

№1 Электрическая цепь постоянного тока и ее параметры.

Эл. цепь – совокупность устройств, предназначенных для генерирования, преобразования, передачи, распределения, потребления электроэнергии - совокупность устройств, по которым могут протекать эл. токи.

Эл. Цепи постоянного тока – в цепях действуют неизменные во времени напряжения и протекают неизменные во времени токи.

Напряжение – работа сил ЭП по перемещению единичного положительного заряда между двумя точками поля.

Эл.ток – упорядоченное движение эл.зарядов под воздействием ЭП. $I = \frac{q}{t}$

ЭДС – работа сторонних сил по перемещению заряда к величине этого заряда. $E = \frac{A_{ст}}{q}$

Потенциал – работа, которую совершает ЭП для перемещения заряда из одной точки в точку с нулевым потенциалом. $\varphi = \frac{A}{q}$ $U = \varphi_1 - \varphi_2$

№2 Схема замещения электрической цепи постоянного тока и ее элементы.

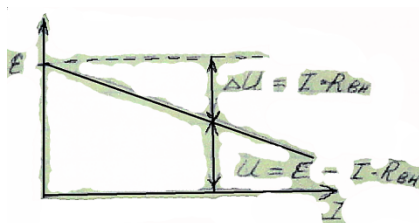
-графическое изображение ЭЦ с помощью условных знаков существенных эл.параметров цепи и их взаимосвязь.

- Вспомогательные (ключи, соединительные провода, измерительные приборы)
- Основные
 1. Потребители (нагрузка) – элементы ЭЦ в которых происходит потребление или преобразование ЭЭ в другие виды энергии.
 2. Источники энергии – происходит преобразование различных видов энергии в электрическую.

Условие эквивалентности источников тока и напря.

$$E = I \cdot R_{вн}$$

Внешняя характеристика источников.



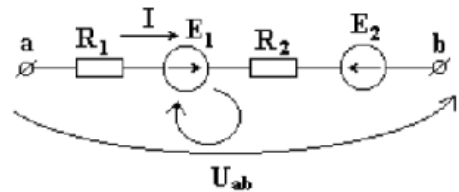
№3 Основные законы электрических цепей

Первый закон Кирхгофа - алгебраическая сумма токов в любом узле цепи равна нулю:

$$\sum I = 0. \quad I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

Второй закон Кирхгофа - алгебраическая сумма ЭДС вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре.

$$\sum E = \sum U$$



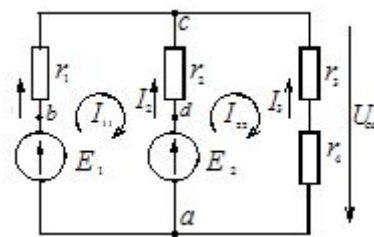
$$I \cdot R_1 + I \cdot R_2 - U_{ab} = E_1 - E_2$$

Обобщенный закон Ома для произвольного участка цепи - Произведение силы тока на сопротивление участка цепи равно алгебраической сумме падения потенциала на этом участке и ЭДС всех источников электрической энергии, включенных на данном участке цепи.

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \xi$$

№4 Потенциальная диаграмма как средство проверки второго закона Кирхгофа

Потенциальная диаграмма составляется для контуров схемы, а так как алгебраическая сумма падений напряжений контура равно нулю, то и в потенциальной диаграмме первый потенциал должен быть равен последнему потенциалу

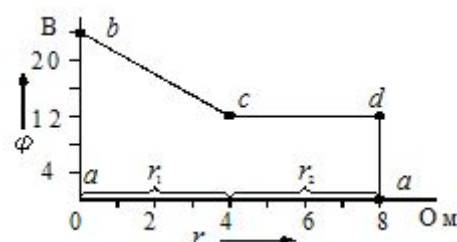


$$\varphi_b = \varphi_a + E_1 = 0 + 24 = 24 \text{ В}$$

$$\varphi_c = \varphi_b - I_1 r_1 = 24 - 3 \times 4 = 12 \text{ В}$$

$$\varphi_d = \varphi_c + I_2 r_2 = 12 + 0 \times 4 = 12 \text{ В}$$

$$\varphi_a = \varphi_d - E_2 = 12 - 12 = 0$$



№5 Мощность в цепи постоянного тока.

$$P = I \times U = I^2 \times R = \frac{U^2}{R} \quad P = \frac{A}{\delta t}$$

Баланс мощностей

Алгебраическая сумма мощностей источников равна алгебраической сумме мощностей нагрузок.

$$\sum_{k=1}^n P_{k\text{ист}} = \sum_{k=1}^m P_{k\text{потр}}$$
$$P_{k\text{ист}} = E_k I_k \quad P_{k\text{потр}} = I_k^2 R_k$$

№6 Метод расчетов эл.цепей с помощью уравнений

Кирхгофа.

1. По первому закону Кирхгофа имеем n уравнения - на единицу меньше числа узлов. Принимая токи, подтекающие к узлу, положительными, а оттекающие от узла – отрицательными.
2. Для контуров, отмеченных дугообразными стрелками, показывающими направления обхода, записываем уравнения по второму закону Кирхгофа

№7 Метод узловых потенциалов

1. Потенциал одного узла принимаем = 0 задаемся условно положительным направлением тока
2. Потенциал узла, для которого составляется ур-е, умножаем на сумму проводимости ветвей, присоединенных к этому узлу.
3. Потенциал соседнего узла умножается на проводимость ветвей (между этими узлами)
4. В правой части стоит алгебраическая сумма произведений ЭДС и проводимости в ветви, где нах. эта ЭДС. Учитываем только присоединенные к узлу ветви. Ставим – если ЭДС от узла, + к узлу.
5. Реш.систему, находим φ_i
6. Используем ур-я связи токов и потенциалов, находим токи.

№8 Метод контурных токов

-токи замыкающиеся по независимым контурам

1. Задаемся направлением токов
2. Определяем независимые контуры, нумеруем.
3. Выбираем направление контурных токов и составляем ур-я.
4. Полученную схему решаем относительно контурных токов.
5. Токи в ветвях находят как алг. сумму контурных токов.

№9 Принцип суперпозиции.

- напряженность электростатического поля, создаваемого в данной точке системой зарядов, есть сумма напряженностей полей отдельных зарядов.

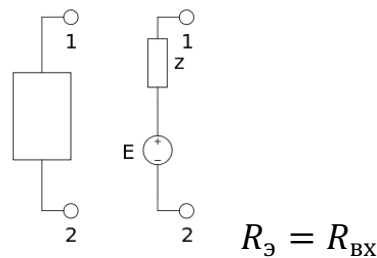
Метод наложения.

В основе метода лежит принцип суперпозиции (наложения): ток в любой ветви сложной электрической цепи, содержащей несколько ЭДС, может быть найден как алгебраическая сумма токов в этой ветви от действия каждой ЭДС в отдельности.

№10 Двухполюсники.

-часть эл.цепи любой сложности и произвольной конфигурации, выделенная относительно двух зажимов

Входное сопротивление двухполюсника.



Теорема об активном двухполюснике: если сколь угодно сложную цепь, выделенную относительно 2х зажимов, можно заменить активным двухполюсником, причем $\varepsilon_{\text{двухп.}} = U_{\text{хх}}$, а $R_{\text{двухп.}} = R_{\text{генератора}}$

№11 Эквивалентные преобразования эл.цепей.

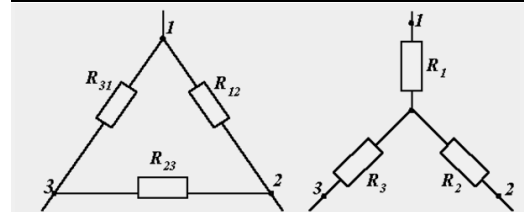


Рис. 1.13. Треугольники и звезда сопротивлений

Если при замене одной из этих схем другой не изменяются потенциалы одноименных точек и подтекающие к ним токи, то во внешней цепи также не произойдет никаких изменений. В этом случае говорят, что схемы эквивалентны.

а) при преобразовании треугольника в звезду:

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

б) при преобразовании звезды в треугольник:

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

№12 Передача энергии от активного двухполюсника к пассивному двухполюснику (ЛЭП постоянного тока)

ЛЭП предназначена для передачи электроэнергии от источника к потребителю. Она представляет собой два изолированных провода с суммарным сопротивлением $R_{\text{л}}$, к началу которых подключен генератор с напряжением U , а к концу – нагрузка с сопротивлением $R_{\text{н}} = R_2$

№13 Принцип получения синусоидальной ЭДС.

Пусть в однородном магнитном поле, например, между полюсами плоского магнита, под углом ψ к горизонтальной плоскости расположена плоская катушка, выполненная в виде прямоугольной рамки, по периметру которой намотано w витков (рис. 2.2). Площадь сечения рамки – S , магнитная индукция – B .

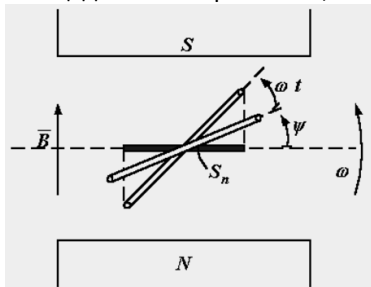


Рис. 2.2. Получение синусоидальной ЭДС

Заставим эту катушку вращаться против часовой стрелки с угловой скоростью ω . Если обозначить время полного оборота катушки через T , то $\omega = 2\pi/T$, (рад/с). За некоторый промежуток времени t рамка повернется на угол ωt . Площадь проекции рамки в этом положении $S_n = S \cdot \cos(\omega t + \psi)$. Рамка и ее проекция на горизонтальную плоскую поверхность пронизываются одним и тем же числом силовых линий магнитной индукции, поэтому обусловленный ими магнитный поток равен:

$$\Phi = BS_n = BS \cos(\omega t + \psi)$$

При вращении катушки число силовых линий, охватываемых ее витками, все время меняется.

Например, при горизонтальном положении рамки это число максимально, при вертикальном – равно нулю. Другими словами, меняется магнитный поток, пронизывающий катушку, в результате чего в ней в соответствии с уравнением (2.2) наводится ЭДС:

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

Величины, хар. синусоидальную функцию во времени.

Угол ψ , определяющий начальное положение рамки и равный фазе в начальный момент времени (при $t = 0$), – начальная фаза. Фаза с течением времени (при вращении катушки) постоянно меняется. Скорость изменения фазы ω называется угловой или циклической частотой. Время одного цикла изменения фазы (время одного оборота рамки) называется периодом и обозначается T . Количество полных изменений синусоидальной ЭДС в секунду определяет частоту f , измеряемую в герцах (Гц). Один герц соответствует одному полному колебанию в секунду. Связь между частотой и периодом выражается формулой $f = 1/T$. При частоте 50 Гц: $\omega = 2\pi/T = 2\pi f = 314 \text{ (с}^{-1}\text{)}$

Волновая диаграмма.

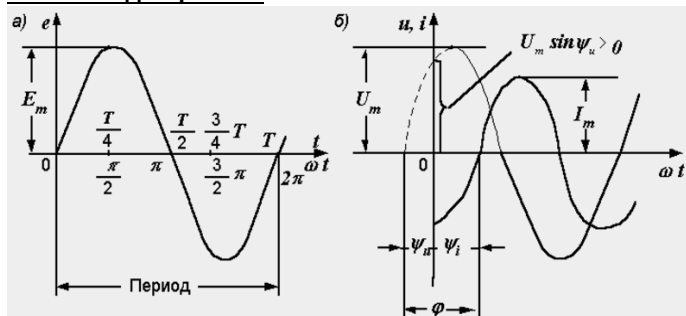
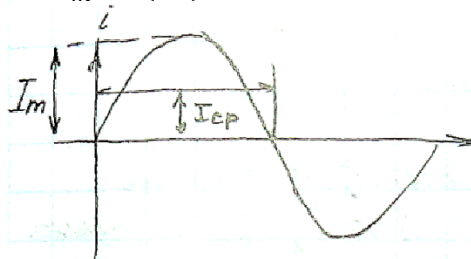


Рис. 2.3. Волновые диаграммы

№14 Среднее и действующее значение синусоидальной функции

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

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



$$\begin{aligned} I_{cp} &= \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \\ &= -\frac{2I_m}{2\pi} \left[\cos \frac{2\pi T}{2} - \cos 0 \right] = \\ &= \frac{2}{\pi} I_m = 0,6371 \cdot I_m \end{aligned}$$

$$I_{cp} = 0,6371 I_m$$

приборы МЭ системы

Действующее значение переменного тока – есть численное значение постоянного тока, который на том же участке ЭЦ, за тот же интервал времени производит ту же работ, что и рассматриваемый переменный.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

№15 Изображение синусоидальной функции времени вращающимися векторами.

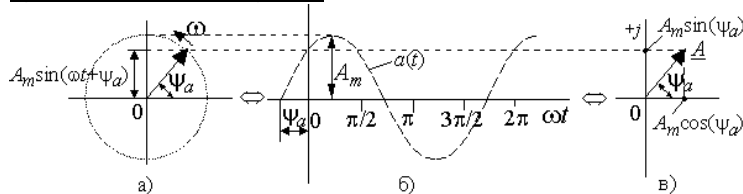


Рис. 2

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad \varphi_i > 0$$

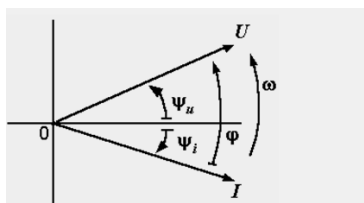


Рис. 2.6. Векторная диаграмма тока и напряжения

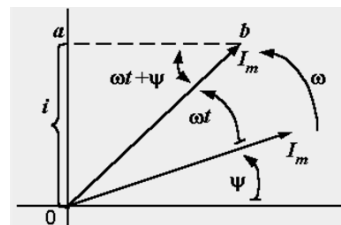


Рис. 2.5. Вращающийся вектор

ток отстает от напряжения на угол φ при вращении против часовой стрелки

№16 Изображение синусоидально изменяющихся величин комплексными числами.

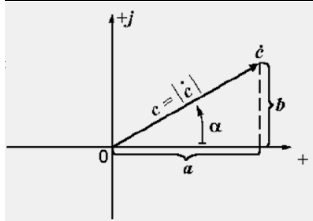


Рис. 2.8. Вектор на комплексной плоскости

Пусть задано выражение синусоидального тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$. Как мы видели раньше, этому выражению соответствует вектор, длина которого равна I_m , а угол наклона к горизонтальной оси ψ . Если этот вектор изобразить в комплексной плоскости (рис. 2.13), то его можно обозначить комплексным числом $I_m = I_m e^{j\psi}$, которое называется комплексной амплитудой тока.

№17 Законы Кирхгофа и закон Ома в цепях синусоидального тока.

Первый: в любой момент времени алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k(t) = 0$$

где n – число ветвей, сходящихся в узле.

Второй: в любой момент времени в замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на всех остальных элементах контура:

$$\sum_{k=1}^m e_k(t) = \sum_{k=1}^m u_k(t)$$

где m – число ветвей, образующих контур.

Закон Ома:

$$E_m = I_m(R + j\omega L - \frac{j}{\omega C})$$

№18 Понятие об активном сопротивлении.

При протекании электрического тока выделяется энергия в виде тепла или механической работы. Параметр электрической цепи, характеризующий этот процесс, называется активным сопротивлением.

Синусоидальный ток в активном сопротивлении.

$$u_R = RI_m \sin(\omega t + \psi) = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi)$$

$$\text{Отсюда } U_{Rm} = RI_m \text{ или } I_m = \frac{U_{Rm}}{R} = GU_{Rm}$$

Разделив два последних уравнения на $\sqrt{2}$, получим

$$U_R = RI \text{ и } I = \frac{U_R}{R} = GU_R$$

В активном сопротивлении напряжение и ток совпадают по фазе; их начальные фазы одинаковы, угол сдвига фаз равен нулю, векторы на векторной диаграмме направлены в одну сторону (параллельны).

№20 Понятие об индуктивности.

Индуктивность (или коэффициент самоиндукции) — коэффициент пропорциональности между скоростью изменения тока на участке ЭЦ и ЭДС самоиндукции наведенной в этом же участке цепи (правило Ленца)

$$W_M = \frac{LI^2}{2} \text{ — энергия МП. } \Phi = LI$$

Индуктивность в цепи синусоидального тока

$$u_L = LI_m \omega \cos(\omega t + \psi) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi + 90^\circ)$$

Это — мгновенное значение напряжения. Его амплитуда

$$\text{равна: } U_{Lm} = I_m \omega L = I_m x_L$$

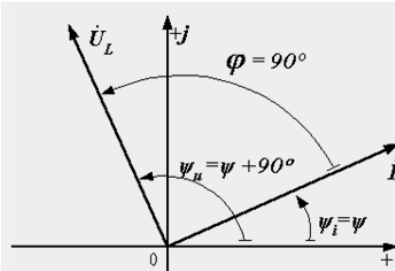


Рис. 2.19. Векторная диаграмма напряжения и тока в индуктивности

$$U_L = I \omega L = I x_L, \text{ откуда } I = \frac{U}{x_L} = \frac{U}{\omega L} = B_L U$$

где B_L — индуктивная проводимость;

$$B_L = \frac{1}{x_L} = \frac{1}{\omega L}$$

Запишем соответствующие формулы в символической форме:

$$\dot{U}_{Lm} = U_{Lm} e^{j(\psi + 90^\circ)} = U_{Lm} e^{j\psi} e^{j90^\circ} = I_m x_L e^{j\psi} j$$

$$\text{Так как } I_m e^{j\psi} = \dot{I}_m, \text{ то } \dot{U}_{Lm} = \dot{I}_m j x_L = \dot{I}_m j \omega L$$

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_{Lm}}{j x_L} = \dot{U}_{Lm} (-j B_L)$$

Аналогично для действующих значений:

$$\dot{U}_L = \dot{I} j x_L = \dot{I} j \omega L$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_L}{j x_L} = \dot{U}_L (-j B_L)$$

№20 Понятие об электрической емкости.

-коэффициент пропорциональности между зарядами системы проводящих тел и напряжением, подведенной к этой системе.

-это свойство физ.объекта запасать в себе энергию и отдавать ее во внешнюю цепь.

$$I = \omega C U_C = B_C U_C,$$

$$x_C = \frac{1}{B_C} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ Отсюда } U_C = I \frac{1}{\omega C} = I x_C$$

$$i = C U_{Cm} \omega \cos(\omega t + \psi) = I_m \sin(\omega t + \psi + 90^\circ),$$

$$\text{где, } I_m = \omega C U_{Cm} = B_C U_{Cm}$$

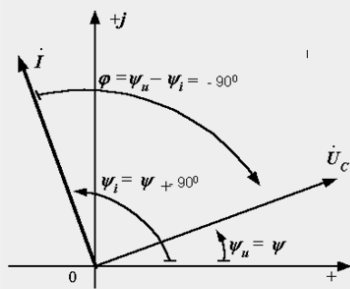


Рис. 2.22. Векторная диаграмма напряжения и тока в емкости

$$\dot{U}_C = \frac{U_{Cm}}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = U_C e^{j\psi}$$

$$\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\psi + 90^\circ)} = I e^{j\psi} e^{j90^\circ} = \omega C U_C e^{j\psi} \cdot j$$

$$\text{Или } \dot{I} = \dot{U}_C j \omega C = \dot{U}_C j B_C$$

$$\dot{U}_C = \dot{I} \frac{1}{j \omega C} = \dot{I} \left(-j \frac{1}{\omega C} \right) = \dot{I} (-j x_C)$$

Отсюда

№21. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

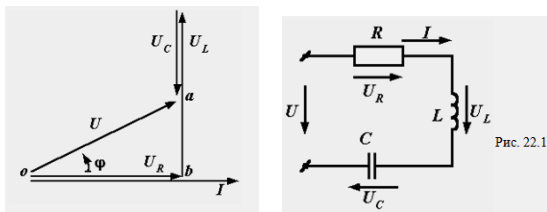
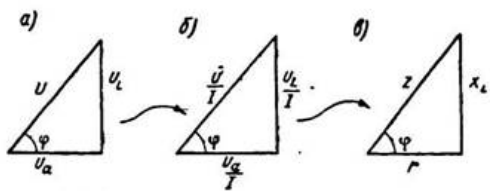


Рис. 22.2. Векторная диаграмма после

$$U_R = IR, \quad U_L = Ix_L, \quad U_C = Ix_C$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(IR)^2 + (Ix_L - Ix_C)^2}$$

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{R^2 + x^2}$$



Фиг. 155. Получение треугольника сопротивлений

№22. Параллельное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

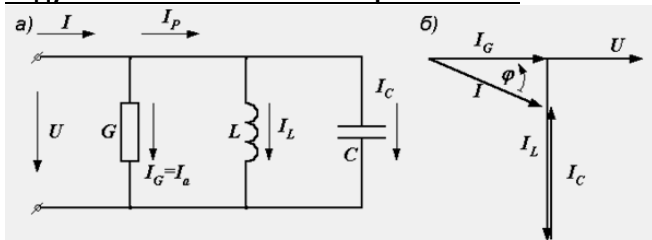


Рис. 23.1. Электрическая цепь и ее векторная диаграмма

$$I = \sqrt{I_G^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{(GU)^2 + (B_LU - B_CU)^2}$$

$$\text{или } I = yU,$$

где y — полная проводимость цепи, равная

$$y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$\bar{I}_p = \bar{I}_L + \bar{I}_C \text{ и определяется как разность длин векторов:}$$

$$I_p = I_L - I_C = B_LU - B_CU = (B_L - B_C)U = BU$$

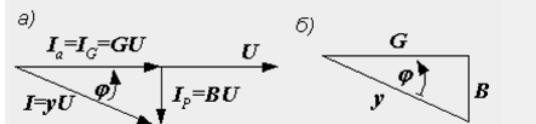


Рис. 23.2. Треугольники токов и проводимостей

№23. Эквивалентные сопротивления и проводимости двухполюсника.

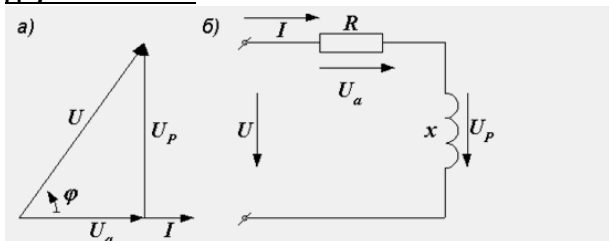


Рис. 24.2 Векторная диаграмма и соответствующая ей последовательная экв. сх.

последовательная схема замещения

пассивного двухполюсника, параметры R , X и Z — эквивалентными сопротивлениями двухполюсника.

разложим вектор тока на две составляющие I_a — активную, направленную по вектору напряжения, и реактивную I_p , перпендикулярную к нему. Такой векторной диаграмме соответствует параллельная схема замещения двухполюсника. параметры G , B и Y называются эквивалентными проводимостями. Токи в элементах G и B мы и представляем как активную и реактивную составляющие общего тока: $I_a = GU$, $I_p = BU$. Из треугольника токов получается треугольник проводимостей.

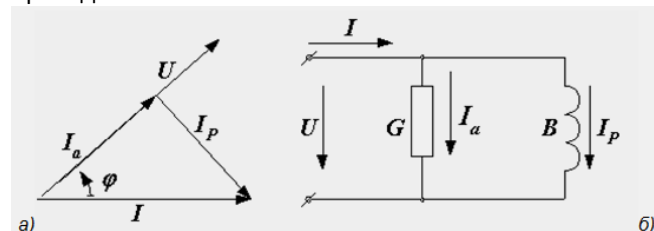


Рис. 24.3. Параллельная эквивалентная схема и ее векторная диаграмма

№24 Построение векторной топографической диаграммы.

1. Выбираем масштаб напряжения и тока
2. Разделив комплексные потенциалы на этот масштаб, находим отрезки в сантиметрах, определяющие положение каждой точки на диаграмме.
3. Соединяем отрезками прямых точки, обозначающие на схеме зажимы каждого отдельного элемента.
4. Даем наименование каждому вектору и указываем его направление.

№25. Мощность в произвольной цепи

синусоидального тока. Треугольник мощностей.

активная мощность:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

$$P = UI \cos(\phi)$$

$$P = I^2 z \cos \phi = I^2 R = U^2 y \cos \phi = U^2 G = U_a I = UI_a$$

$$p = \pm UI \sin 2\omega t,$$

реактивная мощность:

$$Q = I^2 x = I^2 z \sin \phi = UI \sin \phi = U^2 y \sin \phi = U^2 B = U_p I = UI_p$$

Полная мощность:

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

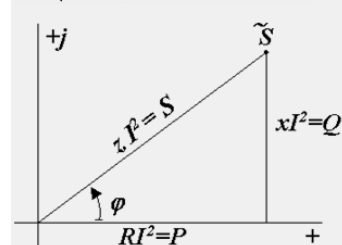


Рис. 28.1. Треугольник мощностей

№26 Резонанс напряжений и его характеристики.

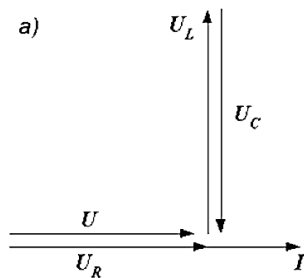
В цепи, содержащей последовательно соединенные участки с индуктивным и емкостным характером сопротивлений, резонанс называется резонансом напряжений. Рассмотрим простейшую цепь, которую часто называют последовательным контуром. Для нее

резонанс наступает при $x = x_L - x_C = 0$ или $x_L = x_C$,

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

откуда:

Напряжения на индуктивности и емкости в этом режиме равны по величине и, находясь в противофазе, компенсируют друг друга. Все приложенное к цепи напряжение приходится на ее активное сопротивление.



Напряжения на индуктивности и емкости могут значительно превышать напряжения на входе цепи. Их отношение, называемое добротностью контура Q , определяется величинами индуктивного (или емкостного) и активного сопротивлений:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{x_{L\text{рез}}}{R} = \frac{x_{C\text{рез}}}{R}.$$

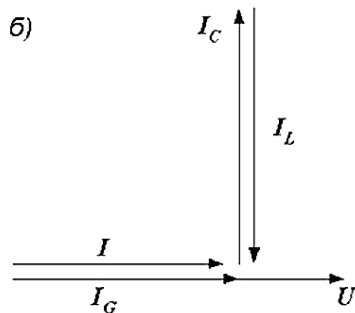
$T = 2\pi\sqrt{LC}$ – формула Томпсона

$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление контура

№ 27 Резонанс токов и его характеристики.

Резонанс в разветвленной цепи называется резонансом токов. Реактивные составляющие токов параллельных ветвей противоположны по фазе, равны по величине и компенсируют друг друга, а сумма активных составляющих токов ветвей дает общий ток.

$\varphi = 0$ при $B_L = B_C$ $\frac{1}{\omega L} = \omega C$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – условие резонанса тока



№28 Явление взаимной индукции.

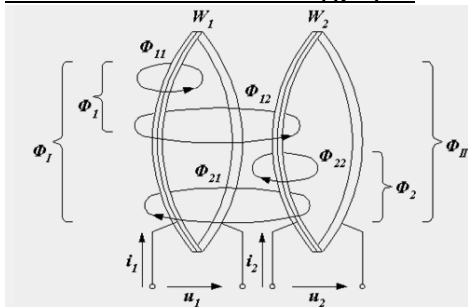


Рис. 29.1. Индуктивно связанные элементы

$$\Psi_I = W_1\Phi_I = W_1\Phi_1 \pm W_1\Phi_{21} = \Psi_1 \pm \Psi_{21}$$

где $\Psi_1 = W_1\Phi_1$ – собственное потокоцепление первой катушки (потокоцепление самоиндукции);
 $\Psi_{21} = W_1\Phi_{21}$ – потокоцепление взаимной индукции.

При изменении магнитного потока в катушке индуцируется эдс электромагнитной индукции, и на ее зажимах появляется напряжение:

$$u_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}$$

или в символической форме

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 j\omega L_1 \pm \dot{I}_2 j\omega M = \dot{U}_{1L} + \dot{U}_{1M}$$

Явление возникновения э.д.с. в одном из контуров при изменении силы тока в другом называется взаимной индукцией.

Для решения задачи о характере включения катушек и о направлении их магнитных потоков вводят понятие одноименных зажимов, отмечая их на схеме одинаковыми значками. Разметку делают руководствуясь следующим определением.

Одноименными зажимами двух катушек называются такие зажимы, когда при одинаковых направлениях токов относительно этих зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой катушке складываются.

Другими словами, если мы имеем две катушки, у которых отмечены начала и концы намотки, и если токи в них протекают одинаково, например от начала к концу в обеих катушках, то оба магнитные потока в каждой из них будут направлены согласно.

№29 Последовательное соединение индуктивно-связанных элементов. Векторная диаграмма.

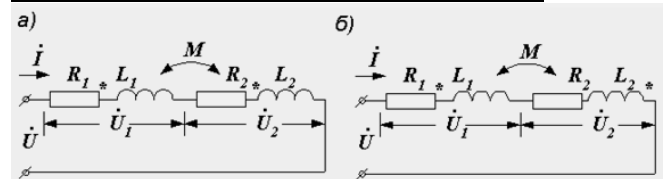


Рис. 3.3. Последовательное соединение индуктивно связанных элементов

Возможны два вида их соединения – согласное и встречное. Если считать, что звездочками отмечены начала обмоток, то при согласном включении начало второй подключается к концу первой (рис. 30.1, а). Токи в обеих катушках направлены одинаково относительно одноименных зажимов: от начала к концу. При встречном включении катушек конец второй присоединяется к концу первой (рис. 30.1, б).

Напряжение на каждой из катушек содержит три составляющих: падение напряжения на активном сопротивлении, напряжение самоиндукции и напряжение взаимной индукции:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I} R_1 + \dot{I} j\omega L_1 \pm \dot{I} j\omega M \\ \dot{U}_2 &= \dot{I} R_2 + \dot{I} j\omega L_2 \pm \dot{I} j\omega M \end{aligned} \right\} \quad (30.1)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2. \quad (30.2)$$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2}{\dot{I}} = Z_1 + Z_2 \pm 2Z_M$$

входное сопрот.

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1, \quad L = L_1 + L_2 \pm 2M, \quad x = x_1 + x_2 \pm 2x_M,$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2, \quad \text{причем } x_{\text{согл}} = x_1 + x_2 + 2x_M, \quad x_{\text{встр}} = x_1 + x_2 - 2x_M$$

$$Z_M = j\omega M = jx_M \text{ т.е. } x_{\text{согл}} > x_{\text{встр}}.$$

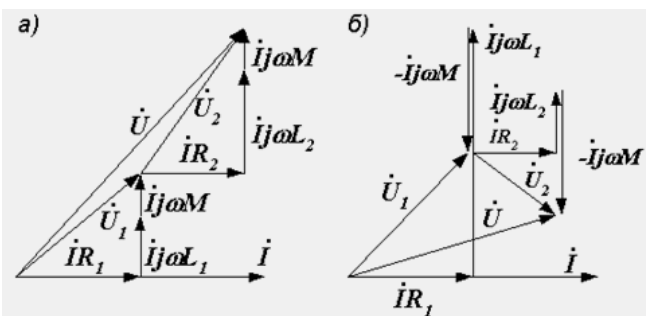


Рис. 30.1. Векторные диаграммы последовательной цепи при согласном (а) и встречном (б) включении

№30 Параллельное соединение индуктивно-связанных элементов. Векторная диаграмма.

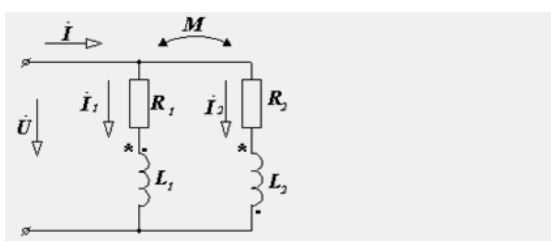


Рис. 31.1. Параллельное соединение индуктивных элементов

Первый случай отмечен на схеме звездочками, второй * точками. Запишем уравнения Кирхгофа для рассматриваемой цепи и решая их, получим выражения, определяющие токи:

$$\begin{cases} \dot{U} = Z_1 \dot{I}_1 \pm Z_M \dot{I}_2, \\ \dot{U} = Z_2 \dot{I}_2 \pm Z_M \dot{I}_1, \end{cases}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U} \frac{Z_2 \mp Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2}, \quad \dot{I}_2 = \dot{U} \frac{Z_1 \mp Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2},$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{U} \frac{Z_1 + Z_2 \mp 2Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2}.$$

В этих уравнениях $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$, $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$, $Z_M = j\omega M$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Z_1 Z_2 - Z_M^2}{Z_1 + Z_2 \mp 2Z_M}.$$

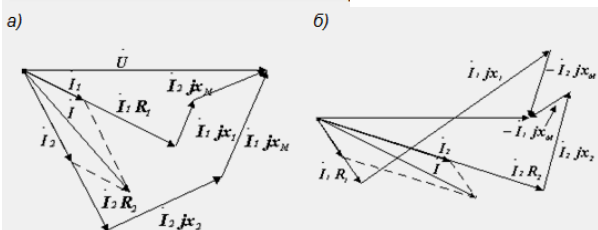


Рис. 31.2. Векторные диаграммы для параллельного соединения индуктивно связанных элементов

№31 Расчет сложной электрической цепи при магнитосвязанных элементах

№32 Развязка магнитных связей.

Замена исходной схемы с магнитносвязанными катушками эквивалентной схемой без магнитных связей называется развязкой магнитных связей или магнитной развязкой. Магнитная развязка электрических схем применяется для упрощения их расчета. После выполнения магнитной развязки к расчету схемы применим любой метод расчета сложных схем.

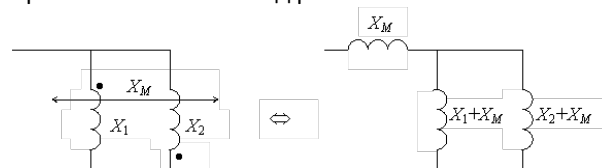


Рис. 76

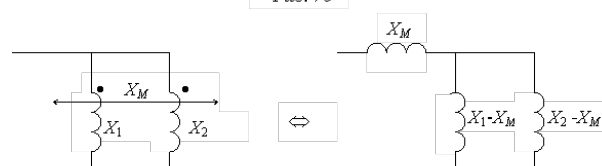


Рис. 75

№33 Воздушный трансформатор.

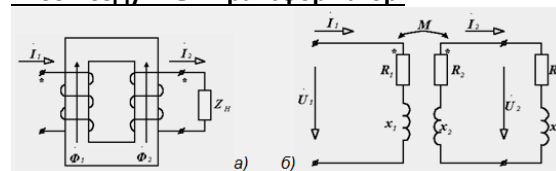


Рис. 35.1. Трансформатор и его схема замещения

К его первичной обмотке подводится напряжение источника питания, а ко вторичной – подключается нагрузка. Одноименными зажимами обмоток являются их верхние выводы. Ток первичной обмотки I_1 создает в магнитопроводе магнитный поток Φ_1 , который в свою очередь во вторичной обмотке вызывает появление тока I_2 . Создаваемый им магнитный поток Φ_2 в соответствии с принципом Ленца препятствует потоку Φ_1 , т.е. направлен ему навстречу. Направление тока I_2 , соответствующее показанному на схеме потоку Φ_2 , определяем по правилу правой руки.

Запишем уравнения второго закона Кирхгофа для первичной и вторичной цепей трансформатора, учитывая, что его обмотки имеют встречное включение:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1(R_1 + jx_1) - \dot{I}_2 jx_M, \\ 0 = \dot{I}_2(R_2 + jx_2 + R_H + jx_H) - \dot{I}_1 jx_M. \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_M \\ 0 = \dot{I}_2 Z_2 - \dot{I}_1 Z_M \end{cases}$$

ЭДС, наведенная во вторичной обмотке трансформатора, равна сумме падений напряжений на всех элементах его вторичного контура. Подставляя $I_2 Z_H = U_2$, получим: $U_2 = E_2 M - I_2 Z_2$.

На рис. 35.2 изображена векторная диаграмма трансформатора. Ее построение начинаем со вторичного тока I_2 . Ориентируясь на его направление, проводим векторы напряжений на всех элементах

вторичной цепи. Их сумма равна ЭДС E_{2M} . Так как в формуле, определяющей ее величину, присутствует множитель j , поворачивающий вектор на четверть оборота, то ток проводим под углом 90° к E_{2M} в сторону отставания. Определив направление I_1 , строим векторы $I_1 R_1$ и $I_1 jX_1$, которые в сумме с $I_2 jX_M$ – дают U_1 .

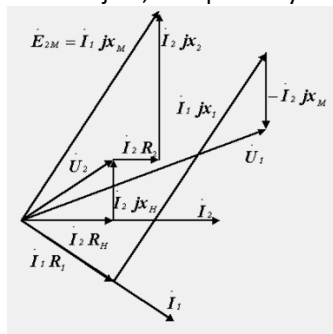


Рис. 35.2. Векторная диаграмма трансформатора

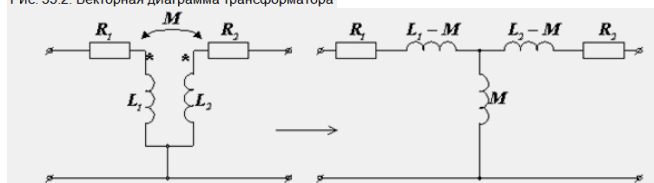


Рис. 35.3. Получение двухконтурной (Т-образной) эквивалентной схемы тр.

$$Z_{BH} = -\frac{Z_M^2}{Z_2} = -\frac{(jx_M)^2}{R_2 + jx_2} \cdot \frac{R_2 - jx_2}{R_2 - jx_2} = \frac{R_2 x_M^2 - jx_2 x_M^2}{R_2^2 + x_2^2}$$

$$R_{BH} = \frac{R_2 x_M^2}{R_2^2 + x_2^2}, \quad x_{BH} = -\frac{x_2 x_M^2}{R_2^2 + x_2^2}$$

№34 Получение трехфазной системы ЭДС. Способы соединения обмоток генератора.

Трехфазная система состоит из трех электрических цепей или электрических схем (фаз), параметры режима (u, i) в которых сдвинуты во времени на $\Delta\omega t = 2\pi/3 = 360^\circ/3 = 120^\circ$.

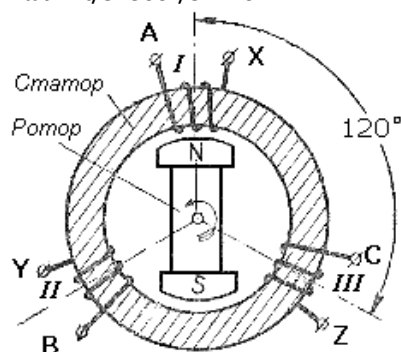


Рис. 64. Схема трехфазного генератора

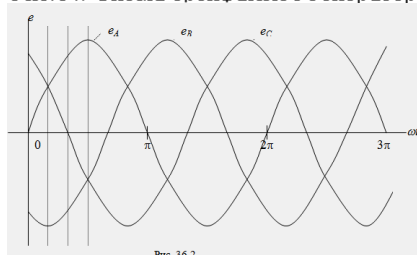


Рис. 36.2

Между собой фазные обмотки генератора могут соединяться по двум различным схемам: звездой (γ) и треугольником (Δ).

№35 Соединение трехфазной нагрузки звездой, симметричный и несимметричный режим.

При соединении в звезду концы фазных обмоток (фаз) генератора соединяются в общую точку N, которая называется нулевой или нейтральной, а начала обмоток служат линейными выводами генератора A, B, C

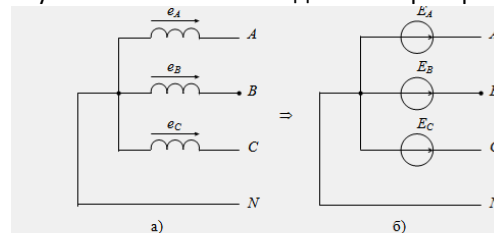


Рис. 37.1

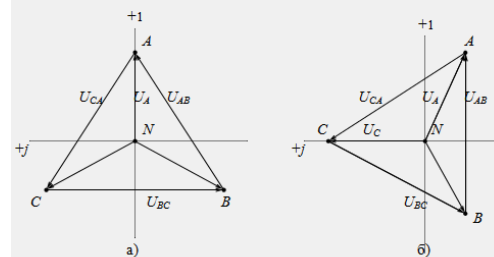


Рис. 37.2

В трехфазном генераторе различают фазные и линейные напряжения. Фазными называются напряжения между началами и концами фазных обмоток или между одним из линейных выводов A, B, C и нулевым выводом N. Фазные напряжения равны фазным ЭДС: $U_A = E_A$, $U_B = E_B$, $U_C = E_C$ (индекс N при фазных напряжениях опускается, так как $\phi_N = 0$). Линейными называются напряжения между двумя линейными выводами A, B, C. Линейные напряжения равны векторной разности двух фазных напряжений: $U_{AB} = U_A - U_B$; $U_{BC} = U_B - U_C$; $U_{CA} = U_C - U_A$.

Схема звезды применяется в том случае, если номинальное напряжение приемника соответствует (равно) фазному напряжению генератора. При соединении в звезду концы фаз приемника объединяются в одну точку "n", называемую нулевой или нейтральной, а начала фаз подключаются к линейным выводам трехфазного генератора A, B, C линейными проводами. Если нулевая точка приемника "n" соединена с нулевой точкой генератора "N" нулевым проводом, то схема получила название звезды с нулевым проводом (рис. 38.1а). При отсутствии нулевого провода схема носит название звезды без нулевого провода (рис. 38.1б)

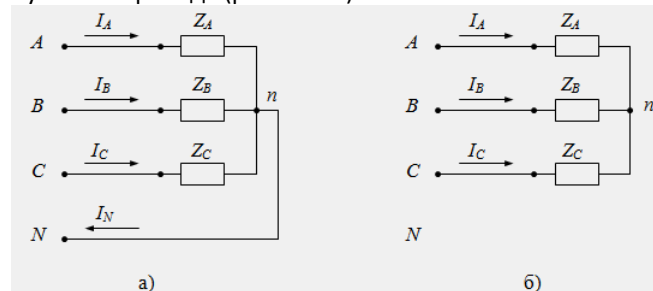


Рис. 38.1

Токи, протекающие в линейных проводах по направлению от генератора к приемнику, называются линейными.

Токи, протекающие в фазах приемника по направлению от начал к концам, называются фазными. В схеме звезды фазы приемника включены

последовательно с линейными проводами и по ним протекают одни и те же токи (I_A , I_B , I_C). Поэтому для схемы звезды понятия линейные и фазные токи тождественны: $I_L = I_\Phi$.

Ток, протекающий в нулевом проводе от приемника к генератору, называется нулевым или нейтральным (I_N).

При симметричной нагрузке $Z_A=Z_B=Z_C$ ток в нулевом проводе $I_N=0$ и, следовательно, надобность в нем отпадает. Симметричные трехфазные приемники (например, трехфазные электродвигатели) включаются по схеме звезды без нулевого провода.

При несимметричной нагрузке относительная величина тока в нулевом проводе зависит от характера и степени не симметрии фазных токов. Как правило, трехфазные приёмники стремятся спроектировать по возможности близкими к симметричным, поэтому ток в нулевом проводе в реальных условиях значительно меньше линейных (фазных) токов.

№36 Соединение трехфазной нагрузки треугольником, симметричный и несимметричный режим.

Обмотки трехфазного генератора теоретически можно включать по схеме треуголь-ника. В такой схеме конец каждой предыдущей фазы соединяется с началом последующей, а точки соединения служат линейными выводами генератора (рис. 37.3).

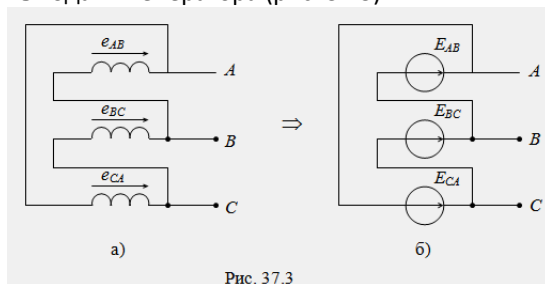


Рис. 37.3

При соединении фаз в треугольник в его контуре действует сумма фазных ЭДС: $\sum e = e_{AB} + e_{BC} + e_{CA}$. В реальных трехфазных генераторах технически невозможно обеспечить равенство нулю для суммарной ЭДС. Так как собственные сопротивления обмоток генератора малы, то даже незначительная по величине суммарная ЭДС $\sum e > 0$ может вызвать в контуре треугольника уравнительный ток, соизмеримый с номинальным током генератора, что привело бы к дополнительным потерям энергии и снижению КПД генератора. По этой причине обмотки трехфазных генераторов запрещается соединять по схеме треугольника.

Схема треугольника применяется в том случае, если номинальное фазное напряжение приемника соответствует (равно) линейному напряжению генератора. При соединении в треугольник конец каждой фазы соединяется с началом последующей, а точки соединения (вершины треугольника) подключаются к линейным выводам трехфазного генератора А, В, С линейными проводами (рис.38.3).

Токи, протекающие в фазах приемника по направлению от их начал к концам, называются фазными (I_{AB} , I_{BC} , I_{CA}). Токи, протекающие в линейных проводах по направлению от генератора к приемнику, называются линейными (I_A , I_B , I_C).

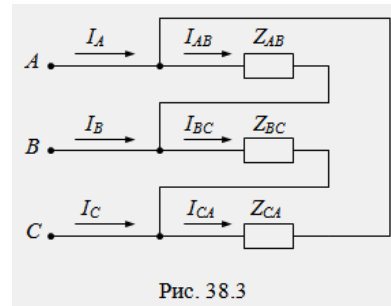


Рис. 38.3

В схеме треугольника фазные и линейные напряжения приемника тождественно равны (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}). В этой схеме к каждой фазе приемника подводится непосредственно линейное напряжение генератора, при этом отдельные фазы работают независимо друг от друга. Фазные токи определяются по закону Ома:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CB}}.$$

Линейные токи определяются из уравнений первого закона Кирхгофа для вершин треугольника, они равны геометрической разности фазных токов: $I_A = I_{AB} - I_{CA}$; $I_B = I_{BC} - I_{AB}$; $I_C = I_{CA} - I_{BC}$.

В симметричном режиме фазные и линейные токи симметричны, при этом отношение их модулей составляет $I_L/I_\Phi = \sqrt{3}$.

При несимметричной нагрузке соотношение между линейными и фазными токами определяется уравнениями первого закона Кирхгофа. На рис. 38.4 показана векторная диаграмма токов и напряжений для произвольной трехфазной цепи при соединении фаз в треугольник.

№37 Мощность трехфазной цепи, расчет и схемы для измерения активной мощности.

Активная и реактивная мощности трехфазной цепи, как для любой сложной цепи, равны суммам соответствующих мощностей отдельных фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C,$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C,$$

В симметричном режиме мощности отдельных фаз равны, а мощность всей цепи может быть получена путем умножения фазных мощностей на число фаз:

$$P = 3P_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi,$$

$$Q = 3Q_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi,$$

$$S = 3S_\Phi = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_\Phi I_\Phi.$$

Следовательно, независимо от схемы соединения (звезда или треугольник) для сим-метричной трехфазной цепи формулы для мощностей имеют одинаковый вид:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{Вт}],$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{вар}],$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{ВА}].$$

В приведенных формулах для мощностей трехфазной цепи подразумеваются линейные значения величин U и I , но индексы при их обозначениях не ставятся.

Для измерения активной мощности всей трехфазной цепи в зависимости от схемы соединения фаз нагрузки и ее характера применяются различные схемы включения измерительных приборов.

Для измерения активной мощности симметричной трехфазной цепи применяется схема с одним ваттметром, который включается в одну из фаз и измеряет активную мощность только этой фазы (рис. 40.1). Активная мощность всей цепи получается путем умножения показания ваттметра на число фаз: $P=3W=3U\phi\cos(\phi)$.

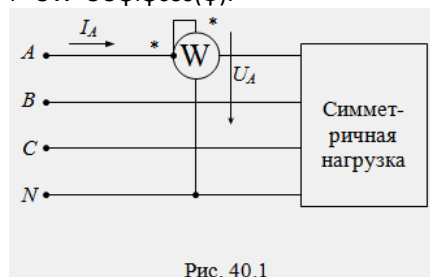


Рис. 40.1

Для измерения активной мощности в четырехпроводных трехфазных цепях (при наличии нулевого провода) применяется схема с тремя приборами (рис. 40.2), в которой производится измерение активной мощности каждой фазы в отдельности, а мощность всей цепи определяется как сумма показаний трех ваттметров:

$$P = W_1 + W_2 + W_3 = U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A + U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C.$$

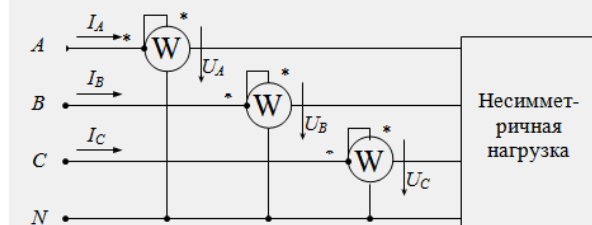


Рис. 40.2

Для измерения активной мощности в трехпроводных трехфазных цепях (при отсутствии нулевого провода) применяется схема с двумя приборами (рис. 40.3).

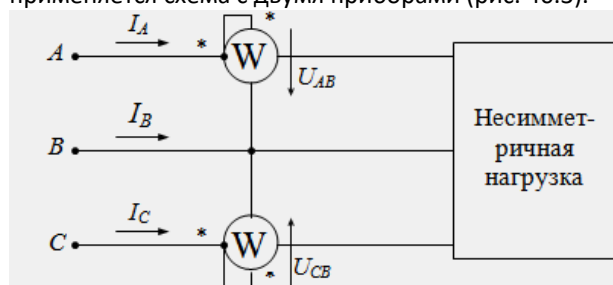


Рис. 40.3

№38 Симметричные составляющие несимметричных трехфазных цепей.

Метод симметричных составляющих применяется для расчета трехфазных цепей в несимметричных режимах. Несимметричные режимы в энергосистеме возникают при различных видах коротких замыканий. Расчет токов коротких замыканий – важная инженерная задача в электроэнергетике, которая решается методом симметричных составляющих.

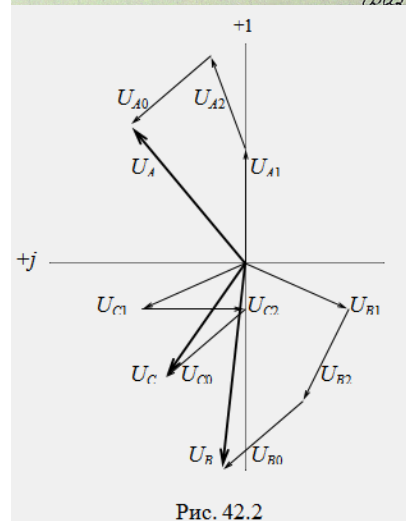
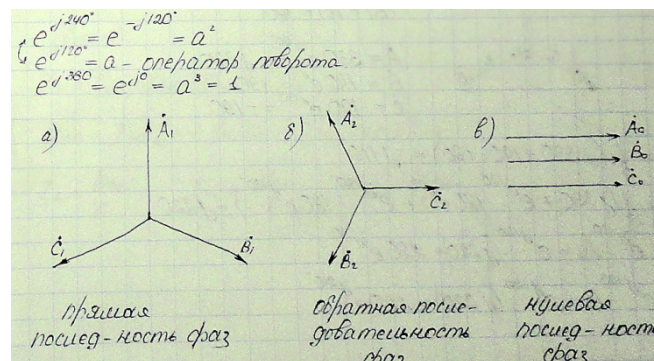


Рис. 42.2

Вектора исходной несимметричной системы определяются по принципу наложения как геометрические суммы соответствующих векторов симметричных составляющих:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0} \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} & (1) \\ \underline{U}_B = a^2 \cdot \underline{U}_{A1} + a \cdot \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} & (2) \\ \underline{U}_C = a \cdot \underline{U}_{A1} + a^2 \cdot \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} & (3) \end{cases}$$

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = \underline{U}_{A1}(1 + a^2 + a) + \underline{U}_{A2}(1 + a + a^2) + \underline{U}_{A0}(1 + 1 + 1) = 3\underline{U}_{A0}.$$

Из полученного уравнения следует формула для выделения симметричной составляющей нулевой последовательности из несимметричной системы

$$\underline{U}_{A0} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C).$$

вектор: