

Оглавление

I. Однофазные и трехфазные электрические цепи. Магнитные цепи.....	3
1. Действующие значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения.....	3
2. Средние значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения.....	4
3. Изображение синусоидального тока и напряжения комплексными числами.....	4
4. Синусоидальный ток в электрической цепи с активным сопротивлением.....	5
5. Синусоидальный ток в электрической цепи с индуктивным сопротивлением.....	5
6. Синусоидальный ток в электрической цепи с емкостным сопротивлением.....	6
7. Последовательное соединение активного (R), индуктивного (XL) и емкостного (XC) сопротивлений.....	6
8. Явление резонанса напряжений в электрической цепи синусоидального тока и его особенности.....	7
9. Электрическая цепь синусоидального тока с параллельным соединением. Проводимости цепи.....	7
10. Явление резонанса токов в электрической цепи синусоидального тока и его особенности.....	8
11. Коэффициент мощности потребителей электроэнергии и его экономическое значение.....	9
12. Получение трехфазной системы ЭДС.....	9
13. Соединение трехфазного потребителя электрической энергии звездой при симметричной нагрузке (соотношения токов и напряжений, векторная диаграмма).....	11
14. Соединение трехфазного потребителя электрической энергии треугольником при симметричной нагрузке (соотношения токов и напряжений, векторная диаграмма).....	13
15. Мощность трехфазной электрической цепи.....	14
16. Соединение трехфазного потребителя электрической энергии звездой с N-проводом (схема и формула для расчета напряжения UN).....	16
17. Коэффициент мощности потребителей электроэнергии и его экономическое значение.....	16
18. Измерение активной мощности трехфазных электрических цепей методом двух ваттметров.....	16
19. Основные понятия о магнитных цепях и методах их расчета.....	17
20. Магнитные цепи с постоянной магнитодвижущей силой.....	17
21. Магнитные цепи с переменной магнитодвижущей силой.....	18
22. Катушка с ферромагнитным сердечником.....	19
II. Промышленная электроника.....	19
1. Полупроводниковый p-n переход и его свойства.....	19
2. Полупроводниковые диоды, их свойства и область применения.....	21
3. Принцип действия транзистора.....	22
4, 5, 6. Схема включения транзистора с общей базой и ее коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_U и мощности K_P	23
7, 8, 9. Схема включения транзистора с общим эмиттером и ее коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_U и мощности K_P	24
10, 11, 12. Схема включения транзистора с общим коллектором и ее коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_U и мощности K_P	24
13. Однополупериодный выпрямитель, принцип действия, коэффициент пульсации выпрямленного тока.....	25
14. Двухполупериодный выпрямитель, принцип действия, коэффициент пульсации выпрямленного тока.....	26
15. Емкостной электрический фильтр в выпрямительной схеме и его влияние на коэффициент пульсации выпрямленного тока.....	30

16. Индуктивный электрический фильтр в выпрямительной схеме и его влияние на коэффициент пульсации выпрямленного тока.....	30
III. Электрооборудование промышленных предприятий.....	31
1. Устройство и принцип действия трансформатора.....	31
2. Схема замещения и приведение параметров трансформатора.....	32
3. Потери мощности и КПД трансформатора.....	34
4. Опыт холостого хода трансформатора и его назначение.....	35
5. Опыт короткого замыкания трансформатора и его назначение.....	37
6. Внешняя характеристика трансформатора и ее влияние на режим работы потребителя электроэнергии.....	38
7. Устройство трехфазного асинхронного электродвигателя.....	40
8. Принцип действия и реверс (изменение направления вращения) трехфазного асинхронного двигателя.....	44
9. Схема замещения и механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя.....	46
10. Способы пуска трехфазного асинхронного двигателя.....	49
11. Способы регулирования частоты (скорости) вращения трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора.....	50
12. Способы регулирования частоты (скорости) вращения трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором (с контактными кольцами).....	52
13. Устройство и принцип действия синхронного генератора и его применение в промышленности.....	52
14. Внешняя характеристика синхронного генератора.....	53
15. Регулировочные характеристики синхронного генератора.....	53
16. Устройство и принцип действия синхронного двигателя.....	53
17. Способы пуска синхронного двигателя.....	54
18. Угловая и механические характеристики синхронного двигателя.....	54
19. U-образные характеристики синхронного двигателя (регулирование реактивного тока и реактивной мощности).....	55
20. Устройство и принцип действия генератора постоянного тока.....	56
21. Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения и их электрические схемы.....	56
22. Сравнение внешних и характеристик генераторов постоянного тока с различными схемами возбуждения.....	57
23. Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока.....	59
24. Способы пуска в ход двигателей постоянного тока.....	60
25. Механическая характеристика двигателей постоянного тока ($n=f(M)$) с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.....	61
26. Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока.....	61

Ответы на билеты по электротехнике.

I. Однофазные и трехфазные электрические цепи. Магнитные цепи.

1. Действующие значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения.

Электрический ток проводимости $i(t)$ — это упорядоченное движение носителей электрического заряда в веществе или вакууме. Величина тока определяется производной по времени t от электрического заряда q , переносимого через поперечное сечение проводника:

$i(t) = \frac{dq}{dt}$. Ток проводимости является результатом перемещения положительных и

отрицательных зарядов в противоположных направлениях, поэтому $q = q_+ + q_-$. За направление тока $i(t)$ принято направление движения положительного заряда.

Электрическое напряжение $u(t)$ — это разность электрических потенциалов φ_1 и φ_2 между зажимами 1 и 2 участка цепи с сопротивлением R , по которому проходит ток $i(t)$. Разность электрических потенциалов определяется энергией, затрачиваемой на перемещение единицы заряда q из точки 1 в точку 2.

Электродвижущая сила (ЭДС) в источниках электрической энергии возникает в процессе преобразования различных видов и форм энергии в электрическую и определяется интегралом от напряженности стороннего электрического поля $\vec{E}_{ст}$ по пути \vec{dl} : $e = \int_l \vec{E}_{ст} \vec{dl}$.

ЭДС может быть вызвана и явлением электромагнитной индукции и ее величина в проводнике, пересекающем магнитное поле, равна $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \vec{dS}$.

Синусоидальная функция может быть представлена: аналитически, в виде временных диаграмм, векторов и комплексных чисел. Мгновенные значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения могут представлены аналитически:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); e = E_m \sin(\omega t + \psi_e); u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \text{ где}$$

i, e, u — мгновенные значения, I_m, E_m, U_m — амплитуды, $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ — угловая частота, ψ_i, ψ_e, ψ_u — начальные фазы.

Действующее значение переменного электрического тока I численно равно такому постоянному току, при прохождении которого через активное сопротивление R за время, равное периоду T , совершается одинаковая работа, что и при прохождении переменного тока.

Работа, совершаемая при постоянном токе и постоянной мощности P за время T :

$$A_{пост} = PT = I^2 RT$$

Работа, совершаемая при синусоидальном переменном токе i и переменной мощности p за период от 0 до T :

$$A_{nep} = \int_0^T p dt = \int_0^T i^2 R dt = \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t) R dt$$

$$A_{ном} = A_{nep}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{T} T} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

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

Аналогично определяют действующие значения ЭДС и напряжения:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

2. Средние значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения.

Среднее значение переменного тока за определенный момент времени от 0 до t_i :

$$I_{cp} = \frac{1}{t_i} \int_0^{t_i} i dt$$

Если $t_i = T$ и $i = I_m \sin(\omega t)$, то

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = 0$$

Аналогично, средние значения ЭДС и напряжения за период T для синусоидальной величины равны нулю.

При $t_i = T/2$ (среднее значение тока за полупериод):

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{\pi}$$

Аналогично для ЭДС и напряжения:

$$E_{cp} = \frac{2E_m}{\pi}; U_{cp} = \frac{2U_m}{\pi}$$

3. Изображение синусоидального тока и напряжения комплексными числами.

Любой вектор и соответствующее ему комплексное число можно представить в алгебраической форме записи через действительную (а) и мнимую (b) составляющие:

$$\underline{A} = a + jb$$

Координаты точки А могут быть выражены через длину вектора и угол между вектором и осью положительных значений. В этом случае $a = A \cos \psi$, $b = A \sin \psi$. Тогда:

$$\underline{A} = A(\cos \psi + j \sin \psi) \quad , \text{ где}$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad - \text{длина вектора,}$$

$\psi = \arctg \frac{a}{b}$ - угол, на который вектор повернут по отношению к положительному направлению вещественной оси.

Ψ положителен, если он отсчитывается против часовой стрелки, иначе он отрицателен.

По формуле Эйлера получим показательную форму записи вектора \underline{A} :

$$\underline{A} = Ae^{j\psi}$$

Мгновенное значение синусоидального тока можно представить вектором \underline{I} в комплексной форме:

$$\underline{I} = \underline{I}_a + \underline{I}_b = I_a + jI_b = Ie^{j\psi_i} = I \cos \psi_i + jI \sin \psi_i, \text{ где}$$

$$I_a = I \cos \psi_i - \text{вещественная часть комплекса тока (активная составляющая),}$$

$$I_b = I \sin \psi_i - \text{мнимая часть комплекса тока (реактивная составляющая),}$$

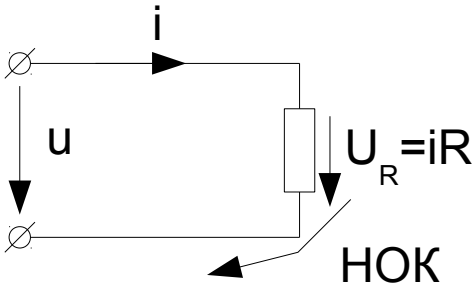
$$I = |\underline{I}| = \sqrt{I_a^2 + I_b^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} - \text{модуль комплекса тока.}$$

Аналогично можно представить синусоидальное напряжение:

$$\underline{U} = \underline{U}_a + \underline{U}_b = U_a + jU_b = Ue^{j\psi_u} = U \cos \psi_u + jU \sin \psi_u, \text{ где } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

4. Синусоидальный ток в электрической цепи с активным сопротивлением.

Активным называется сопротивление, в котором при прохождении переменного тока совершается работа (выделяется тепло).



Уравнение по II закону Кирхгофа:

$$0 = -U + U_R$$

$$U = U_R = iR = I_m \sin(\omega t) R = I_m R \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

В цепи с активным сопротивлением ток и напряжение изменяются по синусоидальному закону и совпадают по фазе.

Введем понятие: сдвиг фазы тока и напряжения:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i$$

Угол φ — это угол между векторами тока и напряжения.

В комплексной форме:

$$\underline{I} = Ie^{j\psi_i} = Ie^{j0} = I$$

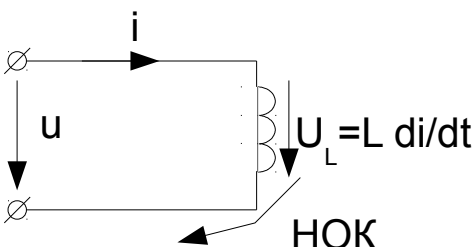
$$\underline{U} = Ue^{j\psi_u} = Ue^{j0} = U$$

5. Синусоидальный ток в электрической цепи с индуктивным сопротивлением.

Индуктивность — это характеристика, отражающая магнитные свойства электрической цепи. L [Гн]

Индуктивностью обладают обмотки (катушки) трансформаторов, различных электромагнитов и т. д.

Уравнение по II закону Кирхгофа:



$$0 = -U + U_L \quad U = U_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = LI_m \omega \cos \omega t = U_m \cos \omega t$$

$$U_m = I_m L \omega = I_m X_L \quad \text{- закон Ома для максимальных значений}$$

$X_L = \omega L$ - индуктивное сопротивление цепи синусоидального тока, обусловленное ЭДС самоиндукции.

$U = U_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ - в цепи с индуктивным сопротивлением напряжение опережает ток на угол $\pi/2$.

В комплексной форме:

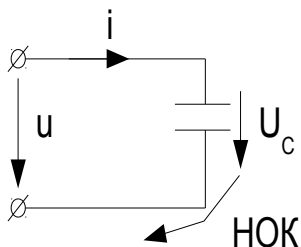
$$\underline{I} = I e^{j\psi_i} = I e^{j0} = I$$

$$\underline{U} = U e^{j\psi_u} = U e^{j\frac{\pi}{2}} = U (\cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2}) = jU$$

6. Синусоидальный ток в электрической цепи с емкостным сопротивлением.

Емкостными свойствами обладают конденсаторы и другие элементы, входящие в радиоэлектронные устройства, силовые установки и т. д. C [Ф]

Уравнение по II закону Кирхгофа:



$$0 = -U + U_C$$

$$U = U_C = \frac{1}{C} \int idt = \frac{1}{C} \int I_m \sin \omega t dt = I_m \frac{1}{\omega C} (-\cos \omega t) = U_m (-\cos \omega t)$$

$$U_m = I_m L \frac{1}{\omega C} = I_m X_C \quad \text{- закон Ома для максимальных значений}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \text{- емкостное сопротивление цепи синусоидального}$$

тока.

$U = U_m (-\cos \omega t) = U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ - в цепи с емкостным сопротивлением напряжение отстает от тока на угол $\pi/2$.

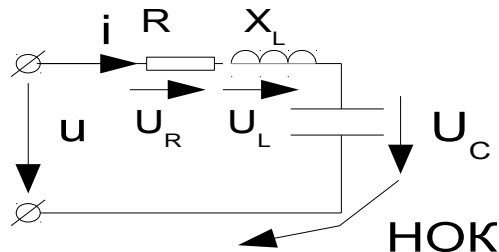
В комплексной форме:

$$\underline{I} = I e^{j\psi_i} = I e^{j0} = I$$

$$\underline{U} = U e^{j\psi_u} = U e^{j(-\frac{\pi}{2})} = U (\cos(-\frac{\pi}{2}) + j \sin(-\frac{\pi}{2})) = -jU$$

7. Последовательное соединение активного (R), индуктивного (X_L) и емкостного (X_C) сопротивлений.

По II закону Кирхгофа:



$$0 = -U + U_R + U_L + U_C$$

$$U = U_R + U_L + U_C$$

$$U = U_m \sin \omega t + U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) + U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

В комплексной форме:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \underline{I}R + \underline{I}jX_L - \underline{I}jX_C = \underline{I}(R + j(X_L - X_C)) = \underline{I}\underline{Z}$$

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad \text{- полное комплексное сопротивление}$$

$$\underline{I} = Ie^{j\theta} = I$$

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = U_R + jU_L - jU_C$$

8. Явление резонанса напряжений в электрической цепи синусоидального тока и его особенности

В цепи с последовательным соединением R, L, C элементов возможно явление резонанса напряжения. При резонансе напряжения в цепи ток и напряжение совпадают по фазе, и полное сопротивление Z цепи равно ее активному сопротивлению R:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$

Отсюда следует условие резонанса напряжения:

$$X_L = X_C$$

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

т. е. когда реактивное сопротивление цепи равно нулю.

При резонансе сила тока в цепи по закону Ома:

$$I_{рез} = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}$$

При резонансе напряжения напряжения на индуктивном и емкостном элементах равны.

Явление, при котором напряжение на индуктивном и емкостном элементах может превышать при определенных условиях напряжение сети, получило название резонанса напряжений. При этом:

– коэффициент мощности цепи равен единице: $\cos \varphi_{рез} = \frac{R}{Z} = 1$;

– напряжение сети равно падению напряжения на активном сопротивлении катушки индуктивности $\underline{U} = \underline{U}_R$;

– активная мощность цепи равна полной мощности: $P_{рез} = UI \cos \varphi = UI = S_{рез}$;

– реактивная мощность цепи равна нулю: $Q_{рез} = Q_L - Q_C = UI \sin \varphi = 0$; $\sin \varphi = 0$.

Таким образом, в режиме резонанса RLC цепь потребляет из сети только активную электрическую энергию (имеет чисто активный характер), не потребляя реактивной энергии. При этом реактивная энергия периодически переходит из электрического поля емкости в магнитное поле индуктивности и наоборот, т. е. циркулирует между реактивными элементами L и C.

Одним из способов получения резонанса напряжения в цепи — это изменение частоты f питающего цепь напряжения.

9. Электрическая цепь синусоидального тока с параллельным соединением. Проводимости цепи.

При анализе цепей переменного тока с параллельным соединением приемников применяют понятие комплексной проводимости \underline{Y} , состоящую из активной проводимости G

и реактивной проводимости B .

Полная комплексная проводимость определяется как величина обратная полному комплексному сопротивлению \underline{Z} :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = G + jB$$

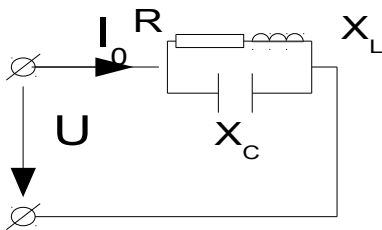
Если комплексная проводимость ветви имеет индуктивный характер, то ток в ветви отстает по фазе от напряжения, если емкостной — то опережает напряжение.

10. Явление резонанса токов в электрической цепи синусоидального тока и его особенности.

Резонанс токов имеет место в электрической цепи переменного тока при параллельном включении катушки индуктивности (с сопротивлением R и индуктивностью L) и емкости C .

Условие резонанса — равенство индуктивной (реактивной) проводимости катушки индуктивности B_L и емкостной (реактивной) проводимости емкости B_C :

$$B_L = B_C; B = B_L - B_C = 0$$



Для этой цепи справедливы следующие соотношения:

$$Y_0 = |\underline{Y}| = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}; G = \frac{R}{Z_k^2} = \frac{R}{R^2 + X_L^2}$$

$$B_L = \frac{X_L}{Z_k^2} = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2}; B_C = \frac{X_C}{X_C^2} = \omega C$$

$$I_0 = U Y_0; \cos \varphi = \frac{G}{Y_0}$$

Определим частоту резонанса в данной цепи:

$$B_L = B_C; \frac{\omega_{рез} L}{R^2 + (\omega_{рез} L)^2} = \omega_{рез} C; R^2 + (\omega_{рез} L)^2 = \frac{L}{C}; \omega_{рез}^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2} = \frac{L - R^2 C}{L^2 C}$$

$$\omega_{рез} = 2\pi f_{рез} = \sqrt{\frac{L - R^2 C}{L^2 C}}$$

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L - R^2 C}{L^2 C}}$$

Резонанс токов может быть получен путем изменения параметров цепи L, C при заданной частоте f источника питания или путем изменения частоты источника питания f при заданных параметрах цепи L, C .

При резонансе токов имеют место следующие соотношения:

– полная проводимость цепи $Y_{рез} = G$;

– полный ток цепи $I_{0рез} = U Y_{рез} = U G = I_R$;

– коэффициент мощности $\cos \varphi_{рез} = \frac{G}{Y_{рез}} = \frac{G}{G} = 1$; $\sin \varphi = 0$;

– активная мощность, потребляемая цепью $P_{рез} = U I_{0рез} \cos \varphi = U I_{0рез} = S$;

– реактивная мощность: $Q_{рез} = Q_L - Q_C = U I_{0рез} \sin \varphi = 0$;

– реактивные токи равны по величине: $I_{\kappa} = I_C$.

11. Коэффициент мощности потребителей электроэнергии и его экономическое значение.

Найдем зависимость силы тока в цепи от коэффициента мощности:

$$P = UI_0 \cos \varphi$$
$$I_0 = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

При увеличении коэффициента мощности сила тока уменьшается при постоянных напряжении и активной мощности. Т.к. Электрические потери пропорциональны квадрату силы тока, то они существенно уменьшаются. В промышленности значения коэффициента мощности не должны быть ниже, чем 0,96.

С целью повышения коэффициента мощности на предприятиях параллельно потребителю подключается батарея конденсаторов. Они компенсируют индуктивную мощность. Кроме этого, снижается общая сила тока, что приводит к уменьшению электрических потерь. Найдем емкость, которую необходимо включить в цепь для достижения коэффициента мощности φ_2 :

$$Q' = Q_L = P \operatorname{tg} \varphi_1; Q'' = Q_L - Q_C = P \operatorname{tg} \varphi_2$$
$$Q' - Q'' = Q_L - Q_L + Q_C = Q_C = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$
$$Q_C = I_C^2 X_C = \frac{U^2}{X_C} X_C = \frac{U^2}{X_C} = \omega C U^2$$
$$\omega C U^2 = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$
$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

12. Получение трехфазной системы ЭДС.

Трехфазной называется электрическая цепь, в ветвях которой действуют три одинаковые по амплитуде синусоидальные ЭДС, имеющие одинаковую частоту, сдвинутые друг относительно друга на угол 120 градусов и полученные от одного источника электрической энергии.

Преимущества трехфазных цепей:

- 1) лучшие экономические показатели трехфазных генераторов;
- 2) экономия по сравнению с однофазными цепями проводниковых материалов;
- 3) возможность получения от одного источника напряжения двух различных значений напряжений.

В качестве источника трехфазного напряжения используются синхронные генераторы.

Трехфазный генератор состоит из ротора и статора. Статор представляет собой корпус, в котором вмонтирован магнитопровод. Магнитопровод изготавливается из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали с целью снижения потерь от вихревых токов и пр.

На статоре размещены три обмотки, смещенные друг относительно друга на угол 120 градусов. Они изготовлены из изолированного обмоточного провода. Обмотки называются фазами.

	Начало	Конец
Фаза А	А	х
Фаза В	В	у
Фаза С	С	z

Чередование фаз $A \rightarrow B \rightarrow C$ называется прямым.

В каждой фазе при работе генератора индуцируются ЭДС e_A, e_B, e_C .

Ротор представляет собой электромагнит, который вращается с постоянной скоростью ω .

При вращении ротора в обмотках статора наводятся синусоидальные ЭДС, сдвинутые друг относительно друга на угол 120° градусов, при этом действующие значения ЭДС равны между собой:

$$E = E_A = E_B = E_C = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

В комплексной форме:

$$E_A = E e^{j0} = E$$

$$E_B = E e^{-j120^\circ} = E (\cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ)) = E \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$E_C = E e^{j120^\circ} = E (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = E \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

Обмотки синхронного генератора могут соединяться «звездой» или «треугольником».

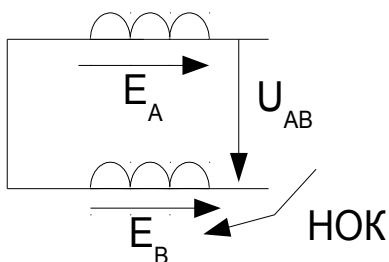
При соединении звездой концы трех фаз х, у, z объединяются в одну точку N, называемую нейтральной.

От точек А, В, С отходят линейные провода, по которым протекают линейные токи I_A, I_B, I_C .

Напряжения между линейными проводами U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} называются линейными напряжениями.

$$U_{\text{л}} = |U_{AB}| = |U_{BC}| = |U_{CA}| \quad \text{- модуль линейного напряжения.}$$

В комплексной форме:



Уравнение по II закону Кирхгофа:

$$\underline{E}_A - \underline{E}_B = \underline{U}_{AB} = E e^{j0} - E e^{-j120^\circ} = U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = U_{\text{л}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2}\right)$$

Аналогично:

$$\underline{U}_{BC} = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = -j U_{\text{л}}$$

$$\underline{U}_{CA} = U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = U_{\text{л}} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2}\right)$$

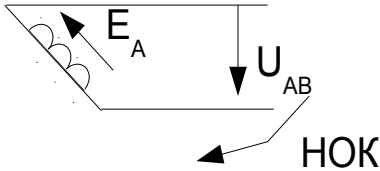
Из векторной диаграммы:

$$\frac{1}{2}U_{AB} = E_A \sin 60^\circ$$

$$U_{AB} = E_A \sqrt{3}$$

$$U_{\text{л}} = E \sqrt{3}$$

При соединении треугольником конец фазы А соединяется с началом фазы В и т. д.
В комплексной форме:



Уравнение по II закону Кирхгофа:

$$\underline{E}_A = \underline{U}_{AB}$$

Аналогично:

$$\underline{E}_B = \underline{U}_{BC}$$

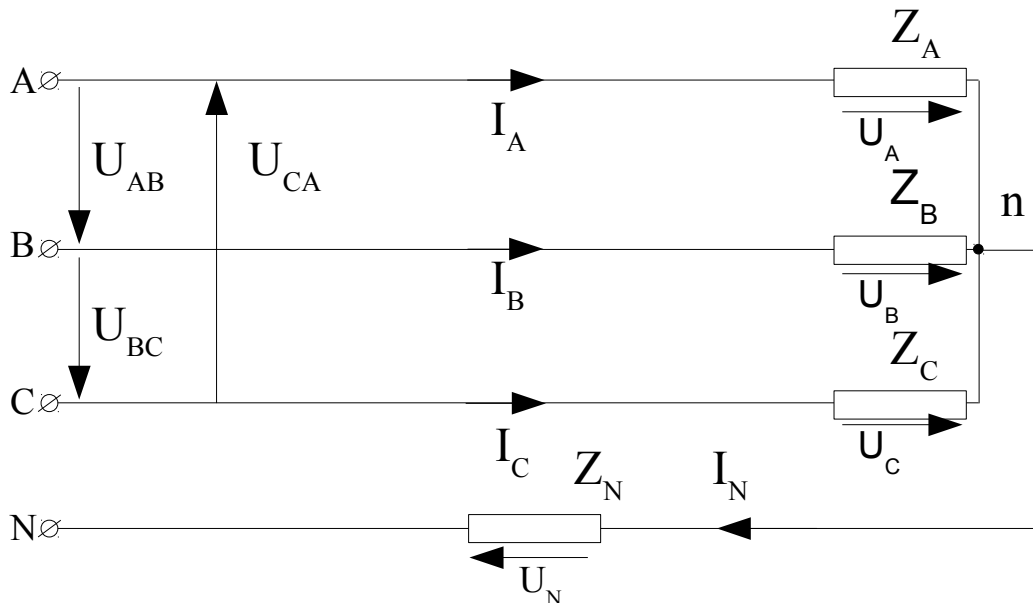
$$\underline{E}_C = \underline{U}_{CA}$$

$$\underline{U}_{AB} = \underline{E}_A = E$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{E}_B = E \left(1 \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{E}_C = E \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

13. Соединение трехфазного потребителя электрической энергии звездой при симметричной нагрузке (соотношения токов и напряжений, векторная диаграмма).



При соединении потребителей звездой имеют место следующие соотношения:

$$E_A = E_B = E_C = E = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \quad \text{- фазные ЭДС генератора, соединенного звездой;}$$

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}} = E \sqrt{3} \quad ;$$

Z_A, Z_B, Z_C - фазные сопротивления трехфазного потребителя, соединенного звездой;

U_A, U_B, U_C - фазные напряжения;

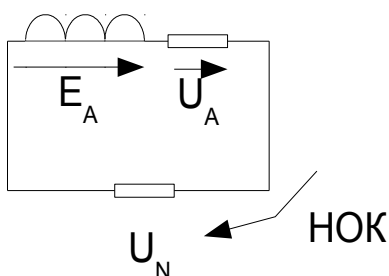
I_A, I_B, I_C - линейные токи;

Z_N - сопротивление нейтрального провода;

I_N - ток в нейтральном проводе;

U_N - падение напряжения в нейтральном проводе.

Фазные напряжения:



Уравнение по II закону Кирхгофа:

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A + \underline{U}_N; \underline{U}_A = \underline{E}_A - \underline{U}_N$$

Аналогично:

$$\begin{aligned} \underline{E}_B &= \underline{U}_B + \underline{U}_N; \underline{U}_B = \underline{E}_B - \underline{U}_N \\ \underline{E}_C &= \underline{U}_C + \underline{U}_N; \underline{U}_C = \underline{E}_C - \underline{U}_N \end{aligned}$$

Фазные (линейные) токи:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A} = (\underline{E}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_A$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B} = (\underline{E}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C} = (\underline{E}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_C$$

Определим \underline{U}_N :

$$\underline{I}_N = \frac{\underline{U}_N}{\underline{Z}_N} = \underline{U}_N \underline{Y}_N$$

По I закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$$

Подставим значения токов:

$$\begin{aligned} \underline{U}_N \underline{Y}_N &= (\underline{E}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_A + (\underline{E}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B + (\underline{E}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_C \\ \underline{U}_N &= \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} \end{aligned}$$

Т.к. $\underline{E}_A = E = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}$

$$\underline{E}_B = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right), \text{ то } \underline{U}_N = \frac{\frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \left[\underline{Y}_A + \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \underline{Y}_B + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \underline{Y}_C \right]}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}$$

$$\underline{E}_C = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

При симметричной нагрузке:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi$$

$$\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}_\phi$$

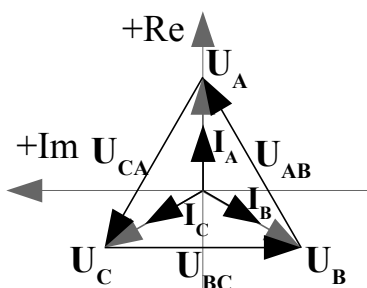
$$\underline{U}_N = \frac{\frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \underline{Y}_\phi \left[1 - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right]}{3 \underline{Y}_\phi + \underline{Y}_N} = 0$$

$$\underline{U}_N = 0 \Rightarrow \underline{I}_N = 0$$

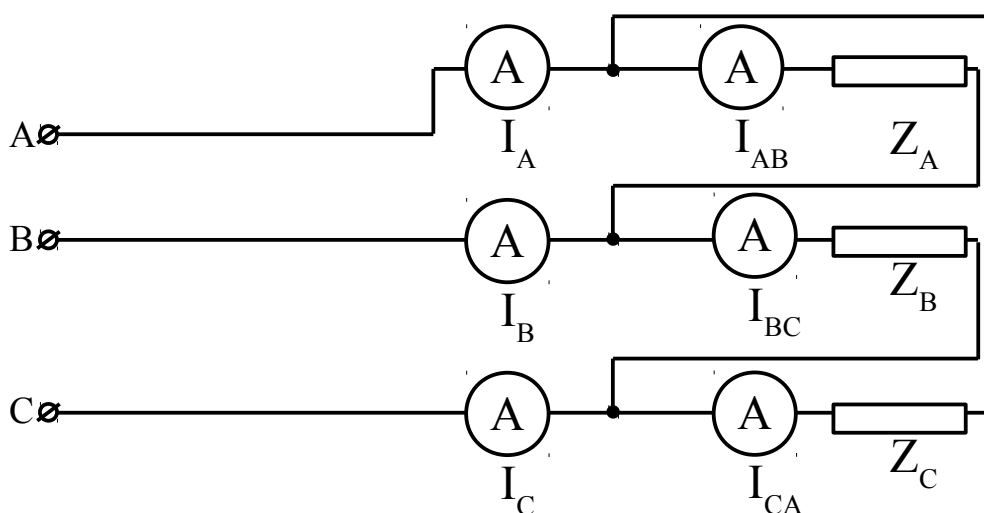
$$\underline{U}_A = \underline{E}_A = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}; \underline{U}_B = \underline{E}_B = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right); \underline{U}_C = \underline{E}_C = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$\underline{I}_A = \underline{E}_A \underline{Y}_A = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \underline{Y}_\phi; \underline{I}_B = \underline{E}_B \underline{Y}_B = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \underline{Y}_\phi; \underline{I}_C = \underline{E}_C \underline{Y}_C = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \underline{Y}_\phi;$$

Для симметричной нагрузки необходимость нейтрального провода отсутствует.



14. Соединение трехфазного потребителя электрической энергии треугольником при симметричной нагрузке (соотношения токов и напряжений, векторная диаграмма).



I_A, I_B, I_C - линейные токи;

I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} - фазные токи;

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} - линейные (фазные) напряжения.

Условие симметрии:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$$

Основные соотношения:

Фазные (линейные) напряжения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= U_{\text{л}} e^{j0} = U_{\text{л}} \\ \underline{U}_{BC} &= U_{\text{л}} e^{-j120^\circ} = U_{\text{л}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ \underline{U}_{CA} &= U_{\text{л}} e^{j120^\circ} = U_{\text{л}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned}$$

Фазные токи:

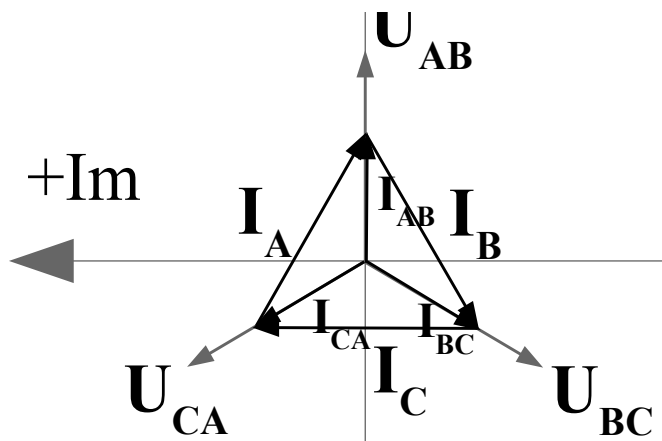
$$\begin{aligned} \underline{I}_{AB} &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} \\ \underline{I}_{BC} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} \\ \underline{I}_{CA} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}} \end{aligned}$$

Линейные токи:

По I закону кирхгофа:

$$\begin{aligned} I_A - I_{AB} + I_{CA} &= 0 \\ I_A &= I_{AB} - I_{CA} \end{aligned}$$

Аналогично
$$\begin{aligned} I_B &= I_{BC} - I_{AB} \\ I_C &= I_{CA} - I_{BC} \end{aligned}$$



15. Мощность трехфазной электрической цепи.

Рассмотрим трехфазный потребитель, имеющий три фазы А, В, С. В зависимости от схемы соединения приемника полные сопротивления фаз будут иметь значения: для звезды Z_A, Z_B, Z_C ; для треугольника Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} . В общем случае при несимметричной нагрузке вектор полной комплексной мощности потребителя \underline{S} равен сумме векторов комплексных

мощностей фаз потребителя:

$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C$$

Комплексная мощность каждой фазы потребителя представим в виде:

$$\begin{aligned} \underline{S}_A &= U_A I_A \cos \varphi_A + j U_A I_A \sin \varphi_A = P_A + j Q_A \\ \underline{S}_B &= U_B I_B \cos \varphi_B + j U_B I_B \sin \varphi_B = P_B + j Q_B, \text{ где} \\ \underline{S}_C &= U_C I_C \cos \varphi_C + j U_C I_C \sin \varphi_C = P_C + j Q_C \end{aligned}$$

U_i, I_i – фазные напряжения и токи потребителя; P_i – активная мощность фазы потребителя, Q_i – реактивная мощность фазы потребителя, φ_i – угол между фазными векторами тока и напряжения фазы потребителя.

Тогда комплексная мощность приемника

$$\underline{S} = (P_A + P_B + P_C) + j(Q_A + Q_B + Q_C) = P + jQ, \text{ где}$$

P, Q – активная и реактивная мощность потребителя.

При этом активная мощность потребителя равна сумме активных мощностей отдельных фаз.

Реактивная мощность потребителя равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз.

Модуль полной мощности:

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

Если нагрузка симметричная, то фазные активные и реактивные мощности равны:

$$P_A = P_B = P_C = P_\phi; Q_A = Q_B = Q_C = Q_\phi; \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\phi$$

Тогда активная и реактивная мощности потребителя равны:

$$\begin{aligned} Q &= 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi \\ P &= 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi \end{aligned}$$

При соединении фаз потребителя звездой:

$$I_\phi = I_L; U_L = \sqrt{3} U_\phi$$

а при соединении треугольником:

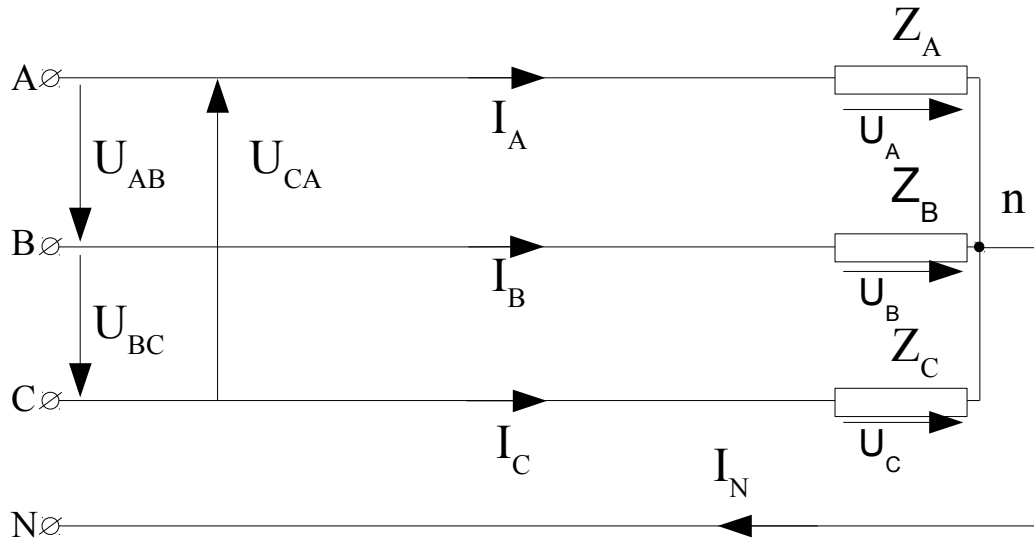
$$U_\phi = U_L; I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

Мощности для звезды и треугольника:

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_\phi \\ Q &= \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_\phi \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_L I_L = 3 U_\phi I_\phi \end{aligned}$$

Отсюда следует вывод, что при симметричной нагрузке мощности потребителя независимо от способа соединения определяются по одним и тем же формулам.

16. Соединение трехфазного потребителя электрической энергии звездой с N-проводом (схема и формула для расчета напряжения U_N).



$$\underline{U}_N = \frac{\frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} [\underline{Y}_A + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \underline{Y}_B + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}) \underline{Y}_C]}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}}$$

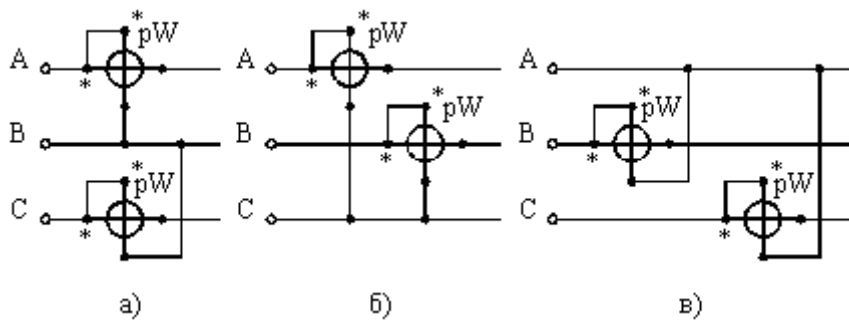
При наличии нейтрального провода с сопротивлением, стремящимся к нулю, проводимость нейтрального провода Y_N стремится к бесконечности:

$$\underline{Z}_N \rightarrow 0 \Rightarrow \underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N} \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{U}_N \sim \frac{1}{\underline{Y}_N} \rightarrow 0$$

17. Коэффициент мощности потребителей электроэнергии и его экономическое значение.

18. Измерение активной мощности трехфазных электрических цепей методом двух ваттметров.

Методом двух ваттметров можно пользоваться при симметричной и несимметричной нагрузке фаз. Три равноценных варианта включения ваттметров:



Активная мощность вычисляется как сумма показаний приборов: $P = W_1 + W_2$.

19. Основные понятия о магнитных цепях и методах их расчета.

20. Магнитные цепи с постоянной магнитодвижущей силой.

Магнитное поле определяется как одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на движущиеся заряженные частицы, магниты и пр.

Интенсивность магнитного поля характеризуется двумя величинами: напряженностью магнитного поля и вектором магнитной индукции. Первая не зависит, а вторая зависит от свойств окружающей среды:

$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, где \vec{B} — вектор магнитной индукции, \vec{H} — напряженность магнитного поля, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — абсолютная магнитная проницаемость, μ — относительная магнитная проницаемость.

В зависимости от величины μ все вещества делятся на три группы: диамагнетики ($\mu < 1$), парамагнетики ($\mu > 1$) и ферромагнетики ($\mu \gg 1$).

Магнитной цепью называется совокупность устройств, содержащих ферромагнитные вещества. Процессы в магнитных цепях описываются с помощью понятий магнитодвижущей силы (МДС), магнитного потока.

Магнитным потоком Φ называется поток вектора магнитной индукции \vec{B} через поверхность \vec{S} :

$$\Phi = \int_S \vec{B} \vec{dS} = B S \cos \alpha, \text{ где } \alpha \text{ — угол между векторами } \vec{B} \text{ и } \vec{S}. \text{ Магнитный поток}$$

измеряется в веберах (Вб).

Теория всех электромагнитных явлений базируется на двух основных законах: *законе электромагнитной индукции* и *законе полного тока*.

Закон электромагнитной индукции гласит: ЭДС, индуцированная через поверхность, ограниченную контуром цепи, равна скорости изменения магнитного потока, взятой с обратным знаком.

Закон полного тока гласит: линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром.

Он выражается формулой:

$$\oint \vec{H} \vec{dl} = \sum_{k=1}^n i_k, \text{ где } \vec{H} \text{ — вектор напряженности магнитного поля, } \vec{dl} \text{ — вектор}$$

бесконечно малого элемента контура, по которому осуществляется обход; i_k — токи, пронизывающие контур. В общем случае, полный ток складывается из токов проводимости, переноса и смещения (возникающие при изменениях электрического поля). Знаки токов определяются по правилу правого винта.

Источником МДС является либо постоянный магнит, либо электромагнит (катушка, обтекаемая током). МДС электромагнита:

$$\Phi = I W, \text{ где } I \text{ — полный ток, } W \text{ — число витков катушки.}$$

В магнитных цепях используется свойство ферромагнитного материала тысячекратно усиливать магнитное поле катушки с током за счет собственной намагниченности.

Рассмотрим расчет магнитной цепи, изображенной на рис. 9.2.

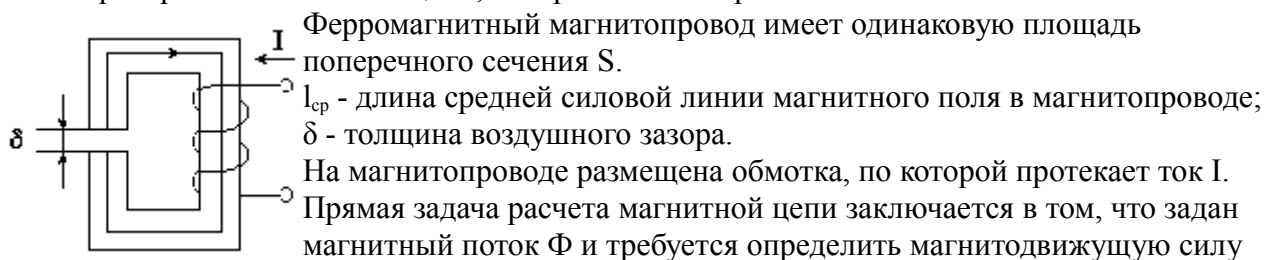


Рисунок 1.

Магнитная цепь с постоянной МДС

Г. Определим магнитную индукцию в магнитопроводе:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

По кривой намагничивания найдем значение напряженности магнитного поля H , соответствующее величине B .

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре:

$$H_1 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}}$$

Магнитодвижущая сила обмотки

$$F = H \cdot l_{\text{оп}} + H_1 \cdot \delta$$

При обратной задаче расчета магнитной цепи по заданному значению магнитодвижущей силы требуется определить магнитный поток. Расчет такой задачи выполняется с помощью магнитной характеристики цепи $F = f(\Phi)$.

Для построения такой характеристики необходимо задаться несколькими значениями Φ и найти соответствующие значения F . С помощью магнитной характеристики по заданной магнитодвижущей силе определяется магнитный поток.

21. Магнитные цепи с переменной магнитодвижущей силой

Магнитные цепи, магнитное поле которых обычно возбуждается катушками с ферромагнитными сердечниками, питающимися от источников переменного тока, называются магнитными цепями с переменными МДС. Они широко применяют при создании разнообразной электрической аппаратуры и электрических машин переменного тока. Для усиления магнитного поля и придания ему требуемой конфигурации электрические машины и аппараты снабжают ферромагнитными сердечниками.

Одной из особенностей магнитных цепей с переменной МДС является то, что токи в обмотках и магнитные потоки в сердечниках взаимосвязаны, т. е. магнитный поток зависит от токов в обмотках, а токи зависят от характера изменения магнитного потока. Эта взаимосвязь усложняет их исследование.

Другой их особенностью является то, что наряду с активной мощностью, расходуемой в активном сопротивлении катушки, эта мощность расходуется также на нагрев ферромагнитного сердечника, что обусловлено гистерезисом и вихревыми токами. Активную мощность, расходуемую на нагрев сердечника, часто называют потерями мощности в стали. Нагревание магнитопроводов ухудшает их энергетические показатели.

В ферромагнитном сердечнике под действием переменного магнитного потока, пронизывающего сердечник, возникают вихри тока, которые замыкаются в сердечнике. Такие токи называются также токами Фуко. Вихревые токи производят размагничивающее действие на магнитопровод, так как, согласно правилу Ленца, магнитное поле вихревых токов является размагничивающим по отношению к магнитному полю, их индуцирующему. Размагничивающее действие вихревых токов сильнее проявляется в середине сердечника и меньше на его поверхности, так как участки в середине сердечника охватываются большими вихревыми токами, чем участки, близкие к поверхности.

Так как размагничивающее действие вихревых токов уменьшается от центра сердечника к его поверхности, то происходит как бы вытеснение основного магнитного потока из середины сердечника к поверхности, т. е. создается магнитный поверхностный эффект.

Иными словами, вихревые токи экранируют внутренние участки магнитопровода от основного магнитного потока, создаваемого током катушки. Магнитный поверхностный эффект растет с повышением частоты переменного тока и особенно заметно начинает проявляться при частотах порядка тысяч герц и выше.

Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов и снижения их экранирующего действия магнитопроводы изготавливают набранными в большинстве случаев из тонких листов стали,

изолированных друг от друга лаком.

22. Катушка с ферромагнитным сердечником.

Для увеличения индуктивности катушек их наматывают на замкнутые сердечники из ферромагнитного материала. В устройствах работающих на низких частотах для сердечников используют электротехническую сталь. При высоких частотах используются сердечники из спрессованного ферромагнитного порошка. Но независимо от конструкции и материала все **катушки с ферромагнитным сердечником** обладают рядом свойств и особенностей, которые мы рассмотрим.

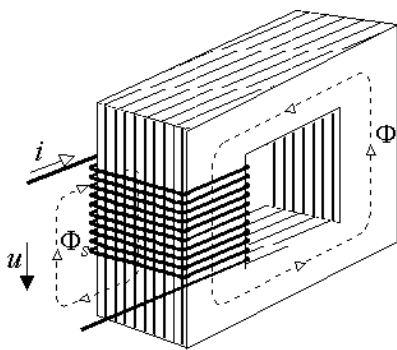


Рис. 1

Рисунок 2. Катушка с ферромагнитным сердечником

В основном катушки имеют конструкцию, показанную на рис. 1. На замкнутый сердечник из ферромагнитного материала различной формы и размеров наматываются проводники, по которым протекает переменный ток.

Протекающий ток создает вокруг катушки переменный магнитный поток, большая часть которого вследствие высокой магнитной проницаемости ферромагнетика замыкается по материалу Φ_0 . Существенно меньшая часть магнитного потока охватывает витки катушки, замыкаясь по воздуху, и образует т.н. поток рассеяния Φ_s . Основной поток и поток рассеяния отличаются друг от друга не только количественно, но и принципиально. **Поток рассеяния** замыкается по среде, магнитная проницаемость которой не зависит от

напряженности магнитного поля. Поэтому его величина линейно связана с величиной тока катушки. **Основной поток** замыкается по ферромагнетика, обладающему сильно выраженной нелинейной зависимостью магнитной проницаемости от напряженности поля и неоднозначной связью между ними. Все это делает невозможным общий точный анализ процессов в катушке и требует принятия допущений, позволяющих рассматривать катушку как объект с линейными характеристиками.

Переменный магнитный поток, пронизывающий материал сердечника, вызывает появление в массе материала ЭДС индукции. Так как все ферромагнетики относятся к проводникам, то под действием этой ЭДС в сердечнике возникают электрические токи, протекающие по замкнутым контурам, расположенным в плоскостях перпендикулярных направлению магнитного потока, и называемые **вихревыми токами или токами Фуко**. **Вихревые токи** создают свой магнитный поток, стремящийся, в соответствии с правилом Ленца, ослабить изменение основного потока. Поэтому они **действуют размагничивающим образом**, уменьшая основной поток. Протекающий по материалу сердечника электрический ток вызывает его нагрев. Если это тепло не используется, то говорят о **потерях на вихревые токи**. Снижение потерь **достигается увеличением удельного сопротивления материала и разделением его на отдельные изолированные друг от друга слои вдоль линий магнитного потока**.

II. Промышленная электроника.

1. Полупроводниковый p-n переход и его свойства.

Полупроводниковые вещества — вещества, удельное сопротивление которых при комнатной температуре больше, чем у проводников ($\rho=10^{-3}-10^{-2}$ Ом*см) , но меньше, чем у непроводников ($\rho=10^{-6}-10^{-4}$ Ом*см).

Электронно-дырочная проводимость обусловлена структурой кристаллической решетки

некоторых веществ, например кремния Si.

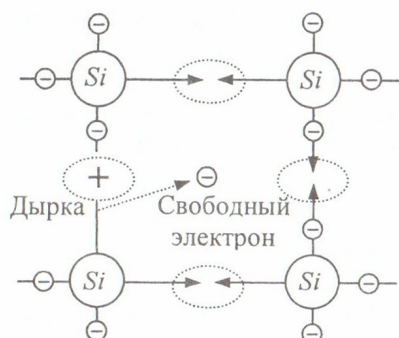


Рис. 6.1. Механизм образования пары электрон-дырка

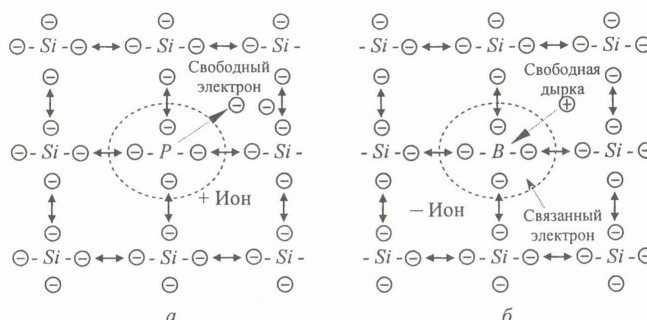


Рис. 6.2. Схема замещения примесными атомами основных атомов в кристаллической решётке

На рисунке 6.1 представлен фрагмент, где электроны атомов кремния образуют валентные связи. Если по каким-либо причинам из решетки будет «выбит» электрон, то на его месте образуется положительно заряженная «дырка», которая ведет себя подобно частице с элементарным положительным зарядом. Электроны и дырки являются носителями зарядов, которые под действием разности потенциалов создают ток в полупроводнике.

Если в кристаллическую решетку Si ввести примесные атомы, то можно изменить соотношение между свободными электронами и дырками в кристалле.

У пятивалентного атома фосфора, введенного в решетку Si (рис. 6.2 а), четыре его валентных электрона вступают в связь с четырьмя электронами соседних атомов кремния, образуя устойчивую оболочку из восьми электронов. Девятый электрон может легко отрываться и становится свободным. Свободные электроны примесного происхождения добавляются к собственным свободным электронам, поэтому проводимость полупроводника становится преимущественно электронной, т. е. n-типа.

Если в решетку Si ввести трехвалентный атом бора (рис. 6.2 б), то для образования устойчивой оболочки из восьми электронов требуется дополнительный электрон, который может быть взят от соседнего атома кремния. На месте изъятго электрона образуется дырка. Дырки, образованные примесными атомами, добавляются к собственным дыркам, поэтому проводимость полупроводника становится преимущественно дырочной, т. е. p-типа.

Свойства p-n перехода.

При соединении полупроводников p- и n-типа идеальной прокладкой возникает пограничный слой, или p-n переход. В пограничной области часть дырок (+) из p-слоя переходит в n-слой, оставляя в p-слое неподвижные отрицательные ионы (-), а часть электронов из n-слоя перейдет в p-слой, оставляя в n-слое неподвижные положительные (+) ионы. Т. о., в пограничном слое образуется «обедненный» электронами и дырками запирающий слой, и возникает разность потенциалов между неподвижными примесными

ионами (U_3) — запирающее напряжение. Возникающее между этими слоями электрическое поле - «потенциальный барьер» - препятствует дальнейшей диффузии свободных электронов и дырок через границу раздела, и ток через р-п прекращается.

Если ЭДС E_b приложена минусом к р-слою, а плюсом к п-слою (обратное включение), то высота потенциального барьера увеличивается (результатирующее напряжение, $U_{pn}=U_3+U_b$), и ток через р-п переход не идет, где U_b — падение напряжения на р-п переходе от внешнего источника тока (E_b). Ток в полупроводнике $I=I_{np}+I_{обр}$.

При увеличении U_{pn} прямой ток I_{np} уменьшается до нуля, а обратный ток $I_{обр}$ увеличивается до тока насыщения. Т. о. $I=I_{обр}$.

Если ЭДС включена плюсом к р-слою, а минусом — к п-слою (прямое включение), высота потенциального барьера уменьшается: $U_{pn}=U_3-U_b$. Ток в полупроводнике: $I=I_{np}-I_{обр}$, где I_{np} — прямой ток, образованный основными носителями заряда (дырками), $I_{обр}$ — обратный ток, образованный неосновными носителями заряда (электроны).

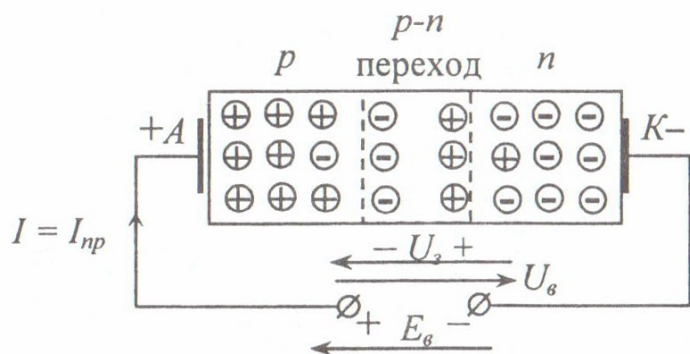


Рис. 6.3. Пространственное распределение зарядов в р-п переходе

Через р-п переход потечет ток после преодоления потенциального барьера (когда $U_3 < U_b$). В идеальном р-п переходе электрический ток может быть только одного направления (рис. 6.3). При уменьшении напряжения на р-п переходе (U_{pn}) обратный ток $I_{обр}$ уменьшается до нуля. Следовательно, при прямом включении ток образован основными носителями зарядов, т. е. $I=I_{np}$.

2. Полупроводниковые диоды, их свойства и область применения.

Полупроводниковый диод — прибор, состоящий из двух слоев с р- и п-проводимостью и с одним р-п переходом. Ток через р-п переход потечет только если $U_3 < U_b$, в этом случае сопротивление диода мало. Если же $U_3 > U_b$, то ток не течет, сопротивление диода велико. На свойстве диодов пропускать ток только в одном направлении основано широкое их применение. В первую очередь они служат для формирования тока одного направления. Также их часто применяют для преобразования переменного тока в постоянный и для

защиты разных устройств от неправильной полярности включения.

3. Принцип действия транзистора.

Транзистор — трехслойный (p-n-p или n-p-n) полупроводниковый прибор с двумя p-n переходами для усиления входного сигнала. Наибольшее применение получили биполярный и полевой транзисторы, их отличие в способе управления током, протекающим через транзистор.

Транзисторы представляют собой тонкую пластинку слаболегированного германия или кремния с электронной или дырочной проводимостью, на которой получены два электронно-дырочных перехода.

Транзисторы имеют три вывода: эмиттер Э, база Б и коллектор К. В зависимости от комбинации p-n перехода транзисторы делятся на два типа: p-n-p и n-p-n. Обе разновидности транзистора отличаются только типом основных носителей заряда и полярностью внешних напряжений. Принцип действия одинаков. Поясим его на примере транзистора типа p-n-p, включение которого в цепь источников питания показано на рисунке 6.7.

Для того, чтобы полупроводниковый триод начал усиливать, его надо соединить с двумя внешними источниками тока так, чтобы один электронно-дырочный переход был включен в прямом направлении, а второй — в обратном. Переход, включаемый в прямом направлении, называется эмиттерным, в обратном — коллекторным.

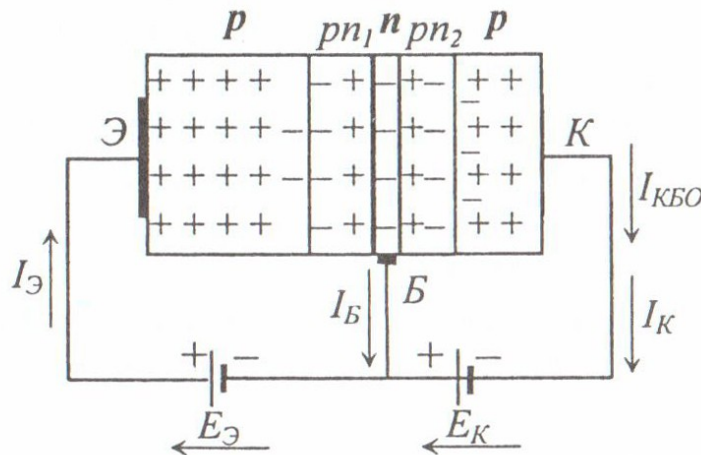


Рис. 6.7. Принцип действия транзистора типа p-n-p

Источник ЭДС E_k выходной цепи транзистора включен между коллектором и базой в непроводящем направлении, поэтому коллекторный p-n переход закрыт и через него проходит только небольшой тепловой ток $I_{кбо}$,

обусловленный дрейфом через коллекторный переход неосновных носителей зарядов: электронов (-) из коллектора в базу и дырок (+) из базы в коллектор.

Если во входную цепь транзистора включить в прямом направлении источник E_3 , то эмиттерный n-p переход откроется и через него в обоих направлениях пойдут основные носители зарядов: электроны из базы в эмиттер и дырки из эмиттера в базу через открытый pn-переход.

Поскольку дырки в базе являются неосновными носителями зарядов, а ширина базы меньше диффузионной длины, на которую успевают продвинуться дырки до рекомбинации (нейтрализации) с электронами, то подавляющее большинство дырок, инжектированных из эмиттера в базу, создадут диффузионный ток в направлении к коллекторному n-p переходу и там, попадая в электрическое поле закрытого коллекторного перехода, создадут дрейфовый ток, вызывая резкое увеличение коллекторного тока. В силу закона электрической нейтральности заряды дырок, прошедших из эмиттера через базу в коллектор, будут компенсированы свободными электронами, приходящими в коллектор из внешней цепи и создающими в ней ток коллектора I_K .

Электроны, являющиеся основными носителями зарядов в базовой области транзистора, под действием электрического поля источника ЭДС E_3 пройдут через эмиттерный n-p переход и создадут ток базы транзистора I_B .

Одной из характеристик транзистора является коэффициент передачи по току

$$\alpha = \frac{I_K}{I_3} \quad (\text{при } U = \text{const}). \quad \text{Как правило, } \alpha = 0,92-0,99.$$

Если не учитывать очень малый по величине тепловой ток коллектора $I_{КБО}$, то в соответствии с 1м законом Кирхгофа можно записать:

$$I_3 = I_B + I_K = I_B + \alpha \cdot I_3, \quad \text{откуда: } I_B = I_3 \cdot (1 - \alpha) \quad \text{или} \quad I_B = I_K \frac{1 - \alpha}{\alpha}.$$

4, 5, 6. Схема включения транзистора с общей базой и ее коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_U и мощности K_P .

Схема с общей базой названа так потому, что базовый переход транзистора является общим для входной и выходной цепей транзистора. В схеме с общей базой входной ток равен току эмиттера I_3 , который обычно на один-два порядка больше тока базы I_B , поэтому входное сопротивление транзистора мало.

Коэффициент усиления по току.

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{i_K}{i_3} = \alpha < 1.$$

Усиление по току отсутствует, так как $K_i < 1$.

Коэффициент усиления по напряжению.

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{i_K \cdot R_n}{i_E \cdot R_{\text{вх}}} = \frac{\alpha \cdot R_n}{R_{\text{ЭБ}}} > 1.$$

Усиление по напряжению происходит, так как $K_u > 1$.

Коэффициент усиления по мощности.

$$K_p = K_i \cdot K_u = \alpha^2 \frac{R_n}{R_{\text{ЭБ}}} > 1.$$

Усиление по мощности происходит, так как $K_p > 1$.

Схема с общей базой применяется в некоторых усилителях с трансформаторной связью между каскадами. Недостатком схемы является трудность согласования большого выходного сопротивления предыдущего каскада с малым входным сопротивлением последующего каскада.

7, 8, 9. Схема включения транзистора с общим эмиттером и ее коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_u и мощности K_p .

Является наиболее распространенной схемой включения транзистора. Во входной цепи проходит сравнительно маленький ток базы, поэтому входное сопротивление достаточно велико. Выходное сопротивление меньше, чем в схеме с общей базой, что позволяет осуществить согласование между каскадами усилителя без применения согласующих трансформаторов. Недостатком схемы является повышенный уровень нелинейных искажений.

Коэффициент усиления по току.

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{i_K}{i_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} > 1.$$

Ток усиливается, так как $K_i > 1$.

Коэффициент усиления по напряжению.

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{i_K \cdot R_n}{i_B \cdot R_{\text{вх}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_n}{R_{\text{вх}}} > 1.$$

Напряжение усиливается, так как $K_u > 1$.

Коэффициент усиления по мощности.

$$K_p = K_i \cdot K_u = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_n}{R_{\text{ЭБ}}} > 1.$$

Мощность усиливается, так как $K_p > 1$.

10, 11, 12. Схема включения транзистора с общим коллектором и ее коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_u и мощности K_p .

Отличается малым выходным сопротивлением, так как в выходной цепи течет ток эмиттера. Входное сопротивление большое, так как входным является ток базы. Схема с

общим коллектором, называемая «эмиттерным повторителем», применяется в качестве согласующего элемента между нагрузкой с малым сопротивлением и выходом предыдущего каскада, обладающим большим входным сопротивлением. Усиления по напряжению транзистор в схеме с общим эмиттером не даёт.

Коэффициент усиления по току.

$$K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{i_K}{i_B} = \frac{1}{1-\alpha} > 1.$$

Ток усиливается, так как $K_i > 1$.

Коэффициент усиления по напряжению.

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{i_{\mathcal{E}} \cdot R_n}{i_B \cdot R_{вх}} = 1$$

Напряжение не усиливается, так как $K_u = 1$.

Коэффициент усиления по мощности.

$$K_p = K_i \cdot K_u = \frac{1}{1-\alpha} > 1.$$

Мощность усиливается, так как $K_p > 1$.

Схема с общим эмиттером используется как согласующий усилитель с большим входным сопротивлением. Она также называется усилителем мощности, или, как было написано выше, эмиттерным повторителем.

13. Однополупериодный выпрямитель, принцип действия, коэффициент пульсации выпрямленного тока.

Однополупериодный выпрямитель представляет собой простейший по исполнению выпрямитель и включает в себя один диод. Принцип действия одноконтурных однополупериодных выпрямителей покажем на примере выпрямительного устройства, схема которого представлена на рисунке 7.3. Схема включает однофазный трансформатор TV, во вторичную обмотку которого включены последовательно диод VD и нагрузочное сопротивление R_n . Первичная обмотка трансформатора присоединена к сети переменного тока. Работа рассматриваемой схемы протекает следующим образом. При подаче переменного напряжения на первичную обмотку трансформатора напряжение на зажимах его вторичной обмотки также будет переменным. Диод проводит ток только в том случае, когда его анод относительно катода будет иметь положительный потенциал. Поэтому ток во вторичной цепи будет протекать только в одном направлении, т. е. в течение положительного полупериода переменного напряжения на первичной обмотке.

В результате этого ток, протекающий в цепи нагрузки, оказывается пульсирующим,

неизменным по направлению, но изменяющимся по величине во времени. Временные диаграммы изменения напряжений и токов, соответствующих однополупериодному выпрямителю, представлены на рис. 7.4.

Качество выпрямления оценивается коэффициентом пульсации. Для рассматриваемой однополупериодной схемы выпрямления:

$$K_n = \frac{A_i}{I_{cp}} = \frac{I_m \pi}{2 I_m} = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

Это означает, что амплитуда A_i переменной составляющей выпрямленного тока в 1,57 раза больше постоянной составляющей I_{cp} .

Реальный диод должен выдерживать максимальное обратное напряжение выпрямителя, то есть при выборе диода для выпрямителя следует выбирать

$$U_m > U_{обр.м} = 3,14 U_{cp}$$

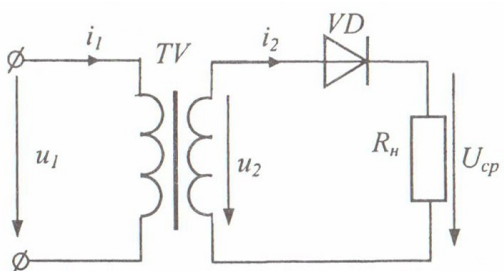


Рис. 7.3. Принципиальная схема однополупериодного выпрямителя переменного тока: u_1, u_2, i_1, i_2 – мгновенные значения напряжения и тока первичной и вторичной обмоток трансформатора соответственно

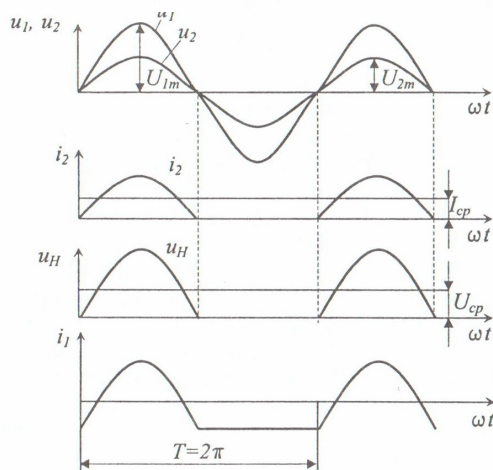


Рис. 7.4. Временные диаграммы токов и напряжений однополупериодного выпрямителя

14. Двухполупериодный выпрямитель, принцип действия, коэффициент пульсации выпрямленного тока.

Схема двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой.

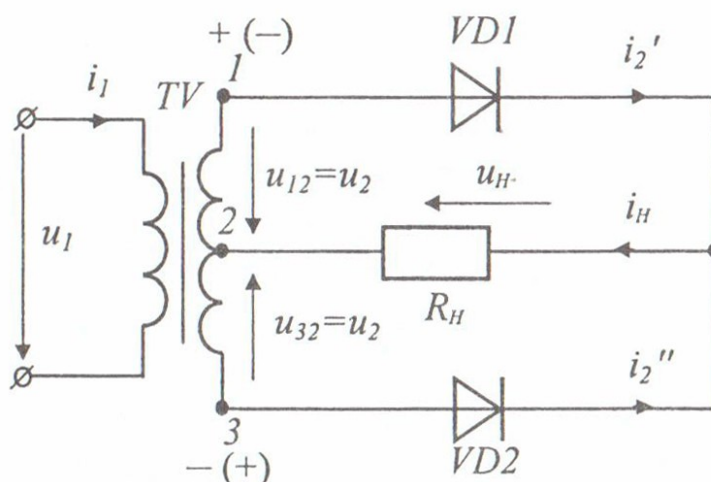
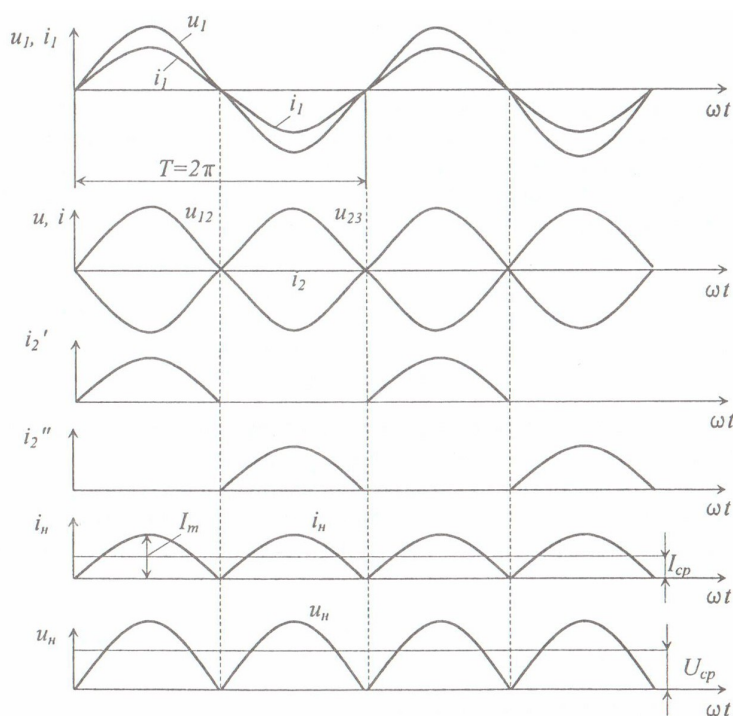


Рис. 7.5. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой 2

Двухполупериодный выпрямитель с нулевой точкой можно рассматривать как два однополупериодных выпрямителя, работающих поочередно на общую нагрузку.

В этой схеме каждый из диодов проводит ток только в течение той части периода, когда анод имеет более высокий потенциал относительно катода, в этом случае диод открыт.

За период входного напряжения u_1 или вторичного напряжения u_2 в один полупериод диод VD1 проводит ток i_2' , а в другой полупериод — проводит ток i_2'' диод VD2. В результате временные диаграммы токов и напряжений приобретают вид, представленный на рисунке 7.6.



Пульсация тока при двухполупериодной схеме значительно уменьшается, так как коэффициент пульсации в этом случае равен:

Рис. 7.6. Временные диаграммы токов и напряжений двухполупериодной выпрямительной схемы с нулевой точкой

$$K_n = \frac{A_i}{I_{cp}} = 0,667, \text{ где } I_{cp} = \frac{2I_m}{\pi}$$

$$A_i = \frac{4I_m}{3\pi} - \text{амплитуда основной гармоники выпрямленного тока.}$$

По сравнению со схемой с нулевой точкой, мостовая схема обладает меньшей на 20% расчётной мощностью, а внешняя характеристика мостовой схемы является менее жёсткой, чем в однополупериодной и двухполупериодной с нулевой точкой схемах выпрямителей.

Мостовая схема однофазного двухполупериодного выпрямителя переменного тока:

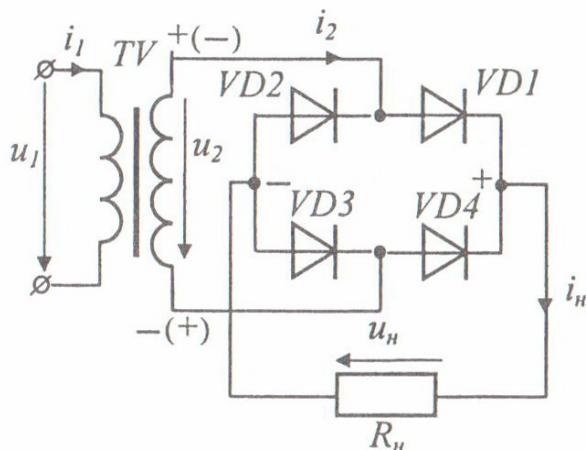
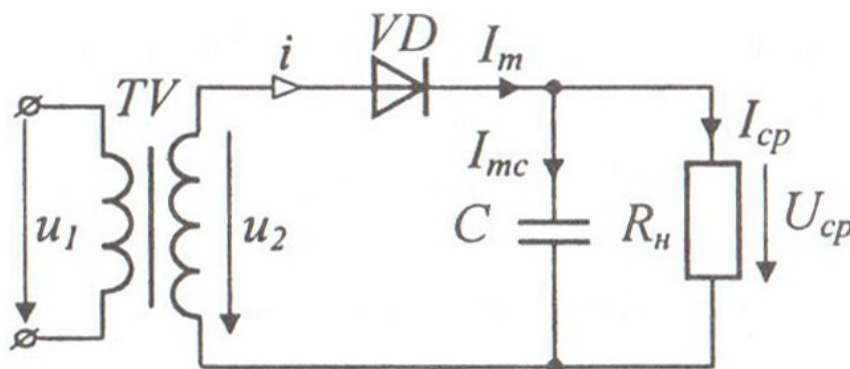


Рис. 7.7. Мостовая схема однофазного двухполупериодного выпрямителя переменного тока

15. *Емкостной электрический фильтр в выпрямительной схеме и его влияние на коэффициент пульсации выпрямленного тока.*

Схема емкостного фильтра показана на рисунке 7.18а



Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, включённый параллельно нагрузке.

рисунок 7.18 а

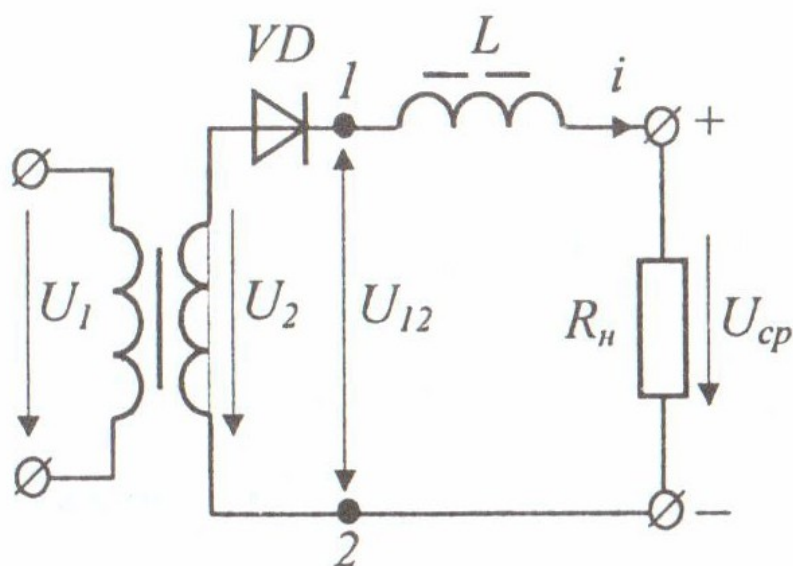
Коэффициент пульсаций в однополупериодной схеме с емкостным фильтром

рассчитывается по формуле:
$$K_n = \frac{1}{4fCR_n}$$

Как видно, чем больше ёмкость, тем меньше коэффициент пульсации, а также увеличивается среднее значение напряжения на сопротивлении нагрузки по сравнению с величиной при отсутствии фильтра и к уменьшению переменной составляющей.

16. *Индуктивный электрический фильтр в выпрямительной схеме и его влияние на коэффициент пульсации выпрямленного тока.*

Схема емкостного фильтра показана на рисунке 7.16а



рисунки 7.16 а

Индуктивный фильтр представляет собой катушку индуктивности, включённую последовательно нагрузке.

$$\text{Коэффициент пульсации на нагрузке: } K_n = \frac{1}{4fL}$$

Индуктивные фильтры целесообразно применять при малых сопротивлениях нагрузок, при малых выпрямленных напряжениях и больших токах. Индуктивные фильтры нельзя применять в однополупериодных выпрямителях, так как диод не может работать в цепи источника переменного тока без отсечки тока. Поэтому при любом значении индуктивного сопротивления фильтра выпрямленный ток останется прерывистым.

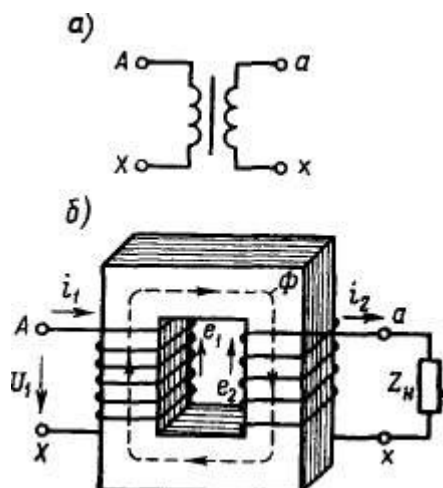
III. Электрооборудование промышленных предприятий.

1. Устройство и принцип действия трансформатора.

Трансформатор — это статический электромагнитный аппарат, действие которого основано на явлении взаимной индукции. Он предназначен для преобразования электрической энергии переменного тока с одними параметрами напряжения и тока в энергию переменного тока с другими параметрами напряжения и тока.

По области применения трансформаторы разделяют на следующие виды:

1. Силовые трансформаторы используются в магистральных распределительных сетях и системах электроснабжения предприятий для распределения электроэнергии.
2. Измерительные трансформаторы используются в качестве элементов для измерения больших по уровню напряжений и токов.
3. Трансформаторы специального назначения используются в специальных электротехнических устройствах: сварочные, импульсные, печные трансформаторы.



Однофазный трансформатор состоит из ферромагнитного провода, собранного из отдельных листов электротехнической стали, на котором расположены две обмотки с разным числом витков, выполненные из медного или алюминиевого провода.

Обмотку, подключенную к источнику питания, называют первичной, а обмотку, к которой подключаются приемники — вторичной.

Если первичную обмотку трансформатора с числом витков w_1 подключить к сети переменного тока, то напряжение сети u_1 вызовет в ней ток i_1 и магнитодвижущую силу (МДС) $F_1 = i_1 w_1$. МДС создает основной переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу трансформатора. Магнитный поток Φ индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции e_1 , а во вторичной обмотке — ЭДС взаимной индукции e_2 . Если к вторичной обмотке присоединена нагрузка Z_H , то цепь вторичной обмотки оказывается замкнутой и ЭДС e_2 вызовет в ней ток i_2 . Ток i_2 создает собственную МДС $F_2 = i_2 w_2$, которая образует основной магнитный поток вторичной обмотки, замыкающийся по магнитопроводу. Сумма основных магнитных потоков образует результирующий магнитный поток трансформатора.

МДС первичной и вторичной обмоток создают также потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, замыкающиеся по магнитопроводу и по воздуху. Потоки рассеяния индуцируют в обмотках трансформатора ЭДС рассеяния $e_{\sigma 1}$ и $e_{\sigma 2}$. Мгновенные значения ЭДС самоиндукции и взаимной индукции первичной и вторичной обмоток определяются по формулам:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Мгновенные значения ЭДС рассеяния равны:

$$e_{\sigma 1} = L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} = -u_{\sigma 1}; e_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} = -u_{\sigma 2}, \text{ где}$$

$L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора; $u_{\sigma 1}$, $u_{\sigma 2}$ — падения напряжения на индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора.

2. Схема замещения и приведение параметров трансформатора.

Схема трансформатора имеет магнитно-связанные контуры, что для анализа электрических режимов трансформатора неудобно. Для замены магнитной связи между обмотками трансформатора составим его эквивалентную электрическую схему. При этом необходимо объединить обе обмотки трансформатора в одну, сделав равными ЭДС этих обмоток: $E_1 = E_2$. Равенство ЭДС будет выполнено, если новое число витков вторичной обмотки сделать равным числу витков первичной обмотки: $w_2' = w_1$. При таком

преобразовании изменятся все величины, характеризующие вторичную цепь и их необходимо пересчитать на новое число витков. Трансформатор, у которого все параметры вторичной обмотки приводятся к параметрам первичной обмотки, называется приведенным. У

приведенного трансформатора коэффициент трансформации $n' = \frac{w_1}{w_2} = 1$.

У приведенного трансформатора параметры первичной обмотки остаются без изменений; мощности и углы между векторами токов и напряжений первичной и вторичной обмоток должны остаться без изменения.

Методика определения приведенных параметров трансформатора:

1. Определим приведенную ЭДС вторичной обмотки E_2' . Учитывая, что

$$\frac{E_1}{E_2} = n, \frac{E_1}{E_2'} = 1, \text{ имеем: } E_2' = nE_2 = E_1 \text{ или приведенное напряжение } U_2' = nU_2 = U_1.$$

2. Определим приведенный вторичный ток I_2' . Из равенства мощностей реальной и приведенной вторичной обмоток трансформатора ($E_2 I_2 = E_2' I_2'$), а также $E_2 I_2 = E_1 I_1$:

$$I_2' = \frac{I_2}{n} = I_1.$$

3. Определим приведенное активное сопротивление вторичной обмотки R_2' . Из равенства активных мощностей реальной и приведенной вторичной обмоток трансформатора ($I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2'$), а также $I_2^2 R_2 = I_1^2 R_1$, имеем: $R_2' = n^2 R_2 = R_1$.

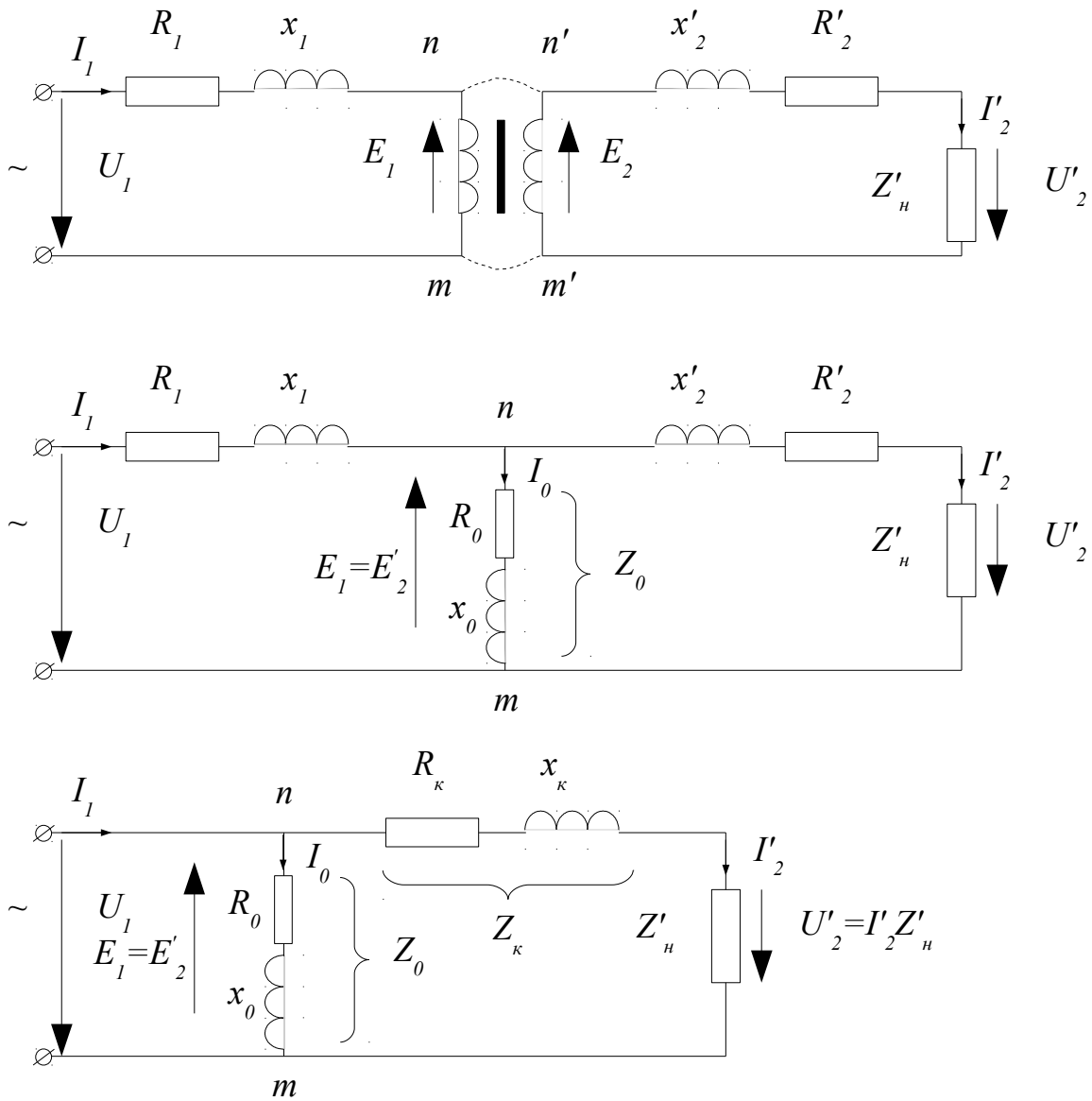
4. По аналогии получаем приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки и приведенное сопротивление нагрузки Z_n' : $x_2' = n^2 x_2$; $Z_n' = n^2 Z_n$.

Если точки m и m' , n и n' объединить, так как они обладают одинаковым потенциалом ($E_1 = E_2'$), а первичную и вторичную обмотки заменить на намагничивающий контур с активным (R_0) и индуктивным (x_0) сопротивлениями, то схему приведенного трансформатора можно заменить на Т-образную схему замещения приведенного трансформатора.

Так как $x_0 \gg x_1$ и $R_0 \gg R_1$ (установлено экспериментально), то эта схема заменяется на упрощенную Г-образную схему замещения с параметрами:

$$I_0 = \frac{U_1}{Z_0} = \frac{U_1}{\sqrt{R_0^2 + X_0^2}}; R_k = R_1 + R_2'; x_k = x_1 + x_2'.$$

После приведения сопротивлений R_2' и x_2' в схеме замещения трансформатора имеем R_k и x_k , которые определяются при опыте короткого замыкания трансформатора.



3. Потери мощности и КПД трансформатора.

В режиме нагрузки трансформатор потребляет из сети электрическую энергию, характеризующую мощность P_1 и передает ее нагрузке мощностью P_2 . Часть потребляемой мощности, называемой потерями $\Delta P = P_1 - P_2$, превращается в трансформаторе в виде тепла.

Потери мощности в трансформаторе состоят из электрических и магнитных: $\Delta P = \Delta P_э + \Delta P_м$, где $\Delta P_э$ — электрические потери мощности в активных R_1 и R_2 сопротивлениях обмоток трансформатора; $\Delta P_м$ - магнитные потери мощности в магнитопроводе трансформатора от вихревых токов и от перемагничивания сердечника.

Электрические потери мощности определяются по формуле:

$$\Delta P_э = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_1 + I_1^2 R_2' = I_1^2 R_к, \text{ где } I_2 = n I_1; R_2 = \frac{R_2'}{n^2}; R_к = R_1 + R_2'.$$

Электрические потери мощности можно записать через их номинальное значение:

$\Delta P_{\text{э}} = I_1^2 R_k = \beta \Delta P_{\text{эн}}$, где $\beta = \frac{I_1}{I_{1н}}$ - коэффициент загрузки трансформатора по току;
 $\Delta P_{\text{эн}} = I_{1н}^2 R_k$ - номинальные электрические потери при номинальном токе.

Магнитные потери в трансформаторе:

$$\Delta P_{\text{м}} = I_0^2 R_0 = \left(\frac{U_1}{Z_0}\right)^2 R_0 = \left(\frac{R_0}{Z_0^2}\right) U_1^2 = K_{\text{м}} U_1^2, \text{ где } K_{\text{м}} = \frac{R_0}{Z_0^2}$$

зависящий от железа и частоты тока; $Z_0 = \sqrt{R_0^2 + x_0^2}$ - полное сопротивление цепи намагничивания.

Магнитные потери мощности можно записать через их номинальное значение:

$$\Delta P_{\text{м}} = K_{\text{м}} U_1^2 = \gamma \Delta P_{\text{мн}}, \text{ где } \gamma = \frac{U_1}{U_{1н}}$$

трансформатора; $\Delta P_{\text{мн}} = K_{\text{м}} U_1^2$ - номинальные магнитные потери при номинальном напряжении.

Таким образом, суммарные потери мощности в трансформаторе:

$$\Delta P = \beta^2 \Delta P_{\text{эн}} + \gamma^2 \Delta P_{\text{мн}}$$

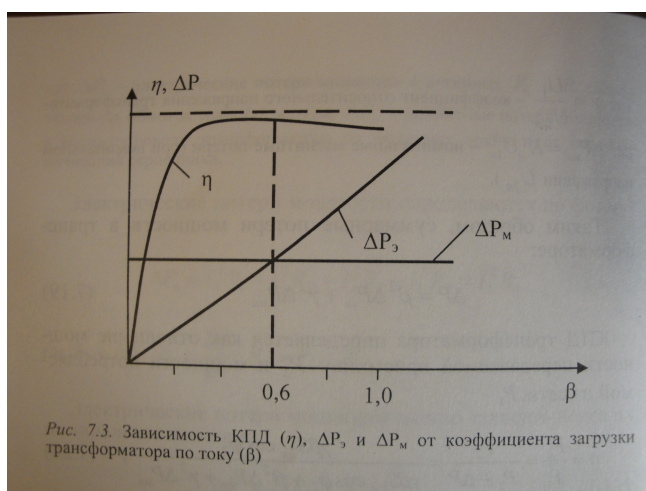
КПД трансформатора определяется как отношение мощности, передаваемой приемнику P_2 к мощности, потребляемой из сети P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{\gamma \beta S_{2н} \cos \varphi_2}{\gamma \beta S_{2н} \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{\text{эн}} + \gamma^2 \Delta P_{\text{мн}}}, \text{ где}$$

$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ - активная мощность, потребляемая трансформатором из сети;

$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \gamma \beta U_{2н} I_{2н} \cos \varphi_2 = \gamma \beta S_{2н} \cos \varphi_2$ - активная мощность, передаваемая

трансформатором в нагрузку; $\gamma = \frac{U_2}{U_{2н}}$; $\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$; $\cos \varphi_2 = \frac{R_{\text{н}}}{Z_{\text{н}}}$; $S_{2н} = U_{2н} I_{2н}$ - номинальная мощность трансформатора.



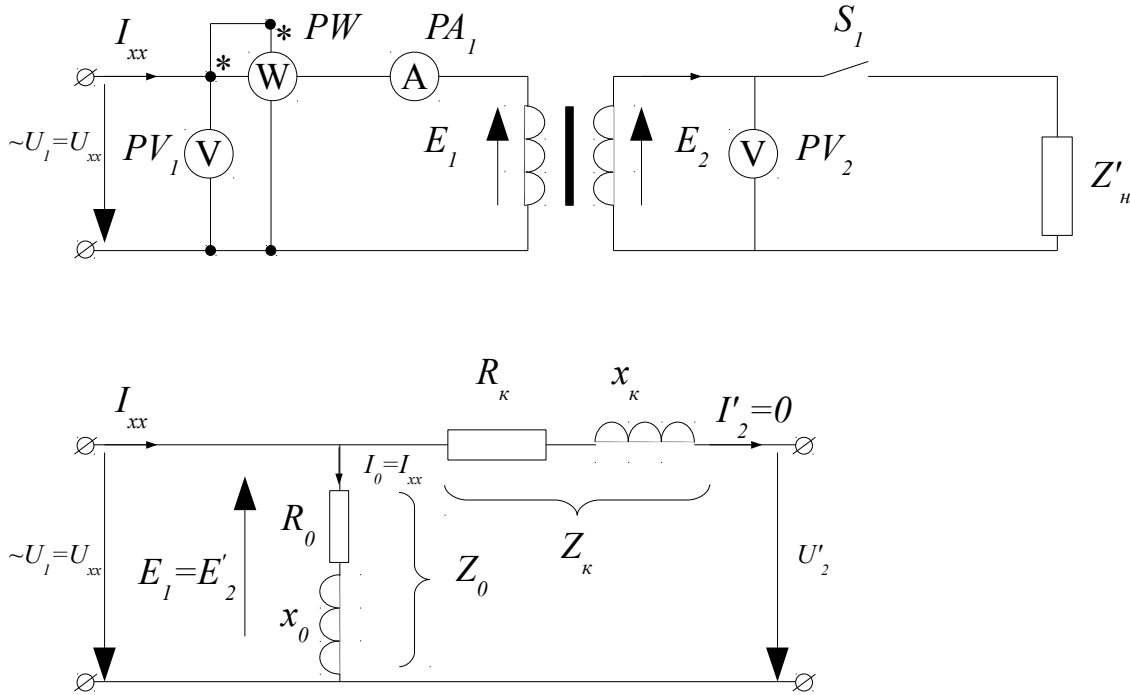
На рисунке показаны зависимости КПД и потерь мощности трансформатора от коэффициента загрузки трансформатора по току, из которых видно, что зависимость $\eta = f(\beta)$ имеет маловыраженный экстремальный характер. КПД достигает максимальных значений, когда переменные электрические потери равны постоянным магнитным потерям при оптимальном значении $\beta_{\text{опт}} = 0,5 \div 0,6$. Высокий КПД силовых трансформаторов достигается при работе с $\beta_{\text{опт}} = 0,5 \div 0,7$ и составляет 97 - 99%.

4. Опыт холостого хода трансформатора и его назначение.

В опыте холостого хода трансформатора первичная обмотка присоединяется к сети, а вторичная — разомкнута. Во вторичной обмотке ток не протекает, и она не оказывает влияния на режим работы первичной обмотки.

На рисунке приведена принципиальная схема опыта холостого хода (ключ S_1 разомкнут) и упрощенная схема замещения.

Определим параметры трансформатора $n, \Delta P_{mn}, R_0, z_0, x_0$ в этом режиме.



В опыте холостого хода измеряются напряжения на входе и выходе трансформатора с помощью вольтметров PV_1 и PV_2 , ток в первичной обмотке с помощью амперметра PA_1 и активная мощность, потребляемая трансформатором из сети с помощью ваттметра PW .

Отношение показаний вольтметров равно коэффициенту трансформации трансформатора: $n = \frac{U_1}{U_2}$.

Поскольку ток холостого хода и активное сопротивление первичной обмотки малы, электрические потери в ней незначительны и намного меньше потерь в магнитопроводе трансформатора ($\Delta P_{эH} = 0$).

Показания ваттметра в этом опыте равны магнитным номинальным потерям ($\beta_{xx} = \frac{I'_2}{I_{2H}} = 0; \gamma_{xx} = \frac{U_1}{U_{1H}} = 1$):

$$P_{Wxx} = \Delta P = \beta^2 \Delta P_{эH} + \gamma^2 \Delta P_{mH} = \Delta P_{mH} .$$

Параметры схемы замещения R_0, x_0, z_0 , а также значения тока $I_1 = I_{xx}$ и его реактивную и активную составляющие I_{1p} и I_{1a} , определяются по опытным данным. Если пренебречь R_1 и x_1 (т. к. $R_1 \ll R_0$ и $x_1 \ll x_0$), то мощность, потребляемая из сети:

$$P_{Wxx} = \Delta P_{mH} = I_{xx}^2 R_0 .$$

Отсюда сопротивление ветви намагничивания $R_0 = \frac{P_{Wxx}}{I_{xx}^2}$ определяется с помощью показаний ваттметра PW и амперметра PA_1 .

Ток в намагничивающем контуре:

$$I_0 = I_{xx} = \frac{U_{1H}}{z_0},$$

откуда $z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{xx}}$ определяется с помощью показаний амперметра PA_1 и вольтметра PV_1 .

Другие параметры трансформатора — индуктивное сопротивление, коэффициент мощности холостого хода, реактивная и активная составляющие тока холостого хода определяются по формулам:

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}; \cos \varphi_0 = \frac{R_0}{z_0}; I_{1p} = I_{xx} \sin \varphi_0; I_{1a} = I_{xx} \cos \varphi_0$$

Потери электрической энергии в магнитопроводе невелики и, следовательно, невелик и ток $I_1 = I_{xx}$, определяющий эти потери. По этой причине намагничивающий ток I_{1p} трансформатора и ток холостого хода трансформатора, равный

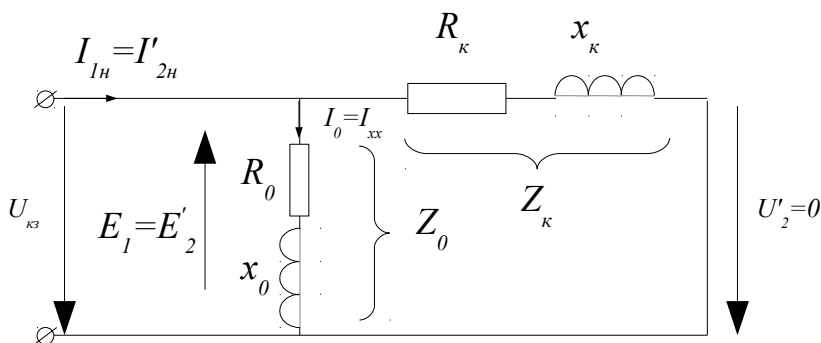
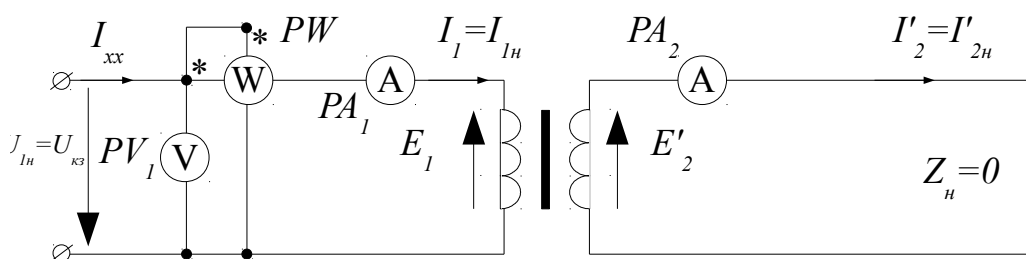
$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}; \cos \varphi_0 = \frac{R_0}{z_0}; I_{1p} = I_{xx} \sin \varphi_0; I_{1a} = I_{xx} \cos \varphi_0, \text{ невелики. Ток холостого хода}$$

составляет всего 5-10% от номинального значения I_{1H} .

Ток I_{1a} значительно меньше I_{1p} , поэтому часто допускают, что $I_{xx} = I_{1p}$.

В технической характеристике трансформатора указывают два параметра режима холостого хода: $i_{1xx} \% = \frac{I_{1xx}}{I_{1H}} * 100 \%$ и $P_x = \Delta P_{MH}$.

5. Опыт короткого замыкания трансформатора и его назначение.



Вторичная обмотка замкнута накоротко. В опыте измеряют напряжение сети (вольтметр PV_1), токи первичной и вторичной обмоток (амперметры PA_1 и PA_2), активная мощность,

потребляемая трансформатором из сети (ваттметр PW).

Значение полного сопротивления обмоток трансформатора z_k составляет всего 5-15% сопротивления нагрузки, и если бы вторичная обмотка оказалась замкнутой накоротко при номинальном напряжении на первичной обмотке, то в обмотках трансформатора возник бы опасный для них ток, больший номинального примерно в 10-20 раз.

Поэтому опыт короткого замыкания проводят следующим образом. После сборки схемы опыта с помощью регулятора напряжения устанавливают напряжение на первичной обмотке такого значения, при котором токи в обмотках равны их номинальным значениям. Напряжение при этом окажется не более 5-15% номинального. Это напряжение называют напряжением короткого замыкания. Затем записывают показания приборов.

Мощность, измеряемая ваттметром PW равна мощности всех потерь энергии в трансформаторе. Однако из-за малого значения напряжения на первичной обмотке потери мощности в магнитопроводе (ΔP_m), которые пропорциональны квадрату амплитуды индукции, или квадрату напряжения первичной обмотки, намного меньше, чем при номинальном напряжении в обмотках при номинальном токе. Поэтому ими можно пренебречь.

Электрические номинальные потери в трансформаторе ($\beta_{кз} = \frac{I_2'}{I_{2н}} = 1 ; \gamma = \frac{U_2}{U_{2н}} = 0$):

$$P_{Wкз} = \Delta P = \beta^2 \Delta P_{эн} + \gamma^2 \Delta P_{мн} = \Delta P_{эн} \quad \text{и определяются по показанию ваттметра PW.}$$

параметры схемы замещения z_k, x_k, R_k определяются следующим образом. Так как номинальный ток $I_{1н} = \frac{U_{кз}}{z_k}$, то $z_k = \frac{U_{кз}}{I_{1н}}$ и определяется с помощью показания вольтметра PV₁ и амперметра PA₁.

Мощность, потребляемая из сети:

$P_{Wкз} = \Delta P_{эн} = I_{1н}^2 R_k$, откуда $R_k = \frac{P_{Wкз}}{I_{1н}^2}$ и определяется с помощью ваттметра PW и амперметра PA₁.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_k = \sqrt{z_k^2 - R_k^2}$.

В технических данных трансформатора указываются два параметра:

$$u_{1к} \% = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} * 100 ; P_{кн} = \Delta P_{эн} .$$

КПД трансформатора можно представить через паспортные данные при $\gamma = 1$:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = 1 - \frac{\beta^2 P_{кн} + P_x}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{кн} + P_x}$$

6. Внешняя характеристика трансформатора и ее влияние на режим работы потребителя электроэнергии.

В рабочем режиме первичная обмотка трансформатора присоединена к сети, а к вторичной присоединены электроприемники с результирующим сопротивлением Z_n .

Зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ или $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = const$ и $\cos \varphi_2 = const$ называется внешней характеристикой.

Значение напряжения на вторичной обмотке определяется не падением напряжения, а потерей напряжения в обмотках. Потеря напряжения есть арифметическая разность между первичным и приведенным вторичным напряжениями:

$$\Delta U'_2 = U_1 - U'_2 \quad .$$

В режиме холостого хода трансформатора ($I_2 = 0$) приведенное напряжение на вторичной обмотке $U'_2 = U'_{xx} = U_1$, а поскольку напряжение U_1 не зависит от нагрузки, то ΔU_2 есть изменение напряжения U'_2 по сравнению с его значением при холостом ходе U'_{xx} :

$$\Delta U'_2 = U'_{xx} - U'_2 \quad , \text{ откуда } U'_2 = U'_{xx} - \Delta U'_2 \quad .$$

Т.к. $U'_2 = n U_2 = U_1$, то $U'_{xx} = U_2 = \frac{U_1}{n}$, а $\Delta U_2 = \frac{\Delta U'_2}{n}$.

Приведенная величина $\Delta U'_2$ для вторичной обмотки из схемы замещения:

$$\Delta U'_2 = I_1 R_k \cos \varphi_2 + j I_1 x_k \sin \varphi_2 \approx U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2 \quad , \text{ где}$$

$$I_1 = \beta I_{1н}; \cos \varphi_2 = \frac{R_n}{Z_n}; \sin \varphi_2 = \frac{x_n}{Z_n}; U_{ka}, U_{kp} \quad - \text{ падение напряжения на активном } R_k \text{ и}$$

реактивном x_k сопротивлениях.

$$U'_2 = U_2 - \Delta U_2 = \frac{U_1}{n} - \frac{\beta}{n} (I_{1н} R_k \cos \varphi_2 + j I_{1н} x_k \sin \varphi_2) \approx \frac{U_1}{n} - \beta_n (U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2) \quad .$$

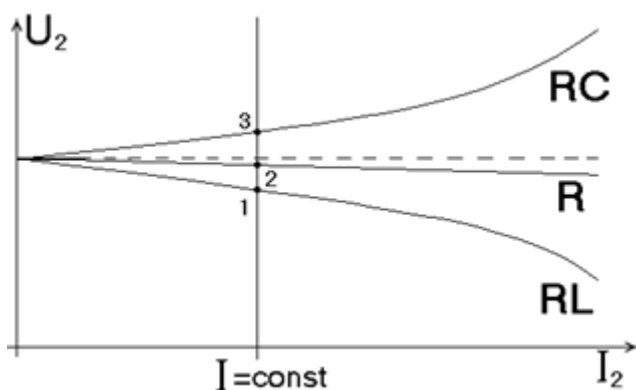


График внешней характеристики для активно-емкостной, активной и активно-индуктивной нагрузок.

7. Устройство трехфазного асинхронного электродвигателя.

Асинхронный двигатель состоит из корпуса с встроенным статором и ротора.



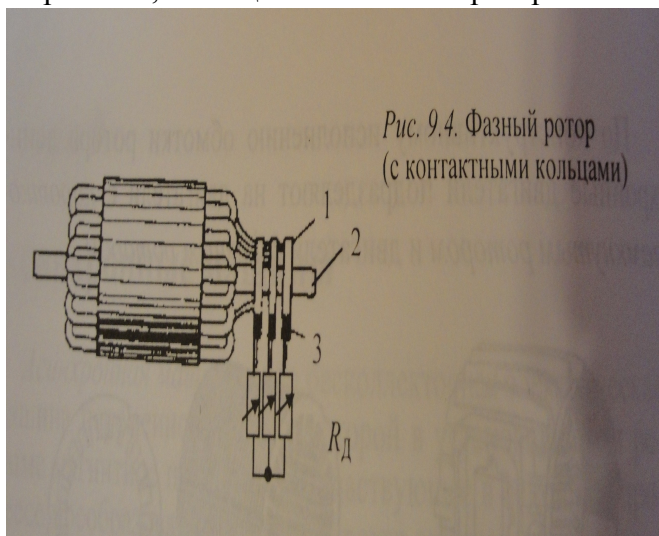
Статор представляет собой полый цилиндр — сердечник, состоящий из стальных пластин, изолированных друг от друга. Они образуют неподвижную часть магнитопровода АД с пазами.

Обмотка статора состоит из трех фазных обмоток, сдвинутых относительно друг друга на угол 120 градусов, укладываемых в пазы сердечника статора. Обмотки статора выполнены из изолированных медных проводов. Три фазы обмотки статора могут соединяться треугольником или звездой и присоединяются к трехфазной сети переменного тока.

Ротор АД также набирают из стальных штампованных листов в форме диска. По конструктивному исполнению обмотки ротора АД подразделяют на двигатели с короткозамкнутым ротором («беличье колесо») и двигатели с фазным ротором.

Короткозамкнутая обмотка образуется медными или латунными неизолированными

стержнями, помещаемыми в пазы ротора.



Поперечное сечение этих стержней имеет форму паза. По торцам стержни соединяют медными короткозамыкающими кольцами.

Обмотку фазного ротора выполняют из изолированных проводников. В пазы ротора, аналогичные по форме пазам статора, укладывают три фазные обмотки, сдвинутые относительно друг друга в пространстве на угол 120 градусов. Таким образом, обмотка фазного ротора получается такой же, как и обмотка статора. Фазные обмотки ротора соединяют звездой, при этом их начала соединяют с контактными кольцами (1),

насаженными на вал (2) и изолированными как от вала, так и друг от друга. Контактные кольца вращаются вместе с валом. По ним скользят неподвижные щетки (3), которые могут быть замкнуты накоротко или присоединены к реостатам R_d , соединенным звездой.

8. Принцип действия и реверс (изменение направления вращения) трехфазного асинхронного двигателя.



Рис. 9.7. Электромагнитная схема (а) и условные обозначения асинхронного двигателя (б, в): б – с короткозамкнутым ротором; в – с фазным ротором.

На рисунке представлена электромагнитная схема АД с короткозамкнутой обмоткой ротора в разрезе, включающая статор (1), в пазах которого расположены три фазные обмотки статора (2), представленные одним витком. Начала фазных обмоток А, В, С, а концы соответственно Х, Y, Z. В цилиндрическом роторе (3) двигателя расположены стержни (4) короткозамкнутых обмоток, замкнутых по торцам ротора пластинами.

При подаче на фазные обмотки статора трехфазного напряжения в витках обмотки статора протекают токи статора i_A, i_B, i_C , создающие вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_1 . Это поле пересекает стержни короткозамкнутой обмотки ротора и в них индуцируются ЭДС, направление которых определяется по правилу правой руки. ЭДС в стержнях ротора создают токи ротора i_2 и магнитное поле ротора, которое вращается с частотой магнитного поля статора. Результирующее магнитное поле АД равно сумме магнитных полей статора и ротора. На проводники с током i_2 , расположенные в результирующем магнитном поле, действуют электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Суммарное усиление $F_{рез}$, приложенное ко всем проводникам ротора, образует вращающийся электромагнитный момент М асинхронного двигателя.

Вращающийся электромагнитный момент М, преодолевая момент сопротивления M_c на валу, принуждает вращаться ротор с частотой n_2 . Ротор вращается с ускорением, если момент М больше момента сопротивления M_c , или с постоянной частотой, если моменты равны.

Частота вращения ротора n_2 всегда меньше частоты вращения магнитного поля машины n_1 , т. к. только в этом случае возникает вращающийся электромагнитный момент. Если частота вращения ротора будет равна частоте вращения МП статора, то ЭМ момент равен нулю (стержни ротора не пересекают МП двигателя, и ток равен нулю). Разница частот вращения МП статора и ротора в относительных единицах называется скольжением двигателя:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} .$$

Скольжение измеряется в относительных единицах или процентах по отношению к n_1 .

В рабочем режиме близком к номинальному скольжение двигателя составляет 0.01-0.06.

Частота вращения ротора $n_2 = n_1(1 - s)$.

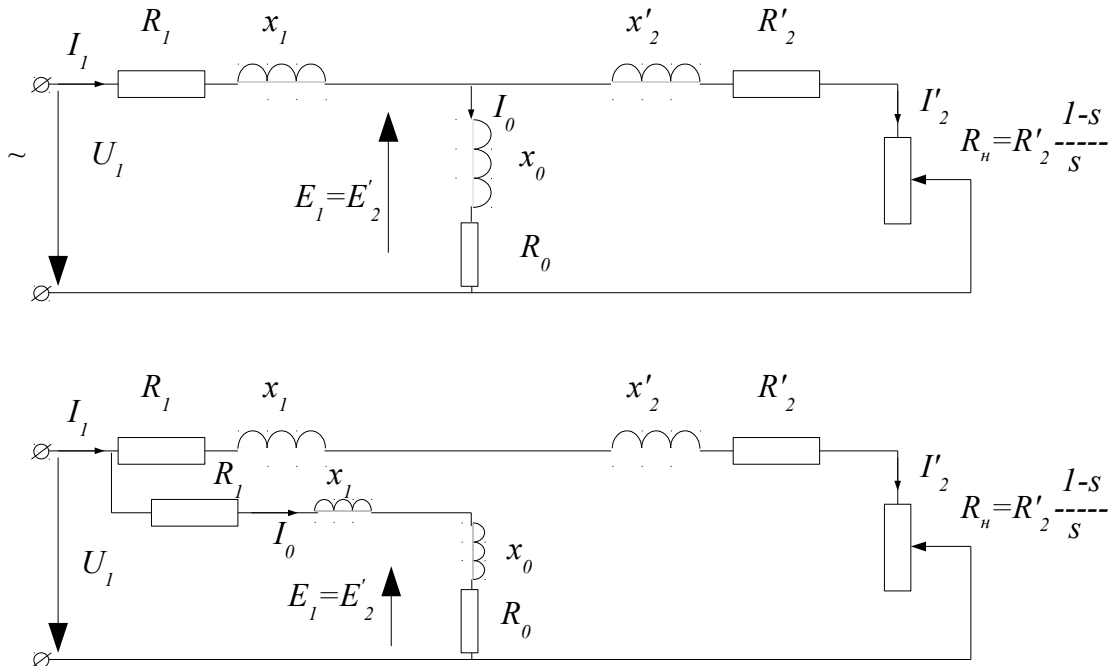
Таким образом, характерной особенностью асинхронной машины является наличие скольжения — неравенства частот вращения магнитного поля двигателя и ротора. Поэтому машину называют асинхронной.

При работе асинхронной машины в двигательном режиме частота вращения ротора меньше частоты вращения МП и $0 < s < 1$. в этом режиме обмотка статора питается от сети, а вал ротора передает механический момент на исполнительный орган механизма. Электрическая энергия преобразуется в механическую.

Если ротор АД заторможен ($s = 1$) – это режим короткого замыкания. В случае, если частота вращения ротора совпадает с частотой вращения МП, то вращающий момент двигателя не возникает. Это режим идеального холостого хода.

Чтобы изменить направление вращения ротора (реверсировать двигатель), нужно изменить направление вращения МП. Для реверса двигателя нужно изменить порядок чередования фаз подведенного напряжения, т. е. Переключить две фазы.

9. Схема замещения и механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя.



В схеме асинхронная машина с электромагнитной связью статорной и роторной цепей заменена эквивалентной приведенной схемой замещения. При этом параметры обмотки ротора R_2 и x_2 приводятся к обмотке статора при условии равенства $E_1 = E'_2$. E'_2 , R'_2 , x'_2 – приведенные параметры ротора.

Активное сопротивление $R_n = R'_2 \frac{1-s}{s}$ рассматривается как внешнее сопротивление, включенное в обмотку неподвижного ротора, т. е. машина имеет активную нагрузку.

Величина этого сопротивления определяется скольжением, а, следовательно, механической нагрузкой на валу двигателя. Если момент сопротивления на валу двигателя $M_c = 0$, то скольжение $s = 0$; при этом величина $R_n = \infty$ и $I'_2 = 0$, что соответствует работе двигателя в режиме холостого хода.

В режиме холостого хода ток статора равен току намагничивания $I_1 = I_0$. Магнитная цепь машины представляется намагничивающим контуром с параметрами x_0 , R_0 – индуктивное и активное сопротивления намагничивания обмотки статора. Если момент сопротивления на валу двигателя превышает его вращающий момент, то ротор останавливается. При этом величина $R_n = 0$, что соответствует режиму короткого замыкания.

Первая схема называется Т-образной схемой замещения АД. Она может быть преобразована в более простой вид. С этой целью намагничивающий контур $Z_0 = R_0 + jx_0$ выносят на общие зажимы. Чтобы при этом намагничивающий ток I_0 не изменял своей величины, в этот контур последовательно включают сопротивления R_1 и x_1 . В полученной Г-образной схеме замещения сопротивления контуров статора и ротора соединены последовательно. Они образуют рабочий контур, параллельно которому включен намагничивающий контур.

Величина тока в рабочем контуре схемы замещения:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' + R_2' \frac{1-s}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \text{ где } U_1 - \text{ фазное}$$

напряжение сети.

Электромагнитный момент АД создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся МП машины. Электромагнитный момент М определяется через электромагнитную мощность:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1}, \text{ где } \omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} - \text{ угловая частота вращения МП статора.}$$

$M = \frac{\Delta P_{э2}}{\omega_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\omega_1 s}$, т. е. ЭМ момент пропорционален мощности электрических потерь в обмотке ротора.

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\omega_1 [(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (x_1 + X_2')^2]}$$

Приняв в уравнении число фаз двигателя $m_1 = 3$; $x_1 + x_2' = x_k$, исследуем его на экстремум. Для этого приравниваем производную dM / ds к нулю и получаем две экстремальные точки. В этих точках момент M_k и скольжение s_k называются критическими и соответственно равны:

$$s_k = \frac{\pm R_2'}{\sqrt{R_1^2 + s_k^2}}, \text{ где «+» при } s > 0, \text{ «-» при } s < 0.$$

$$M_k = \frac{3 U_1^2}{2 \omega_1 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}$$

Зависимость ЭМ момента от скольжения $M(s)$ или от частоты вращения ротора $M(n_2)$ называется механической характеристикой АД.

Если разделить M на M_k , получим удобную форму записи уравнения механической характеристики АД:

$$M = \frac{2 M_k (1 + a s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 a s_k}, \text{ где } a = \frac{R_1}{R_2'}$$

Для АД мощностью выше 10 кВт можно считать, что $R_1 = 0$. Тогда

$$M = \frac{2 M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, M_k = \frac{3 U_\phi^2}{2 \omega_1 x_k}, s_k = \frac{R_2'}{x_k}$$

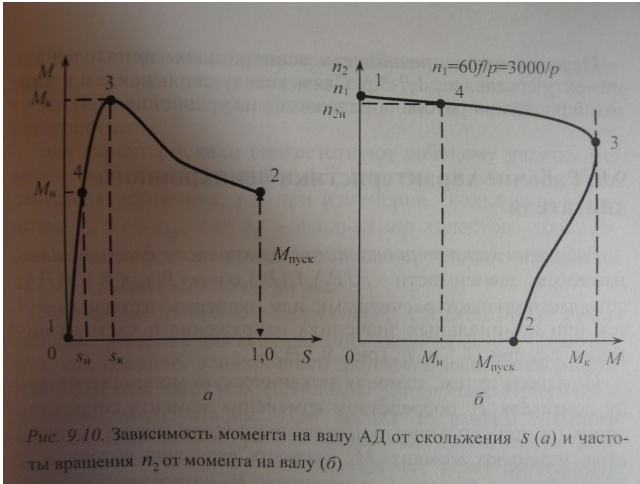


Рис. 9.10. Зависимость момента на валу АД от скольжения s (а) и частоты вращения n_2 от момента на валу (б)

Характерные точки механических характеристик:

- 1 — режим идеального холостого хода. В этой точке $s = 0$; $n_2 = n_1$; $M = 0$.
- 2 — режим короткого замыкания, или начальный этап пуска двигателя. В этой точке $s = 1$; $n_2 = 0$; $M = M_{кз} = M_{пуск}$.
- 3 — режим работы с критическим скольжением. В этой точке $s = s_k$; $M = M_k$.
- 4 — номинальный режим работы, когда $M = M_n$ и $s = s_n = \frac{n_1 - n_{2н}}{n_1}$.

10. Способы пуска трехфазного асинхронного двигателя.

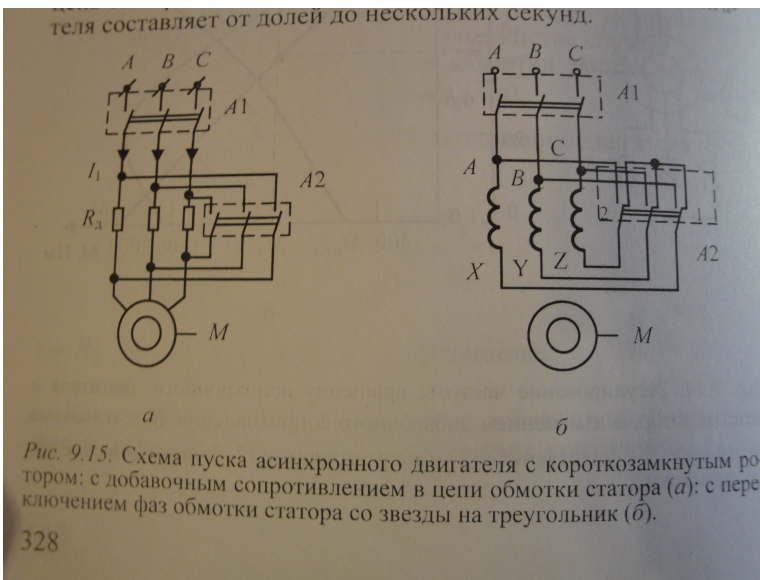


Рис. 9.15. Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: с добавочным сопротивлением в цепи обмотки статора (а); с переключением фаз обмотки статора со звезды на треугольник (б).

Пуск АД осуществляется путем подключения фазных обмоток статора к трехфазной сети переменного тока. Применяется прямой пуск, когда напряжение сети практически мгновенно подается на обмотки статора, и пуск, когда напряжение сети подается на обмотки статора ступенчато или плавно с помощью включения в цепь дополнительных элементов. Время пуска составляет от долей до нескольких секунд.

Для прямого пуска двигателя обмотку его статора подключают к трехфазной сети с помощью автомата

A_1 при включенном автомате A_2 .

После включения автомата A_1 происходит разгон двигателя с увеличением частоты ротора от нуля до установившейся частоты вращения, при которой момент, развиваемый двигателем, равен моменту сил сопротивления на валу. Пуск возможен, если пусковой момент больше момента сопротивления на валу. В процессе пуска ток статора увеличивается от нуля до максимального значения $I_{1max} = (5-7)I_{1н}$ и затем снижается до установившейся величины, близкой к номинальному значению.

Недостатки прямого пуска: большой пусковой ток и относительно малый пусковой момент.

В маломощных сетях для ограничения пускового тока применяют пуск с активным или индуктивным сопротивлением, включенным в цепь обмотки статора или пуск с переключением обмотки со звезды на треугольник.

Перед пуском двигателя с включенным дополнительным сопротивлением R_d автомат A_2 устанавливают в выключенное положение, затем включают автомат A_1 . Происходит пуск двигателя с включенным последовательно с фазной обмоткой сопротивлением R_d , поэтому напряжение на фазах обмотки при пуске ниже напряжения сети, и пусковой ток снижается.

После окончания разбега ротора двигателя включают автомат A_2 , контакты которого шунтируют добавочные пусковые резисторы R_d . Подбором величины R_d можно ограничить пусковой ток до любого значения.

Однако в этом случае одновременно уменьшаются пусковой и критический моменты из-за снижения напряжения на обмотках статора, вызванного падением напряжения на сопротивлении. Вместо активного сопротивления можно включить индуктивность.

Пуск двигателя с переключением обмоток статора двигателя со звезды на треугольник возможен, когда обмотка статора может быть соединена звездой и треугольником и напряжение сети соответствует соединению обмотки статора треугольником.

Установив предварительно автомат A_2 в положение 1, что соответствует соединению фазных обмоток статора звездой, автоматом A_1 подключают обмотку статора к сети. После переходного процесса пуска автомат A_2 переводят в положение 2 (треугольник). Напряжение фазы обмотки статора во время пуска меньше номинального в $\sqrt{3}$ раз. Вследствие этого фазный ток уменьшится в той же степени, а поскольку при соединении треугольником линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз, пусковой линейный ток при таком способе пуска будет меньше по сравнению с пусковым током прямого пуска в 3 раза. Одновременно в 3 раза уменьшается пусковой и максимальный моменты, т. к. они пропорциональны квадрату фазного напряжения. Значение критического скольжения не изменится, т. к. оно не зависит от напряжения.

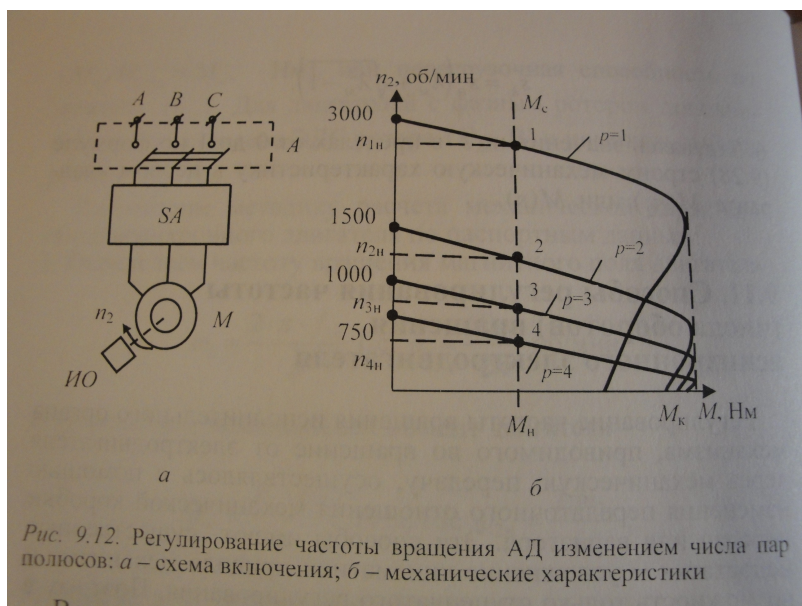
Этот способ пуска возможен только при малых моментах сопротивления на валу.

Пуск двигателя с фазным ротором осуществляется прямым подключением обмотки статора к сети с предварительно введенными в цепь ротора добавочными резисторами R_d . По мере разгона двигателя резисторы R_d выводятся из цепи ротора.

Это позволяет увеличить пусковой момент вплоть до максимального значения, равного критическому, и одновременно снизить пусковой ток.

II. Способы регулирования частоты (скорости) вращения трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора.

Из уравнения частоты вращения МП статора $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ вытекают два наиболее распространенных способа регулирования частоты вращения ротора двигателя: изменением числа пар полюсов p ; изменением частоты напряжения источника f_1 , питающего АД.



Регулирование изменением числа пар полюсов осуществляется изменением схемы соединения фазных обмоток статора. Электродвигатель М подключается к трехфазной сети АВС с помощью автомата А через коммутационное устройство SA. Обмотка каждой фазы состоит из нескольких частей (секций), которые соединяются между собой параллельно или последовательно с помощью устройства SA, образуя разное число пар полюсов двигателя.

Есть и второй способ переключения числа пар полюсов. Статор двигателя имеет две или три независимых обмотки с разным числом пар полюсов p_1, p_2, p_3 . С помощью коммутатора SA при работе двигателя к сети подключается только одна обмотка с конкретным числом пар полюсов, которой соответствует конкретная частота вращения МП статора.

Двигатели с регулированием частоты вращения изменением числа пар полюсов называются многоскоростными.

Для регулирования частоты вращения ротора АД изменением частоты напряжения статора необходимо иметь отдельный источник энергии с регулируемой частотой.

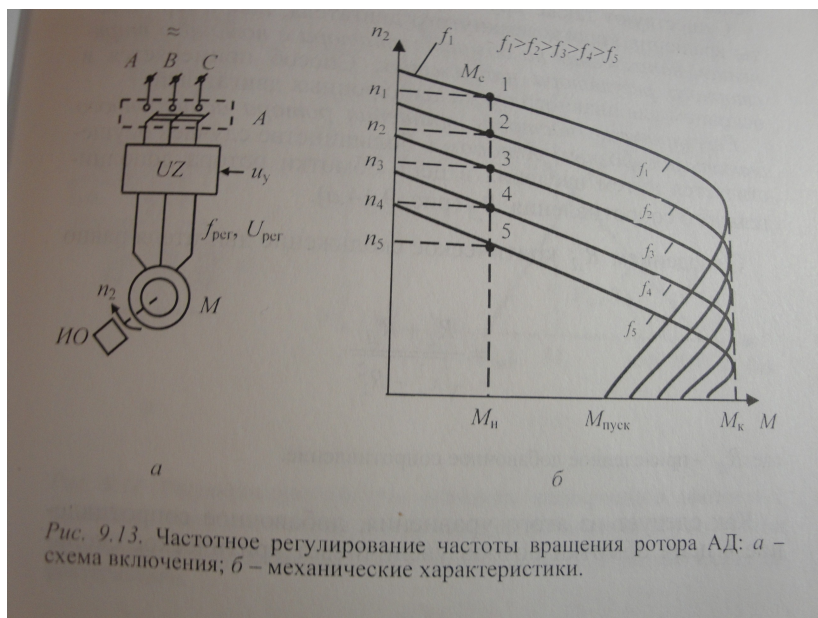


Схема включает транзисторный преобразователь частоты UZ, включенный между сетью с промышленной частотой и обмоток статора АД М. Преобразователь частоты UZ преобразует переменное трехфазное напряжение с частотой $f = 50$ Гц в трехфазное переменное напряжение с регулируемой частотой $f_{пер}$ и напряжением $U_{пер}$. Частота $f_{пер}$ может плавно изменяться от нуля до 90 Гц с помощью сигнала u_y . Такой способ регулирования частоты АД позволяет получить при всех частотах постоянный

критический момент M_k , широкий диапазон и плавное регулирование частоты вращения, однако стоимость преобразователя частоты достаточно велика.

Существуют и другие способы регулирования частоты вращения, например, изменением напряжением на обмотке статора с помощью тиристорного регулятора напряжения, применяемый для плавного пуска АД.

12. Способы регулирования частоты (скорости) вращения трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором (с контактными кольцами).

Регулирование частоты вращения ротора АД с фазным ротором в большинстве случаев осуществляется путем введения в цепь обмотки ротора дополнительного сопротивления R_D .

С введением R_D критическое скольжение двигателя равно

$$s_k = \frac{R_2 + R'_D}{\sqrt{x_k^2 + R_1^2}} .$$

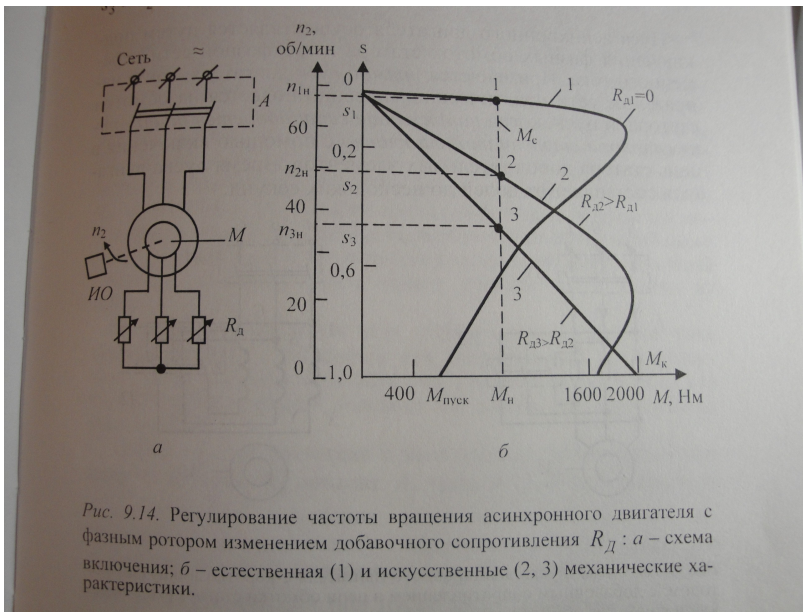


Рис. 9.14. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором изменением добавочного сопротивления R_D : а – схема включения; б – естественная (1) и искусственные (2, 3) механические характеристики.

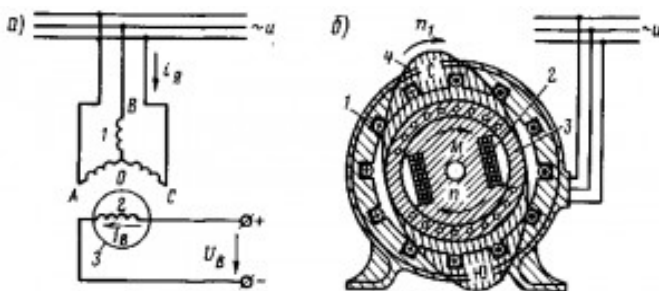
Добавочное сопротивление в цепи обмотки ротора увеличивает критическое скольжение и не влияет на значение максимального момента M_k .

На рисунке естественная (1) и искусственные (2) и (3) механические характеристики для различных значений добавочного сопротивления.

К недостаткам данного способа регулирования частоты вращения ротора относятся: значительные потери энергии в регулировочном добавочном

сопротивлении; малая жесткость механических характеристик, из-за чего небольшое изменение момента на валу вызывает значительное изменение частоты вращения; дискретное регулирование частоты вращения.

13. Устройство и принцип действия синхронного генератора и его применение в промышленности.

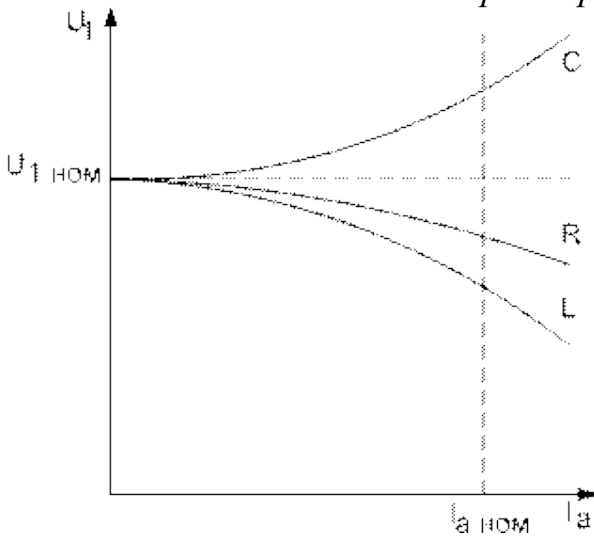


Его обмотки якоря I (рис. 1, а) соединены звездой и подключены к источнику трехфазного переменного тока; в обмотку возбуждения 2 подается от постороннего источника постоянный ток. Благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля 4, созданного трехфазной обмоткой якоря, и поля, созданного обмоткой возбуждения, возникает

электромагнитный момент M (рис. 1,б), приводящий ротор 3 во вращение. Однако в синхронном двигателе, в отличие от асинхронного, ротор будет разгоняться до частоты вращения n_1 , с которой вращается магнитное поле (до синхронной частоты вращения).

Объясняется это тем, что ток в обмотку ротора подается от постороннего источника, а не индуцируется в нем магнитным полем статора и, следовательно, не зависит от частоты вращения вала двигателя. Характерной особенностью синхронного двигателя является постоянная частота вращения его ротора независимо от нагрузки.

14. Внешняя характеристика синхронного генератора.



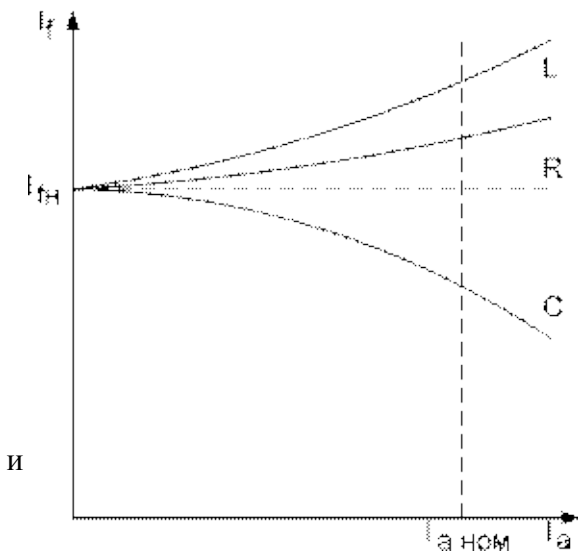
Внешней характеристикой синхронного двигателя называется зависимость напряжения на выводах обмотки статора от тока нагрузки при постоянных коэффициенте мощности, скорости вращения ротора и тока возбуждения.

При индуктивном характере нагрузки ток якоря отстает от напряжения на угол 90 градусов.

При емкостном характере нагрузки ток якоря опережает напряжение на 90 градусов.

Ток якоря совпадает по фазе с напряжением в случае активно-емкостной нагрузки.

15. Регулировочные характеристики синхронного генератора.



Регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения генератора от тока нагрузки при постоянных напряжении, скорости вращения ротора и коэффициенте мощности. Регулировочные характеристики показывают, как нужно изменять ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным.

Также как и внешние характеристики, регулировочные характеристики линейны при небольших токах статора. Регулировочные характеристики при чисто активной, индуктивной емкостной нагрузках показаны на рисунке.

16. Устройство и принцип действия синхронного двигателя.

Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. Так же как и в генераторе, на статоре синхронного двигателя помещается трехфазная обмотка, при включении которой в сеть трехфазного переменного тока будет создано вращающееся магнитное поле, число оборотов в минуту которого $n = \frac{60f}{p}$, где f – частота, p – число пар полюсов.

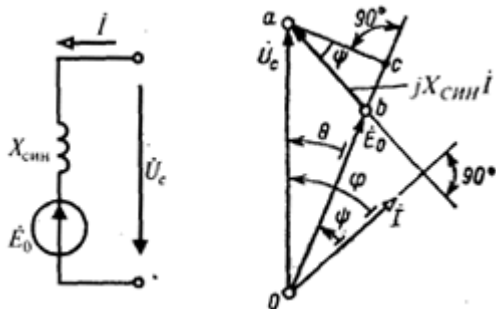


Схема замещения и векторная диаграмма фазы обмотки статора синхронного двигателя

На рисунке представлена схема замещения и векторная диаграмма фазы обмотки статора синхронного двигателя.

На роторе двигателя помещена обмотка возбуждения, включаемая в сеть источника постоянного тока. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов. Вращающееся магнитное поле, полученное токами обмотки статора, увлекает за собой полюса ротора. При этом ротор может вращаться только с синхронной скоростью, т. е. со скоростью, равной скорости вращения поля статора. Таким образом, скорость

синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.

Основным достоинством синхронных двигателей является возможность их работы с потреблением опережающего тока, т. е. двигатель может представлять собой емкостную нагрузку для сети. Такой двигатель повышает $\cos\varphi$ всего предприятия, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии.

Так же как и в генераторах, в синхронных двигателях изменение реактивной мощности, т. е. изменение $\cos\varphi$, достигается регулированием тока возбуждения. При некотором токе возбуждения, соответствующем нормальному возбуждению, $\cos\varphi=1$. Уменьшение тока возбуждения вызывает появление отстающего (индуктивного) тока в статоре, а при увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) — опережающего (емкостного) тока в статоре.

Достоинством синхронных двигателей является также меньшая, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. У синхронных двигателей вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных — квадрату напряжения.

Вращающий момент синхронного двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с магнитным полем полюсов. От напряжения питающей сети зависит только магнитный поток поля статора.

17. Способы пуска синхронного двигателя.

Перед пуском синхронного двигателя необходимо увеличить число оборотов ротора до синхронной скорости. Часто используют так называемый асинхронный пуск. В полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя укладывается пусковая обмотка, выполненная в виде беличьего колеса, наподобие короткозамкнутой обмотки ротора асинхронной машины. Обмотка статора двигателя включается в трехфазную сеть, и пуск его производится так же, как и пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

После того как двигатель разовьет скорость, близкую к синхронной (примерно 95%), обмотка возбуждения включается в сеть постоянного тока и двигатель входит в синхронизм, т. е. скорость ротора увеличивается до синхронной.

При пуске в ход двигателя обмотка возбуждения замыкается на сопротивление, примерно в 10—12 раз большее сопротивления самой обмотки. Нельзя обмотку возбуждения при пуске в ход оставить разомкнутой или замкнуть накоротко. Если при пуске в ход обмотка возбуждения окажется разомкнутой, то в ней будет индуцироваться очень большая ЭДС, опасная как для изоляции обмотки, так и для обслуживающего персонала. Создание ЭДС большой величины объясняется тем, что при пуске в ход поле статора вращается с большой скоростью относительно неподвижного ротора и с большой скоростью пересекает проводники обмотки возбуждения, имеющей большое число витков.

Если обмотку возбуждения замкнуть накоротко при пуске в ход, то двигатель при пуске под нагрузкой может развить скорость, близкую к половине синхронной, и войти в синхронизм не сможет.

Работа синхронной машины с потреблением из сети опережающего тока дает возможность использовать ее в качестве компенсатора. Как выше было отмечено, синхронный двигатель для сети может являться конденсатором и повышать $\cos\varphi$ всей энергоустановки, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии.

18. Угловая и механические характеристики синхронного двигателя.

Зависимость между электромагнитным моментом синхронного двигателя M и углом рассогласования θ , т. е. $M = f(\theta)$, называется угловой характеристикой синхронного двигателя.



Рисунок 3. Угловая характеристика синхронного двигателя.

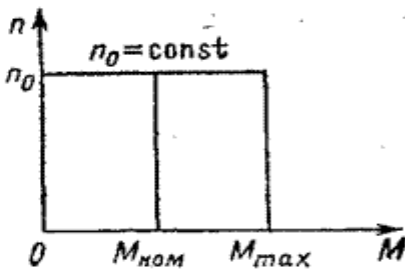


Рисунок 4. Механическая характеристика синхронного двигателя

оказывается зависимым только от угла Θ . Эта зависимость является синусоидальной и называется угловой характеристикой синхронного двигателя (рис. 3).

Угловая характеристика позволяет проанализировать процессы в двигателе при изменении нагрузки на валу ротора.

Механической характеристикой синхронного двигателя называется зависимость частоты вращения от момента двигателя. В синхронном двигателе частота вращения ротора постоянна и от нагрузки не зависит. Поэтому механическая характеристика $n=f(M)$ (рис. 4) – прямая, параллельная оси абсцисс.

19. U-образные характеристики синхронного двигателя (регулирование реактивного тока и реактивной мощности).

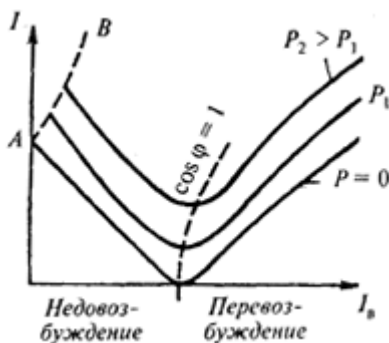


Рисунок 5. Семейство U-образных характеристик синхронного двигателя

Электрическая активная мощность P_1 , потребляемая трехфазным синхронным двигателем из сети, равна утроенной фазной мощности статора $P_1=3U_c I_c \cos\varphi$. Если пренебречь потерями, которые относительно малы, то эта потребляемая активная мощность равна электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой от статора в ротор: $P_1 \approx P_{эм}=3E_0 I_c \cos\psi$ где ψ - угол сдвига фаз между током I и ЭДС E_0 . Из рассмотрения на векторной диаграмме (рис. Ошибка: источник перекрестной ссылки не найден) треугольников Oca и acb следует, отрезок $ac = m_u U_c \sin\Theta = m_u I_{x_{син}} \cos\psi$. Выразим отсюда значение $I_c \cos\psi$ и подставим его в уравнение для $P_{эм}$. Получаем для

механической мощности на валу двигателя

$$P_{мех} \approx P_{эм} = (3E_0 U_c \sin\Theta) / (X_{син}) = P_m \sin\Theta$$

Механический момент на валу двигателя связан с мощностью известным соотношением:

$$M = P_{мех} / \omega = (3E_0 U_c \sin\Theta) / (\omega X_{син}) = M_m \sin\Theta$$

где $\omega = 2\pi n_0 / 60$ - синхронная угловая скорость вращения ротора; $M = (3E_0 U_c \sin\Theta) / (\omega X_{син})$ - максимальный момент, развиваемый двигателем. При постоянных значениях напряжения U_c , угловой скорости ω и синхронного сопротивления $X_{син}$ максимальный момент двигателя M_m зависит только от ЭДС E_0 , т. е. от тока возбуждения ротора I_b . А если ток возбуждения тоже оказывается постоянным, то электромагнитный момент двигателя

Как при увеличении, так и при уменьшении тока возбуждения по сравнению с его номинальным значением значение тока статора увеличивается. Графически зависимость $I = f(I_b)$ похожа на букву U, поэтому она получила название U-образной характеристики. U-образные характеристики строят при условии $U_c, M = \text{const}$. Каждый синхронный двигатель имеет семейство U-образных характеристик для различных значений момента M и мощности P . Пример такого семейства представлен на рис. 5.

20. Устройство и принцип действия генератора постоянного тока.

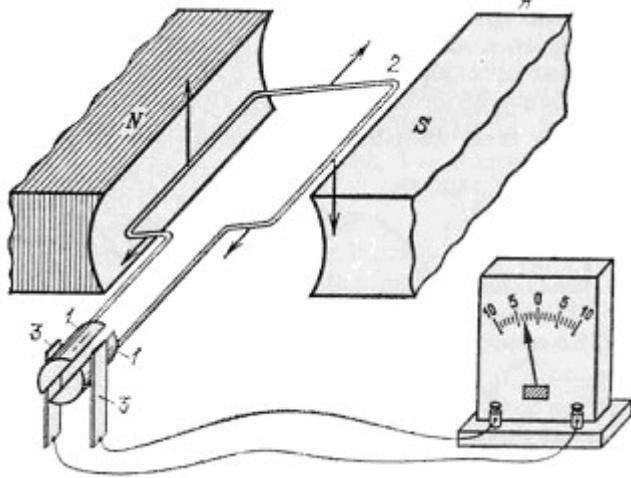


Рисунок 6. Схема генератора постоянного тока: 1 — полукольца коллектора, 2 — вращающийся якорь (рамка), 3 — щетки для съема индукционного тока

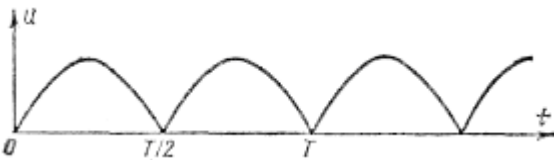
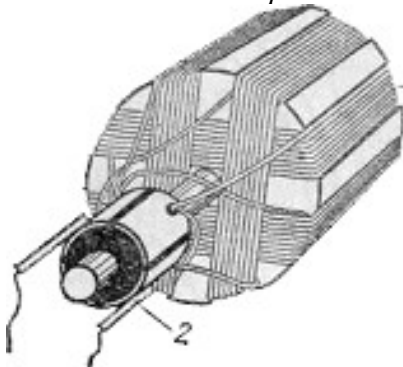


Рисунок 7. Зависимость напряжения на зажимах генератора постоянного тока от времени



от нуля до максимального значения. Такое напряжение и соответствующий ему ток часто называют прямым пульсирующим током. Нетрудно сообразить, что напряжение или ток проходят весь цикл своих изменений за время одного полупериода переменной ЭДС в обмотках генератора. Иначе говоря, частота пульсаций вдвое больше частоты переменного тока.

Чтобы сгладить эти пульсации и сделать напряжение постоянным, якорь генератора составляют из большого числа отдельных катушек, или секций, сдвинутых на определенный угол друг относительно друга, а коллектор составляют из соответствующего числа пластин, лежащих на поверхности цилиндра, вращающегося на общем валу с якорем. Концы каждой секции якоря припаиваются к соответствующей паре пластин, разделенных изолирующим материалом. Такой якорь называют якорем барабанного типа.

21. Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения и их электрические схемы.

Генераторы постоянного тока подразделяются на генераторы с независимым возбуждением и самовозбуждением.

Генераторы первого типа выполняются с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением. В генераторах с электромагнитным возбуждением обмотка возбуждения, располагаемая на главных полюсах, подключается к независимому источнику питания (рис. 8а). Ток в цепи возбуждения I_v может изменяться в широких

Генераторы постоянного тока представляют собой обычные индукционные генераторы, снабженные особым приспособлением — так называемым коллектором, — дающим возможность превратить переменное напряжение на зажимах (щетках) машины в постоянное. Концы якоря соединены с двумя полукольцами, разделенными изолирующим материалом и надетыми на общий цилиндр, который вращается на одной оси с рамкой. К вращающимся полукольцам прижимаются пружинящие контакты (щеточки), с помощью которых индукционный ток отводится во внешнюю сеть. При каждом полуобороте рамки концы ее, припаянные к полукольцам, переходят с одной щетки на другую, а направление индукционного тока в рамке меняется. Поэтому, если переключения в коллекторе происходят в те же моменты времени, когда меняется направление тока в рамке, то одна из щеток всегда будет являться положительным полюсом генератора, а другая — отрицательным, т. е. во внешней цепи будет идти ток, не меняющий своего направления.

В этом случае напряжение на зажимах генератора, хотя и является прямым, т. е. не меняет своего направления, но все время меняется

пределах с помощью переменного резистора R_a . Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения, невелика и в номинальном режиме составляет 1-5 % номинальной мощности якоря генератора. Обычно процентное значение мощности возбуждения уменьшается с возрастанием номинальной мощности машины.

Генераторы с магнитоэлектрическим возбуждением возбуждаются постоянными магнитами, из которых изготавливаются полюсы машины. С таким видом возбуждения выполняются генераторы относительно небольшой мощности, которые применяются в специальных случаях. Недостатком генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением является трудность регулирования напряжения.

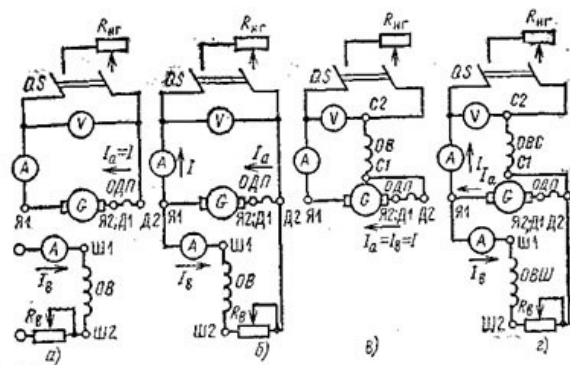


Рисунок 8. Схемы генераторов постоянного тока с а) электромагнитным, б) параллельным, в) последовательным и г) смешанным возбуждением

У генераторов с самовозбуждением обмотка возбуждения получает питание от собственного якоря. В зависимости от способа ее включения генераторы с самовозбуждением подразделяются на генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Схема соединения генератора параллельного возбуждения показана на рис. 8б. Переменный резистор R_B дает возможность изменять ток возбуждения I_B и, следовательно, выходное напряжение. Ток якоря I_a у этого генератора равен $I_a = I + I_B$,

где I - ток нагрузки. Ток возбуждения относительно мал и для номинального режима составляет 1-5 % номинального тока машины.

У генератора последовательного возбуждения обмотка возбуждения соединяется последовательно с якорем и ее ток возбуждения равен току якоря и току нагрузки: $I_B = I_a = I$ (рис. 8в).

У генераторов смешанного возбуждения (рис. 8г) на полюсах размещаются две обмотки. Одна из них, имеющая большое число витков и выполненная из проводников относительно небольшого сечения, включается параллельно с якорем, а другая обмотка с малым числом витков из проводников большого сечения включается последовательно с якорем. Ток якоря такого генератора равен $I_a = I + I_B$.

У этих генераторов параллельная и последовательная обмотки могут быть включены согласно (МДС этих обмоток направлены одинаково) и встречно (их МДС направлены противоположно). В зависимости от этого различаются генераторы смешанного согласного включения и генераторы смешанного встречного включения. Обычно в генераторах смешанного возбуждения основная часть МДС возбуждения создается параллельной обмоткой. Генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения иногда называют соответственно генераторами шунтового, серийного и компаундного возбуждения.

22. Сравнение внешних и характеристик генераторов постоянного тока с различными схемами возбуждения.

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки. Эта характеристика соответствует естественным условиям работы машины, т. е. машина нерегулируема (сопротивление цепи возбуждения r_B постоянно) и снимается при неизменной скорости вращения.

Для генераторов независимого возбуждения при постоянном r_B неизменен также и ток возбуждения I_B . Внешние характеристики такого генератора показаны на рис. 9.

Кривая 1 представляет собой внешнюю характеристику, снятую на понижение напряжения. Для снятия этой характеристики устанавливается такой ток в обмотке возбуждения, чтобы

при холостом ходе генератора напряжение на его зажимах было равно номинальному. Затем нагрузка генератора возрастает при неизменном токе в обмотке возбуждения. При изменении нагрузки от нуля до номинальной напряжение на зажимах генератора уменьшается на величину $\Delta U_{\text{пн}}$.



Рисунок 9.

При снятии характеристики на повышение напряжения (кривая 2) устанавливается такой ток возбуждения, чтобы при номинальной нагрузке генератора напряжение на его зажимах было равно номинальному, после чего нагрузка генератора уменьшается. При изменении нагрузки от номинальной до 0 напряжение на зажимах генератора увеличивается на величину $\Delta U_{\text{пн}}$.

В генераторах параллельного возбуждения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения $r_{\text{в}}$ ток возбуждения не остается постоянным, так как зависит от напряжения на зажимах генератора которое при изменении нагрузки меняется. В генераторах независимого возбуждения увеличение нагрузки вызывает понижение напряжения под воздействием падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 1 на рис. 10).

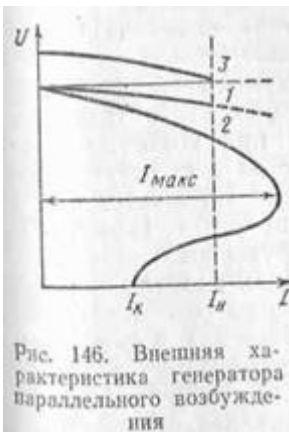


Рисунок 10

В генераторах параллельного возбуждения при уменьшении напряжения также уменьшается ток возбуждения, что вызывает уменьшение магнитного потока и понижение напряжения.

Следовательно, при увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора этого типа уменьшается в большей мере (кривая 2), чем в генераторах независимого возбуждения.

Уменьшение внешнего сопротивления нагрузки вызывает увеличение тока до некоторого значения $I_{\text{макс}}$, не превышающего номинальный ток более чем в 2-2,5 раза. При дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления ток уменьшается и при коротком замыкании будет значительно меньше номинального. Уменьшение сопротивления нагрузки вызывает уменьшение тока возбуждения, так как напряжение генератора понижается.

Если ток возбуждения уменьшился настолько, что машина оказалась размагниченной, то ЭДС понижается в большей степени, чем сопротивление нагрузки, что вызывает уменьшение тока в якоре.

При коротком замыкании генератора параллельного возбуждения ток $I_{\text{в}}$ равен нулю, и обмотка возбуждения не создает магнитного потока. Поэтому в обмотке якоря будет ЭДС только от остаточного магнитного потока $E_{\text{р}}$ имеющая малое значение, и, следовательно, ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$ будет также мал.

Внешняя характеристика на повышение напряжения у генератора параллельного возбуждения (кривая 3) имеет такой же вид, как у генератора независимого возбуждения.



Рисунок 11

Для генератора последовательного возбуждения внешняя характеристика показана на рис. 11. В генераторах этого типа ток возбуждения равен току якоря ($I_{\text{в}}=I_{\text{я}}$), и при холостом ходе ($I_{\text{я}}=0$) в обмотке якоря будет создана ЭДС за счет остаточного магнетизма $E_{\text{р}}$; С увеличением нагрузки также увеличится ток в обмотке возбуждения, что вызывает увеличение ЭДС (кривая 1). Напряжение на зажимах генератора при нагрузке меньше ЭДС вследствие падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 2). Таким образом, у генератора последовательного возбуждения напряжение резко меняется с изменением нагрузки, поэтому они не нашли широкого применения.

В генераторах смешанного возбуждения возможно согласное и встречное включения последовательной и параллельной обмоток.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующая намагничивающая сила, создающая магнитный поток, равна сумме намагничивающих сил параллельной и последовательной обмоток, а при встречном включении — разности этих намагничивающих сил.

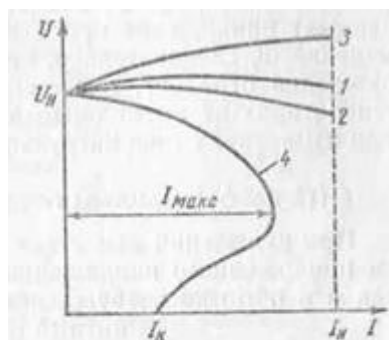


Рис. 148. Внешние характеристики генераторов смешанного возбуждения:
1 — при нормальном возбуждении, 2 — недовозбуждении, 3 — перевозбуждении, 4 — при встречном включении обмоток возбуждения

Рисунок 12

На рис. 12 показаны внешние характеристики генератора смешанного возбуждения.

Увеличение нагрузки такого генератора вызывает уменьшение напряжения на его зажимах за счет падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря. Однако с увеличением нагрузки возрастает также ток в последовательной обмотке возбуждения. Поэтому при согласном включении обмоток увеличение нагрузки будет вызывать увеличение магнитного потока и ЭДС обмотки якоря. Если ЭДС с увеличением нагрузки возрастает на величину, равную понижению напряжения генератора за счет падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря, то напряжение на зажимах генератора будет практически оставаться неизменным при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной (кривая 1).

Такой генератор, называемый нормально возбужденным, не требует изменения тока возбуждения при изменениях нагрузки. При уменьшении числа витков последовательной обмотки ЭДС с возрастанием нагрузки будет увеличиваться в меньшей степени и не будет компенсировать понижения напряжения, так что напряжение на зажимах генератора будет уменьшаться (кривая 2), т. е. генератор недовозбужден. Если число витков последовательной обмотки возбуждения больше, чем то, которое соответствует нормальному возбуждению машины, то генератор окажется перевозбужденным и напряжение на его зажимах будет увеличиваться с увеличением нагрузки (кривая 3). При встречном включении обмоток возбуждения внешняя характеристика подобна этой зависимости для генератора параллельного возбуждения (кривая 4), однако токи максимальный I_m и короткого замыкания I_k у этого генератора будут меньше соответствующих токов генератора параллельного возбуждения за счет размагничивающего действия намагничивающих сил последовательной обмотки.

Наиболее часто применяют генераторы нормально возбужденные, а также перевозбужденные генераторы, позволяющие компенсировать падение напряжения в линии, соединительных проводах и т. д. с тем, чтобы напряжение на нагрузке оставалось постоянным при изменении тока.

23. Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока.

Работа электрического двигателя постоянного тока основана на явлении электромагнитной индукции. Все электрические двигатели постоянного тока состоят из индуктора и якоря, разделенных воздушным зазором.

Индуктор электродвигателя постоянного тока служит для создания неподвижного магнитного поля машины и состоит из станины, главных и добавочных полюсов. Станина служит для крепления основных и добавочных полюсов и является элементом магнитной цепи машины. На главных полюсах расположены обмотки возбуждения, предназначенные

для создания магнитного поля машины, на добавочных полюсах - специальная обмотка, служащая для улучшения условий коммутации.

Якорь электродвигателя постоянного тока состоит из магнитной системы, собранной из отдельных листов, рабочей обмотки, уложенной в пазы, и коллектора, служащего для подвода к рабочей обмотке постоянного тока.

Коллектор представляет собой цилиндр, насаженный на вал двигателя и избранный из изолированных друг от друга медных пластин. На коллекторе имеются выступы-петушки, к которым припаяны концы секций обмотки якоря. Съем тока с коллектора осуществляется с помощью щеток, обеспечивающих скользящий контакт с коллектором. Щетки закреплены в щеткодержателях, которые удерживают их в определенном положении и обеспечивают необходимое нажатие щетки на поверхность коллектора. Щетки и щеткодержатели закреплены на траверсе, связанной с корпусом электродвигателя.

В процессе работы электродвигателя постоянного тока щетки, скользя по поверхности вращающегося коллектора, последовательно переходят с одной коллекторной пластины на другую. При этом происходит переключение параллельных секций обмотки якоря и изменение тока в них. Изменение тока происходит в то время, когда виток обмотки замкнут щеткой накоротко. Этот процесс переключения и явления, связанные с ним, называются коммутацией.

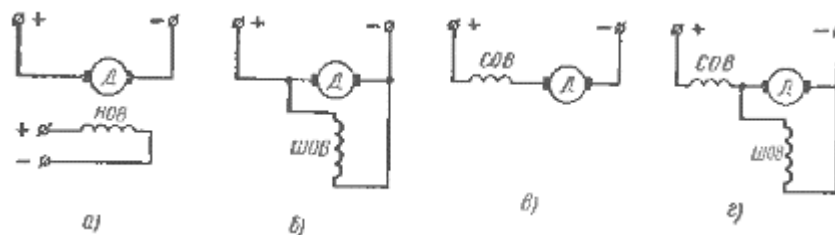


Рисунок 13. Схемы возбуждения электродвигателей постоянного тока: а) независимое, б) параллельное, в) последовательное, г) смешанное

По способу возбуждения электрические двигатели постоянного тока делят на четыре группы:

1. С независимым возбуждением, у которых обмотка возбуждения НОВ питается от постороннего источника постоянного тока.
2. С параллельным возбуждением (шунтовые), у которых обмотка возбуждения ШОВ включается параллельно источнику питания обмотки якоря.
3. С последовательным возбуждением (сериесные), у которых обмотка возбуждения СОВ включена последовательно с якорной обмоткой.
4. Двигатели со смешанным возбуждением (компаундные), у которых имеется последовательная СОВ и параллельная ШОВ обмотки возбуждения.

24. Способы пуска в ход двигателей постоянного тока.

В начальный момент пуска двигателя якорь неподвижен и напряжение в якоре равно нулю, поэтому $I_n = U / R_{я}$.

Сопротивление цепи якоря невелико, поэтому пусковой ток превышает в 10 - 20 раз и более номинальный. Это может вызвать значительные электродинамические усилия в обмотке якоря и чрезмерный ее перегрев, поэтому пуск двигателя производят с помощью пусковых реостатов - активных сопротивлений, включаемых в цепь якоря.

Двигатели мощностью до 1 кВт допускают прямой пуск.

Величина сопротивления пускового реостата выбирается по допустимому пусковому току двигателя. Реостат выполняют ступенчатым для улучшения плавности пуска электродвигателя.

В начале пуска вводится все сопротивление реостата. По мере увеличения скорости якоря возникает противо-ЭДС, которая ограничивает пусковые токи. Постепенно выводя ступень за ступенью сопротивление реостата из цепи якоря, увеличивают подводимое к якору напряжение.

25. *Механическая характеристика двигателей постоянного тока ($n=f(M)$) с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.*

26. *Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока.*

Частота вращения двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{k_c \Phi}$$

где U — напряжение питающей сети; $I_{\text{я}}$ — ток якоря; $R_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря; k_c — коэффициент, характеризующий магнитную систему; Φ — магнитный поток электродвигателя.

Из формулы видно, что частоту вращения электродвигателя постоянного тока можно регулировать тремя путями: изменением потока возбуждения электродвигателя, изменением подводимого к электродвигателю напряжения и изменением сопротивления в цепи якоря.

Наиболее широкое применение получили первые два способа регулирования, третий способ применяют редко: он не экономичен, скорость двигателя при этом значительно зависит от колебаний нагрузки. Механические характеристики, которые при этом получаются, показаны на рис. 14.

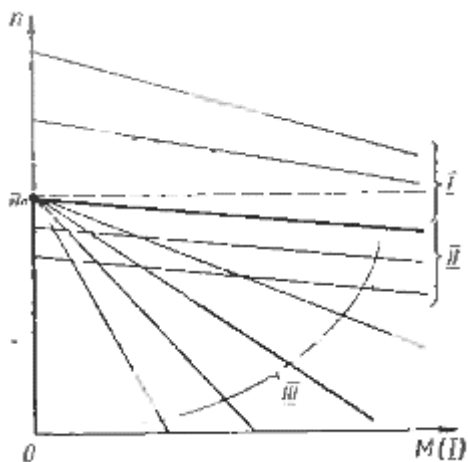


Рисунок 14. Механические характеристики электродвигателя постоянного тока при различных способах регулирования частоты вращения

Жирная прямая — это естественная зависимость скорости от момента на валу, т.е. от тока якоря. Прямая естественной механической характеристики несколько отклоняется от горизонтальной штриховой линии. Это отклонение называют нестабильностью, нежесткостью, иногда статизмом. Группа непараллельных прямых I соответствует регулированию скорости возбуждением, параллельные прямые II получаются в результате изменения напряжения якоря, наконец, веер III — это результат введения в цепь якоря активного сопротивления.

Величину тока возбуждения двигателя постоянного тока можно регулировать с помощью реостата или любого устройства, активное сопротивление которого можно изменять по величине, например транзистора. При увеличении сопротивления в цепи ток возбуждения уменьшается, частота вращения двигателя увеличивается.

При ослаблении магнитного потока механические характеристики располагаются выше естественной (т. е. выше характеристики при

отсутствии реостата).