

План

- Задачи:
- 1. Безопасное использование электроэнергии.
- 2. Основные понятия и определения. Изучение методов расчета электрических цепей.

Литература:

- 1. Яцкевич В. В. Электротехника. Минск. Ураджай, 1981.*
- 2. Касаткин А. С., Немцов М.В. М., Электротехника. Москва, Высшая школа, 2000.*
- 3. Бородин И.Ф. и др. Основы электроники.- М.: КолосС, 2009.-207 с. ил.-*

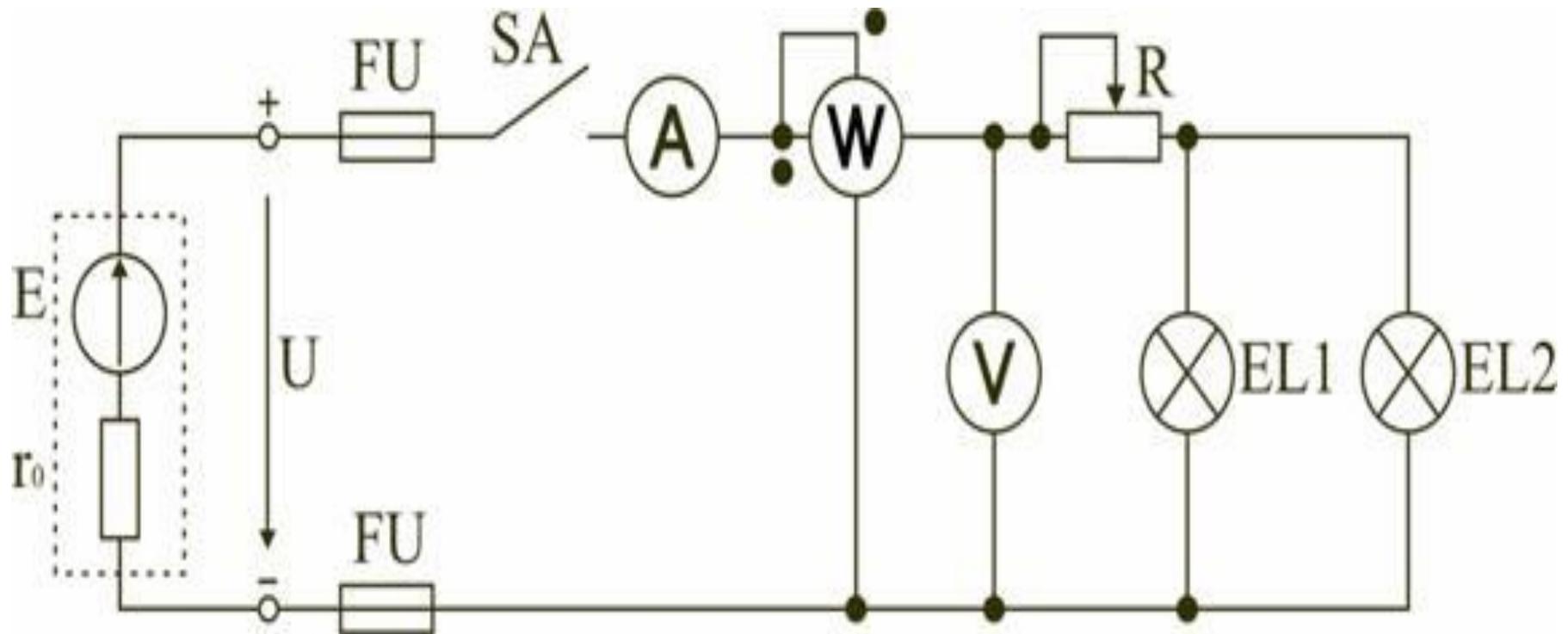
Электрические цепи

- Тема №1: Электрические цепи постоянного тока
- Тема №2: Электрические цепи синусоидального тока
- Тема №3: Трёхфазные цепи

Тема №1: Электрические цепи **постоянного тока.**

Основные понятия и определения.
Элементы электрической цепи и её
топология. Классификация цепей..
Законы Ома и Кирхгофа. Мощность
цепи постоянного тока. Баланс
мощностей.

Пример электрической цепи



Источник электрической энергии

- Источником электрической энергии (питания) называется устройство, преобразующее какой-либо вид энергии в электрическую.
- Источники, в которых происходит преобразование неэлектрической энергии в электрическую, называются первичными источниками. Вторичные источники – это такие источники, у которых и на входе, и на выходе – электрическая энергия (например, выпрямительные устройства).

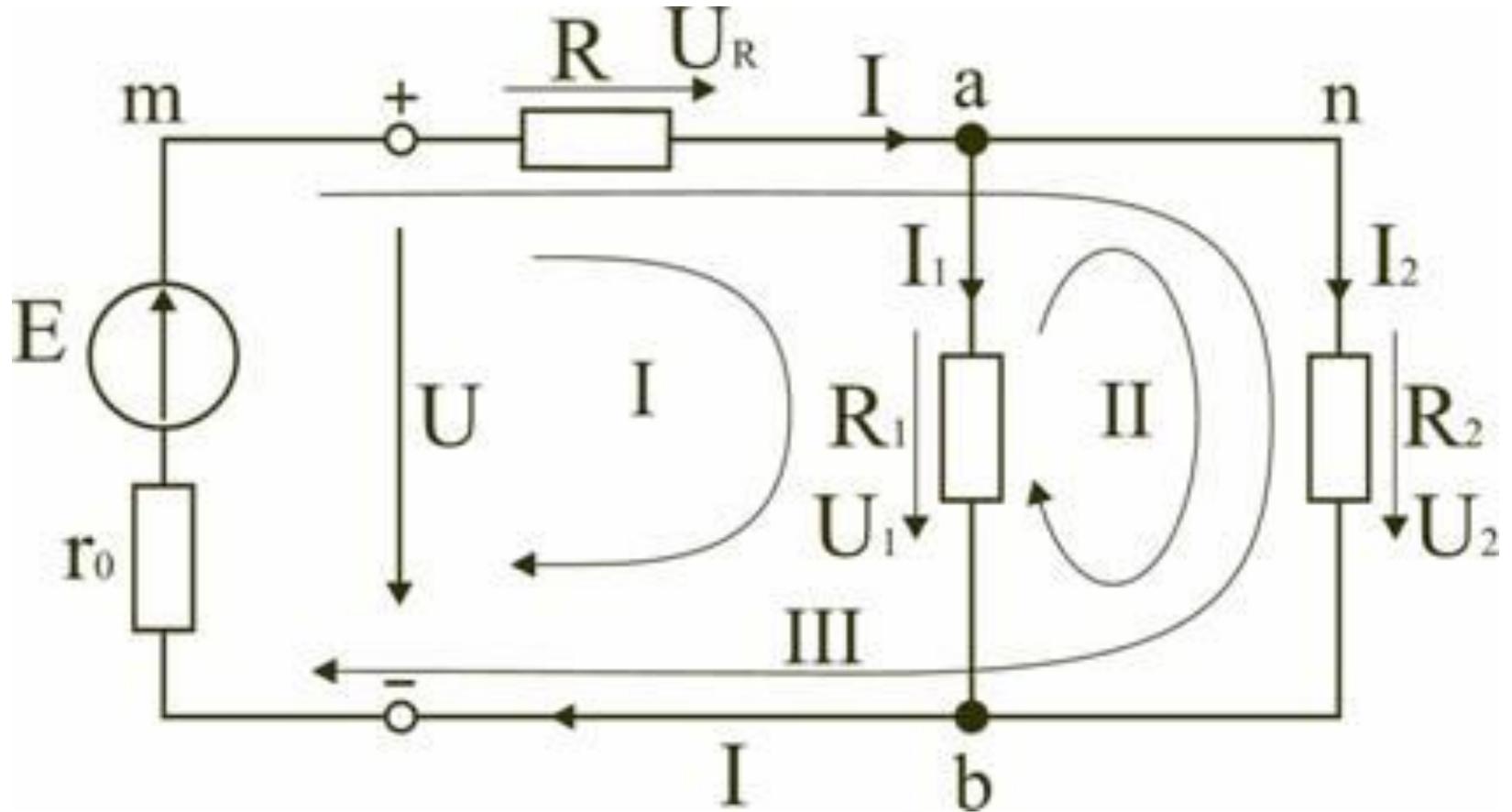
Постоянный электрический ток

- Постоянным электрическим током называется ток, который с течением времени не меняет величину и направление.
- Силой тока называется количество электричества, протекающее через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = Q/t \quad \left[\frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А} \right]$$

- где: Q - количество электричества, Кл.
t - время, с

Пример электрической цепи, представленной с использованием УГО



Элементы электрической цепи и её топология

- Ветвь электрической цепи (схемы) – участок цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных элементов. Схема на рис. 1.2 имеет три ветви: ветвь bma, в которую включены элементы r_0, E, R и в которой возникает ток I ; ветвь ab с элементом R_1 и током I_1 ; ветвь anb с элементом R_2 и током I_2 .
- Узел электрической цепи (схемы) – место соединения трех и более ветвей. В схеме на рис. 1.2 – два узла a и b. Ветви, присоединенные к одной паре узлов, называют параллельными. Сопротивления R_1 и R_2 (рис. 1.2) находятся в параллельных ветвях.
- Контур – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям. В схеме на рис. 1.2 можно выделить три контура: I – btab; II – anba; III – manbm, на схеме стрелкой показывают направление обхода контура.

Выбор направлений E , U , I

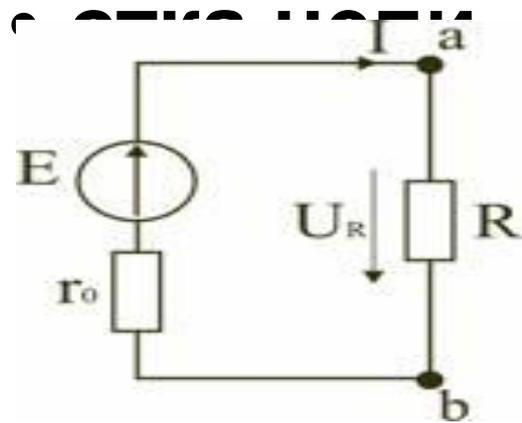
- **Условные положительные направления ЭДС источников питания, токов во всех ветвях, напряжений между узлами и на зажимах элементов цепи необходимо задать для правильной записи уравнений, описывающих процессы в электрической цепи или ее элементах. На схеме (рис. 1.2) стрелками укажем положительные направления ЭДС, напряжений и токов:**
- **а) для ЭДС источников – произвольно, но при этом следует учитывать, что полюс (зажим источника), к которому направлена стрелка, имеет более высокий потенциал по отношению к другому полюсу;**
- **б) для токов в ветвях, содержащих источники ЭДС – совпадающими с направлением ЭДС; во всех других ветвях произвольно;**
- **в) для напряжений – совпадающими с направлением тока в ветви или элемента цепи.**

Линейные и нелинейные электрические цепи

- Элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивление и др.) не зависят от тока в нем, называют линейным, например электропечь.
- Нелинейный элемент, например лампа накаливания, имеет сопротивление, величина которого увеличивается при повышении напряжения, а следовательно и тока, подводимого к лампочке.
- Следовательно, в линейной электрической цепи все элементы – линейные, а нелинейной называют электрическую цепь, содержащую хотя бы один нелинейный элемент.

Основные законы цепей постоянного тока

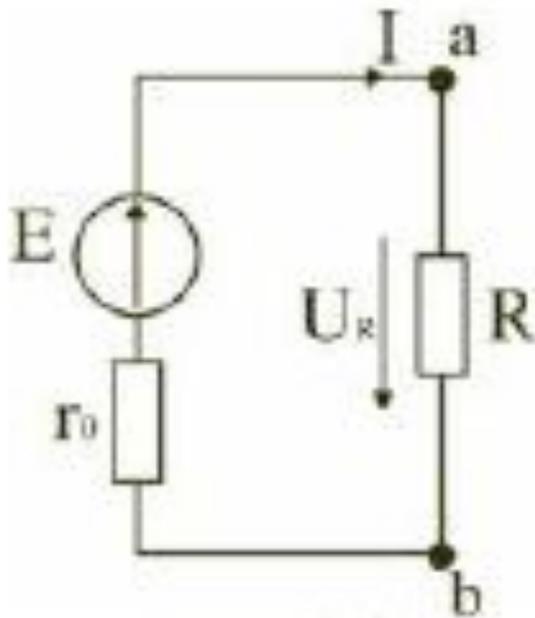
- Закон Ома для участка цепи



$$I = U_r/R, U_r = IR$$

Основные законы цепей постоянного тока

Закон Ома для всей
цепи



$$I = \frac{E}{R_{\Sigma}} = \frac{E}{r_0 + R}$$

$$R_{\Sigma} = r_0 + R$$

Основные формулы по теме

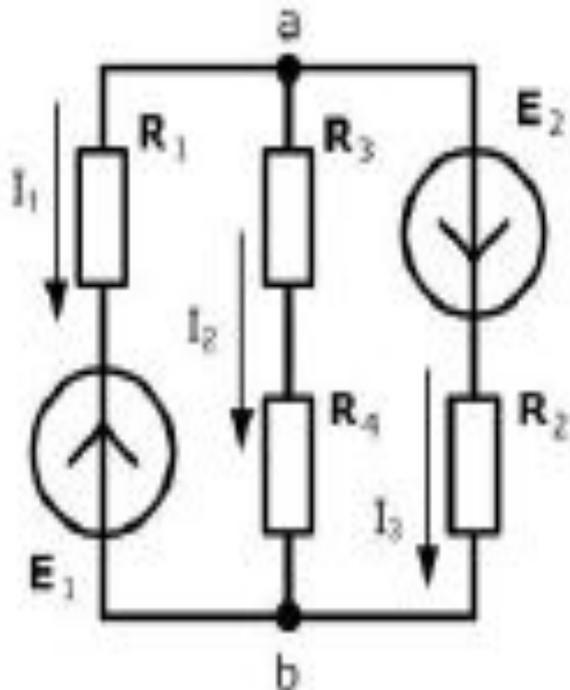
22.11.2018

Формулы электротехники

$I = U / R$ $U = IR$ $R = U / I$	Закон ОМА, где: I - Сила тока, А; U - Напряжение, В; R- Электрическое сопротивление проводника, Ом
$I = E / (R+r)$	Закон ОМА для замкнутой цепи: E- э.д.с. источника; r - внутреннее сопротивление э.д.с.; R - сопротивление внешней цепи, Ом;

Основные законы цепей постоянного тока

- Закон Ома для всей цепи



E_1, E_2 - источники напряжения

R_1, R_2 - внутренние сопротивления источников

R_3, R_4 - сопротивления

I_1, I_2, I_3 - токи ветвей цепи

$$I_1 = (U_{ab} - E_1) / R_1 \quad (1.17)$$

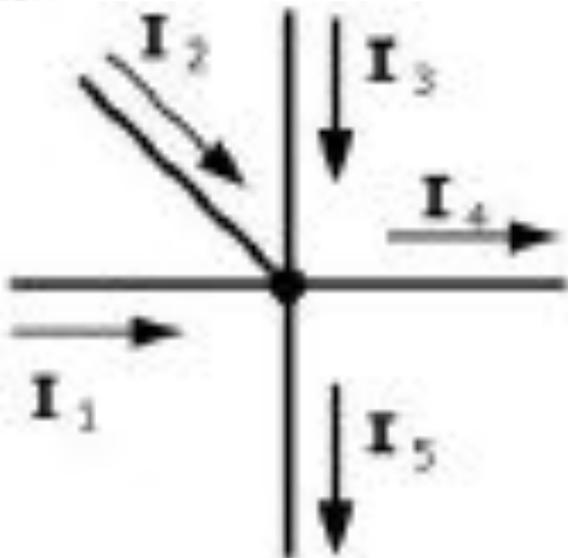
$$I_2 = U_{ab} / (R_3 + R_4) \quad (1.18)$$

$$I_3 = (U_{ab} + E_2) / R_2 \quad (1.19)$$

Основные законы цепей постоянного тока

- Первый закон Кирхгофа - алгебраическая сумма всех токов, сходящихся в узле равна нулю.

$\sum_{k=1}^n I_k = 0$ (1.20), где n – количество ветвей, сходящихся в узле.



$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0, \text{ либо} \\ I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$

Основные законы цепей постоянного тока

- **Второй закон Кирхгофа** - в любом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений в отдельных сопротивлениях.
- Данный закон применим к любому замкнутому контуру электрической цепи.

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k \quad (1.21), \text{ где: } n - \text{ кол-во ЭДС в контуре,} \\ m - \text{ кол-во сопротивлений в контуре}$$

Электрическая энергия и мощность источника питания

- В действующей цепи электрическая энергия источника питания преобразуется в другие виды энергии. На участке цепи с сопротивлением R в течение времени t при токе I расходуется электрическая энергия

$$W = I^2 R t.$$

МОЩНОСТЬ

$$P = \frac{W}{t} = I^2 R = UI.$$

Баланс мощностей.

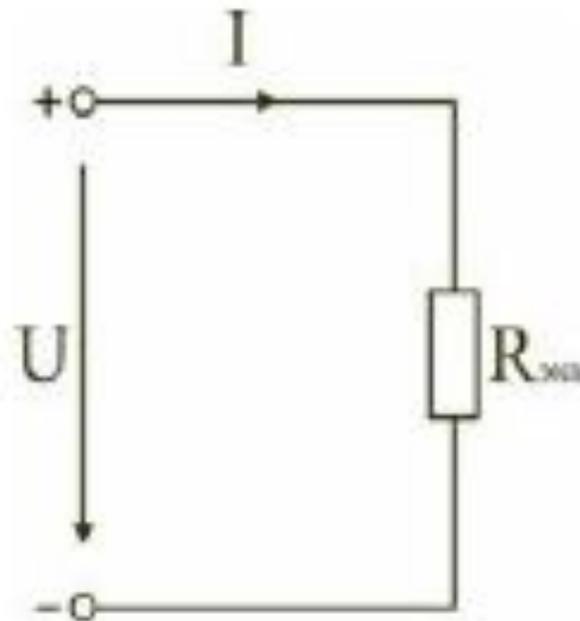
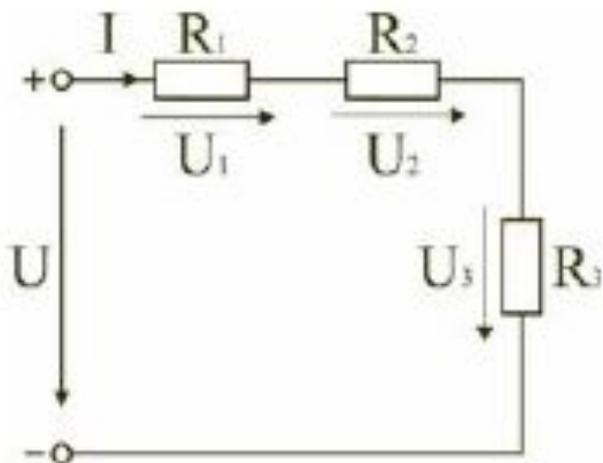
- При составлении уравнения баланса мощностей следует учесть, что если действительные направления ЭДС и тока источника совпадают, то источник ЭДС работает в режиме источника питания, и произведение $E I$ подставляют в (1.8) со знаком плюс. Если не совпадают, то источник ЭДС работает в режиме потребителя электрической энергии, и произведение $E I$ подставляют в (1.8) со знаком минус. Для цепи, показанной на рис. 1.2 уравнение баланса мощностей запишется в виде:

$$EI = I^2 (r_0 + R) + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

Основные формулы по теме

1-й закон Кирхгофа (для узла)	$\sum_{i=1}^n I_i = 0$	I_i — токи в отдельных ответвлениях, сходящихся в одной точке, А; $i = 1, 2, \dots, n$;
2-й закон Кирхгофа (для замкнутого контура)	$\sum I r = \sum E$	E — ЭДС, действующая в контуре, В;
Распределение тока в двух параллельных ветвях цепи переменного тока	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$	r — сопротивление отдельных участков, Ом I_1 — ток первой ветви, А; I_2 — ток второй ветви А; Z_1 — сопротивление первой ветви, Ом; Z_2 — сопротивление второй ветви, Ом

Электрическая цепь с последовательным соединением элементов



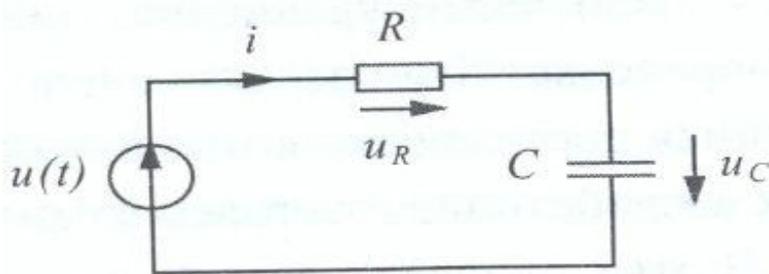
$$U = U_1 + U_2 + U_3 \text{ ИЛИ } IR_{\text{экв}} = IR_1 + IR_2 + IR_3,$$

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Ёмкость + индуктивность в цепи постоянного тока

Конденсатор

$$u_R + u_C = u(t); \quad u_R = Ri; \quad i = C \frac{du_C}{dt}$$



a)

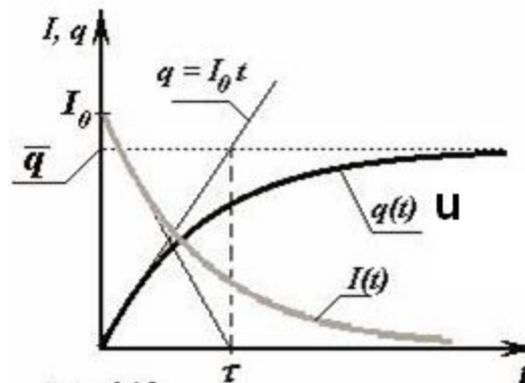
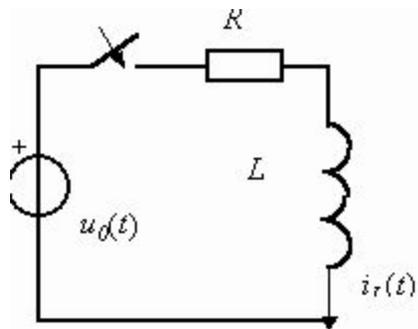


Рис. 146

τ - Постоянная времени



ИНДУКТИВНОСТЬ

Вначале эдс
самой индукции
будет
препятствовать
увеличению тока.

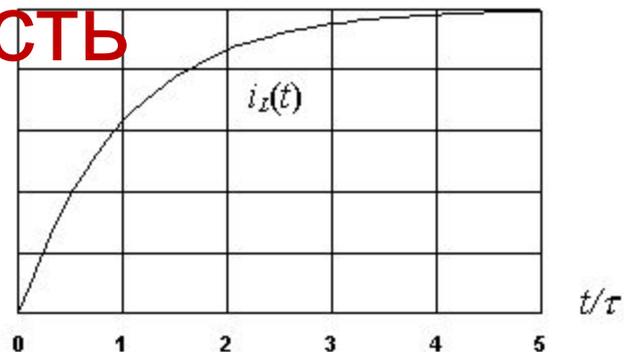
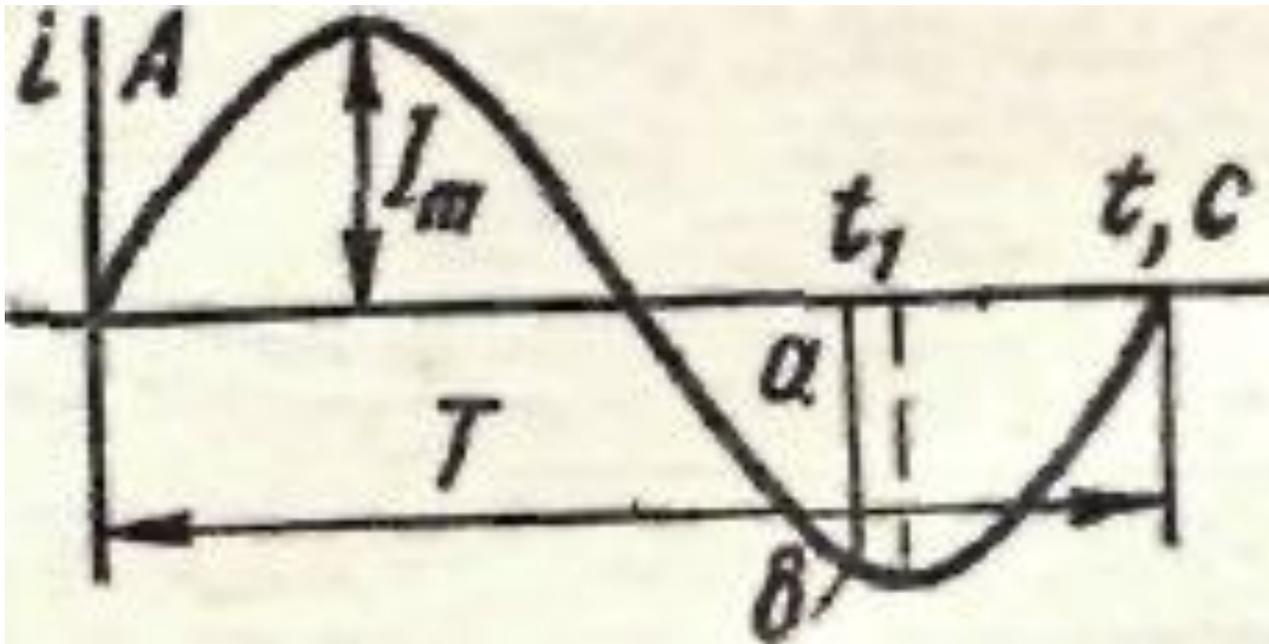


рис. 1.9.

Электрические цепи синусоидального тока

Цепи однофазного синусоидального тока.

Основные соотношения в цепи синусоидального тока.



Цепи однофазного синусоидального тока.

Основные соотношения в цепи синусоидального тока.

- $f = 50$ Гц,
- $T = 0.02$ с $f = 1 / T$
- Синусоидальный ток. Если кривая изменения периодического тока описывается синусоидой или косинусоидой (см. рис.), то такой ток называют синусоидальным током

Цепи однофазного синусоидального тока.

- **Обозначения:**
- **Мгновенные значения:** i , u , e , p ;
- **Амплитудные значения:** I_m , U_m , E_m , P_m ;
- **Действующие значения:** I , U , E , P .

Получение синусоидальных ЭДС и тока

- В равномерное магнитное поле поместим рамку, состоящую из одного витка (рис. 5-2). Рамка вращается с постоянной угловой скоростью ω .
- *В соответствии с законом электромагнитной индукции в ней будет наводиться ЭДС*

$$e = -d\Phi/dt$$

Получение синусоидальных ЭДС и тока

$$e = -d\Phi/dt$$

Закон электромагнитной индукции

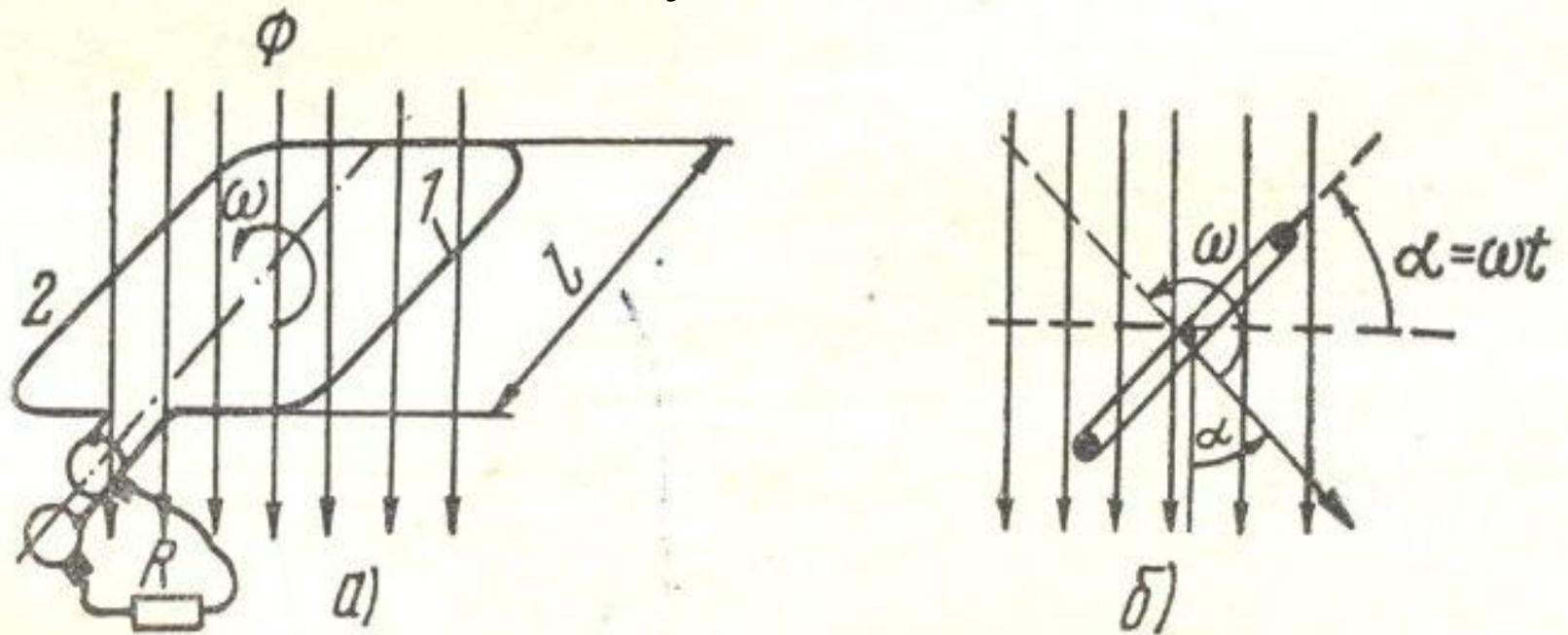


Рис. 5-2. Виток в однородном магнитном поле.

Получение синусоидальных эдс и тока

Преобразуем исходное выражение для наведенной эдс (e). См. рис. 5.2

$$e = -d\Phi/dt, \quad \Phi = BS \cos \alpha = \Phi_m \cos \alpha,$$

$$\Phi_m = BS$$

$$\alpha = \omega t$$

$$e = -d\Phi/dt = -d(\Phi_m \cos \omega t)/dt = \omega \Phi_m \sin \omega t,$$

Получение синусоидальных ЭДС и тока

Обозначим:

$$\omega \Phi_m = E_m, \text{ тогда}$$

$$e = E_m \sin \omega t$$

ЭДС витка, вращающегося в магнитном поле, изменяется во времени по синусоидальному закону. Если замкнуть концы витка на сопротивление R , то в цепи возникнет синусоидальный ток

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

Вывод: Получение синусоидальных ЭДС и тока

- *При всяком изменении магнитного потока через проводящий контур в этом контуре возникает электрический ток.*
- *В этом и заключается один из важнейших законов природы — закон электромагнитной индукции, открытый Фарадеем в 1831 г.*
- *Правило Лёнца. Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле уменьшает (компенсирует) изменение магнитного потока, являющееся причиной возникновения этого тока.*

Получение синусоидальных эдс и тока Правило Ленца

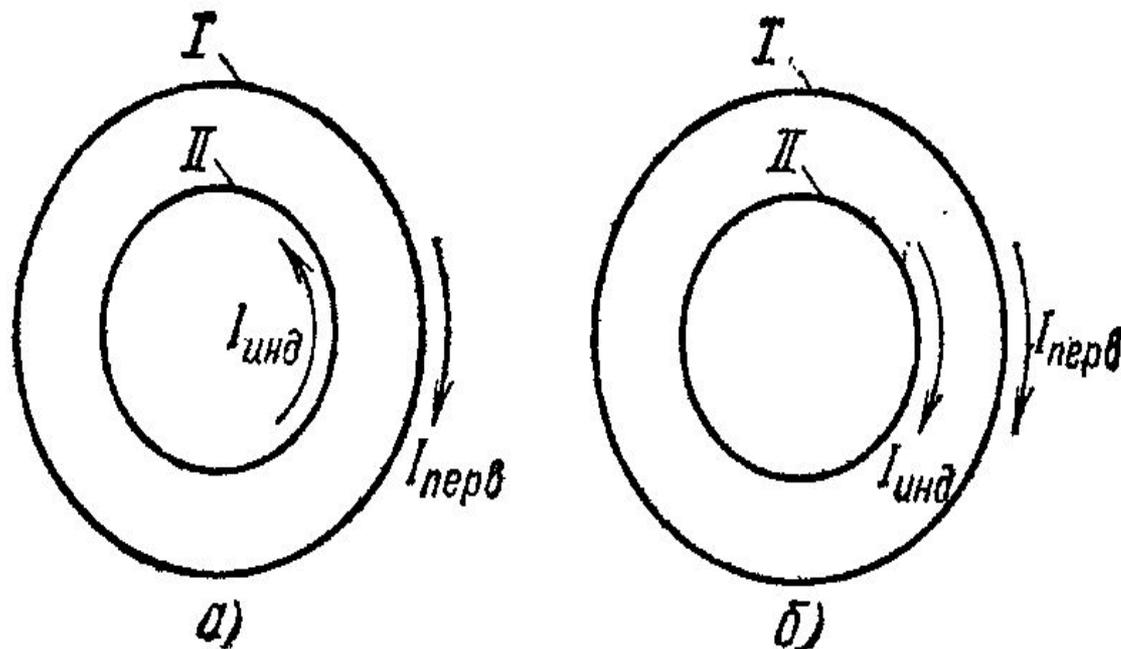


Рис 261. Связь между направлением первичного тока $I_{\text{перв}}$, создающего магнитное поле, и направлением индукционного тока $I_{\text{инд}}$:
а) при усилении магнитного поля; б) при ослаблении магнитного поля

Представление синусоидальных ЭДС и тока

- Синусоидальную функцию времени можно представить:
- а) графиком;
- б) уравнением $i = I_m \sin \omega t$;
- в) вращающимся радиус-вектором.

Последняя форма выражения синусоидальной функции наиболее наглядна и проста.

- Допустим, что вектор OA соответствует в принятом масштабе максимальному значению E_m синусоидальной функции $e = E_m \sin \omega t$. Он закреплен в одной точке и вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω ; угол $\alpha = \omega t$ непрерывно изменяется. Проекция вращающегося вектора OA на вертикальную ось в любой момент времени равна произведению длины вектора на $\sin \alpha$, т. е. она изменяется по закону синуса

Представление синусоидальных ЭДС и тока

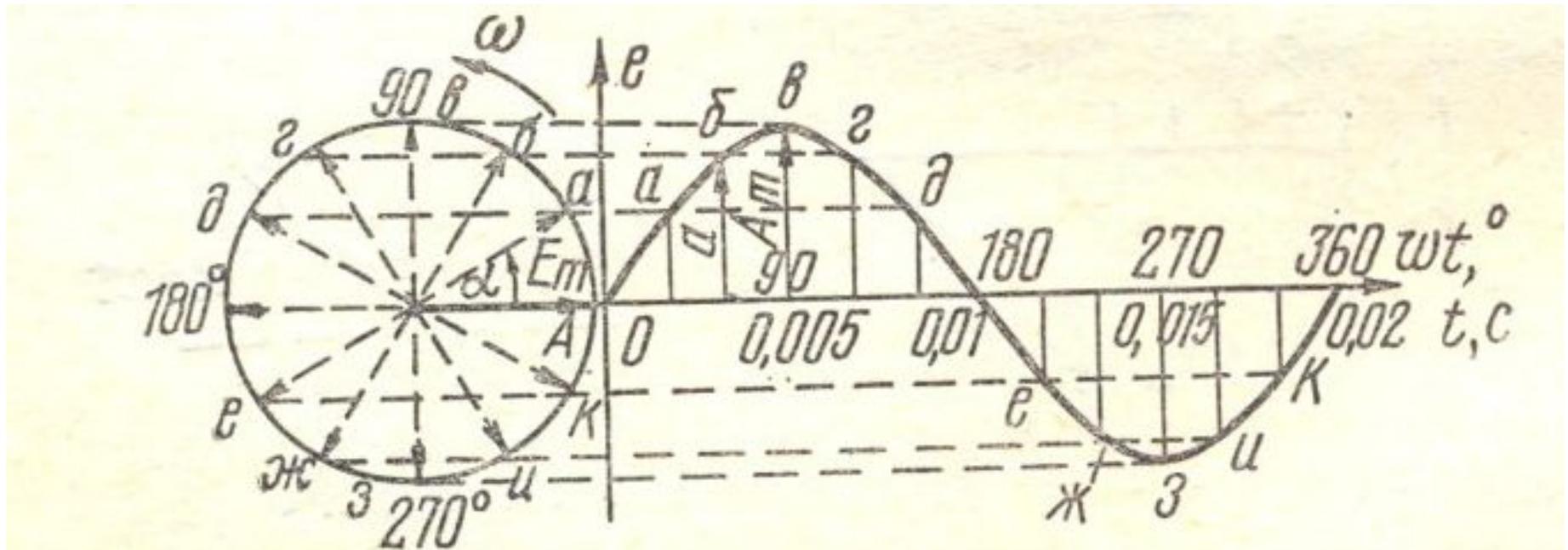
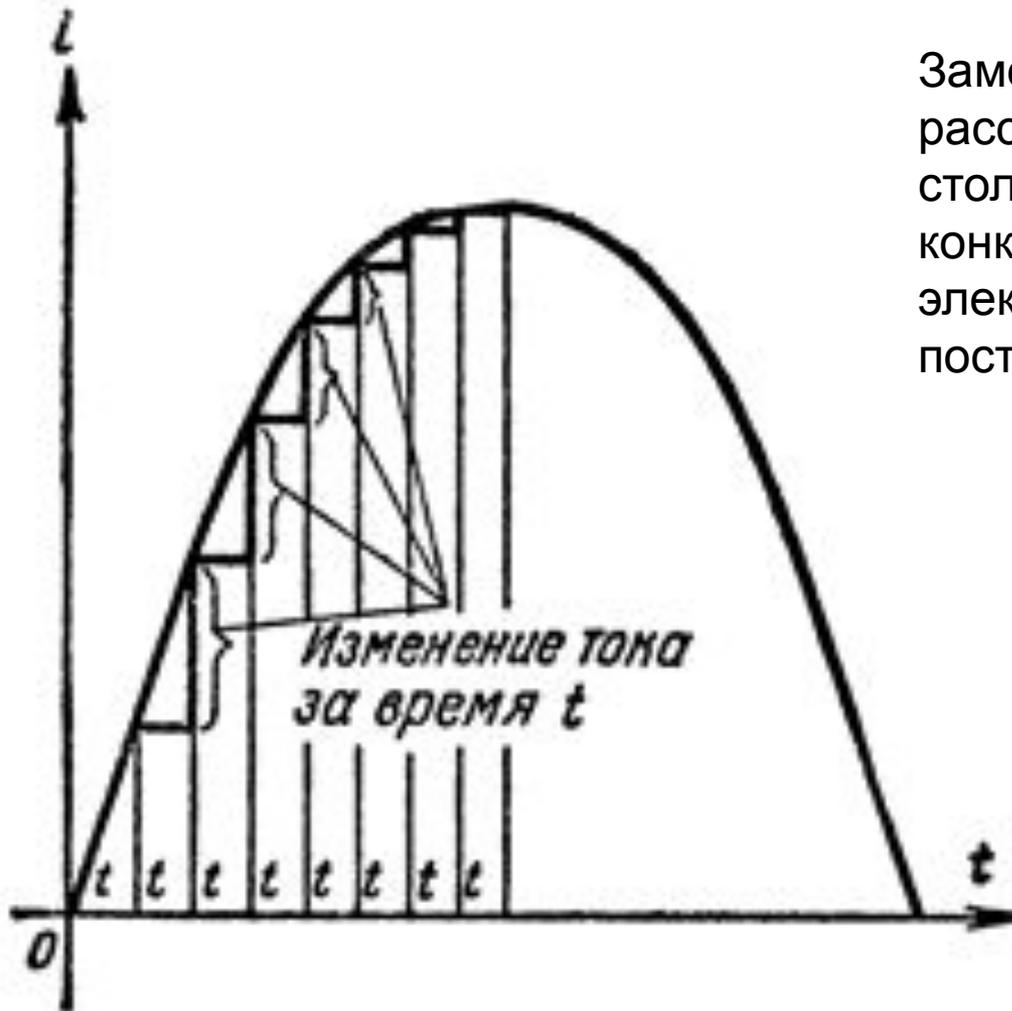


Рис. 5-3. Получение синусоиды путем вращения вектора

Действующие значения переменного тока

- Действующим значением переменного тока называется такой постоянный ток, который на одинаковом сопротивлении R за время, равное одному периоду, выделяет такое же количество тепла, что и данный переменный ток за то же время.
- Действующие значения обозначают большими буквами без индексов: I , U , E .

Замена синусоиды ломаной линией



Замена позволяет синусоиду рассматривать как сумму столбиков. В пределах конкретного столбика электрическая величина имеет постоянное значение.

Действующее значение переменного тока для
интервала времени Δt

$$\Delta W = Ri^2 \Delta t$$

Тогда для периода T
Имеем:

$$W \sim \int_0^T Ri^2 dt$$

Действующее значение переменного тока

Формула энергии для постоянного тока

$$W_{-} = RI^2 T$$

С учетом того, что :

$$W_{-} = W_{\sim}$$

Получим:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

где

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

Действующее значение переменного тока

После интегрирования и упрощения получим:

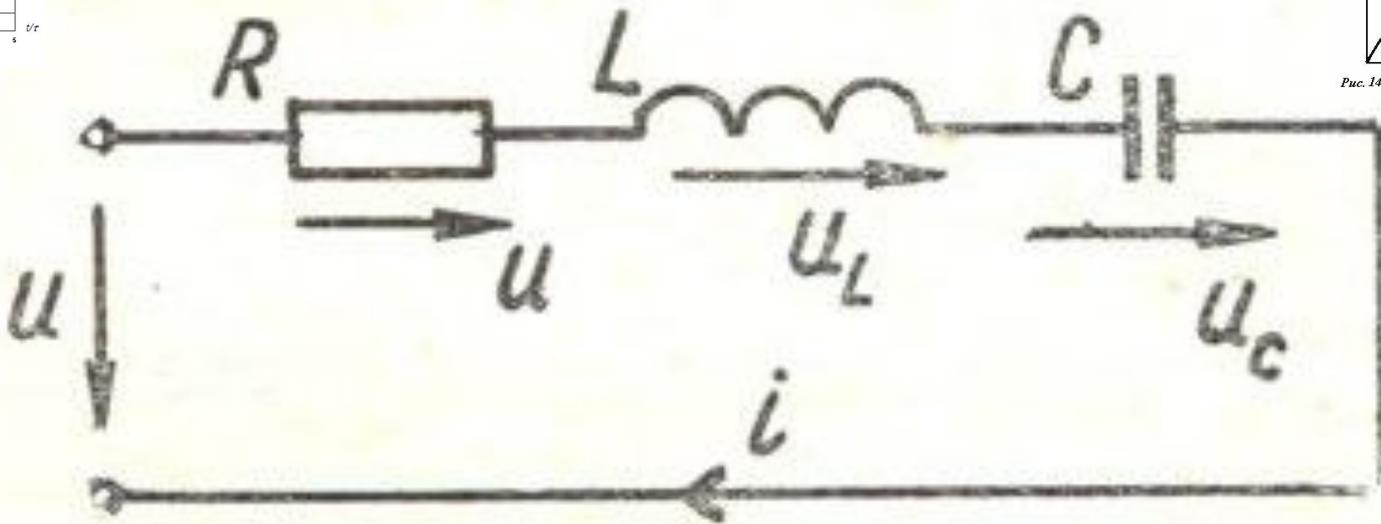
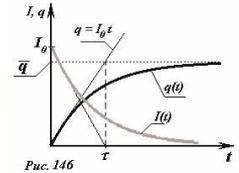
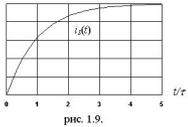
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$U = U_m / \sqrt{2}$$

$$E = E_m / \sqrt{2}$$

Здесь величины с индексом m , - амплитудные значения. Полученные соотношения необходимо учитывать при выборе диодов выпрямительных схем, а также напряжений сдвигающих конденсаторов.

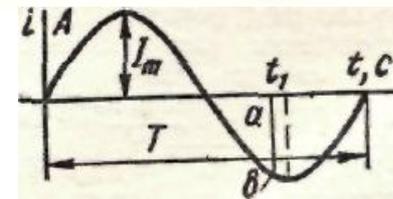
Активные и реактивные элементы в цепи синусоидального тока



Порассужда
токе

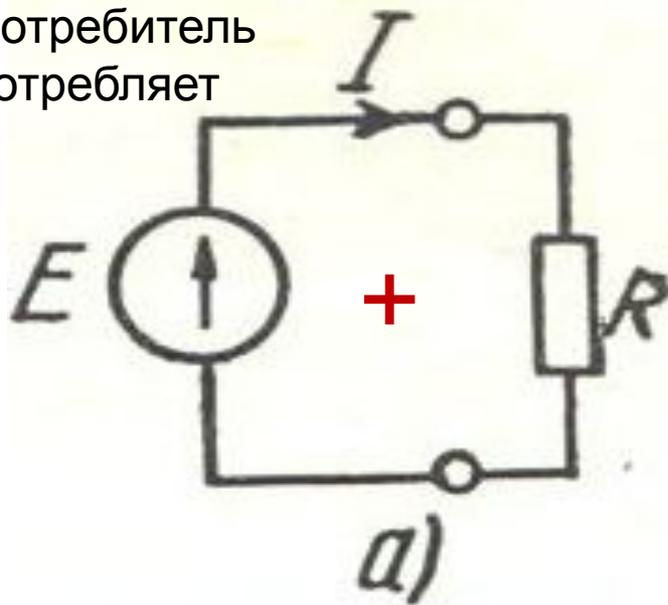
Рис. 6-2. Схема последовательного соединения элементов R , L и C .

Вначале вернуться к слайду № 21.

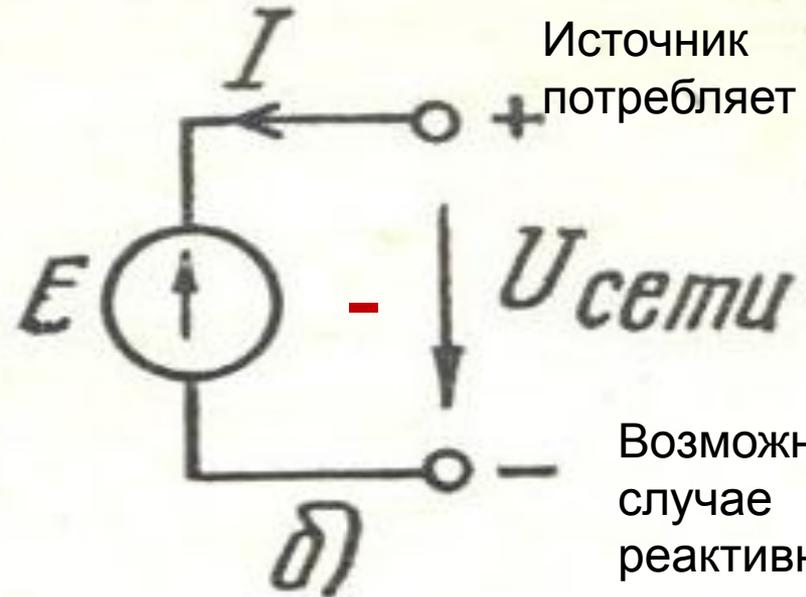


Положительная и отрицательная МОЩНОСТЬ

Потребитель
потребляет



Источник
потребляет



Возможно в
случае
реактивной
нагрузки

Рис. 8-2. Направление эдс и тока в источнике а) и потребителе б) электрической энергии.

Основные формулы

Активное сопротивление

$$W = \int_0^T p(t) dt$$

$$W = U_a IT$$

$$P = W/T = U_a I$$

$$U_a = RI$$

$$P = RI^2$$

Когда имеем дело с активной нагрузкой, процесс проходит аналогично цепи постоянного тока. При расчете мощности и энергии надо использовать действующее значение тока.

Мгновенная мощность в цепи с активным сопротивлением

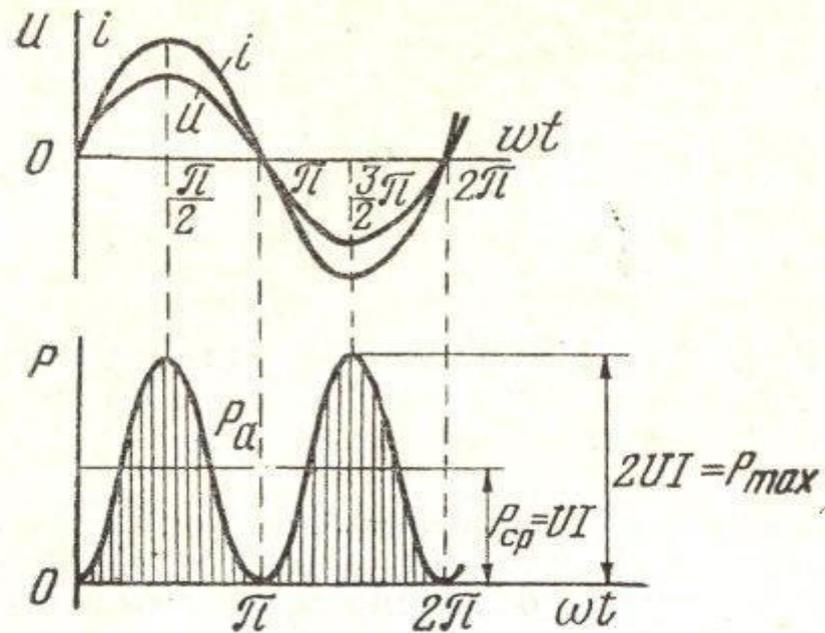


Рис. 8-3. График мгновенной мощности в цепи с активным сопротивлением.

На индуктивности напряжение опережает ток

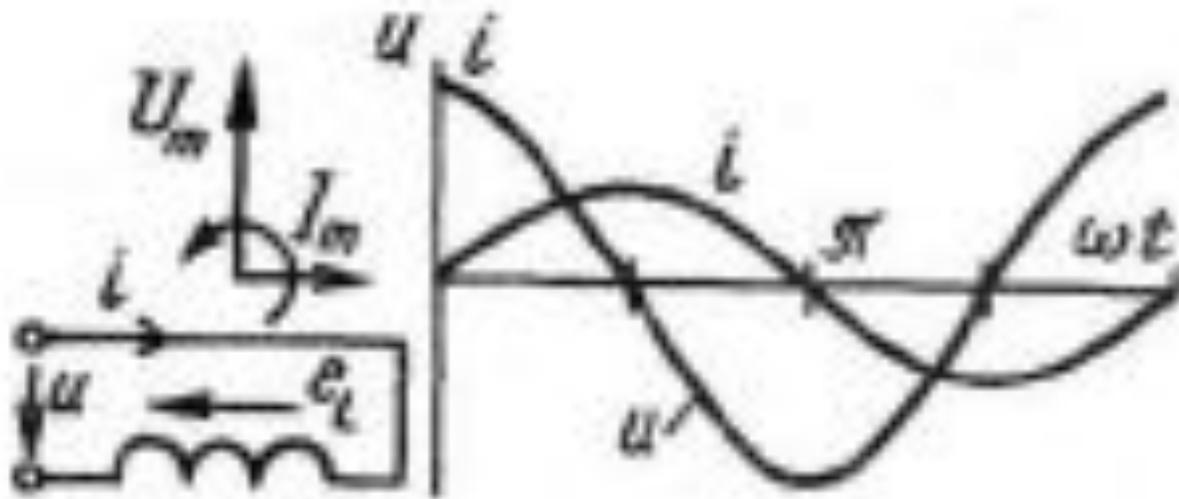


Рис. 5-9. Схема, векторная диаграмма и графики тока и напряжения цепи с индуктивностью.

Пусть в идеальной катушке, т. е. катушке, обладающей столь малыми R и C , что ими можно пренебречь, ток синусоидальный. По какому закону в такой цепи будет изменяться напряжение?

На индуктивности напряжение опережает ток

- При изменении силы тока по гармоническому закону
- $i = I_m \sin \omega t$,
- ЭДС самоиндукции равна:
- $e = -L di/dt = -L \omega I_m \cos \omega t$
- Так как $u = -e$, то напряжение на концах катушки оказывается равным:
- $U = L \omega I_m \cos \omega t = L \omega I_m \sin(\omega t + \pi/2) =$
- $= U_m \sin(\omega t + \pi/2)$, где $U_m = L \omega I_m$
- Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\pi/2$, или, что то же самое, колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на $\pi/2$.

Векторные диаграммы.

- Графики (временные диаграммы) синусоидальных функций позволяют наглядно представить их амплитуды и начальные фазы. Однако при расчетах электрических цепей над этими функциями приходится выполнять математические операции. Чтобы сложить графически (перестраивая диаграммы) или аналитически (преобразовывая уравнение синусоид) только две функции, например $i_1(t) + i_2(t)$, понадобится много времени.
- Расчет упрощается и становится наглядным, если изобразить синусоидальные функции векторами. Тогда операции над синусоидами сводятся к графическому сложению или вычитанию векторов. Смотри слайд №33

Векторные диаграммы.

- Один из векторов можно расположить произвольно, но остальные векторы по отношению к нему будут строго ориентированы. Совокупность векторов, изображающих токи и напряжения одной электрической цепи, называют векторной диаграммой.
- *Индуктивное и емкостное сопротивления в отличие от активного сопротивления зависят от угловой частоты тока и создают разность фаз между током и напряжением.*

Основные формулы Индуктивность

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

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

$$p_L = u_L i = U_{Lm} I_m \sin \omega t \cos \omega t$$

$$p_L = U_L I \sin 2\omega t$$

$p_L = u_L i$ равна нулю

Мгновенная мощность в цепи с индуктивным сопротивлением

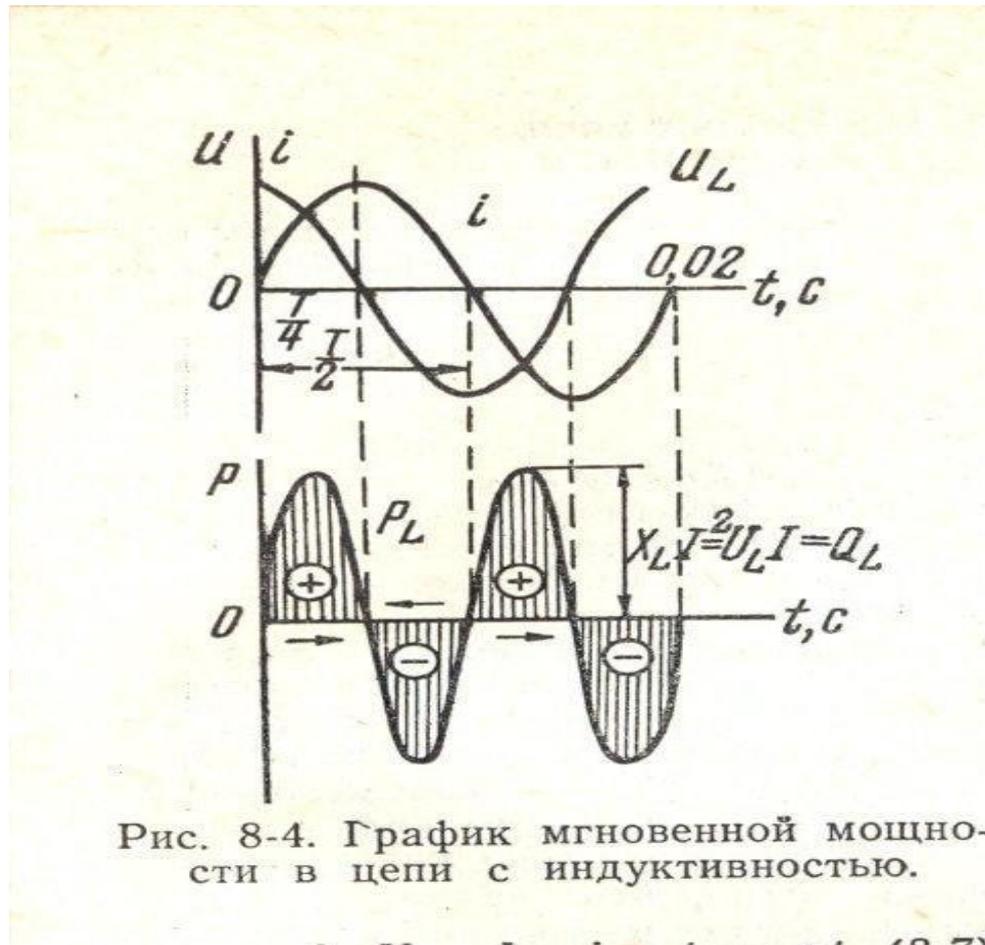


Рис. 8-4. График мгновенной мощности в цепи с индуктивностью.

На емкости ток опережает напряжение

Заряд емкости $q = uc$, где u – напряжение, c – значение емкости.
Определим ток - мгновенное значение .

$$i = dq / dt = Cdu/dt = Cd(U_m \sin \omega t) / dt = \omega C U_m \sin(\omega t + \pi/2),$$

на индуктивности наоборот.

Основные формулы

Емкость

$$p_C = ui = U_{Cm} I_m \sin \omega t \cos \omega t = \\ = U_C I \sin 2\omega t, \quad (8-12)$$

$$Q_C = U_C I = X_C I^2$$

Мгновенная мощность в цепи с емкостным сопротивлением

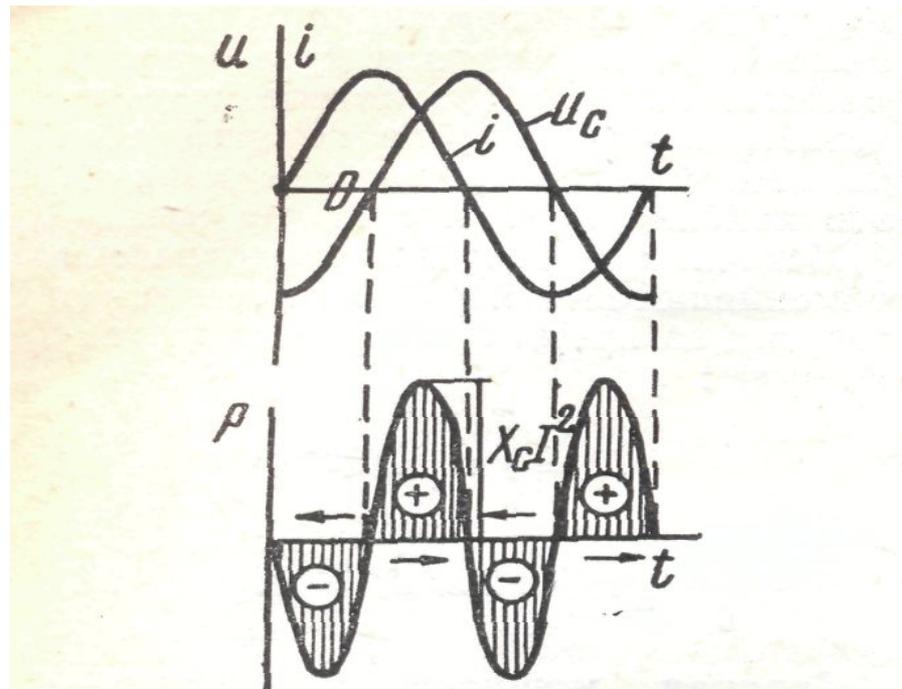


Рис. 8-5. График мгновенной мощности в цепи с емкостью.

Мгновенная мощность в цепи с емкостным и индуктивным сопротивлением

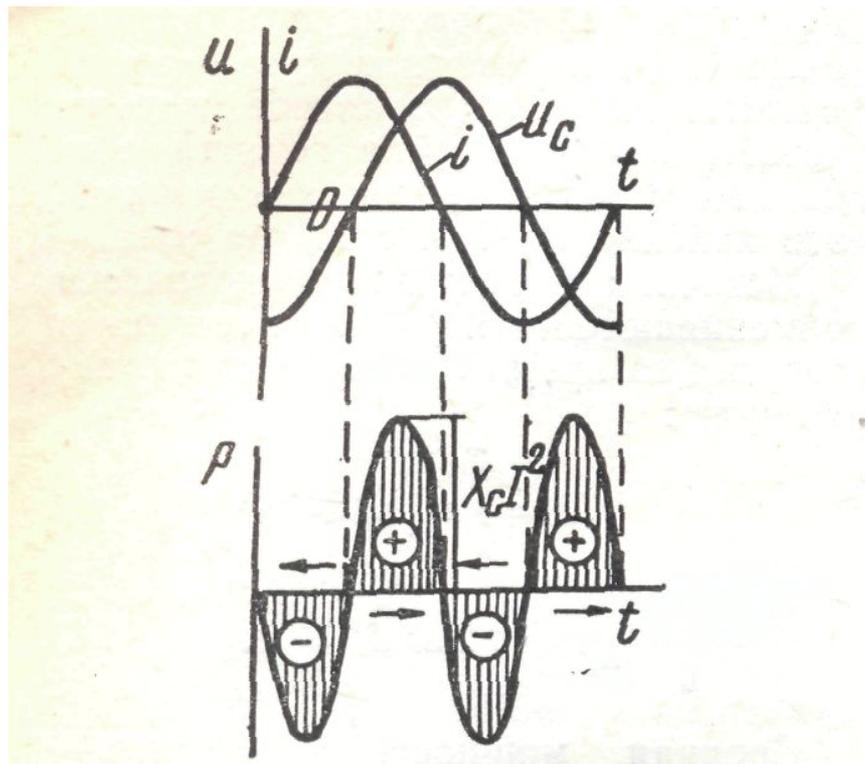


Рис. 8-5. График мгновенной мощности в цепи с емкостью.

$$X_C = 1/\omega C$$

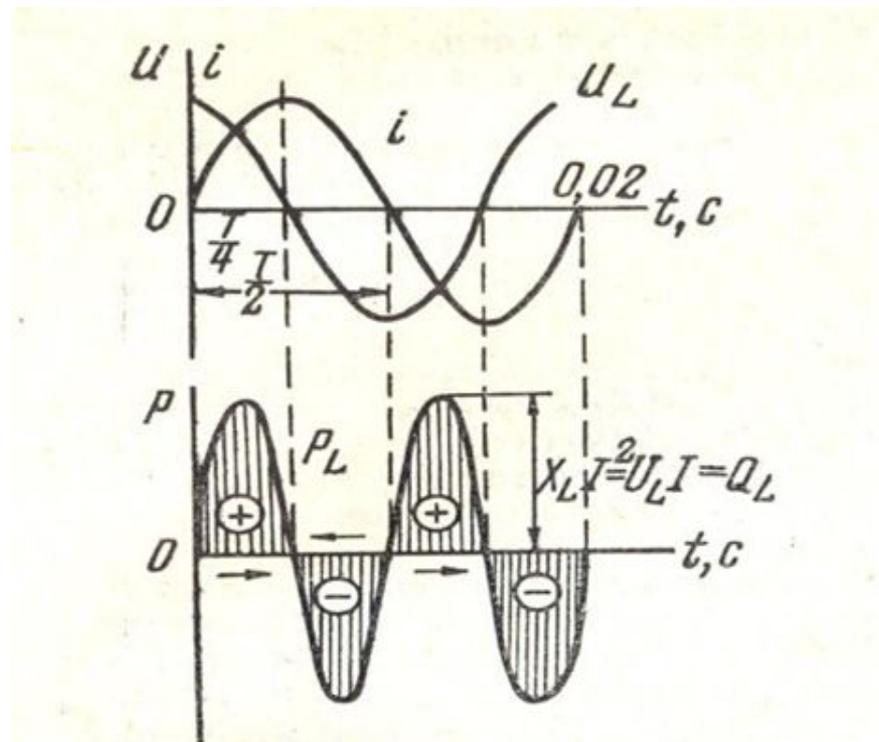
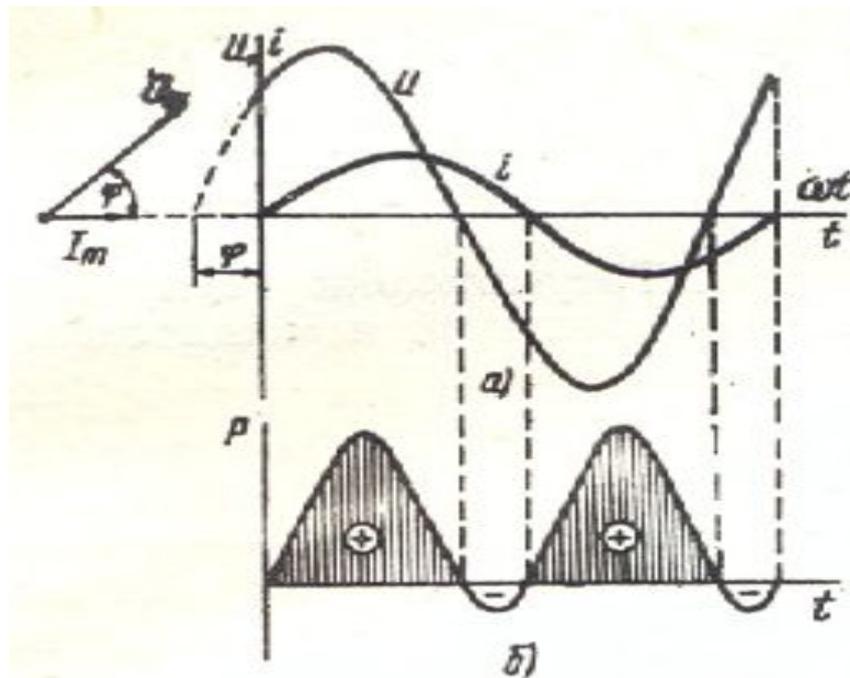


Рис. 8-4. График мгновенной мощности в цепи с индуктивностью.

$$Z_L = \omega L$$

Мгновенная мощность в цепи со смешанным (преимущественно индуктивным) сопротивлением



Основные формулы цепи со смешанным (преимущественно индуктивным) сопротивлением

$$P = W/T = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (2UI \cos \varphi \sin^2 \omega t + UI \sin \varphi \sin 2\omega t) dt$$

$$\int_0^T \sin^2 \omega t dt = T/2$$

$$P = UI \cos \varphi$$

Основные формулы цепи со смешанным (преимущественно индуктивным) сопротивлением

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ является важнейшим энергетическим фактором. Это видно из следующего примера.

Если энергию передавать при $\cos \varphi = 1$, то ток в цепи равен $I = P/U$. Если же $\cos \varphi = 0,5$, то $I = P/0,5U = 2P/U$, т. е. ток увеличивается в два раза.

Мощность в цепи переменного тока

- Цепь однофазного тока

$$P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

ИТОГ Если $X_L > X_C$

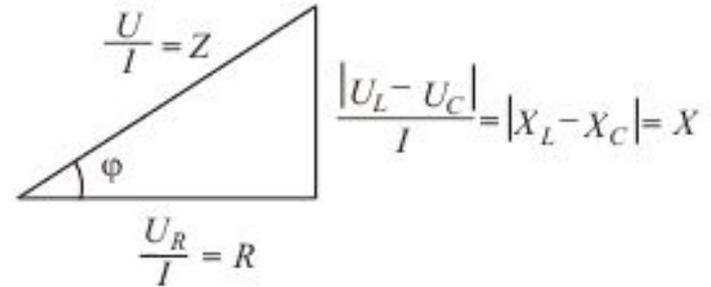
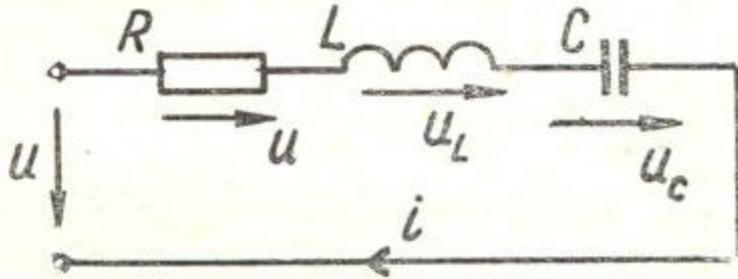


Рис. 6-2. Схема последовательного соединения элементов R , L и C .

1. Ток во всех элементах цепи в каждый момент времени одинаков $I = I_m \sin \omega t$
2. Сопротивление емкости равно $X_C = 1/\omega C$,
3. Сопротивление индуктивности равно $X_L = \omega L$,
4. $U_C = U_m \sin(\omega t - \pi/2)$,
5. $U_L = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$.

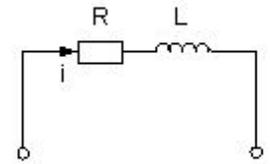
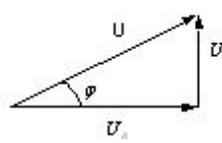
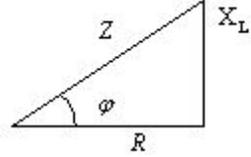
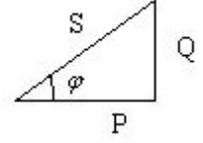
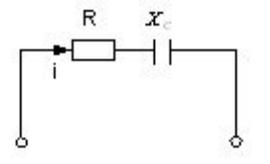
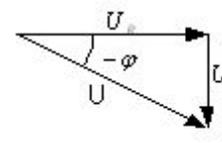
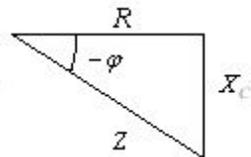
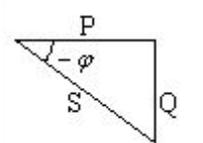
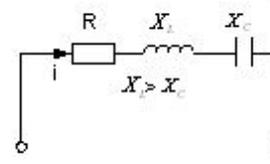
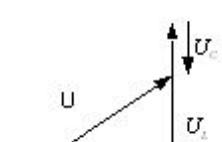
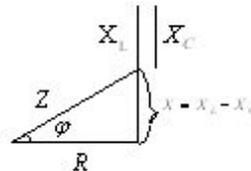
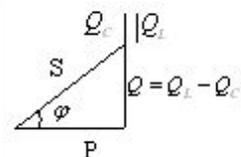
Основные формулы по теме

22.11.2018

Формулы электротехники

$P = UI \cos \varphi$	<p>Мощность цепи переменного тока, где: P - мощность, Вт U - напряжение, В I - сила тока, А $\cos \varphi$ - коэффициент мощности</p>
$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	<p>Полная мощность: S - полная мощность цепи, В•а P - активная мощность, Вт Q - реактивная мощность, Вар</p>
$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi$	<p>Активная мощность 3-фазной цепи переменного тока, где: P - мощность, Вт U - напряжение линейное, В I - ток линейный, А $\cos \varphi$ - углы сдвига токов по фазе</p>
$Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi$	<p>Реактивная мощность 3-фазной цепи переменного тока, где: Q - реактивная мощность, Вар U - напряжение линейное, В I - ток линейный, А $\sin \varphi$ - углы сдвига токов по фазе</p>
$S = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	<p>Полная мощность 3-фазной цепи переменного тока, где: P - активная мощность, Вт Q - реактивная мощность, Вар U - напряжение линейное, В I - ток линейный, А</p>

Различные варианты последовательного соединения элементов в цепях переменного тока.

Схема	Треугольник напряжений	Треугольник сопротивлений	Треугольник мощностей
 <p>$i = I_m \sin \omega t$</p>	 <p>$u = u_R + u_L$ $0 < \varphi < 90^\circ$</p>	 <p>$z^2 = R^2 + X_L^2$ $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$</p>	 <p>$S^2 = P^2 + Q^2$ $\varphi = \arctg \frac{Q}{P}$</p>
 <p>$i = I_m \sin \omega t$</p>	 <p>$u = u_R + u_C$ $-90^\circ < \varphi < 0$</p>	 <p>$z^2 = R^2 + X_C^2$ $\varphi = -\arctg \frac{X_C}{R}$</p>	 <p>$S^2 = P^2 + Q^2$ $\varphi = -\arctg \frac{Q}{P}$</p>
 <p>$i = I_m \sin \omega t$</p>		 <p>Цепь носит характер RL</p>	

Изображение комплексными числами.

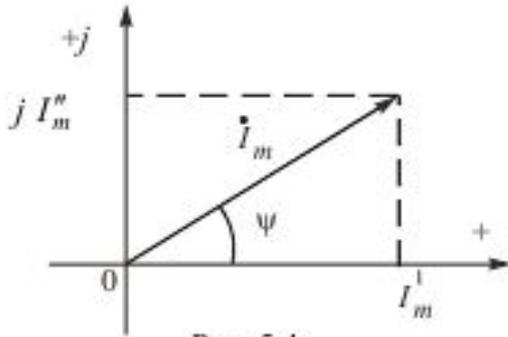


Рис. 5.4

Математика для расчета цепей переменного тока

Для аналитического решения плоскость координат $ХОУ$ заменим комплексной плоскостью (рис. 5.4). Так как буквой i в электротехнических дисциплинах обозначают ток, то мнимую единицу обозначают буквой $j = -1$. Вектору на комплексной плоскости можно сопоставить комплексное число:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi}$$

Величину характеризуют модулем комплекса I_m , положение на комплексной плоскости – аргументом комплекса ψ . Такую форму записи комплексного числа в математике называют показательной. Ее можно использовать для умножения и

Трёхфазные электрические цепи.

Тема №1: Трёхфазная цепь

Получение системы трёхфазных ЭДС. Способы соединения фаз трёхфазных источников и приемников электрической энергии. Измерение мощности и энергии трёхфазной цепи.

Легасов Валерий Александрович
Фукусима-1

АЭС Фукусима-1 Япония до аварии.



Атомная энергетика Японии

- На момент начала 2011 года ядерная энергетика обеспечивала 30% потребности Японии и планировалось увеличить этот показатель до 40% в течение 10 лет. Однако планомерное развитие атомной энергетики Японии было остановлено [аварией на Фукусима-1](#). На момент начала 2011 года ядерная энергетика обеспечивала 30% потребности Японии и планировалось увеличить этот показатель до 40% в течение 10 лет. Однако планомерное развитие атомной энергетики Японии было остановлено аварией на Фукусима-1. Резко отрицательное отношение населения к АЭС, заставило правительство остановить реакторы на всех станциях для проверки. 27 марта 2012 года был остановлен последний реактор – Томари-3. До катастрофы с японской АЭС в стране восходящего солнца действовало 54 реактора, включая крупнейшую АЭС мира — [Касивадзаки-Карива](#), которые покрывали 26% всей потребности страны в энергии.

Атомная энергетика Японии

Новые подходы

- Обсуждение будущего АЭС в Японии началось с планов по закрытию всех станций к 2030 году. Однако с каждым годом приходит понимание, что уход из страны дешевой энергии и почти полное отсутствие энергоресурсов в виду ограниченности и густонаселенности территории, ставит экономику Японии в тупик. ВВП продолжает из года в год снижаться, компании сокращают производства, выводят их в другие страны Азиатско-тихоокеанского региона.
- На текущий момент по 19 реакторам поданы заявки на возобновление работы. В июле 2014 года были допущены к запуску два первых реактора Японии на [АЭС Сэндаи](#).



Разрушенный 4 блок на Чернобыльской АЭС

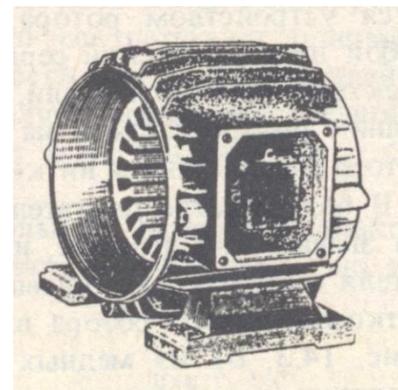
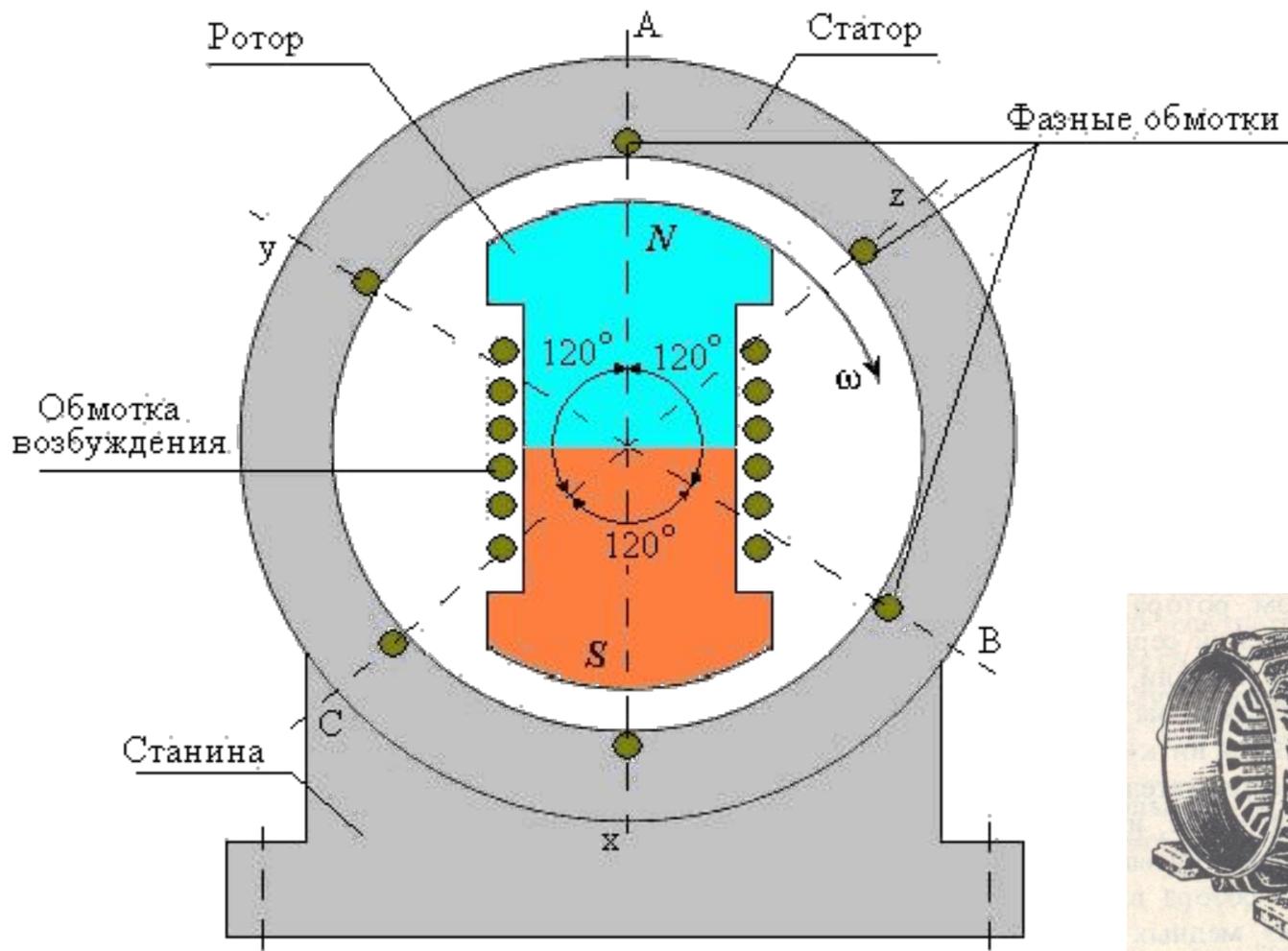
Трёхфазные электрические цепи.

Тема №1: Трёхфазная цепь

Получение системы трёхфазных ЭДС. Способы соединения фаз трёхфазных источников и приемников электрической энергии. Измерение мощности и энергии трёхфазной цепи.

Легасов Валерий Александрович
Фукусима-1

Трехфазные электрические цепи.



Рабочая часть обмотки

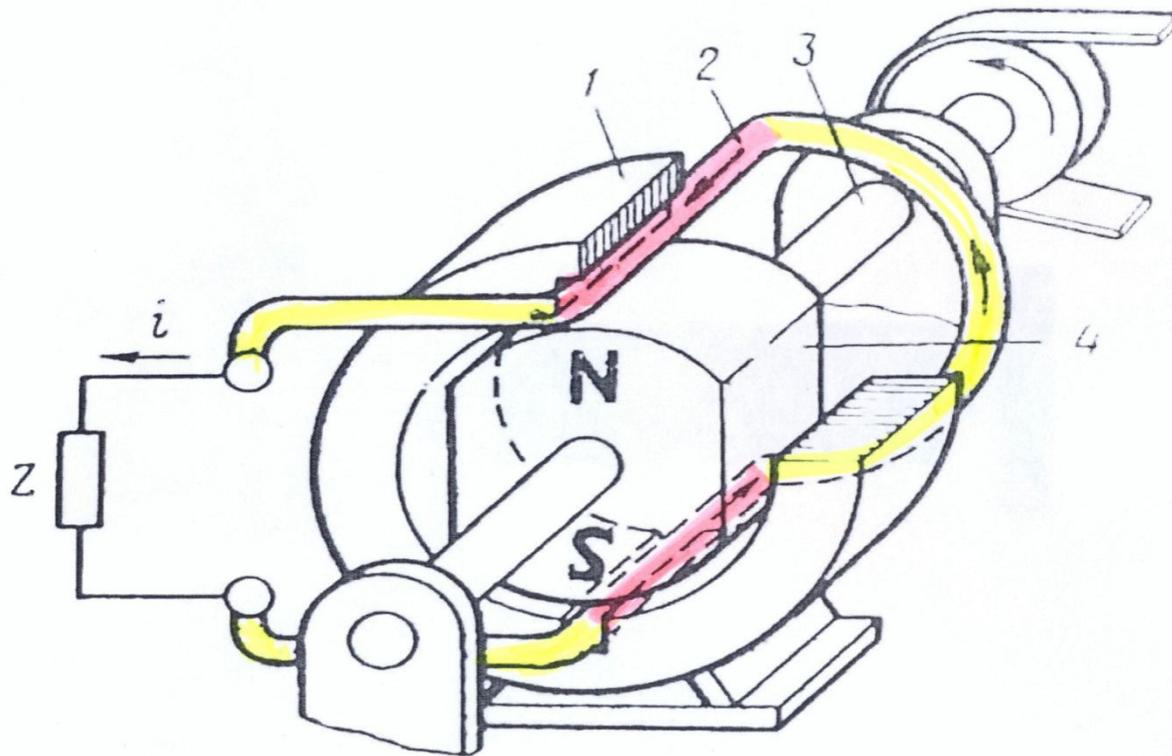
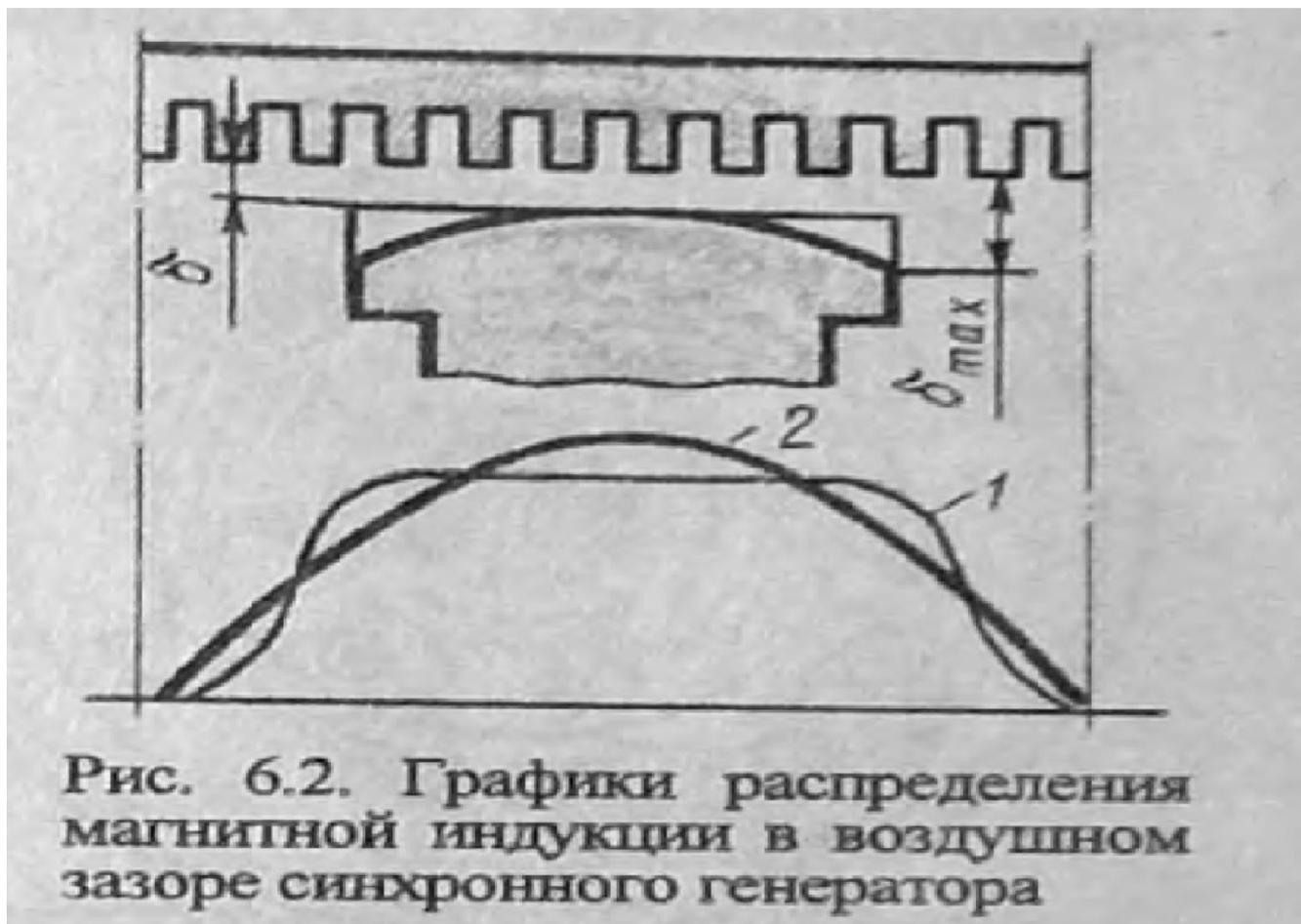
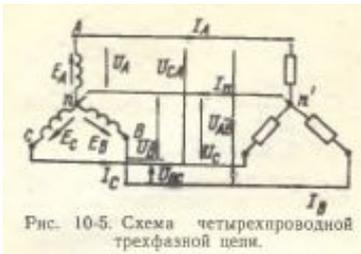


Рис. 6.1. Упрощенная модель синхронного генератора

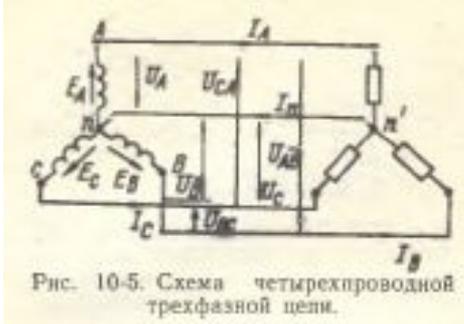
Обмотка укладывается в пазы и занимает некоторый сектор





Определения

- **Фазные и линейные величины.**
 Величины, относящиеся к одной фазе (рис. 10-5), получили название фазных: фазные эдс E_a, E_b, E_c ; фазные токи I_a, I_b, I_c ; фазные напряжения U_a, U_b, U_c .
- * Термин «фаза» в электротехнике имеет два значения: фаза — аргумент синусоидальной функции ωt и фаза — отдельная цепь трехфазной цепи. Обмотки генератора также называют фазами.



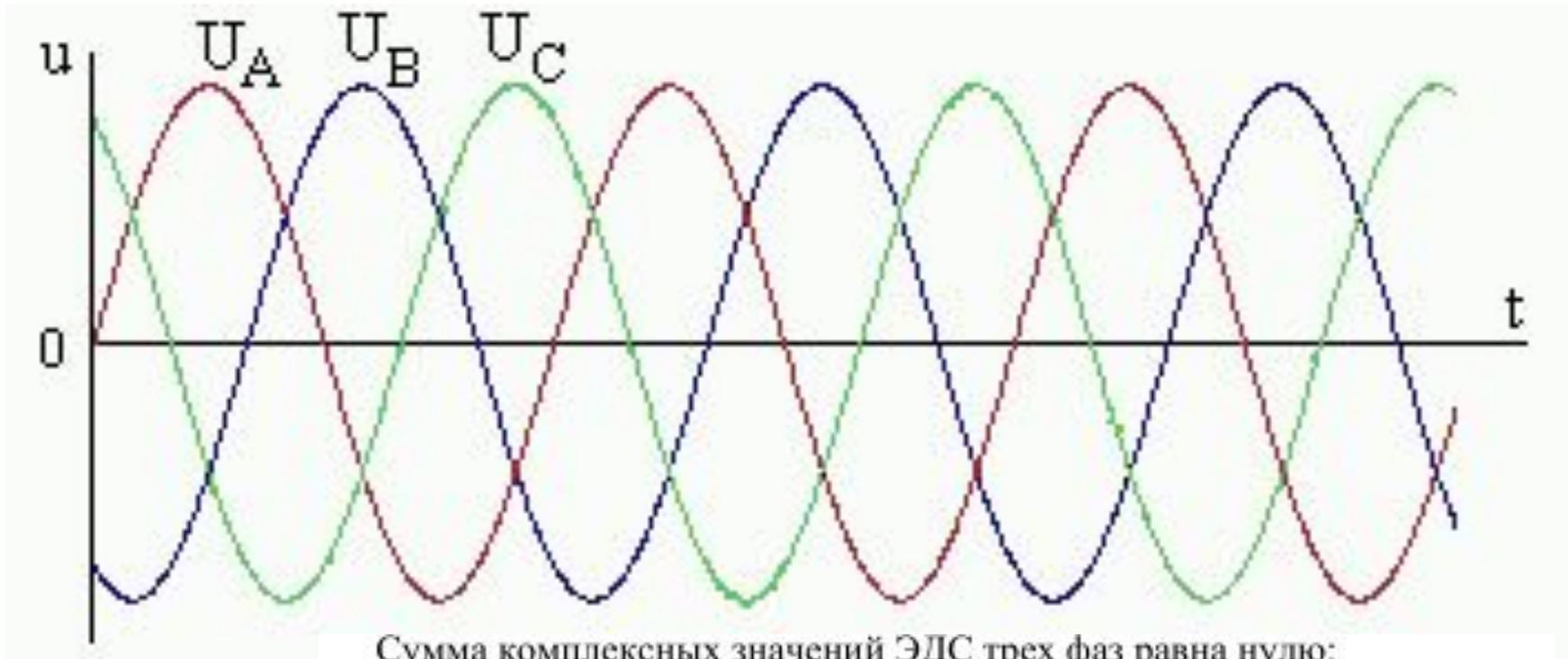
Определения

- Напряжения между линейными проводами называются линейными: U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} . Токи в линейных проводах — линейные токи.
- Токи в фазах генератора и фазах приемника сохранили название фазных токов. Из рис. 10-5 видно, что фазный ток является и линейным током.

Симметричная система ЭДС

- Симметричная система ЭДС – это три синусоиды, сдвинутые относительно друг друга по фазе на угол 120° .
Принято считать, что начальная фаза ЭДС фазы А равна нулю, ЭДС фазы В отстает от ЭДС фазы А на 120° , ЭДС фазы С отстает от ЭДС фазы В на 120° .

Временные зависимости



$$\hat{E}_A + \hat{E}_B + \hat{E}_C = E + Ee^{-j120^\circ} + Ee^{+j120^\circ} = E - \frac{E}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}E - \frac{E}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}E = 0.$$

Представление комплексными числами в показательной форме

Комплексы действующих значений ЭДС фаз в показательной форме могут быть записаны уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{E}_A &= E; & \dot{E}_B &= E e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E e^{-j120^\circ} = a^2 E; \\ \dot{E}_C &= E e^{j\frac{2\pi}{3}} = E e^{j120^\circ} = E e^{-j\frac{4\pi}{3}} = a E,\end{aligned}$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота, $a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}$.

Математика для перемножения векторных величин

Условное изображение фаз обмоток генератора и их разметка представлены на рис.

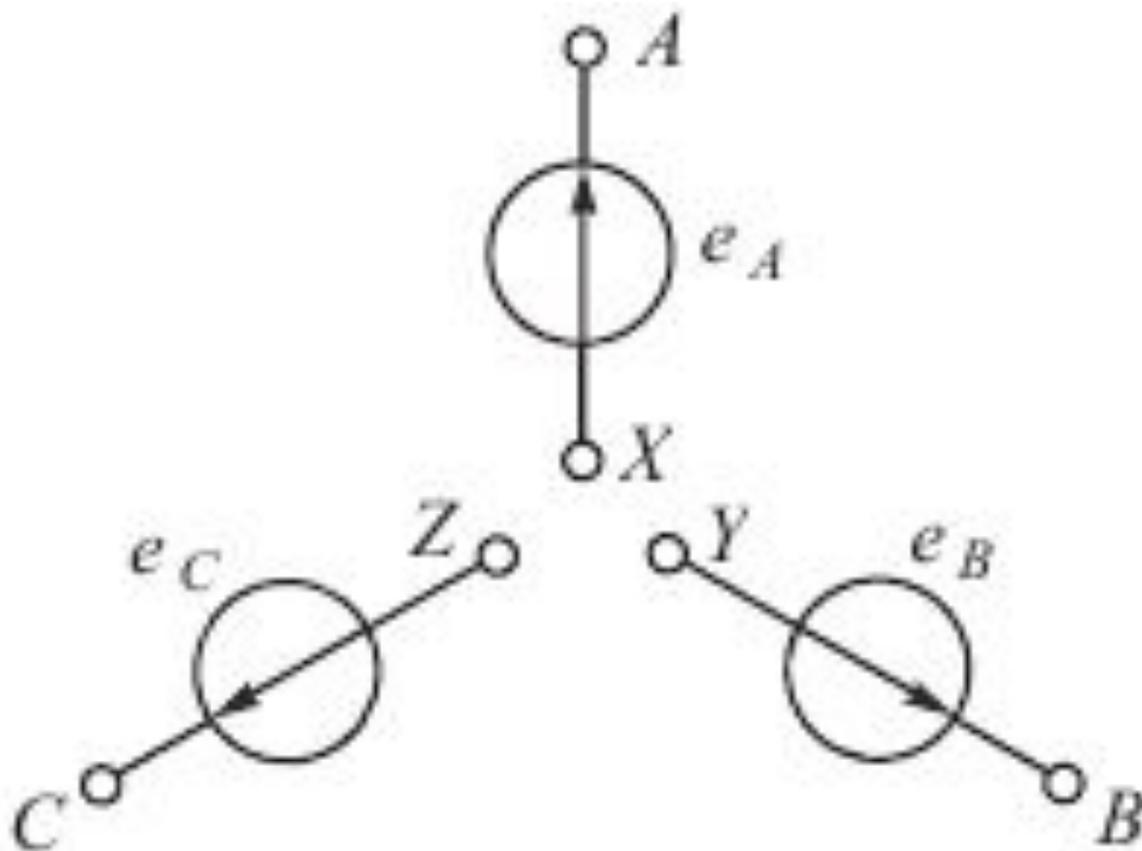


Рис. 11. 1

Трехфазная система ЭДС для МГНОВЕННЫХ значений

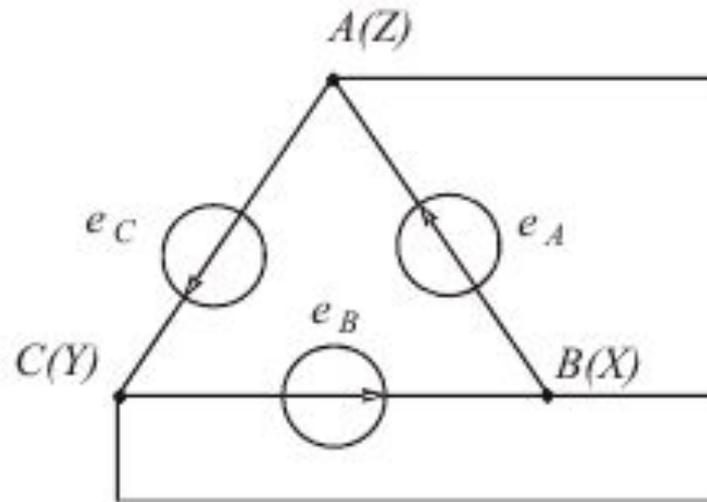
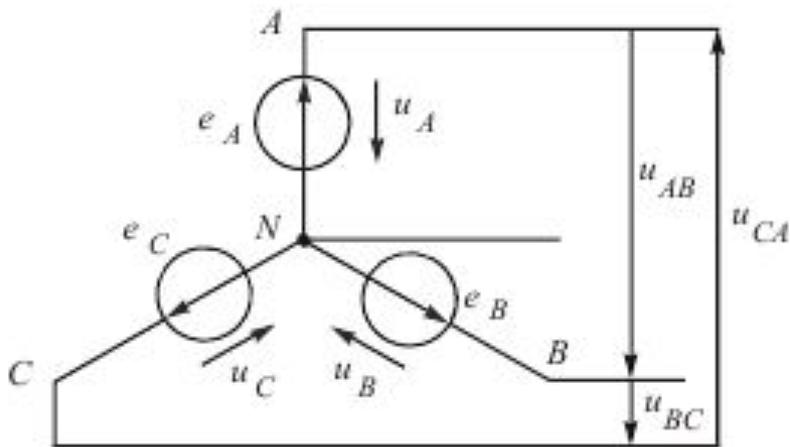
$$e_A(t) = E_m \sin(\omega t);$$

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

$$e_C(t) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ);$$

Способы соединения фаз обмоток генератора.

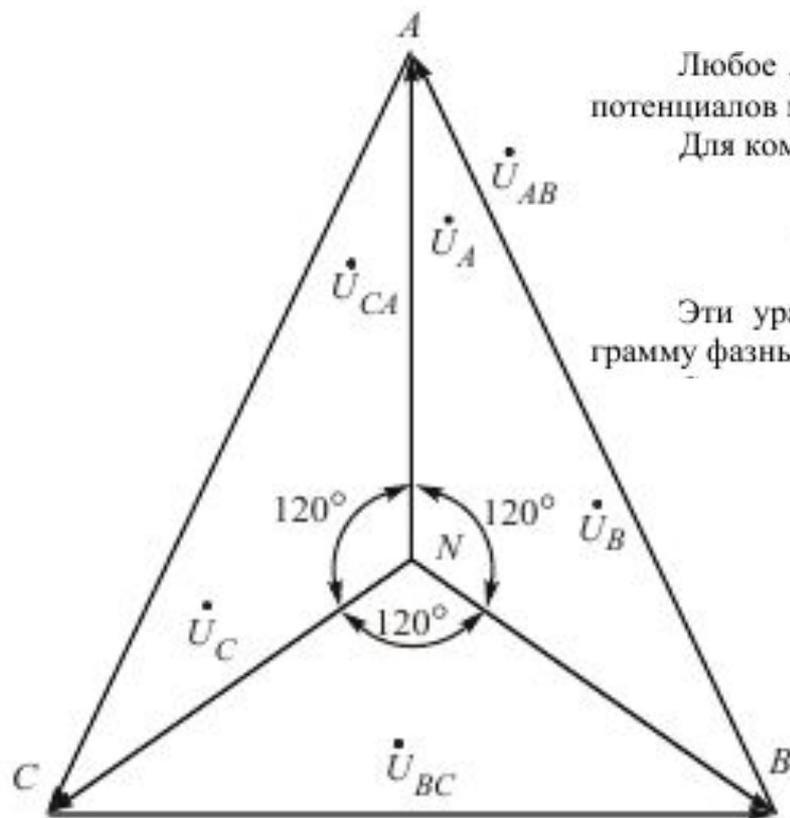
- Соединение звездой Соединение треугольником



Обычно обмотки генератора соединяют звездой.

Напряжения между началом и концом фазы (см. рис. 11.3) называют фазными (u_A , u_B и u_C), а напряжения между началами фаз генератора – линейными (u_{AB} , u_{BC} , u_{CA}).

Соотношение между линейным и фазным напряжением при соединении источника звездой



Любое линейное напряжение можно определить, рассчитав изменение потенциалов между соответствующими началами фаз генератора.

Для комплексных значений эти уравнения имеют вид

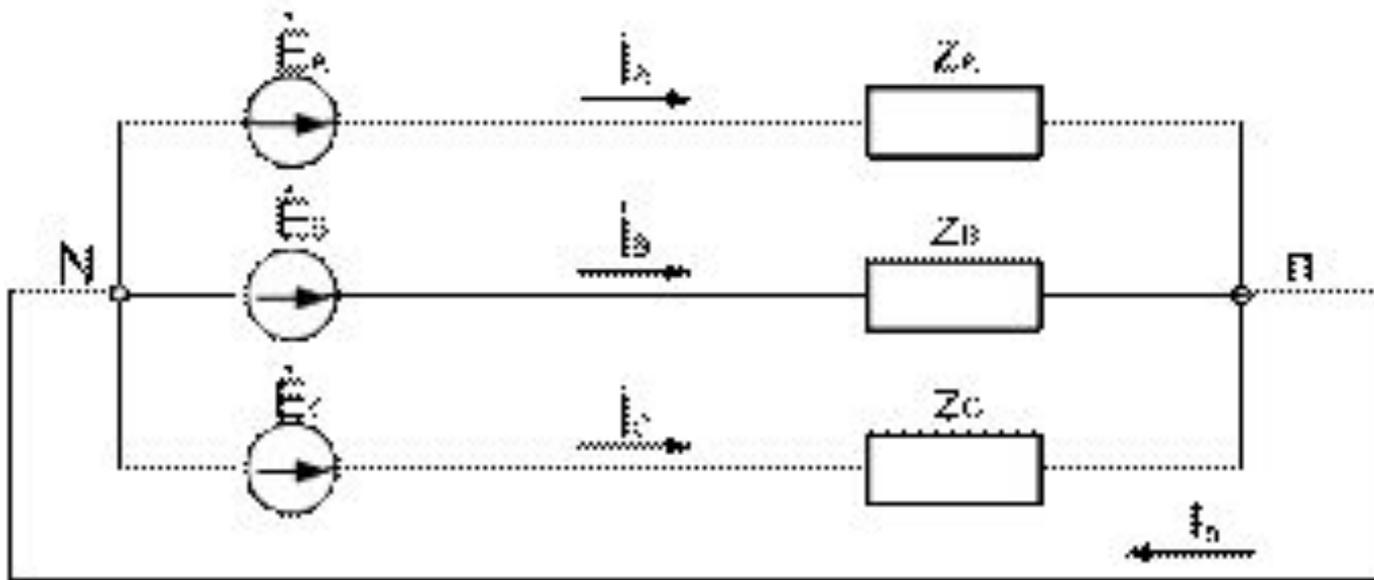
$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Эти уравнения дают возможность построить топографическую диаграмму фазных и линейных напряжений ([рис. 11.5](#)).

Линейное напряжение по величине больше фазного в $\sqrt{3}$ раз, т. е.

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} \quad \text{или} \quad U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}.$$

Соединение «звезда – звезда» с нейтральным проводом



$$\dot{U}_\Phi = \dot{U}_\Pi / \sqrt{3}$$

$$\dot{I}_\Phi = \dot{I}_\Pi$$

Соединение звезда – звезда без нейтрального провода.

$$\dot{I}_A = \underline{Y}_A (\dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}) = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_A};$$

$$\dot{I}_B = \underline{Y}_B (\dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}) = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_B};$$

$$\dot{I}_C = \underline{Y}_C (\dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}) = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}}{\underline{Z}_C}.$$

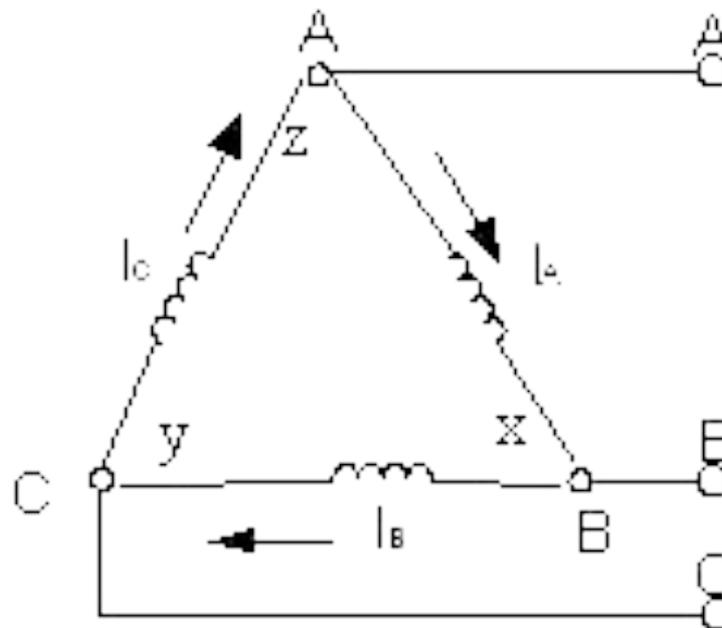
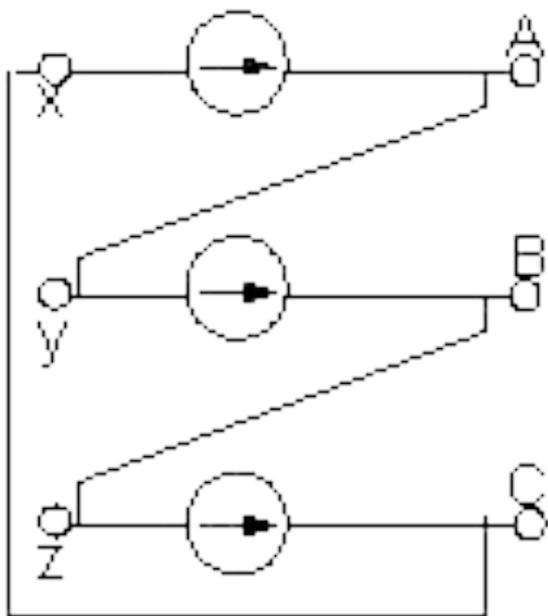
Этот режим эксплуатации трехфазных цепей на практике не желателен.

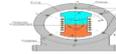
звезда – звезда

Несимметричный режим без нулевого провода

- **Линейные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} остаются неизменными при любой нагрузке, так как клеммы приемника соединены с началами фаз генератора А, В, С.**
- **При неравномерной нагрузке фаз,**
- **$Z_a \neq Z_b \neq Z_c$. В результате сместится точка n, т.е. будут нарушены фазные напряжения.**
- **При несимметричных нагрузках возникает несимметричность фазных напряжений (перекос напряжений), нарушается нормальная работа приемников.**

Соединение нагрузки треугольником





Соединение нагрузки треугольником

$$\dot{U}_\Phi = \dot{U}_\Pi$$

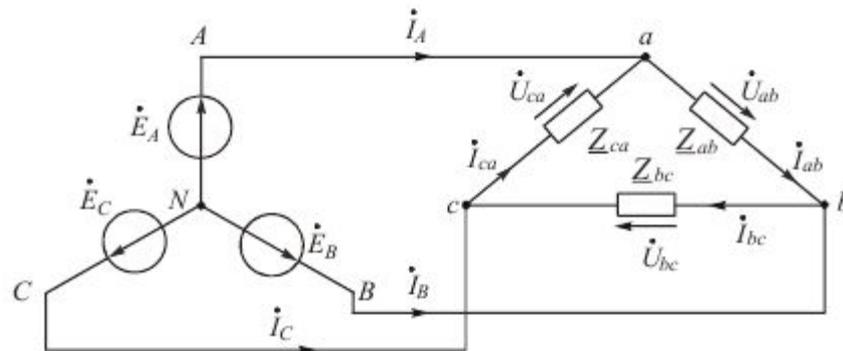


Рис. 12.1

В симметричной системе всегда

$$\dot{I}_\Pi = \sqrt{3} \dot{I}_\Phi$$

В несимметричной системе

- фазные токи

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_B}$$

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_A}$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_C}$$

В несимметричной системе

Линейные токи

$$\begin{cases} i_A = i_{AB} - i_{CA}; \\ i_B = i_{BC} - i_{AB}; \\ i_C = i_{CA} - i_{BC}. \end{cases}$$

Для симметричной нагрузки

В трехфазных цепях различают те же мощности, что и в однофазных: мгновенную p , активную P , реактивную Q и полную S . **Активная**

МОЩНОСТЬ: $P_{\text{акт}} = 3P_{\phi}$

$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi$$

$$P_{\text{акт}} = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi$$

Мощности p , P и Q находят как суммы мощностей трех фаз: $p = \sum p_{\phi}$;

$P = \sum P_{\phi}$; $Q = \sum Q_{\phi}$.

Мощности каждой фазы вычисляют по известным формулам.

Реактивная мощность фазы

$$Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin\varphi_{\phi} \text{ или } Q_{\phi} = X_{\phi} I_{\phi}^2.$$

Полную мощность трехфазной цепи вычисляют как гипотенузу суммарного треугольника мощностей:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(\sum P_{\phi})^2 + (\sum Q_{\phi})^2}.$$

Тема 2. Трёхфазная цепь **(продолжение)**

- Вращающееся магнитное поле.
- Принцип действия асинхронных двигателей.

Основные формулы по теме

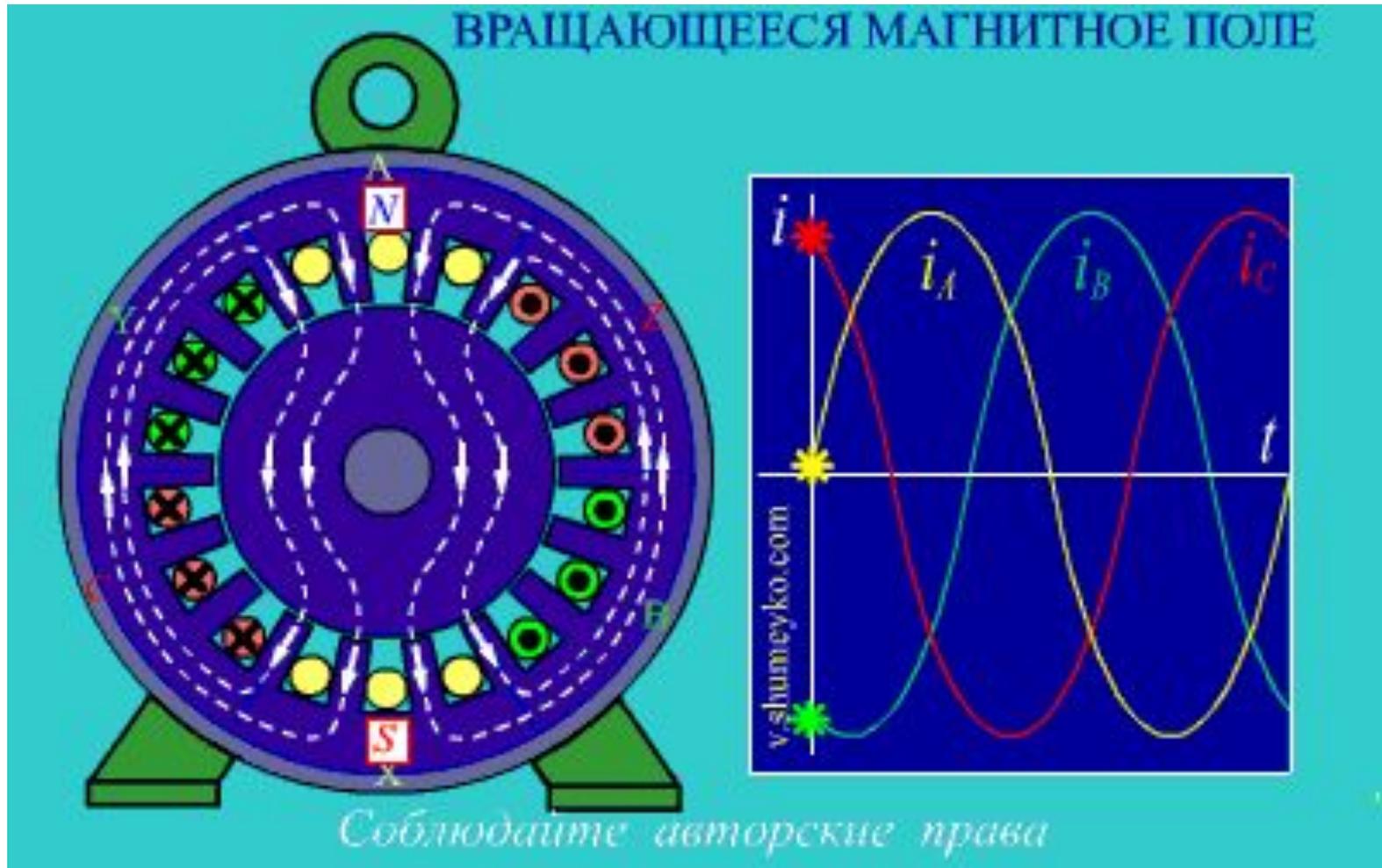
- Следовательно, независимо от схемы соединения (звезда или треугольник) для симметричной трехфазной цепи формулы для мощностей имеют одинаковый вид:

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

- $$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$
 [вар], **END**

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

Вращающееся магнитное поле



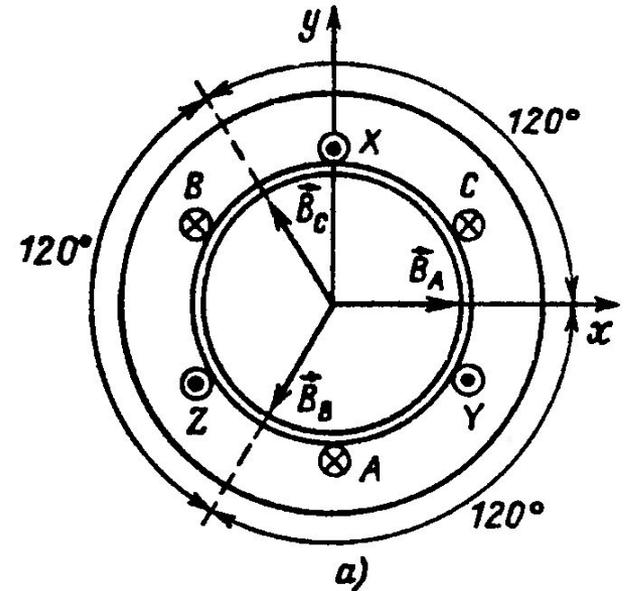
Вращающееся магнитное поле

ПОЛЕ Касаткин

$$B_A = B_m \sin \omega t;$$

$$B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$B_C = B_m \sin(\omega t - 240^\circ).$$



Составляющая индукции магнитного поля вдоль оси x равна алгебраической сумме проекций на эту ось мгновенных значений трех индукций:

$$B_x = B_A \cos 0^\circ + B_B \cos(-120^\circ) + B_C \cos(-240^\circ) =$$
$$= B_A + B_B (-1/2) + B_C (-1/2).$$

Вращающееся магнитное поле

Подставив выражения индукций из (14.2), получим

$$B_x = B_m \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = B_m \left[\sin \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t \right] = 1,5B_m \sin \omega t. \quad (14.3)$$

Составляющая индукции магнитного поля по оси y

$$B_y = B_A \sin 0^\circ + B_B \sin(-120^\circ) + B_C \sin(-240^\circ) = \\ = B_B (-\sqrt{3}/2) + B_C \sqrt{3}/2,$$

Вращающееся магнитное поле

или после подстановки значений индукций из (14.2)

$$B_y = B_m \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] = 1,5B_m \cos \omega t. \quad (14.4)$$

Таким образом, магнитная индукция поля статора

$$B_{ст} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = 1,5B_m \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = 1,5B_m, \quad (14.5)$$

Магнитная индукция поля статора

$$B_{\text{ст}} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = 1,5B_m \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = 1,5B_m, \quad (14.5)$$

Вывод: значение магнитной индукции постоянно и равно 1.5 Bm.

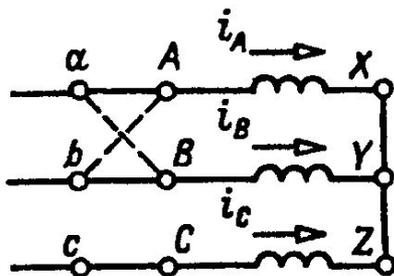
Угол α , образуемый магнитными линиями поля с осью y (рис. 14.8, z),

определяя $\text{tg} \alpha = B_x / B_y = \sin \omega t / \cos \omega t = \text{tg} \omega t$

т. е. $\alpha = \omega t$.

Как изменить направление вращения магнитного поля статора

- Чтобы изменить направление вращения магнитного поля статора, достаточно изменить порядок подключения двух любых фазных обмоток асинхронной машины к трехфазному источнику электрической энергии, например как на рис. 14.8, б штриховой



Принцип действия асинхронного двигателя

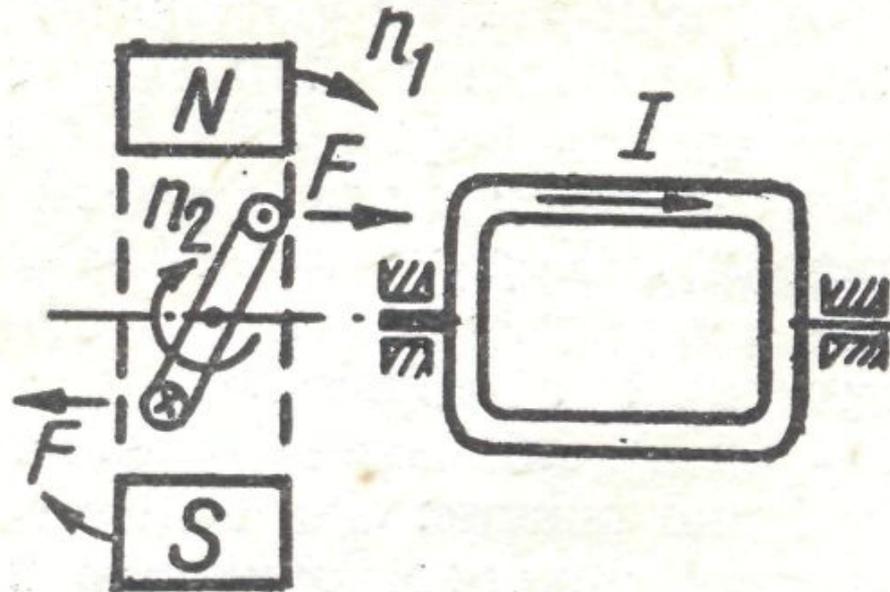


Рис. 18-2. Короткозамкнутый виток во вращающемся магнитном поле.

Принцип действия асинхронного двигателя

- Расположим во вращающемся магнитном поле укрепленный на оси замкнутый виток провода (рис. 18-2). Согласно закону электромагнитной индукции, в витке будет индуцироваться эдс ($e = Blv$). *Направление тока в витке, вызванного этой эдс, определим по правилу правой руки. Согласно закону Ампера, на проводник с током в магнитном поле действует сила $F = BI$. Направление силы определим по правилу левой руки — она направлена в сторону вращения магнитного поля.*
- Частота вращения витка n_2 не может достигнуть частоты вращения магнитного поля n_1 . *Если бы это случилось (n_2 стала равной n_1), то виток оказался бы неподвижным относительно магнитного поля, его стороны перестали бы пересекаться магнитными силовыми линиями, исчезли бы эдс и ток в витке и, следовательно, сила $F = BI$ стала равной нулю — исчезла бы причина, заставляющая виток вращаться. Поэтому всегда $n_2 < n_1$*
- Короткозамкнутый виток и магнитное поле вращаются с разной частотой. Такое вращение получило название несинхронного, или асинхронного вращения. Оно лежит в основе принципа действия асинхронного двигателя.

Принцип действия асинхронного двигателя

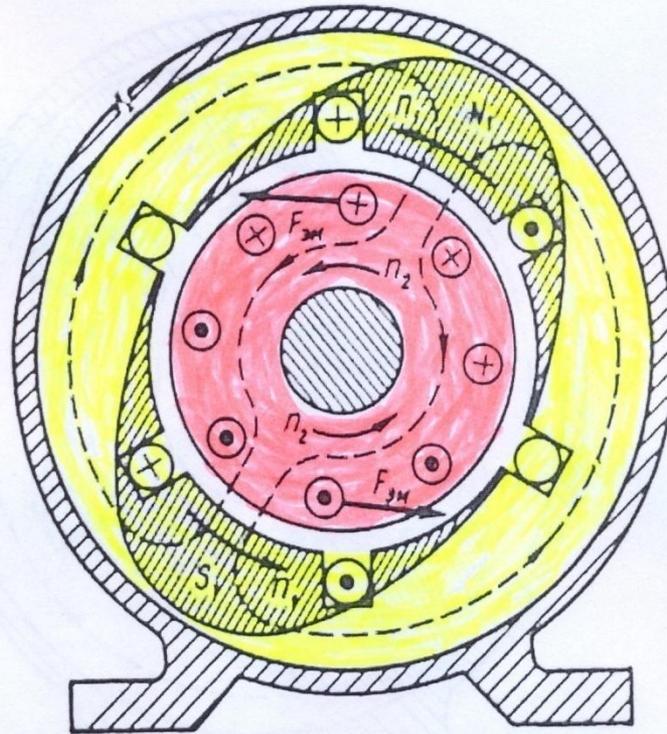
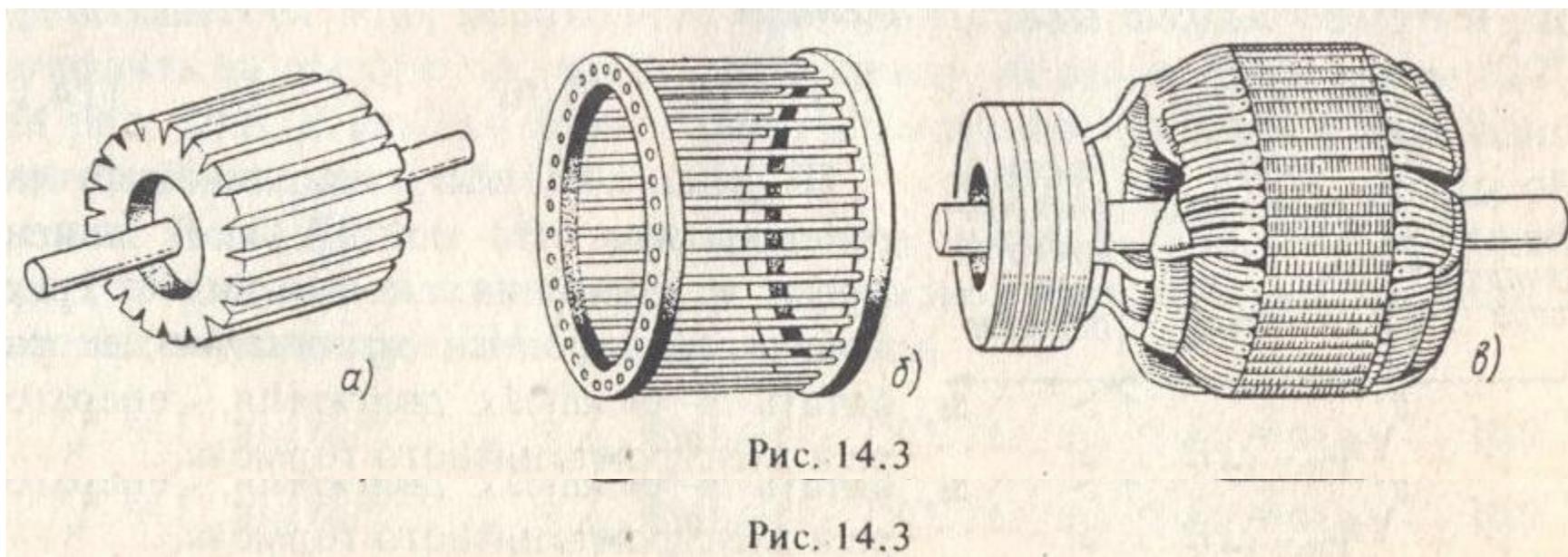


Рис. 6.4. К принципу действия асинхронного двигателя



Короткозамкнутый
ротор

Фазный ротор