_{\text{вр}} = C_M \Phi I_{\text{я}} = k I_{\text{я}}$ – линейно зависит от тока якоря

$\Rightarrow I_{\text{я}} = k' M_{\text{вр}} = k' M_{\text{сопр}}$ (в установившемся режиме $M_{\text{вр}} = M_{\text{сопр}}$)

Подставляя $I_{\text{я}}$ в (4.12), получим

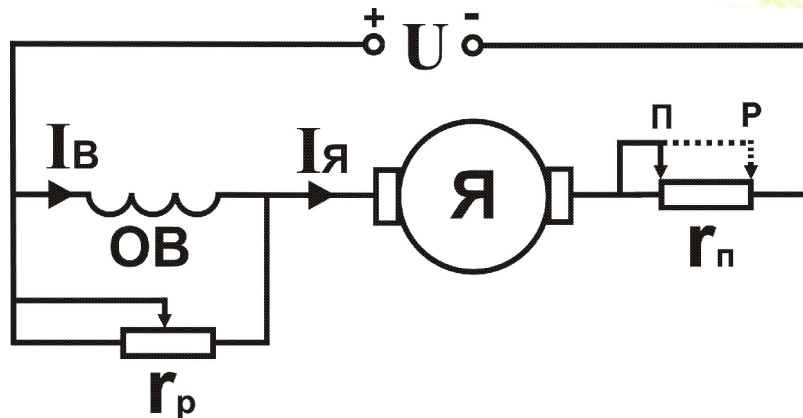
$$n = n_0 - \Delta n (M_{\text{сопр}}) \quad (4.13)$$

т.е. механическая характеристика линейная и жесткая.



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

ДПТ с последовательным возбуждением



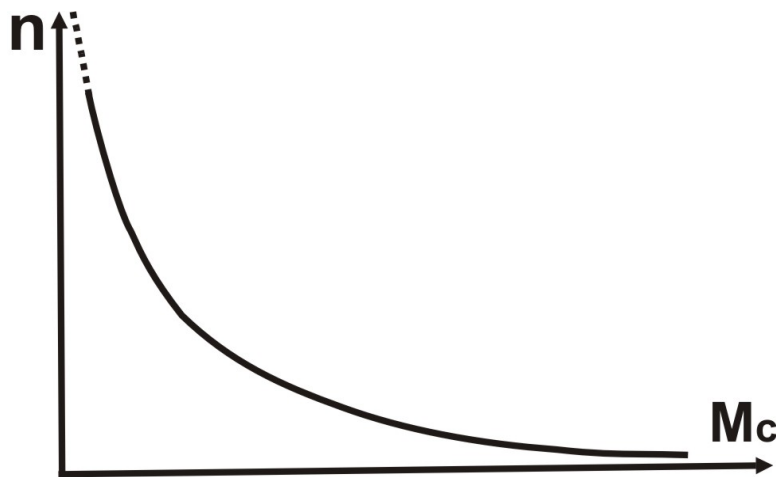
Якорь и ОВ подключены к источнику питания последовательно $\Rightarrow I_{\text{в}}$ и МП Φ зависят от $I_{\text{я}}$, т.е. от нагрузки ДПТ.

$I_{\text{в}} \sim I_{\text{я}} \Rightarrow \Phi \sim I_{\text{я}} \Rightarrow M_{\text{вр}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}} = k' I_{\text{я}}^2$ – квадратичная зависимость от тока якоря $\Rightarrow I_{\text{я}} = k' \sqrt{M_{\text{вр}}} = k' \sqrt{M_{\text{сопр}}}$ (в установившемся режиме $M_{\text{вр}} = M_{\text{сопр}}$)

Подставляя $I_{\text{я}}$ в (4.12), получим

$$n = \frac{n'}{\sqrt{M_{\text{сопр}}}} - n'' \quad (4.14)$$

т.е. механическая характеристика нелинейная и мягкая.



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

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

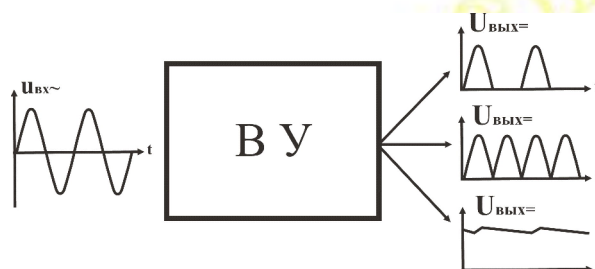
Классификация ДПТ по способу возбуждения.

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_B и Φ не зависят от I_a – МХ жесткая и линейная.
3. ДПТ с последовательным возбуждением – якорь и ОВ подключены последовательно к одному источнику – I_B и Φ сильно зависят от I_a – 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.

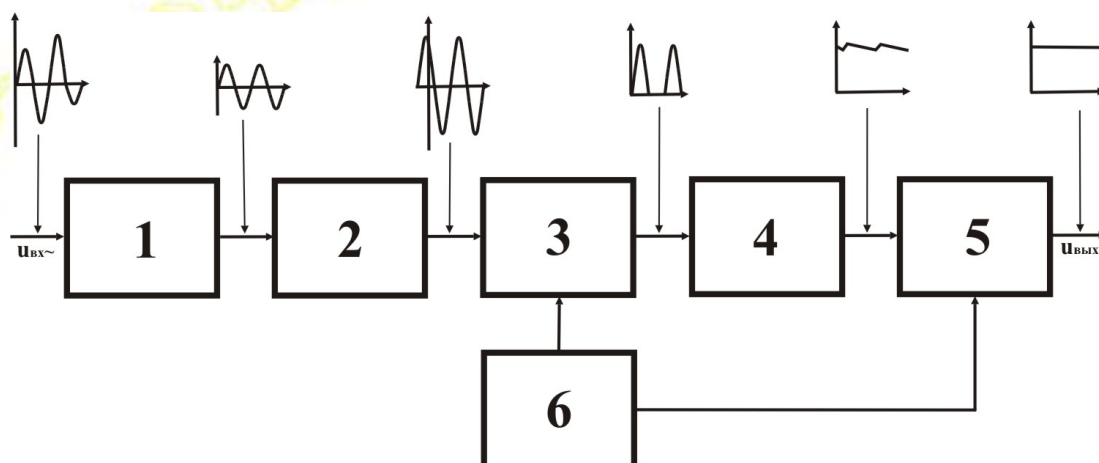
ЧАСТЬ 2 ЭЛЕКТРОНИКА

Тема 5 Выпрямительные устройства (ВУ)

Назначение ВУ – преобразование знакопеременного тока в знакпостоянный, т.е. для выпрямления переменного тока и напряжения.



Структурная схема ВУ



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

2 – Трансформатор – изменяет (увеличивает или уменьшает) переменное напряжение. Связь между обмотками трансформатора только через магнитное поле \Rightarrow 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 знакпостоянный.

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 пробую вентиля.

$U_{обр\ max}$ – допустимое обратное напряжение, превышение которого приводит к электрическому пробую 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.

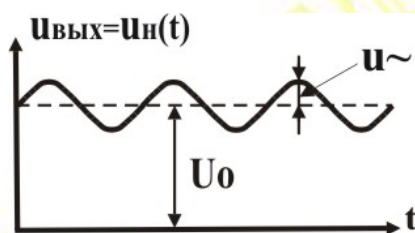
В реальных ВУ ряд блоков может отсутствовать, но вентиль есть всегда – вентиль – основной блок ВУ.

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}



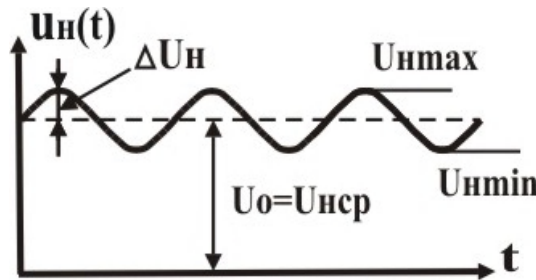
2. Среднее значение выпрямленного напряжения

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

$$U_{нсп} = U_0$$

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).



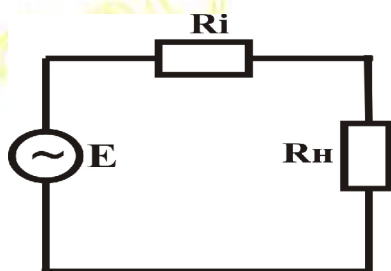
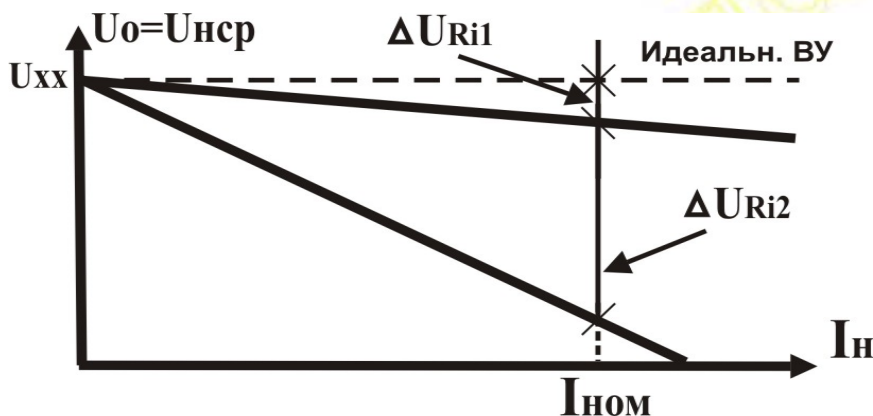
$$K_{\Pi} = \frac{\Delta U_{\text{H}}}{U_{\text{HCP}}}$$

$$\Delta U_{\text{H}} = \frac{U_{\text{Hmax}} - U_{\text{Hmin}}}{2}$$

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

Внешняя характеристика ВУ $U_0 = U_{\text{нсп}} = f(I_{\text{H}})$

– это зависимость постоянной составляющей выходного напряжения U_0 от тока в нагрузке I_{H} . При подключении нагрузки R_{H} напряжение на выходе ВУ будет отличаться от его ЭДС ($E = U_{\text{ХХ}}$) на величину падения напряжения на его внутреннем сопротивлении R_{i} .



$$U_0 = U_{\text{нсп}} = U_{\text{ХХ}} - I_{\text{H}} R_{\text{i}} = U_{\text{ХХ}} - \Delta U_{R_{\text{i}}}$$

$$\Delta U_{R_{\text{i}1}} = I_{\text{НОМ}} R_{\text{i}1}$$

$$\Delta U_{R_{\text{i}2}} = I_{\text{НОМ}} R_{\text{i}2}$$

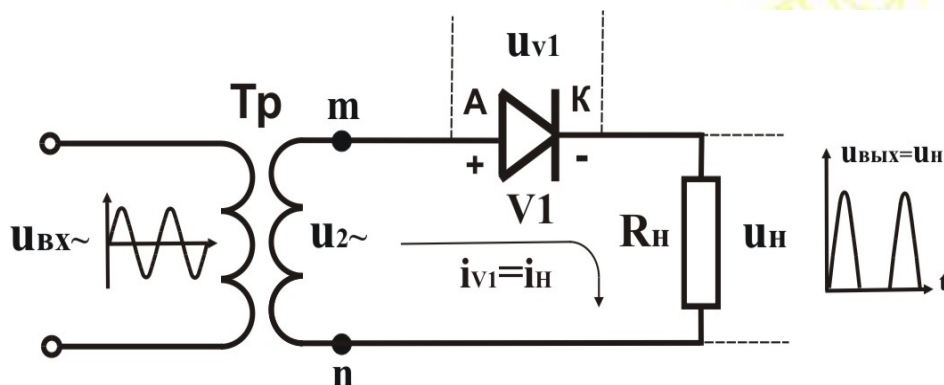
$$R_{\text{i}1} < R_{\text{i}2}$$

$$\Delta U_{R_{\text{i}1}} < \Delta U_{R_{\text{i}2}}$$

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

С ростом тока нагрузки I_H 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



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

Будем считать, что Тр и вентиль V1 – идеальны: $R_{Tr} = 0$; $R_{пр} = 0$, $R_{обр} = \infty$

1-й полупериод

в (.) m “+” => + на A V1 => $\varphi_A > \varphi_K$ => V1 – открыт ($R_{v1}' = R_{пр} = 0$) => течет ток по цепи m \rightarrow V1 \rightarrow R_H \rightarrow n \rightarrow m
 Величина тока $i_H' = i_{V1}' = u_{2\sim}' / (R_{v1}' + R_H) = u_{2\sim}' / R_H$ ($R_{v1}' = R_{пр} = 0$)
 Напряжение на нагрузке $U_H' = i_H' R_H = u_{2\sim}'$

2-й полупериод

в (.) m “-” => - на A V1 => $\varphi_A < \varphi_K$ => V1 – закрыт ($R_{v1}'' = R_{обр} = \infty$) => ток в цепи и напряжение на нагрузке равны 0.
 $i_H'' = i_{V1}'' = 0$; $u_H'' = 0$
 В 1п/пер ВУ ток и напряжение на нагрузке существует только половину периода (когда вентиль открыт).

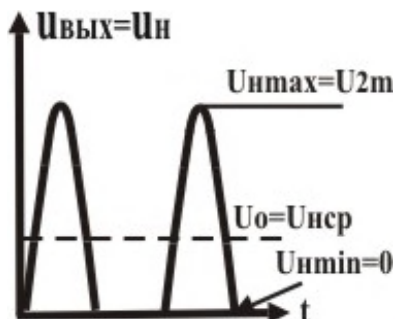
Обратное напряжение на закрытом вентиле – из II закона Кирхгофа $u_{2\sim} = u_{V1}'' + u_H''$ ($u_H'' = 0$) => $u_{V1}'' = u_{2\sim}$ – напряжение на закрытом вентиле равно выпрямляемому напряжению, а его максимальное значение $U_{обр\ макс} = U_2 m$ – амплитуде выпрямляемого напряжения (в $\sqrt{2}$ раз больше его действующего значения).

Основные параметры схемы:

1. Постоянная составляющая выходного напряжения

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

2. Коэффициент пульсации Кп



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

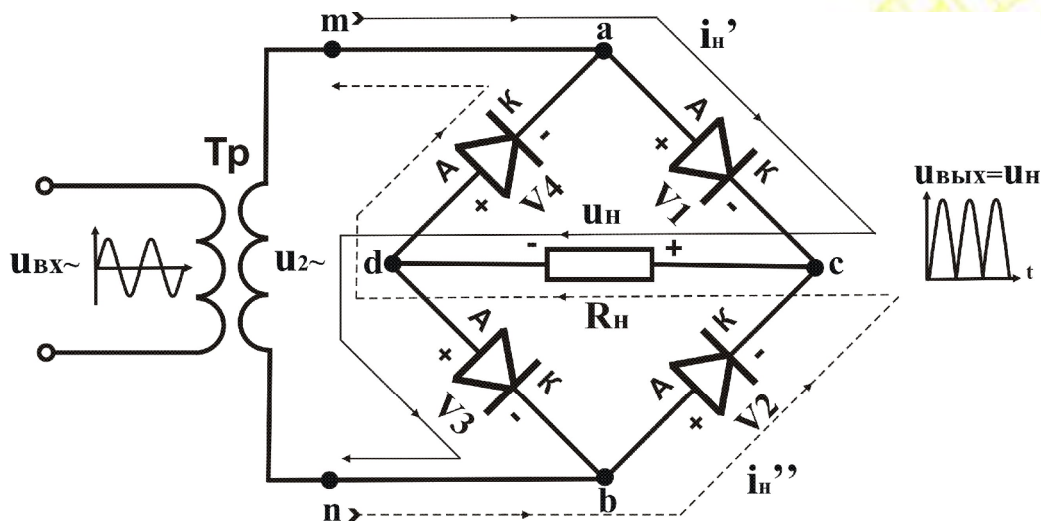
$$K_{\text{п}} = \Delta U_{\text{H}} / U_{\text{ср}} = (U_{2m}/2) / (\pi/U_{2m}) = \pi / 2 = 1.57$$

– переменная составляющая выходного напряжения больше постоянной.

Достоинства и недостатки:

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

Двухполупериодная мостовая схема ВУ



Работа схемы:

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

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

Течет ток по цепи

m – a – V1 – c – Rн – 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 => - на анодах V1 и V3 => V1 и V3 - закрыты ($R_{обр} = \infty$)

«+» в (.) n => + на анодах V2 и V4 => 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 => $u_{V1}' = 0$ => $u_{V2}' = u_{2\sim}$ - 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. $U_0 = U_{нсп} = 2(U_{2m} / \pi)$ - в два раза больше чем в однополупериодной - ток и напряжение на нагрузке существуют оба полупериода
2. Коэффициент пульсации $K_{п} = \frac{1}{2} (\pi / 2) = (\pi / 4)$ - 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.



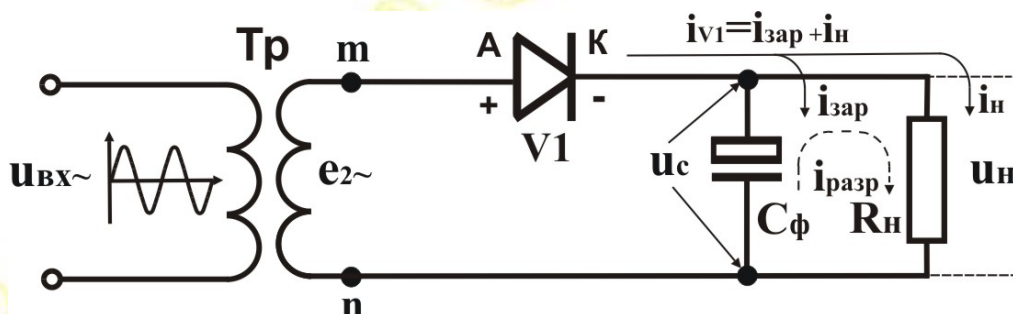
Коэффициент фильтрации $K_f = (K_{pвх} / K_{pвых})$ – показывает, во сколько раз фильтр уменьшает K_p .

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

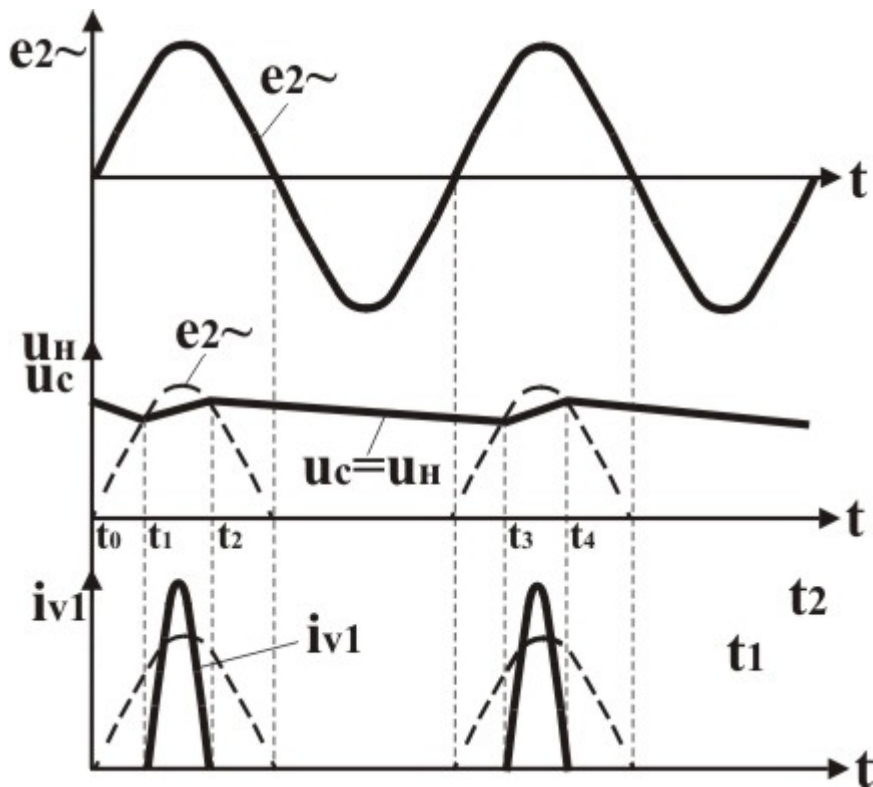
Элемент	Сопротивление элемента	
	Пост. ток $f=0$	Перем. ток $f=f_{\text{сети}}$ (или $2f_{\text{сети}}$)
R	R	R
$X_L = 2\pi fL$	0	X_L
$X_C = 1 / 2\pi fC$	∞	X_C

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 V_1 , 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 А V1 < «+» на К V1 ($\varphi_A < \varphi_K$) \Rightarrow вентиль V1 закрыт и конденсатор Сф продолжает разряжаться, $\Rightarrow u_C \downarrow$

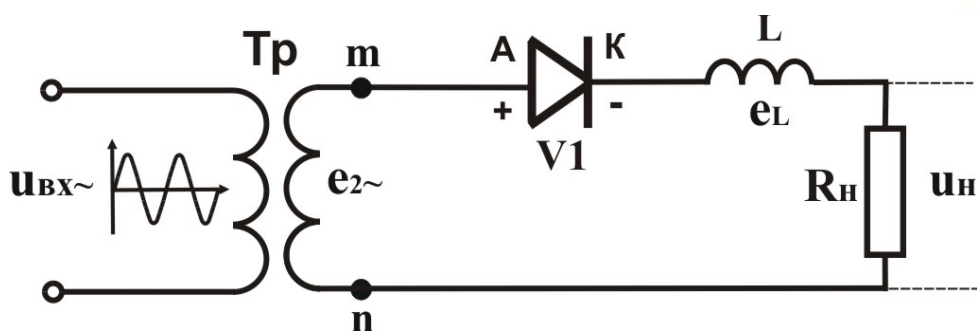
Интервал $t_1 - t_2$ в (.) м «+», и $e_{2\sim} > u_C \Rightarrow$ «+» на А V1 > «+» на К V1 \Rightarrow ($\varphi_A > \varphi_K$) вентиль V1 открыт, через него течет ток $i_V = i_{3AP} + i_H$
 i_H создает напряжение на нагрузке
 i_{3AP} заряжает конденсатор Сф, напряжение на нем растет ($u_H = u_C \uparrow$)

Интервал $t_2 - t_3$ $e_{2\sim} < u_C \Rightarrow$ вентиль V1 закрыт и конденсатор Сф разряжается через нагрузку создавая на R_H падение напряжения $u_H = i_{PA3}R_H$, напряжение на Сф \downarrow ($u_H = u_C \downarrow$)

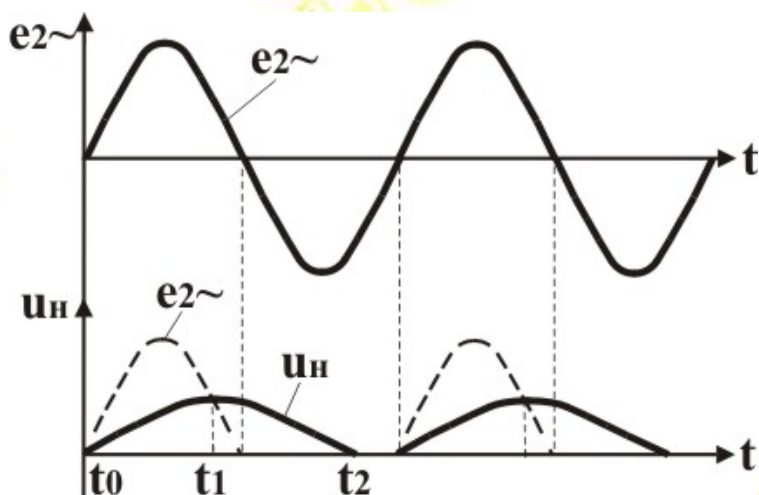
Дальше процесс повторяется.

Скорость заряда конденсатора определяется его емкостью Сф и сопротивлением цепи заряда ($R_{тр}, R_{v1}$), а скорость разряда – емкостью Сф 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 \uparrow тока (интервал $t_0 - t_1$) ЭДС самоиндукции e_L направлена навстречу $e_{2\sim}$ и $u_H = e_{2\sim} - e_L < e_{2\sim}$

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

Амплитуда импульса напряжения на нагрузке u_H уменьшается, длительность импульса увеличивается $\Rightarrow K_{П} \downarrow$

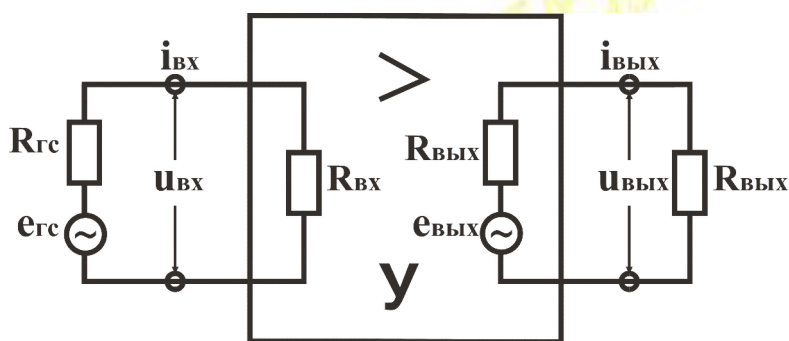
Индуктивные фильтры обычно используются при больших токах нагрузки, т.е. в силовых ВУ.

Тема 6 Усилители (У)

Назначение – 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

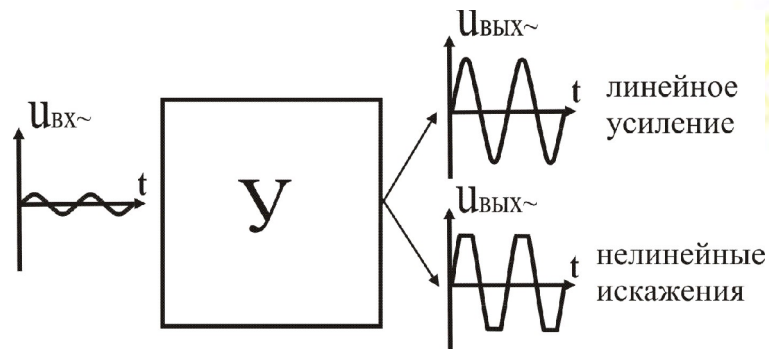
$$u_{ВЫХ} = i_{ВЫХ} R_{Н} = \frac{e_{ВЫХ}}{R_{ВЫХ} + R_{Н}} R_{Н}$$

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.

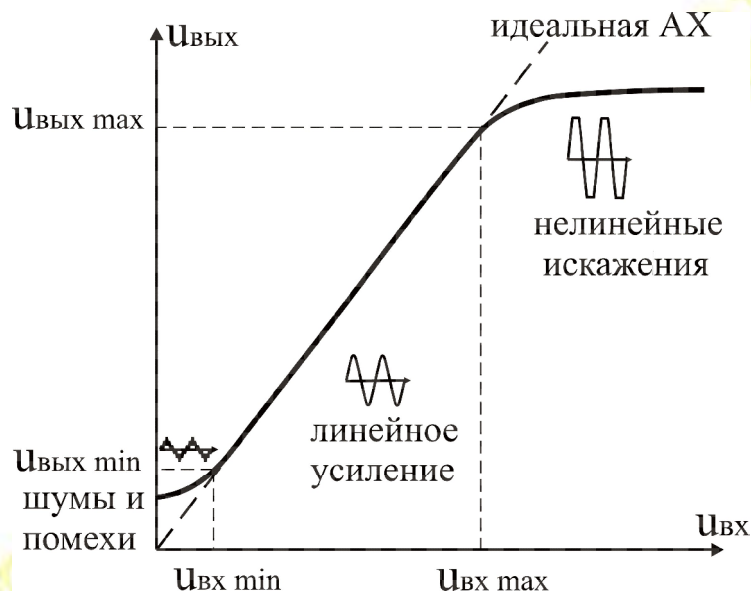


$$K_{НИ} = K_{Г} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + P_4 \dots}{P_1}} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 \dots}{U_1^2}}$$

5. Динамический диапазон D (см. АХ).
6. Полоса пропускания – Δf (см. АЧХ).

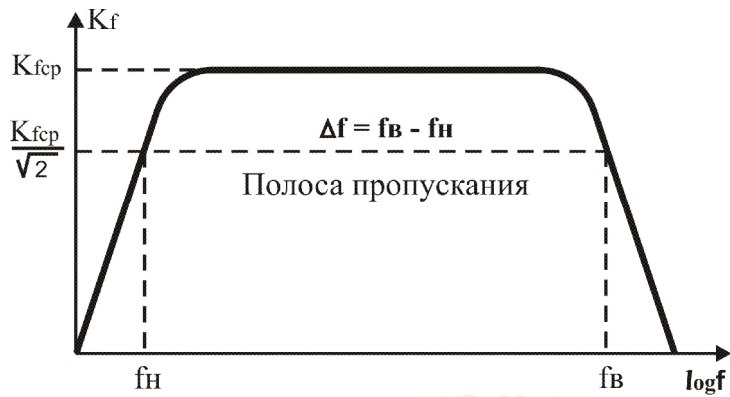
Характеристики:

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 (БПТ)

Биполярные – т.к. используются полупроводники (п/п) двух типов:

n-типа – с электронной проводимостью \ominus

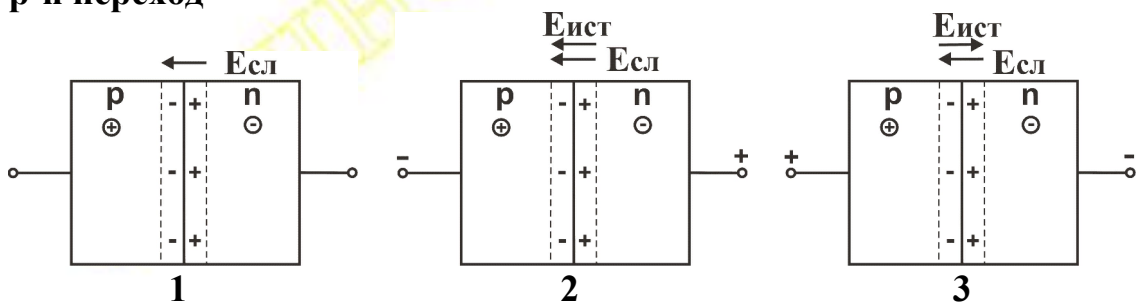
p-типа – с дырочной проводимостью \oplus

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



Э – эмиттер Б – база К – коллектор

p-n переход

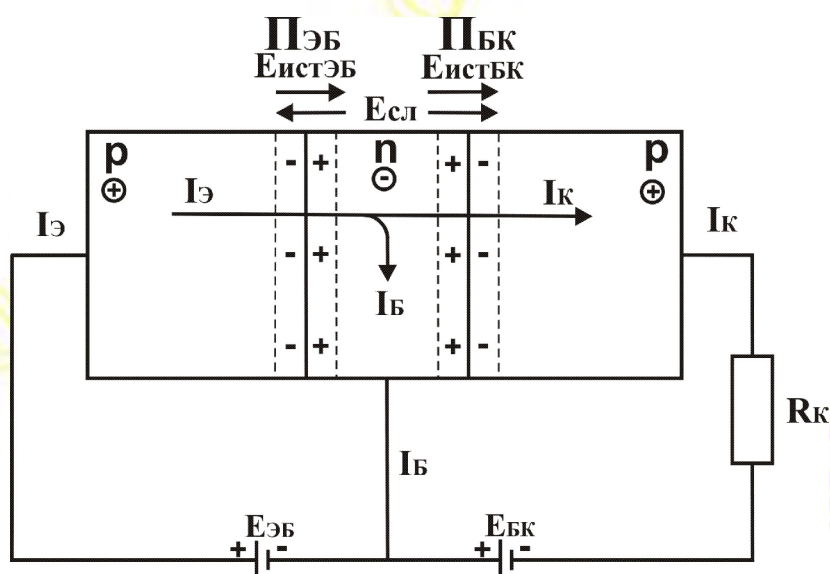


1. Из-за диффузии и рекомбинации электронов и дырок на p-n переходе возникает двойной электрический слой, т.е. –

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)



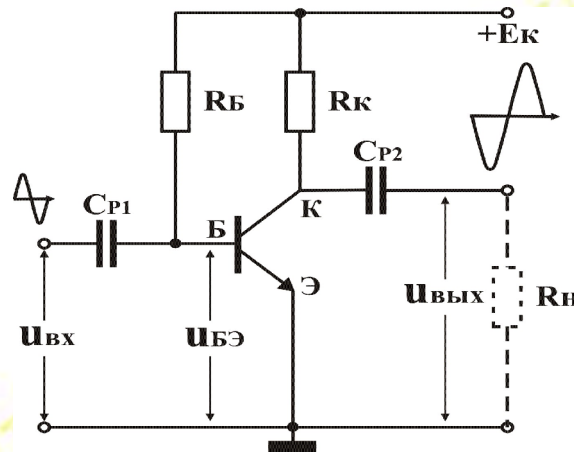
Без внешних источников – оба перехода закрыты за счет $E_{СЛ}$.
 На переходе база – коллектор ($ПБК$) $E_{ПБК} = E_{СЛ} + E_{ИСТ БК} \Rightarrow ПБК$ – еще больше закрыт для основных носителей (\oplus в К и \ominus в Б).
 На переходе эмиттер – база ($ПЭБ$) $E_{ПЭБ} = E_{СЛ} - E_{ИСТ ЭБ}$ т.е. $ПБК$ – приоткрыт, часть дырок, энергия которых больше барьера, может пройти через $ПЭБ$ 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 $ПБК$ 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 $ПЭБ$ подать переменный сигнал $u_{вх}$, 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 цепи коллектора включить резистор $R_{К}$, то изменяющийся $I_{К}$ создаст на нем переменное падение

напряжения, т.е. переменный выходной сигнал $u_{\text{ВЫХ}} \sim$. При достаточно большом R_K , $u_{\text{ВЫХ}} > u_{\text{ВХ}} \sim$, – 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.

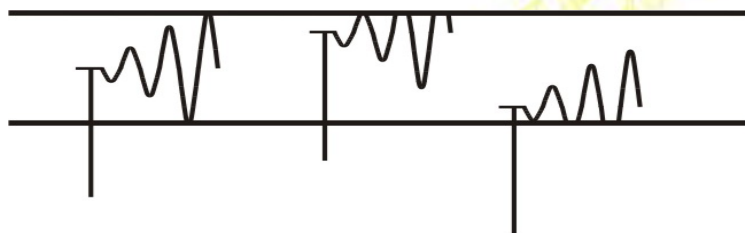


Назначение элементов схемы:

E_K – 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 ПЭБ от E_K подается постоянное напряжение $U_{BЭ0}$, которое приоткрывает переход. Изменяя R_B можно изменить $U_{BЭ0}$, т.е. режим покоя БПТ. Обычно переход полуоткрыт, в этом случае можно получить без искажений максимальный выходной сигнал.



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 ПЭБ (чтобы не изменялся режим покоя БПТ), а C_{P2} – с коллектора БПТ в нагрузку.

Работа схемы:

Без сигнала $U_{BЭ0}$ приоткрывает управляющий переход ПЭБ и текут токи покоя $I_{Э0}$ и $I_{K0} \cong I_{Э0}$.

Если есть входной сигнал, то $u_{\text{ВХ}}$ складывается с $U_{BЭ0}$, $\Rightarrow U_{BЭ} = U_{BЭ0} + u_{\text{ВХ}}$ – 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. $u_{\text{ВЫХ}} = U_K = E_K - I_K R_K$. Переменная составляющая через C_{P2} подается в нагрузку.

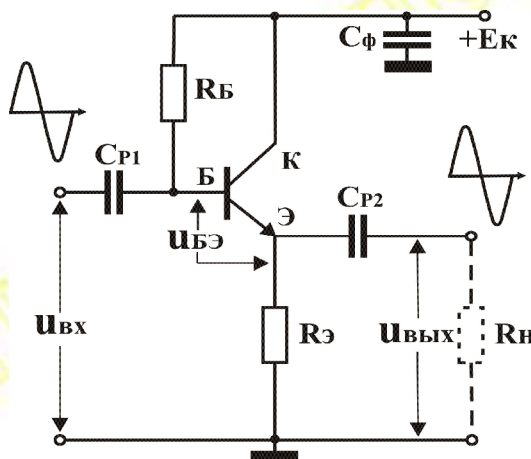
Если $u_{вх} \uparrow$ то $\Pi_{эб}$ приоткрывается $\Rightarrow \uparrow I_{э}, I_{б}$ и $I_{к} \cong I_{э} \Rightarrow u_{Rк} = I_{к}R_{к} \uparrow \Rightarrow U_{к} = u_{ввых} = (E_{к} - u_{Rк}) \downarrow$ – т.е. при $\uparrow u_{вх}, u_{ввых} \downarrow \Rightarrow$ в схеме с ОЭ выходной сигнал в противофазе с входным, т.е. ОЭ переворачивает фазу усиливаемого сигнала на 180° .

Основные параметры:

+ $K_U \gg 1; K_I \gg 1; K_P \gg 1$

– сравнительно малое $R_{вх}$ и большое $R_{ввых}$

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 $u_{ввых}$

$E_{к}, R_{б}, C_{P1}$ 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

- $u_{ввых}$ создается на $R_{э}$, а не на $R_{к}$, как в ОЭ.
- При $\uparrow u_{вх}$, $\Pi_{эб}$ приоткрывается $\Rightarrow I_{э}, I_{б}$ и $I_{к} \cong I_{э} \uparrow \Rightarrow u_{э} = I_{э}R_{э} \uparrow \Rightarrow u_{ввых} = u_{э} \uparrow$ – т.е. при $\uparrow u_{вх}$ $u_{ввых}$ тоже $\uparrow \Rightarrow$ в схеме с ОЭ $u_{ввых}$ совпадает по фазе с $u_{вх}$ и почти равно ему по величине – отсюда второе название – эмиттерный повторитель.

$$u_{ввых} = u_{вх} - u_{бэ} \quad u_{бэ} \ll u_{вх} \Rightarrow u_{ввых} \cong u_{вх}$$

Основные параметры:

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

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

++ большое $R_{вх}$ ($R_{вх ок} > R_{вх оэ}$) и малое $R_{ввых}$ ($R_{ввых ок} < R_{ввых оэ}$) – поэтому часто используется в качестве первого или последнего каскада в многокаскадных усилителях, если нужно обеспечить большое $R_{вх}$ или малое $R_{ввых}$.

Тема 7 Многокаскадные усилители (МКУ)

Назначение – для получения больших коэффициентов усиления несколько усилителей включаются последовательно.

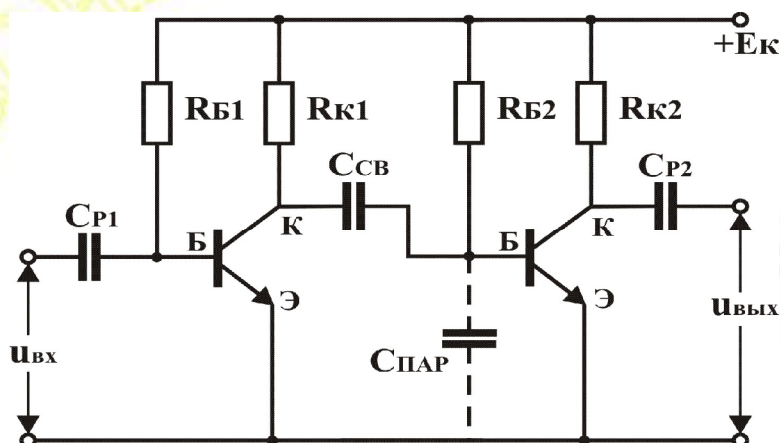
Сигнал от одного усилителя к другому передается через четырехполюсник связи (ЧПСв).

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).

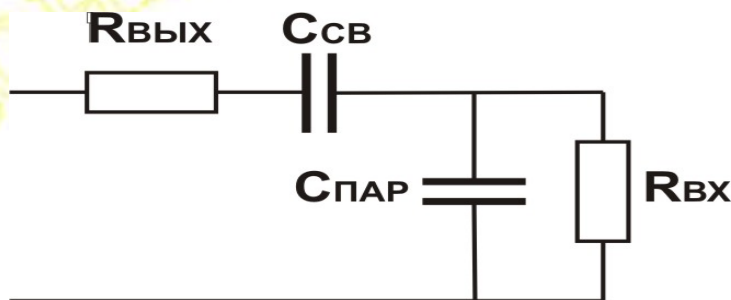
Усилители с RC связью



Назначение элементов и принцип действия – см. ОЭ.

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

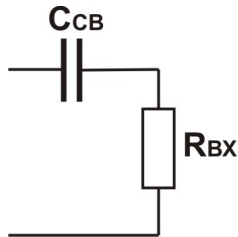
Эквивалентная схема RC-связи



Область Н.Ч.

$$X_{C_{CB}} \gg R_{ВЫХ}$$

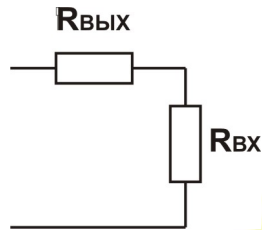
$$X_{C_{ПАР}} \gg R_{ВХ}$$



Область Ср.Ч.

$$X_{C_{CB}} \ll R_{ВЫХ}$$

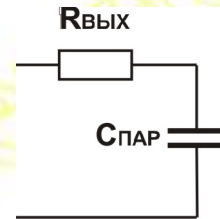
$$X_{C_{ПАР}} \gg R_{ВХ}$$



Область В.Ч.

$$X_{C_{CB}} \ll R_{ВЫХ}$$

$$X_{C_{ПАР}} \ll R_{ВХ}$$



Особенности АЧХ:



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

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

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

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

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

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

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

Достоинства и недостатки:

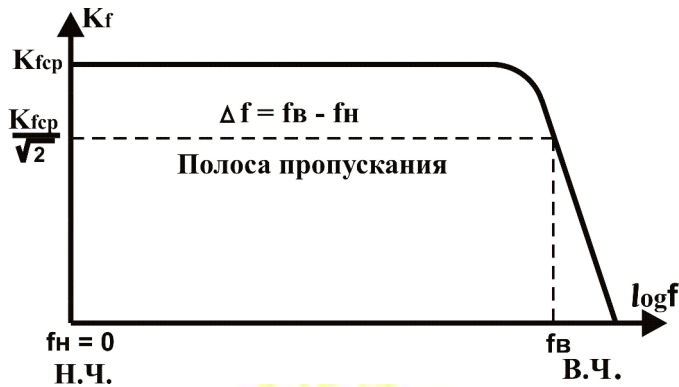
- + малые габариты, вес, стоимость
- + полное разделение каскадов по постоянному току
- завал АЧХ на Н.Ч. – нельзя усиливать низкочастотные сигналы.

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

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

Особенности УГС:

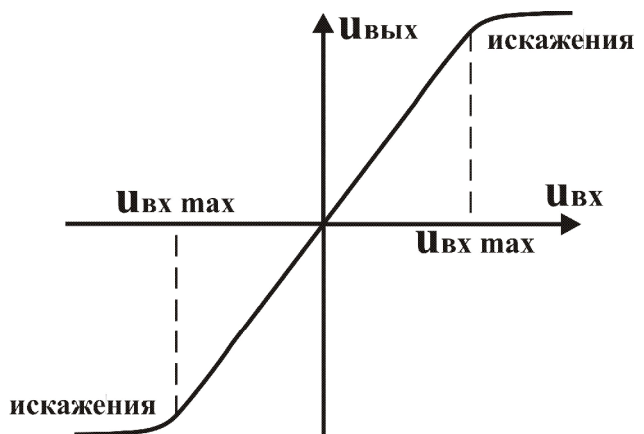
1. Нет завала АЧХ на Н.Ч.



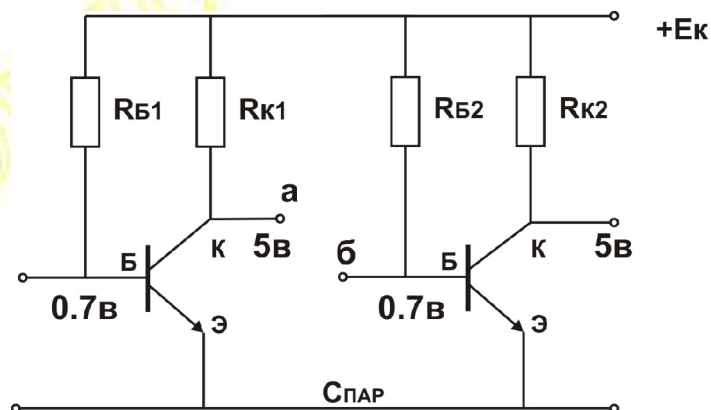
Завал на В.Ч. – как у усилителя с RC-связью

2. УГС

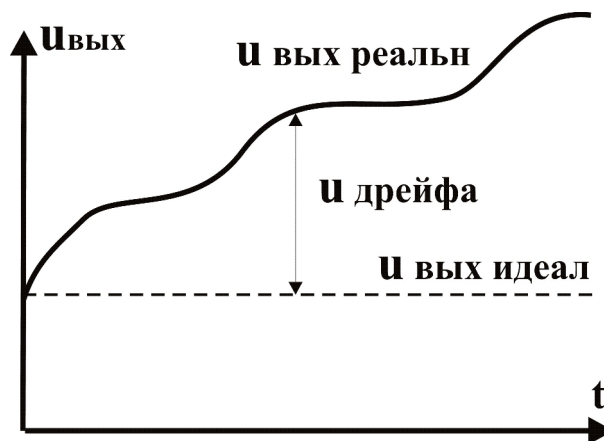
$U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ может быть > 0 и < 0
т.е. АХ имеет две ветви



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 $U_{\text{ВЫХ}} = U_K = E_K - I_K R_K$ при постоянном $U_{\text{ВХ}}$.

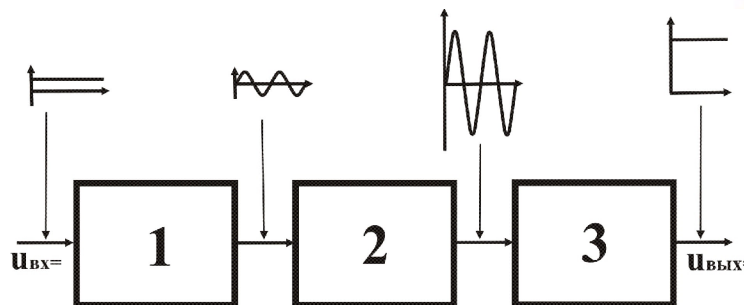


Причины дрейфа:

1. Изменение E_K
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

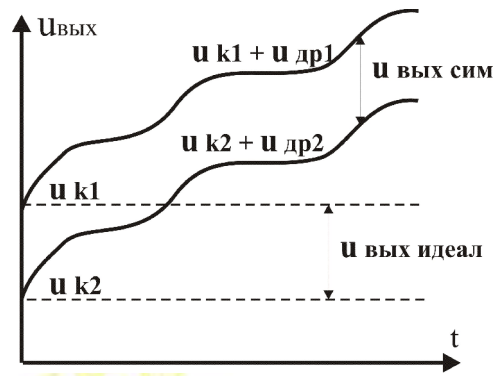
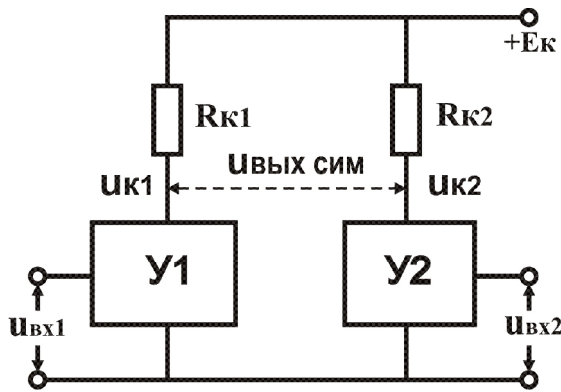


1. Модулятор – преобразует постоянный сигнал в переменный
2. Усилитель переменного сигнала (с RC-связью)
3. Демодулятор – преобразует усиленный переменный сигнал в постоянный

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 $U_{\text{ВЫХ}}$ снимается **между** выходами этих усилителей



$$u_{\text{вых сим}} = u_{k1} + u_{\text{др1}} - (u_{k2} + u_{\text{др2}}) = (u_{k1} - u_{k2}) + (u_{\text{др1}} - u_{\text{др2}}) \cong u_{\text{вых ид.}}$$

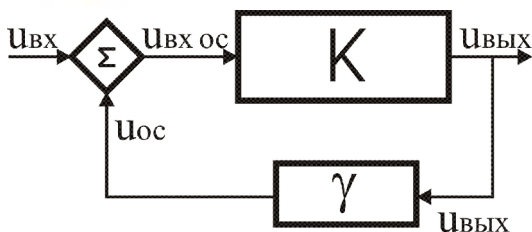
Если усилители одинаковые, то дрейф тоже практически одинаков и почти полностью компенсируется $(u_{\text{др1}} - u_{\text{др2}}) \approx 0$.

Достоинства и недостатки УГС

- + 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.



$$u_{\text{вх ос}} = u_{\text{вх}} \pm u_{\text{ос}}$$

$$u_{\text{ос}} = \gamma u_{\text{вых}}$$

γ – коэффициент передачи ЧП обратной связи

Положительная обратная связь (ПОС, +ОС) – сигнал ОС совпадает по фазе с входным, т.е. складывается с ним

$$u_{\text{вх ос}} = u_{\text{вх}} + u_{\text{ос}} \Rightarrow u_{\text{вх}} \uparrow \Rightarrow u_{\text{вых}} \uparrow \Rightarrow K_U \uparrow \Rightarrow \text{ПОС увеличивает усиление.}$$

Отрицательная обратная связь (ООС, –ОС) – сигнал ОС в противофазе с входным, т.е. вычитается из него

$$u_{\text{вх ос}} = u_{\text{вх}} - u_{\text{ос}} < u_{\text{вх}} \Rightarrow u_{\text{вых}} \downarrow \Rightarrow K_U \downarrow \Rightarrow \text{ООС уменьшает усиление.}$$

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

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

K – коэффициент усиления усилителя без ОС

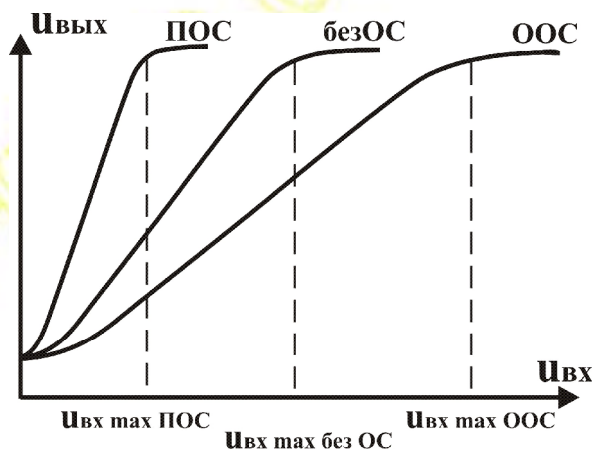
γ – коэффициент передачи ЧПос $u_{\text{ос}} = \gamma u_{\text{вых}}$

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

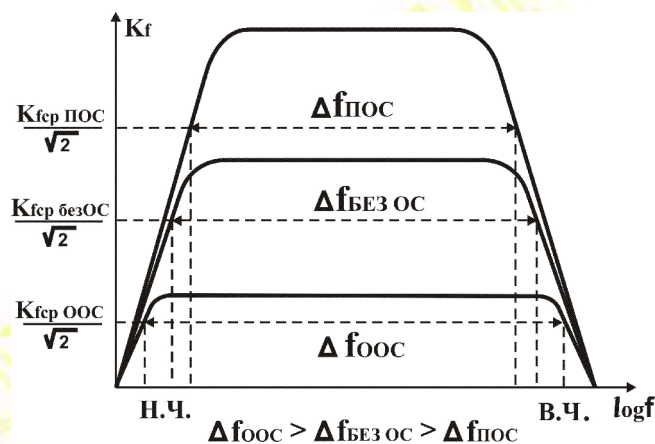
ООС уменьшает усиление, но улучшает все остальные параметры усилителя (ПОС – наоборот):

- ⊖ $K_{\text{ООС}} < K$ – 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 $u_{\text{вх оос}} = u_{\text{вх}} - u_{\text{оос}}$ – ↓ поэтому Н.И. начинаются при больших $u_{\text{вх}}$.

- 5. ООС расширяет полосу пропускания Δf



ООС увеличивает $R_{\text{ВХ}}$ и уменьшает $R_{\text{ВЫХ}}$, поэтому влияние последовательных $C_{\text{СВ}}$ проявится на более низкой частоте $f_{\text{Н ООС}} < f_{\text{Н}}$, а параллельных $C_{\text{ПАР}}$ – на более высокой $f_{\text{В ООС}} > f_{\text{В}}$ (см. усилитель с RC-связью).

Варианты контрольных работ и методические рекомендации по их выполнению

Задача № 1. Последовательное соединение элементов.

Задание для расчета:

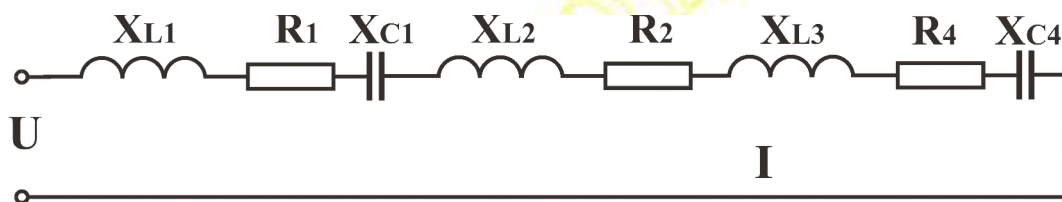
1. Нарисовать схему соединения для своего варианта задания.
2. Найти эквивалентное реактивное сопротивление цепи X_{Σ} .
3. Найти эквивалентное активное сопротивление цепи R_{Σ} .
4. Найти полное сопротивление цепи Z .
5. Найти приложенное напряжение U .
6. Найти падение напряжения на каждом элементе схемы.
7. Написать II закон Кирхгофа для своей схемы.
8. Построить векторную диаграмму (в масштабе).
9. Определить активную, реактивную и полную мощность всей цепи.
10. Написать условие резонанса для исследуемой цепи (соотношение между реактивными сопротивлениями).
11. Качественно построить векторную диаграмму при резонансе (изменив соответствующим образом длину векторов реактивных напряжений).

Пример расчета:

Исходные данные:

№ вар.	I А	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	10	3	2	6	2	4	нет	3	нет	нет	нет	2	8

Схема соединения в соответствии с исходными данными



2. Эквивалентное реактивное сопротивление цепи

$$X_{\Sigma} = \sum X_L - \sum X_C = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} - X_{C1} - X_{C4} = 3 + 2 + 3 - 6 - 8 = -6 \text{ Ом}$$

3. Эквивалентное активное сопротивление цепи

$$R_{\Sigma} = \sum R = R_1 + R_2 + R_4 = 2 + 4 + 2 = 8 \text{ Ом}$$

4. Полное сопротивление $Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} = \sqrt{8^2 + (-6)^2} = 10 \text{ Ом}$

5. Приложенное напряжение $U = I Z = 100 \text{ В}$

6. Падение напряжения на отдельных элементах схемы

$$U_{X_{L1}} = I X_{L1} = 10 \cdot 3 = 30 \text{ В}$$

$$U_{R1} = I R_1 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ В}$$

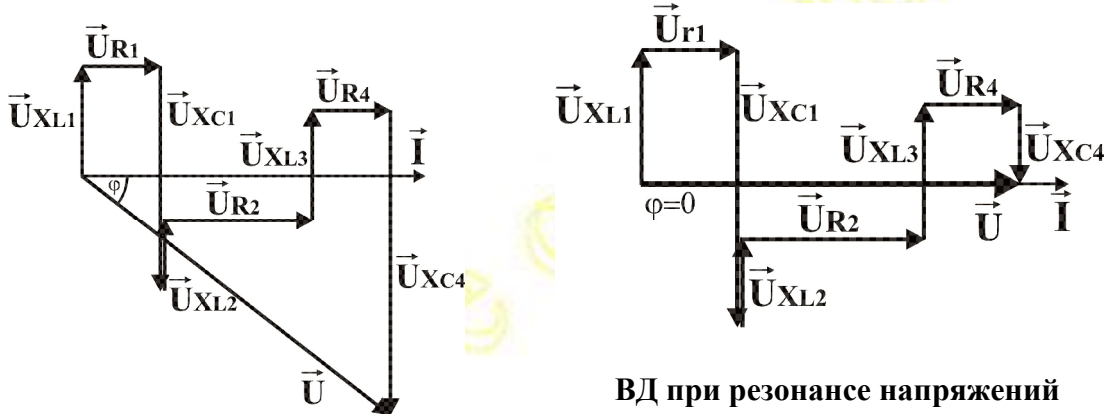
$$U_{C1} = I X_{C1} = 10 \cdot 6 = 60 \text{ В}$$

аналогично находим U_{XL2} , U_{R2} , U_{XL3} , U_{R4} , U_{XL4}

7. II закон Кирхгофа

$$\vec{U} = \vec{U}_{XL1} + \vec{U}_{R1} + \vec{U}_{C1} + \vec{U}_{XL2} + \vec{U}_{R2} + \vec{U}_{XL3} + \vec{U}_{R4} + \vec{U}_{XL4}$$

8. Векторная диаграмма



9. Активная мощность $P = UI \cos \varphi = I^2 R_{\Sigma} = 10^2 \cdot 8 = 800 \text{ Вт}$

Реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi = I^2 X_{\Sigma} = 10^2 \cdot (-6) = -600 \text{ ВАр}$

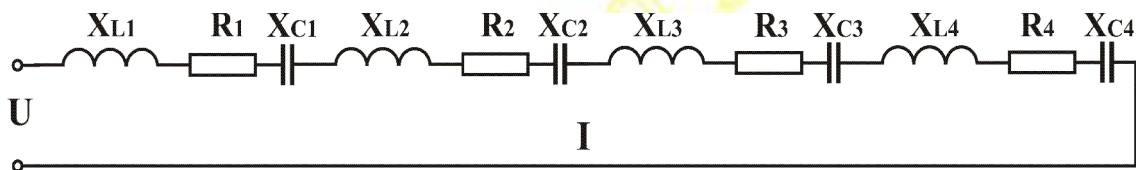
Полная мощность $S = UI = I^2 Z = 10^2 \cdot 10 = 1000 \text{ ВА}$

10. Условие резонанса напряжений: $X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} = X_{C1} + X_{C4}$

($\sum X_L = \sum X_C$; $\sum U_L = \sum U_C$)

11. Векторная диаграмма при резонансе (см. выше)

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



№ вар.	I А	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
1	10	4	3	нет	нет	2	10	4	нет	нет	8	3	нет
2	1	нет	1	10	нет	2	2	9	3	нет	нет	нет	5
3	10	нет	3	2	5	2	нет	нет	1	5	8	2	нет
4	1	нет	2	5	7	1	нет	нет	3	2	нет	нет	8
5	10	7	2	нет	4	4	нет	нет	2	10	5	нет	нет
6	1	5	3	нет	нет	2	2	4	нет	5	нет	3	8
7	10	6	4	нет	4	2	нет	нет	нет	4	2	нет	нет
8	1	8	1	нет	нет	2	2	нет	нет	9	нет	3	5
9	10	7	6	нет	нет	2	2	нет	нет	4	5	нет	нет

№ вар.	I А	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
10	1	нет	2	4	6	2	нет	нет	нет	8	нет	2	2
11	10	8	2	нет	нет	2	10	4	нет	нет	6	2	нет
12	1	нет	4	2	нет	2	4	10	2	нет	нет	нет	10
13	10	5	2	нет	нет	1	2	3	нет	4	6	3	нет
14	1	нет	2	10	8	1	нет	4	5	нет	нет	нет	8
15	10	4	2	нет	5	1	нет	нет	нет	10	7	5	нет
16	1	3	2	5	нет	2	нет	2	нет	нет	8	2	нет
17	10	нет	1	5	6	2	5	3	3	нет	нет	2	5
18	1	нет	4	2	5	2	нет	8	1	5	нет	1	нет
19	10	нет	2	5	7	1	нет	нет	нет	4	нет	3	6
20	1	7	2	нет	4	4	4	нет	2	6	5	нет	нет
21	10	5	3	4	нет	2	2	4	нет	5	нет	3	4
22	1	4	4	нет	4	2	нет	2	нет	4	2	нет	нет
23	10	8	1	4	нет	2	2	нет	нет	5	нет	3	5
24	1	4	6	нет	3	2	2	нет	нет	4	5	нет	нет
25	10	нет	2	4	4	2	нет	2	нет	8	нет	2	2
26	1	8	2	4	нет	2	6	4	нет	нет	6	2	нет
27	10	нет	4	5	нет	2	4	5	2	нет	5	нет	7
28	1	5	2	нет	3	1	2	3	нет	4	3	3	нет
29	10	нет	2	10	4	1	нет	4	5	нет	4	нет	8
30	1	4	2	нет	5	1	нет	4	нет	10	3	5	нет

Задача № 2. Параллельное соединение элементов.

Задание для расчета:

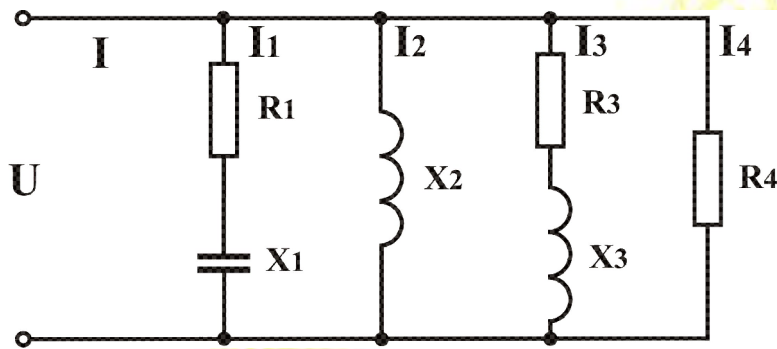
1. Нарисовать схему соединения для своего варианта задания
2. Найти активные и реактивные проводимости ветвей.
3. Найти эквивалентную активную проводимость всей цепи.
4. Найти эквивалентную реактивную проводимость всей цепи.
5. Найти полную проводимость цепи.
6. Определить ток в неразветвленной части цепи I.
7. Определить активную, реактивную и полную мощности всей цепи и первой ветви.
8. Найти активные и реактивные составляющие токов в ветвях.
9. Построить в масштабе векторную диаграмму (ВД) и определить ток в неразветвленной части цепи по ВД.
10. Написать соотношение между реактивными проводимостями при резонансе.
11. Определить полную проводимость и ток в неразветвленной части цепи при резонансе. Построить векторную диаграмму при резонансе.

Пример расчета:

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	4	нет	3	нет	10	нет	6	8	нет	10	нет	нет

Схема соединения в соответствии с исходными данными



2. Полное сопротивление, активная и реактивная проводимости ветвей

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом}$$

$$g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} = \frac{4}{25} = 0.16 \text{ Сим}; \quad b_1 = \frac{X_1}{Z_1^2} = \frac{3}{25} = 0.12 \text{ Сим}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{0^2 + 10^2} = 10 \text{ Ом}$$

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = 0; \quad b_2 = \frac{X_2}{Z_2^2} = \frac{10}{100} = 0.1 \text{ Сим}$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом}$$

$$g_3 = \frac{R_3}{Z_3^2} = \frac{6}{100} = 0.06 \text{ Сим}; \quad b_3 = \frac{X_3}{Z_3^2} = \frac{8}{100} = 0.08 \text{ Сим}$$

$$Z_4 = \sqrt{R_4^2 + X_4^2} = \sqrt{10^2 + 0^2} = 10 \text{ Ом}$$

$$g_4 = \frac{R_4}{Z_4^2} = \frac{10}{100} = 0.1 \text{ Сим}; \quad b_4 = \frac{X_4}{Z_4^2} = 0 \text{ Сим}$$

3. Эквивалентная активная проводимость цепи

$$g_{\Sigma} = \sum g = g_1 + g_3 + g_4 = 0.16 + 0.06 + 0.1 = 0.32 \text{ Сим}$$

4. Эквивалентная реактивная проводимость цепи

$$b_{\Sigma} = \sum b_L - \sum b_C = b_2 + b_3 - b_1 = 0.1 + 0.08 - 0.12 = 0.06 \text{ Сим}$$

5. Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2} = \sqrt{0.32^2 + 0.06^2} = 0.326 \text{ Сим}$$

6. Ток в неразветвленной части цепи

$$I = U y = 100 \cdot 0.326 = 32.6 \text{ А}$$

7. Активная, реактивная и полная мощности всей схемы

$$P = UI \cos \varphi = U^2 g_{\Sigma} = 3200 \text{ Вт}$$

$$Q = UI \sin \varphi = U^2 b_{\Sigma} = 600 \text{ ВАр}$$

$$S = UI = U^2 y = 2860 \text{ ВА}$$

Активная, реактивная и полная мощности первой ветви

$$P_1 = UI \cos \varphi_1 = U^2 g_1 = 1600 \text{ Вт}$$

$$Q_1 = UI \sin \varphi_1 = U^2 b_1 = -1200 \text{ ВАр}$$

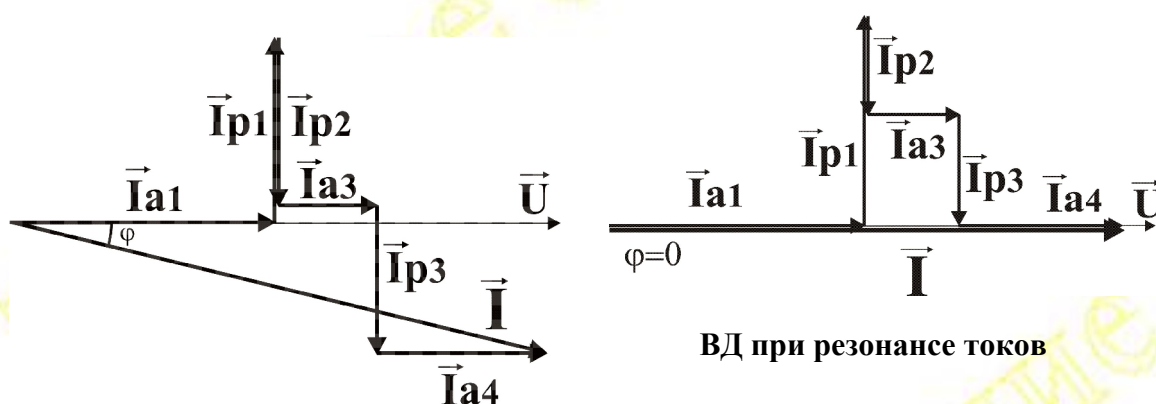
$$S_1 = UI_1 = U^2 y_1 = U^2 / Z_1 = 2000 \text{ ВА}$$

8. Активные и реактивные составляющие токов в ветвях

$$I_{a1} = U g_1 = 100 \cdot 0.16 = 16 \text{ А}; I_{p1} = U b_1 = 100 \cdot 0.12 = 12 \text{ А}$$

аналогично находим $I_{a1} = 0$, $I_{p2} = 10 \text{ А}$; $I_{a3} = 6 \text{ А}$, $I_{p2} = 8 \text{ А}$; $I_{a4} = 10 \text{ А}$, $I_{p4} = 0$

9. Векторные диаграммы



10. Условие резонанса токов $b_2 + b_3 = b_1$ ($\sum b_L = \sum b_C$; $\sum I_L = \sum I_C$)

11. Полная проводимость и ток в неразветвленной части цепи при резонансе

$$\sum b_L = \sum b_C \Rightarrow b_{\Sigma} = 0 \Rightarrow y_0 = \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2} = g_{\Sigma} = 0.32 \text{ Сим}$$

$$I_0 = U y_0 = 100 \cdot 0.32 = 32 \text{ А}$$

Векторная диаграмма при резонансе (см. выше)

Варианты заданий для расчета цепи с параллельным соединением приемников

№ 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
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

№ 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
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

Задача № 3. Соединение трехфазной нагрузки звездой с нейтральным проводом.

Задание для расчета:

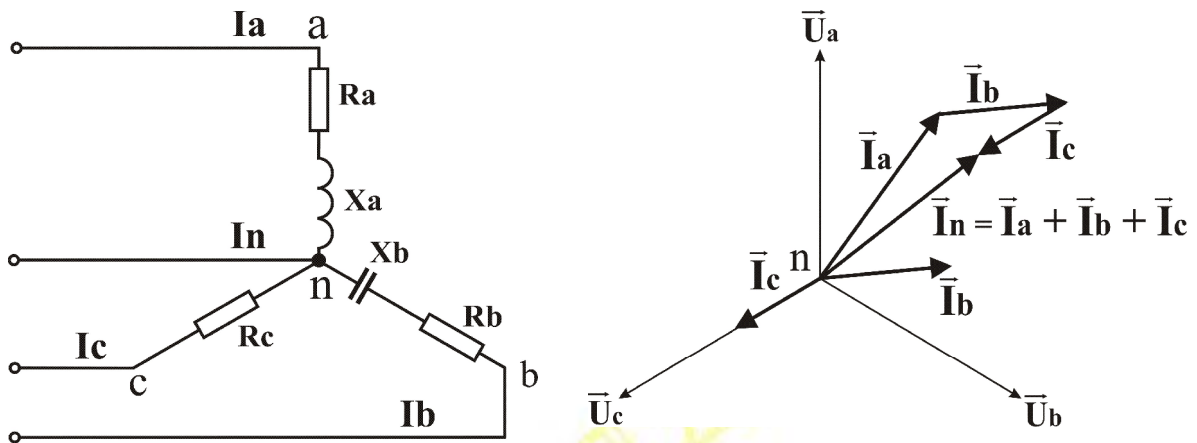
1. Нарисовать схему соединения для своего варианта задания.
2. Определить фазные напряжения U_a, U_b, U_c .
3. Найти полные сопротивления фаз, фазные токи и углы сдвига фаз между фазными токами и напряжениями.
4. Построить (в масштабе) векторную диаграмму (ВД) и определить ток в нейтральном проводе.
5. Определить активную, реактивную и полную мощность каждой фазы и всей трехфазной нагрузки.

Пример расчета:

Исходные данные:

№ вар.	Uл В	R _a Ом	X _{La} Ом	X _{Ca} Ом	R _b Ом	X _{Lb} Ом	X _{Cb} Ом	R _c 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 $U_a = U_b = U_c = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{173}{1.73} = 100 \text{ В}$

3. Полное сопротивление фазы “а”, фазный ток I_a и угол сдвига фаз φ_a

$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + X_a^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом}; \quad I_a = \frac{U_a}{Z_a} = \frac{100}{5} = 20 \text{ А};$$

$$\varphi_a = \arccos \frac{R_a}{Z_a} = \arccos 0.8 = 37^\circ$$

Аналогично, $Z_b = 10 \text{ Ом}, I_b = 10 \text{ А}; \varphi_b = -37^\circ$

$$Z_c = 10 \text{ Ом}, I_c = 10 \text{ А}; \varphi_c = 0$$

4. Векторная диаграмма (см. выше).

5. Активная, реактивная и полная мощности фаз

$$P_a = UI \cos \varphi_a = I^2 R_a = 1600 \text{ Вт}$$

$$Q_a = UI \sin \varphi_a = I^2 X_a = 1200 \text{ ВАр}$$

$$S_a = UI_a = I^2 Z_a = 2000 \text{ ВА}$$

Аналогично, $P_b = 800 \text{ Вт}, Q_b = -600 \text{ ВАр}, S_b = 1000 \text{ ВА};$

$$P_c = 1000 \text{ Вт}, Q_c = 0, S_c = 1000 \text{ ВА}$$

Активная, реактивная и полная мощности всей нагрузки

$$P = P_a + P_b + P_c = 3400 \text{ Вт}$$

$$Q = Q_a + Q_b = 600 \text{ ВАр}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2400^2 + 600^2} = 2474 \text{ ВА};$$

Варианты заданий для расчета трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом

№ вар.	Uл В	Ra Ом	XLa Ом	XCa Ом	Rb Ом	XLb Ом	XCb Ом	Rc Ом	XLc Ом	XCc 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

№ 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
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

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 " \perp ") были соединены с низко потенциальными гнездами (" \perp ") 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 " \sim " – к верхнему гнезду U_1 (PV1) на схеме накладной панели; другим проводом соединить "заземленные" точки (\perp) 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 "Г" (ток полного отклонения 25 мА, цена деления $C_1 = 25\text{мА}/50\text{дел} = 0,5 \text{ мА/дел}$). 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

5

- 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.

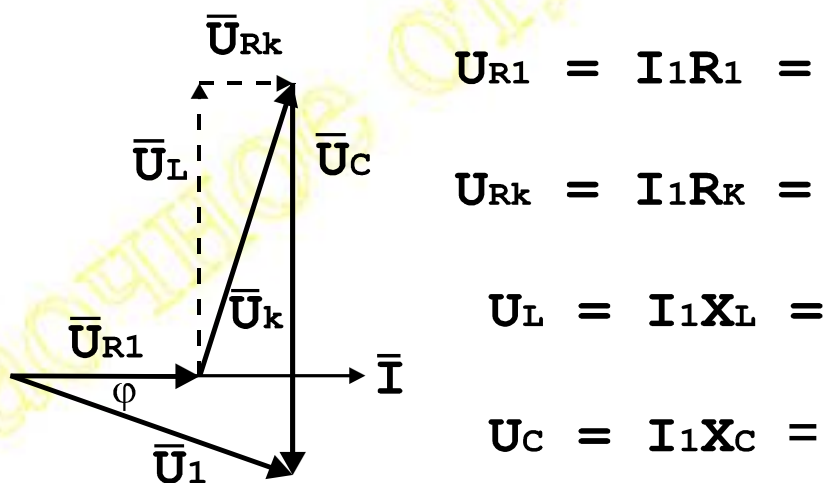


Рисунок 1 – Пример построения векторной диаграммы

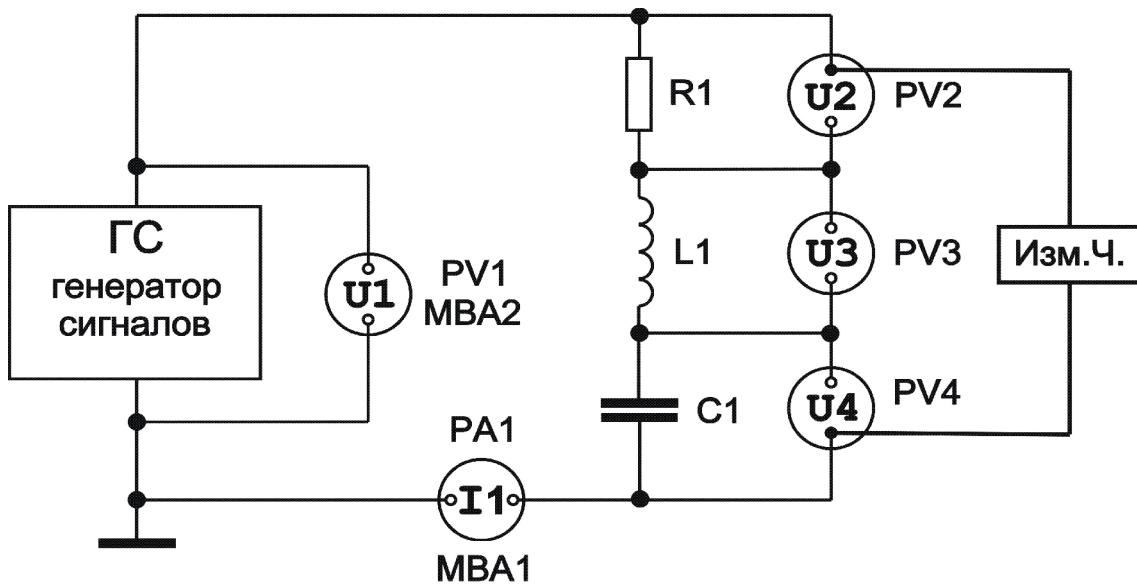


Рисунок 2 Схема исследования цепи однофазного переменного тока при последовательном соединении приемников

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

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

1.2 Изучение явления резонанса в цепи с параллельным соединением приемников.

1.3 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 А3 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 “ \perp ”) 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 ($f = f_{рез}$).

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 ($\sim 0.6 f_{рез}$ и $\sim 0.8 f_{рез}$) и для двух частот больше резонансной ($\sim 1.2 f_{рез}$ и $\sim 1.4 f_{рез}$). 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?

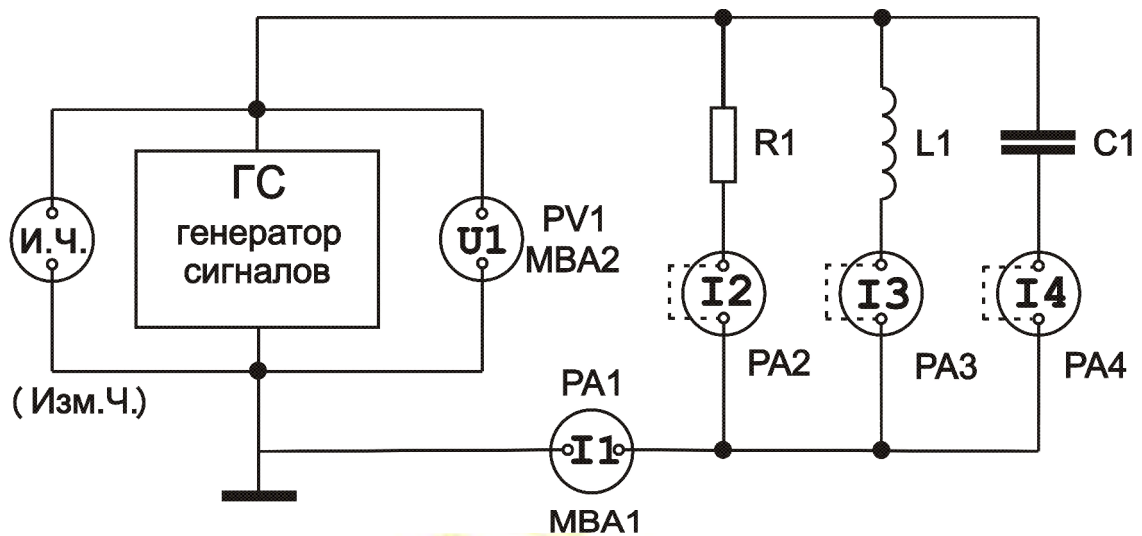


Рисунок 1 Схема для исследования цепи однофазного переменного тока при параллельном включении приемников

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			$f = f_{\text{рез}} = \dots\dots\dots$		
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 $U_{П\text{ MAX}}$ 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 $U_{п\ max}$ 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.

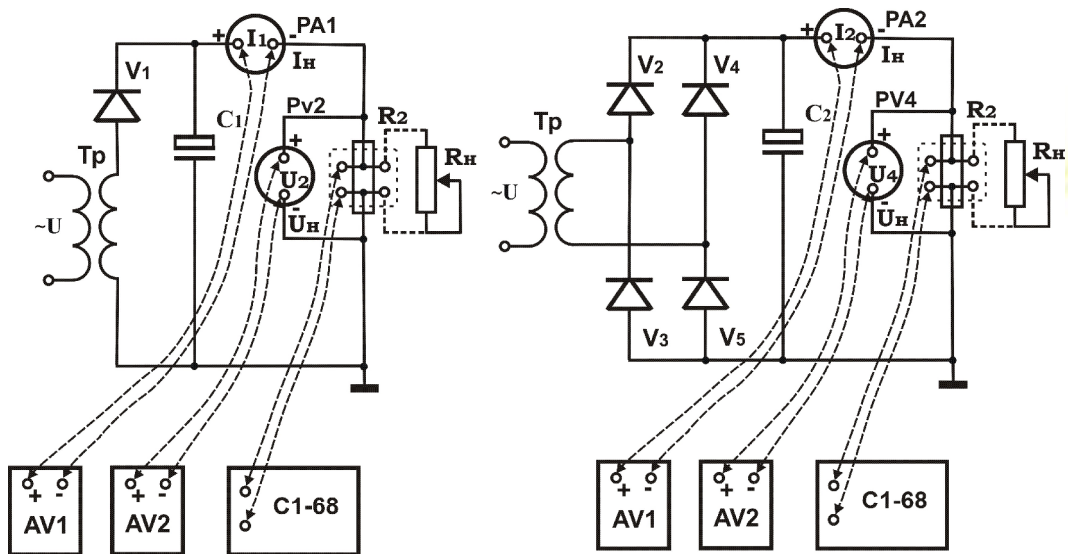


Рисунок 1 Схема лабораторной установки

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. Касаткин А.С. Электротехника.– М.: Энергия, 1974.– 592 с.
3. Основы промышленной электроники / Под ред. Е.Г.Герасимова, – М.: Высш. шк., 1986.– 335 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. Преимущество электрической энергии по сравнению с другими видами энергии с точки зрения экономической целесообразности передачи и распределения.
2. Среднее и действующее значение синусоидально изменяющихся токов, напряжений и ЭДС.
3. Векторное изображение синусоидальных величин.
4. Цепь переменного тока с активным сопротивлением.
5. Цепь переменного тока с индуктивностью.
6. Цепь переменного тока с емкостью.
7. Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников. 2 закон Кирхгофа. Векторная диаграмма. Полное сопротивление. Резонанс напряжений.
8. Цепь переменного тока с параллельным соединением приемников. 1 закон Кирхгофа. Способы определения тока в неразветвленной части цепи. Векторная диаграмма. Резонанс токов.
9. Мощность цепи переменного тока (мгновенная, активная, реактивная, полная).
10. Экономическая целесообразность применения цепей трехфазного тока. Роль отечественных ученых в изобретении трехфазных систем.
11. Соединение приемников "звездой" с нейтральным проводом. Назначение нейтрального провода. Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами. Векторные диаграммы при различных нагрузках.
12. Соотношения между фазными и линейными токами приемника, соединенного треугольником. Векторные диаграммы при различных нагрузках.
13. Катушка со стальным сердечником в цепи переменного тока. Назначение ферромагнитных сердечников в катушках электротехнических устройств. Потери в ферромагнитном сердечнике, методы их снижения.
14. Устройство и принцип действия трансформатора. Экономические и технические достоинства трансформатора. Взаимосвязь электрического и магнитного полей. Роль отечественных ученых в создании трансформатора.
15. Работа трансформатора под нагрузкой. Основные уравнения трансформатора.
16. Внешняя характеристика трансформатора. Влияние характера нагрузки на вид внешней характеристики.
17. Механические характеристики двигателей и исполнительных механизмов. Условия устойчивой работы электропривода.

18. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя. Частота вращения магнитного поля статора, частота вращения ротора, скольжение.
19. Механическая характеристика асинхронного двигателя, характерные точки, формулы для $M(\text{вр})$, $M(\text{пуск})$, $M(\text{max})$, влияние активного сопротивления цепи ротора на вид механической характеристики.
20. Способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.
21. Способы пуска асинхронных двигателей, их применение.
22. Устройство двигателя постоянного тока. Классификация двигателей постоянного тока по способу возбуждения.
23. Принцип действия двигателя постоянного тока. Уравнение цепи якоря двигателя постоянного тока. Зависимость момента от тока якоря и от магнитного потока.
24. Характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, пуск, регулирование частоты вращения, применение.
25. Характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, пуск, регулирование частоты вращения, применение.
26. Назначение и структурная схема выпрямительного устройства,
27. Основные параметры и характеристики выпрямителей.
28. Однополупериодная схема выпрямления переменного тока. Временные диаграммы и основные соотношения.
29. Мостовая схема выпрямления переменного тока. Основные соотношения, временные диаграммы.
30. Фильтры выпрямителей. Назначение, понятие о коэффициенте фильтрации.
31. Принцип действия емкостного фильтра, основные расчетные соотношения, временные диаграммы.
32. Принцип действия индуктивности в качестве фильтра, временные диаграммы.
33. Внешняя характеристика выпрямителя.
34. Основные параметры и характеристики усилителей. Понятие об эквивалентном источнике сигнала.
35. Транзистор, назначение, преимущества и недостатки транзисторных схем, устройство, обозначение на электрических схемах.
36. Принцип действия биполярного транзистора.
37. Схема усилителя с общим эмиттером. Назначение элементов схемы.
38. Усилитель с общим коллектором. Схема, основные параметры, особенности.

39. Многокаскадные усилители. Особенности, классификация по виду четырехполюсников связи.
40. Усилители с емкостной связью. Схема усилителя, назначение элементов, АЧХ, особенности.
41. Усилители с гальванической связью. Особенности, понятие о дрейфе нуля и методах борьбы с ним.
42. Обратные связи в усилителях. Классификация обратных связей. Коэффициент усиления усилителя с обратной связью. Влияние отрицательной обратной связи на параметры и характеристики усилителя.

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ КАТУШКИН
ВИТАЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ РОМАНЕНКО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
учебное пособие для студентов заочной формы обучения

Подписано в печать Формат 60x84 1/16 Бум. офсетная.
Нач. л.1. Печ.л. Бум. л. 1,0. Тираж 100 экз. Зак. от 2008 г.

Издательство Санкт-Петербургского государственного технологического института –
технического университета. 198013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26
Отпечатано РТП ИК «СИНТЕЗ» 198013 Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26