

# Вопросы с краткими ответами к экзамену по теоретическим основам электротехники

## **1 Закон Ома. Закон Джоуля-Ленца. Первый и второй законы Кирхгофа. Законы Кирхгофа для магнитных цепей.**

Закон Ома: Ток в проводнике равен отношению напряжения на участке проводника к электрическому сопротивлению этого участка  $I = U/R$ , выражения  $U = R I$  и  $R = U/I$  являются производными закона Ома.

Закон Джоуля-Ленца: Количество электрической энергии, преобразуемое в проводнике в тепловую энергию, пропорционально квадрату тока и сопротивлению проводника  $W = I^2 R t$ .

Первый закон Кирхгофа: Сумма токов подтекающих к узлу электрической цепи равна сумме токов, утекающих от узла  $\sum I_n = \sum I_y$ .

Второй закон Кирхгофа: В контуре электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах равна алгебраической сумме ЭДС  $\sum IR = \sum E$ .

**Для магнитных цепей.** Первый закон Кирхгофа. Сумма магнитных потоков, подтекающих к узлу магнитной цепи равна сумме магнитных потоков, утекающих от узла  $\sum \Phi_n = \sum \Phi_y$ .

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей (закон полного тока). Сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура магнитной цепи равна сумме МДС вдоль того же контура.  $\sum Hl = \sum IN$ .

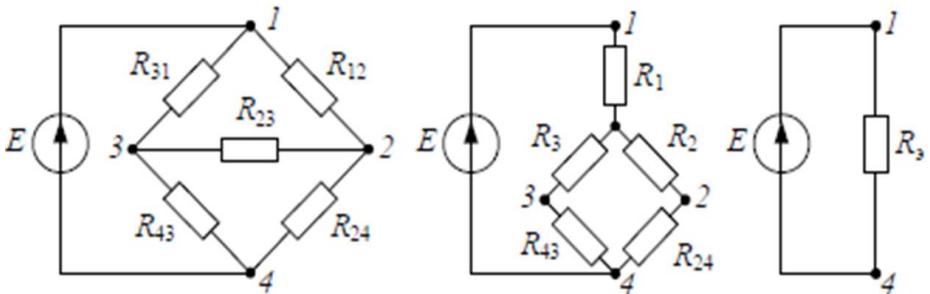
## **2 Эквивалентные преобразования в электрических цепях. Метод свёртывания цепи.**

Цепь, содержащая один источник, свёртывается, начиная от крайних ветвей по направлению к источнику. Эквивалентные сопротивления последовательно подключенных элементов определяются как их сумма. Эквивалентные сопротивления параллельно подключенных элементов

определяются по формуле  $R = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ . Таким образом, цепь преобразуется в один эквивалентный элемент  $R_3$ . Ток источника определяется как частное от деления его ЭДС на сумму эквивалентного сопротивления цепи и внутреннего сопротивления источника. Затем схема разворачивается. Ток источника поэтапно распределяют между ветвями цепи, определяя напряжения узлов или используя формулы разброса  $I_1 = I \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ ;  $I_2 = I \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$ . Правильность расчёта проверяется составлением баланса мощностей  $P_{\text{и}} = \sum I^2 R$ .

### 3 Преобразование треугольника сопротивлений в звезду и наоборот.

При замене верхнего треугольника сопротивлений звездой каждое сопротивление звезды получается как частное от деления произведения сопротивлений прилегающих сторон треугольника на сумму сопротивлений всех его сторон.



$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}.$$

Если требуется заменить звезду сопротивлений треугольником, то каждое сопротивление стороны треугольника определяется как сумма сопротивлений прилегающих лучей звезды плюс частное от деления их произведения на сопротивление противолежащего луча

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}; \quad R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}.$$

#### 4 Метод контурных токов.

Контурные токи направляются по часовой стрелке. Для каждого контурного тока составляется уравнение по 2 закону Кирхгофа – алгебраическая сумма падений напряжений на элементах контура равна алгебраической сумме действующих в этом контуре ЭДС. Сумма падений напряжений особая, так как суммируются падение напряжения от протекания контурного тока по собственным сопротивлениям контура и добавки от протекания соседних токов по общим сопротивлениям. Эти добавки берутся со знаком « – », потому что в общих сопротивлениях контуров контурные токи текут во встречных направлениях.

Число уравнений равно числу независимых контуров в схеме.

В каноническом виде система уравнений по методу контурных токов для схемы, содержащей три контура, выглядит так:

$$\begin{aligned} I_{11}R_{11} - I_{22}R_{12} - I_{33}R_{13} &= E_{11}; \\ - I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} - I_{33}R_{23} &= E_{22}; \\ - I_{11}R_{31} + -I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33} &= E_{33}. \end{aligned}$$

После определения контурных токов находят реальные токи в ветвях.

#### 5 Метод узловых потенциалов. Метод двух узлов.

Сначала определяют потенциалы узлов, затем токи между ними. При расчёте схемы содержащей три узла один из узлов заземляется (его потенциал равен нулю) а потенциалы остальных рассчитываются решением системы из двух уравнений

$$\begin{aligned} \varphi_1 g_{11} - \varphi_2 g_{12} &= I_{11}; \\ - \varphi_1 g_{21} + \varphi_2 g_{22} &= I_{22}. \end{aligned}$$

Здесь  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы узлов;

$g_{11}$  и  $g_{22}$  – суммы проводимостей ветвей, подключенных к соответствующим узлам 1 и 2;

$g_{12} = g_{21}$  – суммы проводимостей ветвей, подключенных между узлами 1 и 2;

$I_{11}$  и  $I_{22}$  – узловые токи узлов 1 и 2 равные алгебраической сумме токов, полученных от умножения ЭДС ветвей, подходящих к соответствующему узлу, на проводимость данных ветвей.

Далее по закону Ома определяют токи в ветвях.

Для схемы, содержащей 2 узла достаточно одного уравнения. Здесь определяется напряжения между двумя узлами

$$U_{AB} = \frac{\sum \pm E_K \cdot g_K}{\sum g_K},$$

где  $E_K$  – ЭДС в ветвях между узлами;

$g_K$  – проводимости ветвей.

Знак «+» берётся, если ЭДС направлена к узлу  $a$ , если от узла «–».

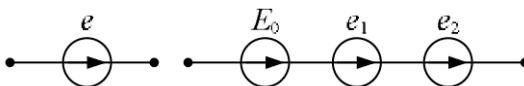
Токи в ветвях определяются по закону Ома с учётом направлений напряжения и ЭДС  $I_K = (\pm U_{AB} \pm E_K) \cdot g_K$ .

## 6 Принцип и метод наложения.

Принцип наложения заключается в том, что ток в любой ветви сложной линейной цепи с несколькими ЭДС равен алгебраической сумме токов, вызванных в этой ветви каждой ЭДС в отдельности. Поочерёдно рассчитывают токи от каждой из ЭДС, мысленно удаляя остальные из схемы, но оставляя их внутренние сопротивления. Частичные токи, вызванные действием одного источника, обозначают со штрихом  $I_n'$ ; вызванные действием другого источника обозначают с двумя штрихами  $I_n''$ . Реальный ток равен  $I_n = I_n' + I_n''$  с учётом знаков (направлений).

Принцип наложения справедлив и для напряжений  $U_n = U_n' + U_n''$ .

Принцип наложения используется также для расчёта мгновенных значений несинусоидального тока. Источник несинусоидальной ЭДС заменяется последовательным соединением источников постоянной и синусоидальных ЭДС,  $e = E_0 + E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2)$ ,



Расчёт тока каждой гармоники ведётся символическим методом, индуктивные сопротивления для  $k$ -гармоники равны  $jk\omega L$ , емкостные  $1/jk\omega C$ . Затем токи представляются как функции времени, мгновенные значения которых складываются  $i = I_0 + i_1 + i_2$ .

## 7 Метод эквивалентного генератора.

Применяется для определения тока в какой-нибудь одной ветви. В исследуемой цепи выделяют ветвь с сопротивлением  $R$ , в которой требуется определить ток. Остальную часть цепи представляют в виде источника ЭДС с напряжением  $U_{\text{ХХ}}$  и внутренним сопротивлением  $r_{\text{ВН}}$ .  $U_{\text{ХХ}}$  это напряжение холостого хода между зажимами оставшейся части цепи при отключённой ветви, его измеряют либо рассчитывают с применением методов расчёта простых цепей. Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора  $r_{\text{ВН}}$  рассчитывают как сопротивление оставшейся части цепи между её зажимами.

Для определения внутреннего сопротивления эквивалентного генератора можно предварительно измерить либо вычислить ток  $I_{\text{КЗ}}$  короткого замыкания оставшейся части цепи. Далее рассчитывают внутреннее сопротивление, оно равно:  $r_{\text{ВН}} = U_{\text{ХХ}} / I_{\text{КЗ}}$ .

Искомый ток определяют по формуле:  $I = U_{\text{ХХ}} / (R + r_{\text{ВН}})$ .

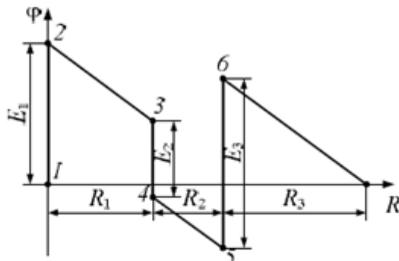
Если выделенная ветвь содержит источник ЭДС  $E$  с внутренним сопротивлением  $r_0$ , искомый ток определяют по формуле

$$I = (U_{\text{ХХ}} \pm E) / (R + r_0 + r_{\text{ВН}}).$$

## 8 Потенциальная диаграмма электрической цепи.

Потенциальная диаграмма строится для цепи постоянного тока. Она представляет собой график изменения потенциала при обходе цепи по замкнутому контуру, содержащему резисторы и источники ЭДС. По горизонтали откладывают в масштабе сопротивления, которые встречаются на пути обхода; по вертикали – потенциалы с учётом знака. Диаграмма начинается с точки, потенциал которой принят за ноль 0. При обходе по замкнутому контуру потенциал возвращается к исходному значению – нулю. Повышение потенциала означает, что мы идём против тока, понижение – по току. Крутизна линий потенциальной диаграммы показывает силу тока, а направление наклона – направление тока.

Скачки потенциала говорят о встречающихся по пути источниках ЭДС, если внутреннее сопротивление источника равно 0 скачок вертикальный, если оно не равно 0 – скачок с небольшим наклоном.



## 9 Построение результирующих вольт-амперных характеристик при параллельном и последовательном соединении нелинейных элементов.

При **параллельном** соединении элементов нелинейной цепи они под одним напряжением, их токи складываются,  $I_1 + I_2 = I$ ,  $ab + ac = ad$

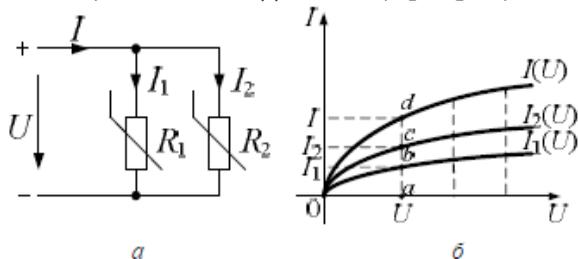


Рисунок 1 – Схема (а) и графическое построение результирующей ВАХ (б) при параллельном соединении нелинейных элементов

При **последовательном** соединении элементов нелинейной цепи по ним протекает один ток, их напряжения складываются  $U_1 + U_2 = U$ ,  $ab + ac = ad$  (рисунок 2).

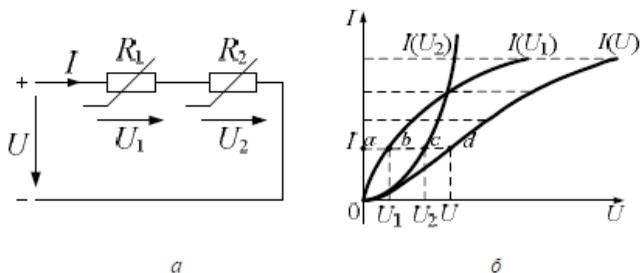


Рисунок 2 – Схема (а) и графическое построение результирующей ВАХ (б) при последовательном соединении нелинейных элементов

## 10 Расчёт электростатических цепей при параллельном и последовательном соединении конденсаторов.

Заряд конденсатора  $q$  равен произведению ёмкости  $C$  на напряжение  $U$

$$q = C \cdot U, \text{ Кл (кулон)}, \quad (1)$$

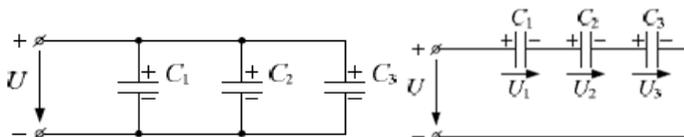
где  $C$  – ёмкость в фарадах (Ф).  $1\text{мкФ} = 10^{-6}$  Ф;  $1\text{нФ} = 10^{-9}$  Ф;  $1\text{пФ} = 10^{-12}$  Ф.

Энергия электрического поля, запасённая конденсатором

$$W = 0,5 C \cdot U^2 \text{ Дж (джоуль)}. \quad (2)$$

При **параллельном** соединении конденсаторов все они находятся под одним напряжением, их ёмкости и заряды складываются,

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad q = q_1 + q_2 + q_3.$$



При **последовательном** соединении конденсаторов заряд всех конденсаторов и каждого конденсатора в отдельности один и тот же  $q = q_1 = q_2 = q_3$ . Эквивалентная ёмкость  $C = 1 / (1 / C_1 + 1 / C_2 + 1 / C_3)$ , для случая двух конденсаторов  $C = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$ . Она меньше ёмкости любого из *последовательно* включённых конденсаторов. Напряжение распределяется между конденсаторами обратно-пропорционально их ёмкости – чем больше ёмкость конденсатора, тем меньше на нём напряжение.

## 11 Магнитодвижущая сила. Напряжённость магнитного поля и магнитная индукция. Магнитная проницаемость. Магнитный поток.

Магнитное поле создаётся электрическими токами. Магнитодвижущая сила  $F$  катушки с током  $I$  равна произведению этого тока на число витков  $N$ :  $F = I \cdot N$  (ампер-витки). Магнитодвижущая сила распределяется по длине  $l$ , м, силовых линий поля, создавая напряжённость  $H$  А/м. Возбуждается магнитная индукция  $B$ , Тл (тесла), которая зависит от магнитной проницаемости материала  $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$ . Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  показывает во сколько раз вещество изменяет (усиливает или ослабляет) магнитное поле по сравнению с вакуумом, проницаемость которого  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Поток вектора магнитной индукции через поверхность площадью  $S$ , м<sup>2</sup>, в равномерном поле равен:  $\Phi = B \cdot S$ , Вб (вебер); он называется магнитным потоком.

## 12 Расчёт неразветвлённых магнитных цепей. Определение МДС по заданному магнитному потоку. Определение магнитного потока по МДС.

Обычно заданы конфигурация и геометрические размеры магнитопровода (длина участков  $l_k$  и площадь сечений  $S_k$ ), кривые намагничивания  $B(H)$  ферромагнитных материалов и магнитный поток  $\Phi_B$  или магнитная

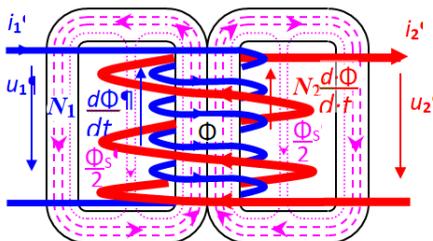
индукция  $B_B$  в воздушном зазоре. Находят значение индукции на каждом участке магнитопровода  $B_K = \Phi_B / S_K$ . По кривым намагничивания определяют напряжённость  $H_K$  на каждом участке магнитной цепи. Напряжённость поля в воздушном зазоре рассчитывают по формуле  $H_B = B / \mu_0 \approx 0,8 \cdot 10^6 \cdot B$ . Искомую магнитодвижущую силу МДС определяют по второму закону Кирхгофа:  $IN = \Sigma H_K \cdot l_K$ .

Для определения магнитного потока по заданной магнитодвижущей силе сначала строят вебер-амперную характеристику  $\Phi(IN)$  – зависимость магнитного потока от магнитодвижущей силы. При этом задаются значениями потока  $\Phi$  и определяют МДС  $IN$  по описанной выше методике. Затем по заданной МДС определяют магнитный поток.

### 13 Явление электромагнитной индукции. ЭДС самоиндукции и взаимной индукции. Трансформатор.

При изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо контур, в нём наводится электродвижущая сила  $e$ . Она равна скорости изменения потокосцепления  $\Psi$  контура, взятой с отрицательным знаком  $e = - d\Psi / dt$ . Эта ЭДС препятствует изменению магнитного потока. На применении явления электромагнитной индукции основано взаимное преобразование механической и электрической энергий.

При изменении собственного потокосцепления возникает ЭДС самоиндукции  $e_L$ , а при изменении взаимного потокосцепления – ЭДС взаимной индукции  $e_M$ . Изменение тока в одной катушке встречает противодействие со стороны другой катушки. Наглядный пример использования явления взаимной индукции – работа трансформатора.



Пульсирующий магнитный поток  $\Phi$  обеспечивает передачу энергии из первичной обмотки  $N_1$  понижающего трансформатора во вторичную  $N_2$  с преобразованием – уменьшением напряжения в  $k = N_1 / N_2$  раза и одновременно увеличением силы тока.

## 14 Резистор, катушка индуктивности и конденсатор в цепи синусоидального тока.

В *резисторе* ток и напряжение совпадают по фазе. Их значения связаны законом Ома:  $U_r = r \cdot I$ . Мощность, потребляемая резистором,  $P = r \cdot I^2$ .

Напряжение на идеальной *катушке индуктивности* пропорционально производной от тока

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ), \text{ где } L - \text{индуктивность.}$$

Напряжение на идеальной катушке индуктивности опережает ток по фазе на  $90^\circ$  (электрических), т. е. на четверть периода. Соответственно ток через катушку отстаёт от напряжения. Значения напряжения и силы тока в катушке связаны через индуктивное сопротивление  $x_L$ :

$$U_L = x_L I, \text{ где } x_L = \omega L = 2\pi f L.$$

Индуктивное сопротивление является реактивным, т. к. характеризует не потребление, а обмен энергией. Реактивная мощность  $Q_L$  обмена энергией между катушкой индуктивности и питающей цепью:

$$Q_L = x_L I^2 = \omega L I^2 = 2\pi f L I^2.$$

Напряжение на *конденсаторе* пропорционально интегралу от протекающего через него тока

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin \omega t = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ), \text{ где } C - \text{ёмкость.}$$

Напряжение на идеальном конденсаторе отстаёт от тока по фазе на  $90^\circ$  (электрических). Соответственно ток через конденсатор опережает приложенное напряжение. Значения напряжения и силы тока в конденсаторе связаны через ёмкостное сопротивление

$$U_C = x_C I, \text{ где } x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Ёмкостное сопротивление также является реактивным. Реактивная мощность обмена энергией между конденсатором и питающей цепью

$$Q_C = x_C I^2 = \frac{U^2}{x_C} = \omega C U^2 = 2\pi f C U^2.$$

Реактивные сопротивление и мощность катушки индуктивности считаются положительными, а конденсатора – отрицательными.

## 15 Представление синусоидального тока и напряжения, сопротивления и мощности в цепи переменного тока комплексными числами.

Комплекс действующего значения тока  $\underline{I}$  может быть записан в алгебраической или в показательной форме ( $a$  – действительная часть,  $b$  – коэффициент при мнимой,  $I$  – модуль,  $\psi$  – аргумент, начальная фаза)

$$\underline{I} = a \pm jb \Rightarrow Ie^{\pm j\psi}.$$

Комплекс действующего значения напряжения  $\underline{U}$  может быть записан в алгебраической или в показательной форме ( $a$  – действительная часть,  $b$  – коэффициент при мнимой,  $U$  – модуль,  $\psi$  – аргумент, начальная фаза)

$$\underline{U} = a \pm jb \Rightarrow Ue^{\pm j\psi}.$$

Ток, напряжение и сопротивление связаны между собой законом Ома

$$\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}; \quad \underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z}; \quad \underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}, \text{ где } \underline{Z} \text{ – комплекс полного сопротивления.}$$

Комплекс полного сопротивления цепи  $\underline{Z}$  это число в алгебраической или показательной форме ( $R$  – активное,  $X$  – реактивное,  $Z$  – модуль,  $\varphi$  – аргумент, угол сдвига фаз между током и напряжением)

$$\underline{Z} = R \pm jX \Rightarrow Ze^{\pm j\varphi}.$$

Если цепь имеет активно-индуктивный характер, при  $j$  применяется знак «+», если цепь имеет активно-емкостной характер, то при  $j$  знак «-» ( $-j$ ).

Комплекс полной мощности  $\underline{S}$  обычно записывают в алгебраической форме ( $P$  – активная мощность,  $Q$  – реактивная мощность).  $\underline{S} = P \pm jQ$ .

Для определения комплекса полной мощности, а, следовательно, активной и реактивной мощности необходимо умножить комплекс напряжения на комплексно-сопряжённый ток,  $\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P \pm jQ$ .

Комплексно-сопряжённый ток  $\underline{I}^*$  имеет обратный знак при  $j$ .

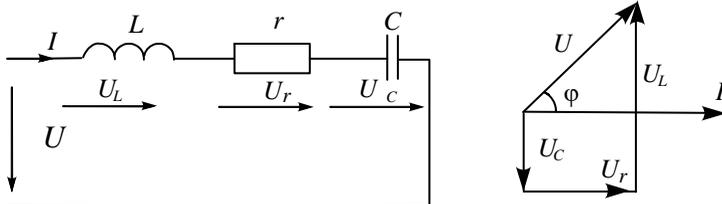
## 16 Расчёт цепи переменного тока с последовательным соединением элементов. Резонанс напряжений.

При последовательном соединении элементов складываются их сопротивления и напряжения на них. Однако это суммы комплексных чисел (действительные части отдельно, мнимые отдельно). Полное сопротивление цепи с последовательно соединёнными резистором,

индуктивным элементом и конденсатором в комплексном виде  $\underline{Z} = r + jX_L - jX_C$ . Модуль полного сопротивления  $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$ .

Из обеих формул видно, что индуктивное и емкостное сопротивления взаимно компенсируют друг друга. Если  $x_C = x_L$ , то полное сопротивление минимально и равно активному  $r$ , а сила тока  $I$  максимальна. Обмен энергией между катушкой индуктивности и конденсатором также достигает максимума, на этих элементах наблюдаются перенапряжения. Такой режим называют резонансом напряжений. Так как  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , резонансная частота  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ;  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ .

### 17 Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов при последовательном соединении элементов цепи переменного тока.



По всем элементам течёт один и тот же ток  $I$ , считаем его действительным и откладываем по горизонтальной оси. При последовательном соединении элементов электрической цепи их напряжения складываются, однако сумма напряжений не арифметическая и не алгебраическая, а геометрическая – это сумма векторов:

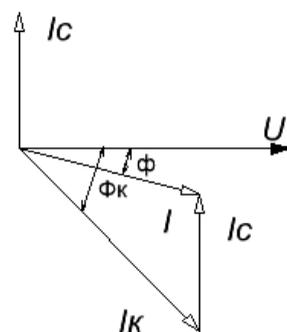
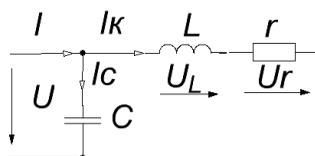
- напряжение на конденсаторе  $U_C$  отстаёт по фазе от тока на  $90^\circ$ , вектор направлен вертикально вниз;
- напряжение на резисторе  $U_r$  совпадает по фазе с током, вектор направлен горизонтально.
- напряжение на индуктивности  $U_L$  опережает по фазе ток на  $90^\circ$ , вектор направлен вертикально вверх.

Напряжение  $U$  равно сумме напряжений  $U_C$ ,  $U_r$  и  $U_L$ . В общем случае оно сдвинуто по фазе относительно тока на угол  $\varphi$ . Сдвиг против часовой стрелки считается положительным, при этом ток отстаёт от напряжения, цепь имеет активно-индуктивный характер. Сдвиг по часовой стрелке

считается отрицательным, при нём напряжение отстаёт от тока, цепь имеет активно-емкостной характер.

### 18 Цепь переменного тока с параллельным соединением элементов. Компенсация индуктивности катушки конденсатором (повышение коэффициента мощности $\cos\varphi$ ).

При параллельном соединении элементы находятся под одним напряжением  $U$ , у них складываются токи и мощности. Ток  $I_k$  в катушке  $rL$  отстаёт по фазе от приложенного напряжения  $U$  на угол  $\varphi_k$ ; она потребляет индуктивную мощность. Для компенсации индуктивности параллельно катушке подключается конденсатор  $C$ , ток которого  $I_c$  опережает по фазе напряжение на  $90^\circ$ . При этом уменьшаются угол сдвига фаз до  $\varphi$  и потребляемый ток до  $I$ , что снижает потери в источнике и проводах; повышается  $\cos\varphi = P/S$  (коэффициент мощности, он показывает какую долю от полной мощности составляет активная).



### 19 Цепи со взаимной индуктивностью. Согласное и встречное включение магнитосвязанных катушек.

Если изменение тока одной катушке порождает электродвижущую силу в другой, и наоборот, такие катушки называют магнитосвязанными. Взаимная индуктивность  $M$ , как и собственная  $L$ , измеряется в Гн (генри).

Коэффициент магнитной связи двух катушек  $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$ .

Если катушки включены последовательно-согласно ЭДС взаимоиндукции складывается с ЭДС самоиндукции, что увеличивает суммарную индуктивность катушек, а следовательно и полное сопротивление  $Z_c = r_1 + jx_{L1} + r_2 + jx_{L2} + j2x_M$ . При последовательно-встречном включении индуктивность и сопротивление уменьшаются  $Z_B = r_1 + jx_{L1} + r_2 + jx_{L2} - j2x_M$ . Отсюда можно определить  $x_M = (Z_c - Z_B) / 4$  и взаимную индуктивность  $M$ .

## 20 Трёхфазная система питающих напряжений. Фазные и линейные напряжения. Способы подключения трёхфазных потребителей.

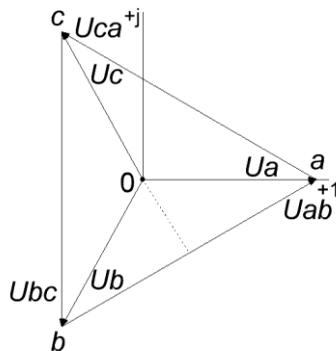
В трёхфазной питающей сети 230/400 В фазные напряжения равны по величине и сдвинуты на  $120^\circ$  по фазе:

$$\underline{U}_a = 230 e^{j0}, \quad \underline{U}_b = 230 e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_c = 230 e^{j120^\circ}.$$

Линейные напряжения по величине больше фазных в  $\sqrt{3}$  раза и тоже сдвинуты по фазе:

$$\underline{U}_{ab} = 400 e^{j30^\circ}, \quad \underline{U}_{bc} = 400 e^{-j90^\circ}, \quad \underline{U}_{ca} = 400 e^{j150^\circ}.$$

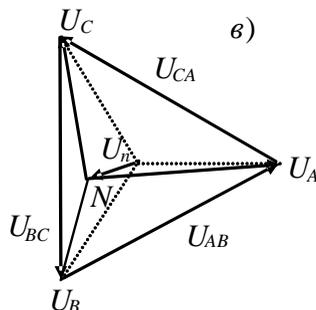
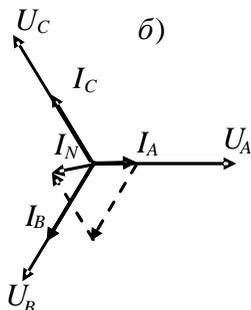
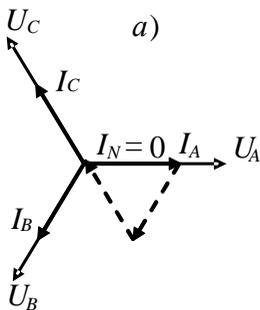
Получается равносторонний треугольник линейных напряжений и вписанная в него трёхлучевая звезда фазных напряжений.



Фазы потребителя могут подключаться к фазным напряжениям по схеме «звезда»  $Y$  с нулевым проводом или без него либо к линейным напряжениям по схеме «треугольник»  $\Delta$ . При переключении тех же потребителей со звезды на треугольник токи в каждой фазе нагрузки возрастают в  $\sqrt{3}$  раза, токи в линейных проводах и мощность – в 3 раза.

## 21 Подключение несимметричных потребителей звездой, определение тока в нулевом проводе. Векторные диаграммы.

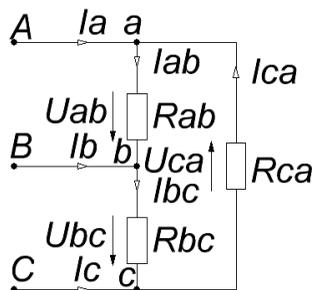
Ток в нулевом проводе равен векторной сумме фазных токов. Если нагрузка симметричная эта сумма равна 0 ( $I_N = 0$ , рисунок а). Для такой нагрузки (например, двигателя) нулевой рабочий провод не нужен.



Если нагрузка несимметричная в нулевом проводе появляется выравнивающий ток  $I_N$  (рисунок б). Если попытаться подключить несимметричную нагрузку без нулевого провода произойдет перекос фаз, нейтраль потребителя сместится относительно нейтрали источника (рисунок в,  $U_n$ ). При этом на нагруженной фазе будет пониженное напряжение ( $U_B$ ), а на разгруженной – повышенное ( $U_A$ ), что недопустимо для нормальной работы приёмников. Поэтому в нулевой провод не ставят предохранители и выключатели.

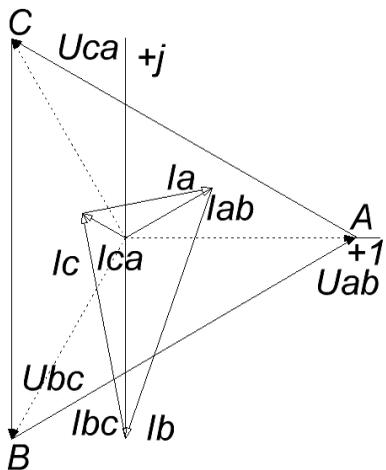
## 22 Подключение несимметричных потребителей треугольником, определение токов в линейных проводах. Векторные диаграммы.

Токи фаз нагрузки при соединении её треугольником  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  и  $I_{ca}$  определяются делением соответствующих линейных напряжений на сопротивления. Токи в линейных проводах определяются как разности соответствующих фазных токов:  $I_a = I_{ab} - I_{ca}$ ;  $I_b = I_{bc} - I_{ab}$  и  $I_c = I_{ca} - I_{bc}$ .



Построение векторной диаграммы начинается с равностороннего треугольника линейных напряжений  $a-b-c$ . Затем из центра треугольника (начала координат) откладывают векторы фазных токов  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  и  $I_{ca}$ . Они параллельны векторам  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  и  $U_{ca}$  соответствующих линейных напряжений, так как нагрузка активная. Концы фазных токов соединяют между собой, получая токи в линии  $I_a$ ,  $I_b$  и  $I_c$ . Из диаграммы видно, что линейные токи немного сдвинуты по фазе относительно напряжений фаз источника, несмотря на то, что нагрузка в цепи чисто активная.

начинается с равностороннего



## 23 Баланс мощностей в трёхфазной цепи.

Активная мощность трёхфазной цепи равна сумме активных мощностей всех фаз  $P = P_A + P_B + P_C$ . Она может быть рассчитана как сумма произведений квадратов модулей действующих значений токов элементов цепи на их активные сопротивления  $P_\Sigma = \Sigma I^2 \cdot R$ .

Реактивная мощность трёхфазной цепи равна сумме реактивных мощностей всех фаз  $\pm Q = \pm Q_A \pm Q_B \pm Q_C$  («+» индуктивная, «-» ёмкостная). Она может быть рассчитана как сумма произведений квадратов модулей действующих значений токов элементов цепи на их реактивные сопротивления  $\pm Q_\Sigma = \Sigma \pm I^2 \cdot X$ .

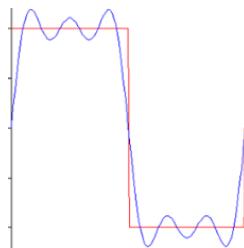
Проверка баланса полной мощности источника и потребителей:

$\underline{S} = P \pm jQ = \underline{U}_{AB} \cdot \underline{I}_{AB}^* + \underline{U}_{BC} \cdot \underline{I}_{BC}^* + \underline{U}_{CA} \cdot \underline{I}_{CA}^*$  должна быть равна  $P_\Sigma \pm jQ_\Sigma$ .

Комплексно-сопряжённые токи  $\underline{I}^*$  имеют обратный знак при «j».

## 24 Расчёт электрических цепей несинусоидального тока.

Несинусоидальные ЭДС раскладываются в ряд Фурье как сумма постоянной составляющей, первой гармоники и высших гармоник. Пример представления прямоугольного сигнала как суммы 1, 3 и 5 гармоник изображён на рисунке.

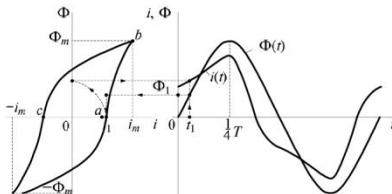


Расчёт тока каждой гармоники ведётся символическим методом, индуктивные сопротивления для  $k$ -гармоники равны  $j k \omega L$ , ёмкостные  $1/j k \omega C$ . Затем токи представляются как функции времени, мгновенные значения которых складываются  $i = I_0 + i_1 + i_2$ .

Действующее значение тока каждого элемента определяют как корень квадратный из суммы квадратов токов гармоник  $I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$  (включая нулевую гармонику – постоянный ток). Активная мощность несинусоидального тока в элементе определяется как произведение квадрата действующего значения тока на его активное сопротивление.

## 25 Нелинейные цепи переменного тока. Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока.

Нелинейные цепи переменного тока могут содержать индукционные катушки как элементы электрических машин. График тока в такой катушке зависит от вида петли гистерезиса, по которой перемагничивается материал сердечника. Нелинейная зависимость индукции от напряжённости, а, следовательно, и тока от магнитного потока является причиной несинусоидальности тока. Высшие гармоники тока тем больше, чем сильнее проявляется насыщение материала сердечника при его намагничивании. Объяснить построение кривой тока.



## 26 Коммутация. Переходные процессы в цепях с ёмкостью.

**Коммутация** это переключение электрических соединений, оно сопровождается переходными процессами. Если цепь содержит накопители энергии, то конденсаторы при коммутации могут создать сверхтоки, а катушки индуктивности – перенапряжения.

**Классический метод расчёта переходных процессов** заключается в определении начального и принуждённого значения тока и напряжения, а также показателя экспонент, по которым эти токи (напряжения) переходят от начального значения к принуждённому.

**Второй закон коммутации. Напряжение на обкладках конденсатора сразу после коммутации равно напряжению перед коммутацией.** Затем оно изменяется по экспоненте с постоянной времени  $\tau = RC$ . При зарядке или разрядке конденсатора через малое сопротивление возникают сверхтоки, которые могут сварить контакты или вывести из строя полупроводниковые элементы.

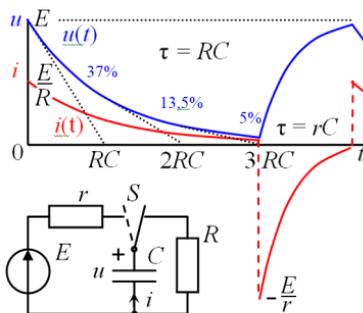


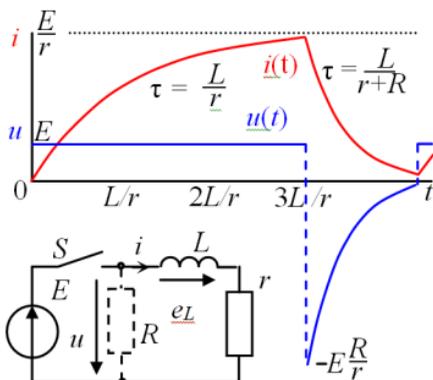
Рисунок 2 Графики разрядки и зарядки конденсатора

## 27 Переходные процессы в цепях с индуктивностью.

*Первый закон коммутации.* Ток в катушке индуктивности сразу после коммутации равен току перед коммутацией. При замыкании контакта  $S$  напряжение скачком увеличивается до  $E$ , а ток возрастает по экспоненте с постоянной времени  $\tau = L/r$  приближаясь к  $E/r$ .

При размыкании контактов на них возникает импульс перенапряжения обратной полярности величиной  $-ER/r$ . Этот импульс может пробить

изоляцию; от него между контактами возникает дуга, которая может их расплавить. Для борьбы с импульсом обратного перенапряжения в цепях постоянного тока используют встречно-параллельно включённые диоды, а в цепях переменного тока – демпфирующие  $RC$ -цепочки.



**Рисунок 1** Графики напряжения и тока при подключении и отключении  $Lr$  катушки