

• Лекция № 9

• Трансформаторы

- Энергетические показатели однофазного трансформатора
- Трехфазные трансформаторы

• Асинхронный двигатель

- Основные элементы конструкции

Коэффициент полезного действия (КПД)

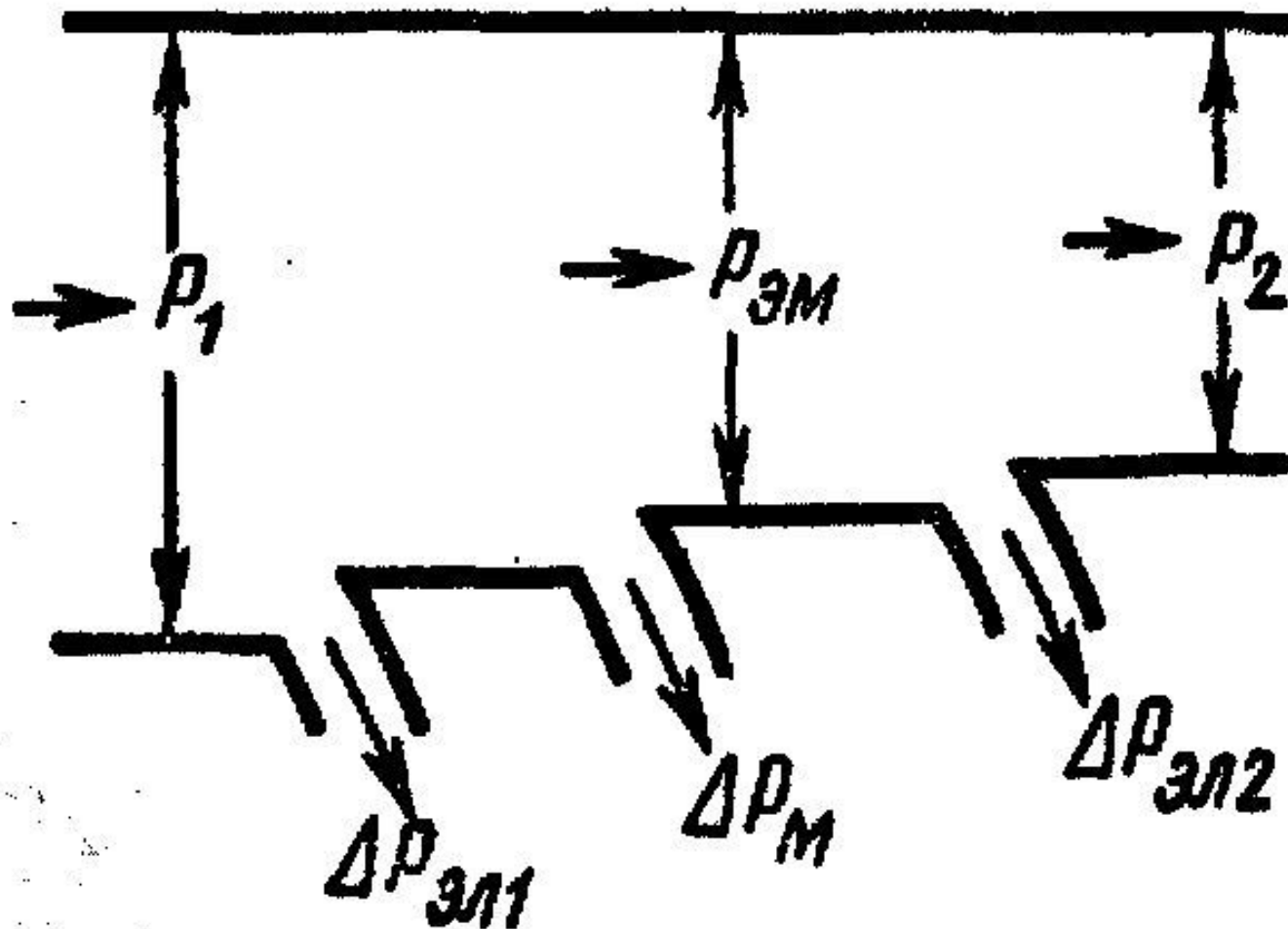
- *Энергетическая диаграмма.* При работе в трансформаторе возникают потери энергии. Коэффициентом полезного действия трансформатора (КПД) называют отношение отдаваемой мощности P_2 к мощности P_1 , поступающей в первичную обмотку:

$$\eta = P_2 / P_1 = (U_2 I_2 \cos \varphi_2) / (U_1 I_1 \cos \varphi_1) \text{ или } \eta = (P_1 - \Delta P) / P_1 = 1 - \Delta P / (P_2 + \Delta P)$$

- ,где ΔP — суммарные потери в трансформаторе.
- Высокие значения КПД трансформаторов не позволяют определять его с достаточной степенью точности путем непосредственного измерения мощностей P_1 и P_2 , поэтому его вычисляют косвенным методом по значению потерь мощности.
- Процесс преобразования энергии в трансформаторе характеризует энергетическая диаграмма. При передаче энергии из первичной обмотки во вторичную возникают электрические потери мощности в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$, а также магнитные потери в стали магнитопровода ΔP_m . (от вихревых токов и гистерезиса). Поэтому
- $P_2 = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{эл2} - \Delta P_m$, и формулу можно представить в виде

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_m} = 1 - \frac{\Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_m}{P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_m}$$

Энергетическая диаграмма трансформатора



Определение потерь мощности

- Величину $P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_m$, поступающую во вторичную обмотку, называют внутренней электромагнитной мощностью трансформатора. Она определяет габаритные размеры и массу трансформатора.
- Согласно требованиям ГОСТа потери мощности в трансформаторе определяют по данным *опытов холостого и короткого замыкания*. Получаемый при этом результат имеет высокую точность, так как при указанных опытах трансформатор не отдает мощность нагрузке. Следовательно, вся мощность, поступающая в первичную обмотку, расходуется на компенсацию имеющихся в нем потерь.

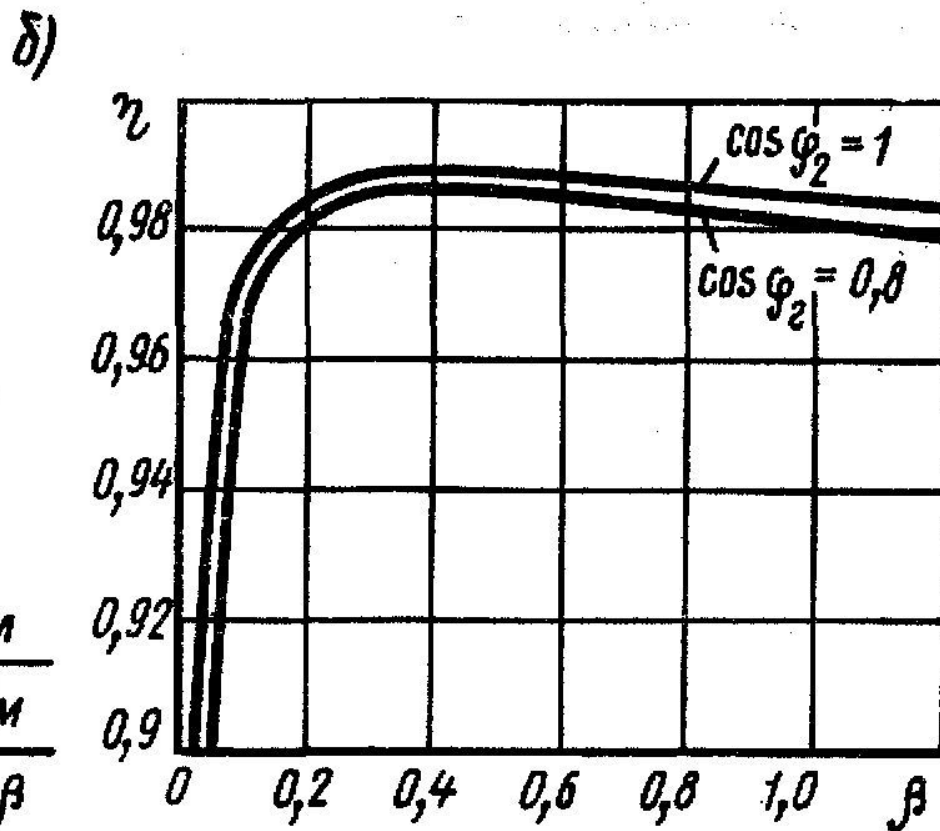
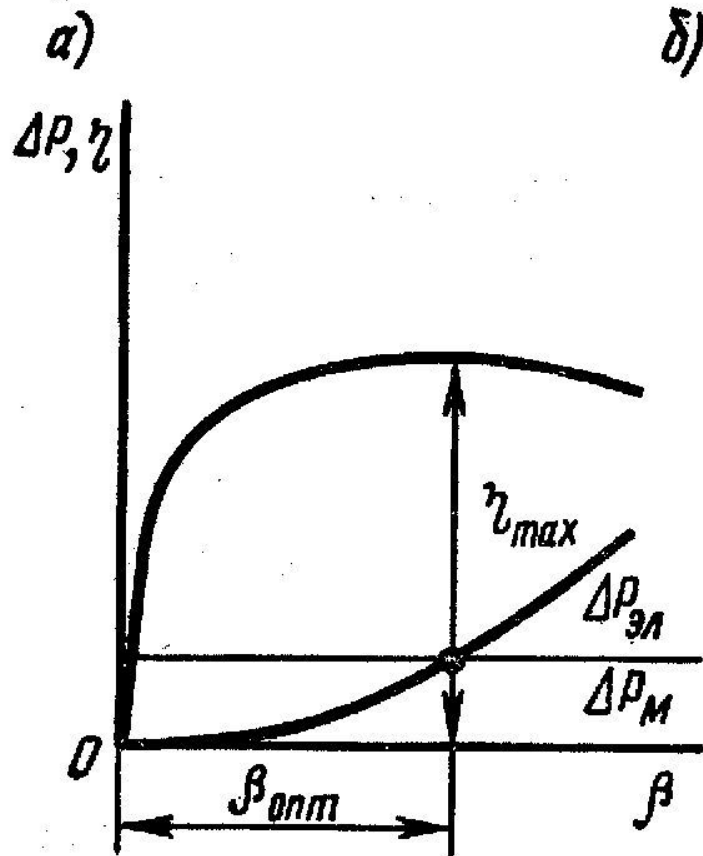
- При опыте холостого хода ток I_{10} невелик и электрическими потерями мощности в первичной обмотке можно пренебречь. В тоже время магнитный поток практически равен потоку при нагрузке, так как его величина определяется приложенным к трансформатору напряжением. Магнитные потери в стали пропорциональны квадрату значения магнитного потока. Следовательно, с достаточной точностью можно считать, что магнитные потери в стали магнитопровода равны мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении, т.е.
- $\Delta P_M \approx P_{10}$. Для определения суммарных электрических потерь, т.к. $I_{10} \approx 0$, полагают, что $I'_2 = I_1$. При этом
- $\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2 \approx I_2'^2 (R_1 + R_2) \approx I_2'^2 R_k$ или $\Delta P_{эл} \approx \beta^2 I_{2н}^2 R_k \approx \beta^2 \Delta P_{эл.н}$
- где $\Delta P_{эл.н}$ — суммарные электрические потери при номинальной нагрузке, $\beta = I_2 / I_{2н}$ — коэффициент нагрузки трансформатора.

- Величину $\Delta P_{\text{эл.н}} \approx I_{2\text{н}}'^2 R_{\text{к}} \approx I_{1\text{н}}^2 R_{\text{к}}$ можно с достаточной степенью точности принять равной мощности $P_{\text{к}}$, потребляемой трансформатором при опыте короткого замыкания, который проводится при номинальном токе нагрузки. При этом магнитные потери в стали $\Delta P_{\text{м}}$ весьма малы по сравнению с потерями $\Delta P_{\text{эл}}$ из-за сильного уменьшения напряжения U_1 , а следовательно, и магнитного потока трансформатора и ими можно пренебречь. Таким образом,
- $\Delta P_{\text{эл}} = \beta^2 P_{\text{к}}$, полные потери $\Delta P = P_{10} + \beta^2 P_{\text{к}}$. Подставляя полученные значения P в и учитывая, что $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2 \approx \beta S_{\text{ном}} \cos\varphi_2$, находим

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_{\text{к}} + P_{10}}{\beta S_{\text{н}} \cos\varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{10}}$$

- Эта формула рекомендуется ГОСТом для определения КПД трансформатора. Значения P_{10} и $P_{\text{к}}$ для силовых трансформаторов приведены в соответствующих стандартах и каталогах.

Зависимость КПД от нагрузки



- При $\beta = 0$ полезная мощность и КПД равны нулю. С увеличением отдаваемой мощности КПД увеличивается, так как в энергетическом балансе уменьшается удельное значение магнитных потерь в стали, имеющих постоянное значение. При некотором значении β_{opt} кривая КПД достигает максимума, после чего начинает уменьшаться с увеличением нагрузки. Причиной этого является сильное увеличение электрических потерь в обмотках, возрастающих пропорционально квадрату тока, т.е. пропорционально β^2 , в то время как полезная мощность P_2 возрастает только пропорционально β .

- Максимальное значение КПД в трансформаторах большой мощности достигает весьма высоких пределов (0,98...0,99). Оптимальный коэффициент нагрузки $\beta_{\text{опт}}$, при котором КПД имеет максимальное значение, можно определить, взяв первую производную $d\eta/d\beta$ по формуле и приравняв ее нулю. При этом
- $\beta_{\text{опт}}^2 P_{\text{к}} = P_{10}$ или $\Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{м.}}$. Следовательно, КПД имеет максимум при такой нагрузке, при которой электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали. Это условие (равенство постоянных и переменных потерь) приближенно справедливо и для других типов электрических машин. Для серийных силовых трансформаторов

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_{10} / P_{\text{к}}} \approx \sqrt{0,2 \div 0,25} \approx 0,45 \div 0,5$$

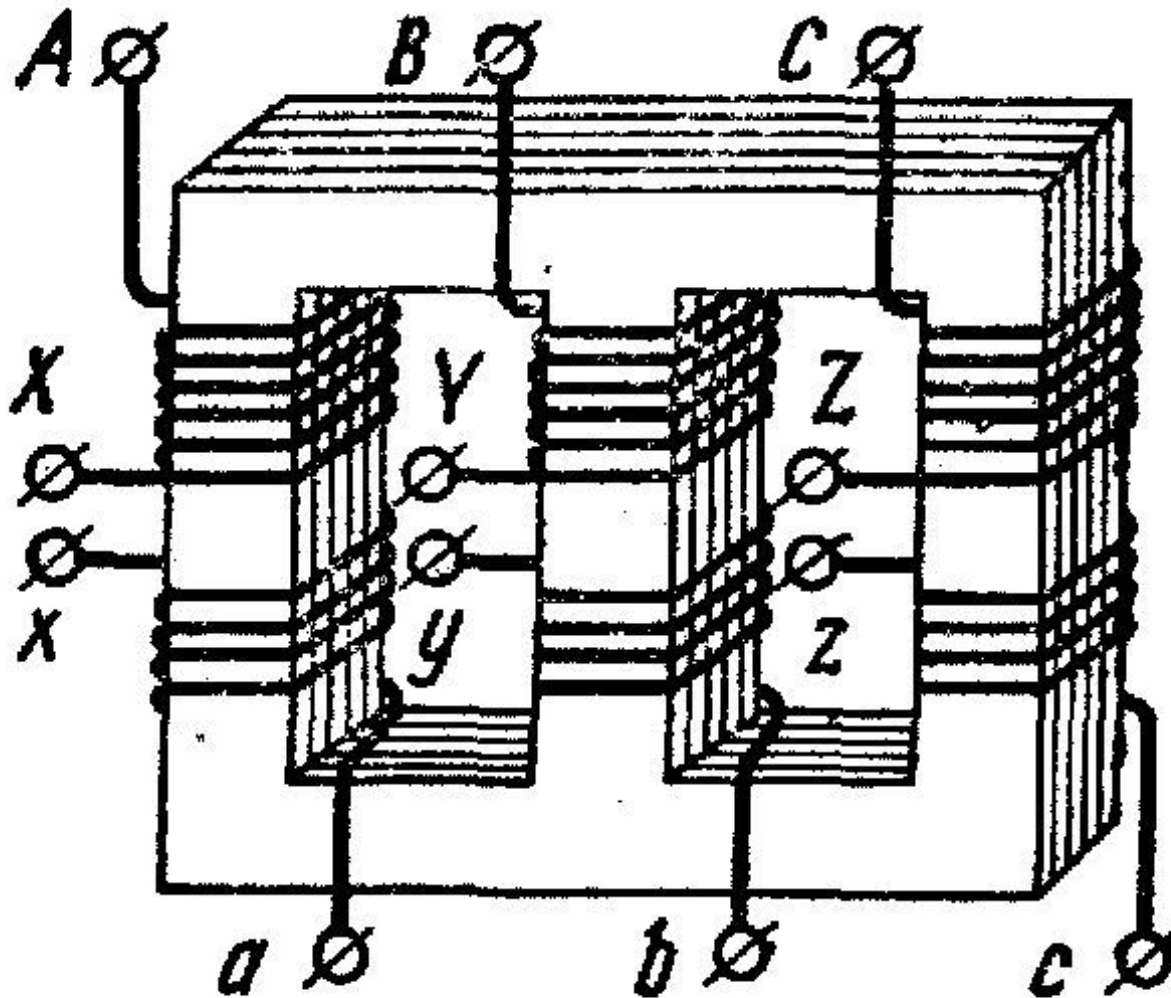
- Указанные значения $\beta_{\text{опт}}$ получены при проектировании трансформатора на минимум приведенных затрат (на их приобретение и эксплуатацию). Наиболее вероятная нагрузка трансформаторов соответствует $\beta = 0,5 \dots 0,7$.
- В трансформаторах максимум КПД выражен сравнительно слабо, т.е. он сохраняет высокое значение в довольно широком диапазоне изменения нагрузки ($0,4 < \beta < 1,5$). При уменьшении $\cos\varphi_2$ КПД снижается, так как возрастают токи I_2 и I_1 , при которых трансформатор имеет заданную мощность P_2 .
- В трансформаторах малой мощности в связи с относительным увеличением потерь КПД существенно меньше, чем в трансформаторах большой мощности. Его значение составляет $0,6 \dots 0,8$ для трансформаторов, мощность которых менее 50 Вт; при мощности 100...500 Вт КПД равен $0,90 \dots 0,92$.

Трехфазные трансформаторы

- Трехфазный ток обычно преобразуют с помощью трехстержневых трехфазных трансформаторов, в которых первичная и вторичная обмотки каждой фазы расположены на общем стержне.
- На каждом из трех стержней, набранных из листов электротехнической стали и объединенных сверху и снизу ярмом, расположены первичная и вторичная обмотки одной фазы. Начальные выводы обмотки высшего напряжения, обозначаются буквами A, B, C (или C_1, C_2, C_3), конечные выводы — буквами X, Y, Z (или C_4, C_5, C_6). Для начальных выводов обмоток низшего напряжения применяется обозначения малыми буквами: a, b, c , для конечных выводов — x, y, z .

- Магнитные потоки трех фаз Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 сдвинуты друг относительно друга по времени на одну треть периода или по фазе на 120° . Поэтому мгновенное значение их суммы равно нулю. В этом случае магнитный поток в любом из стержней в каждый момент времени равен алгебраической сумме потоков двух других стержней. При симметричном питающем напряжении и равномерной нагрузке (являющейся наиболее распространенной) все фазы трехфазного трансформатора находятся практически в одинаковых условиях. Поэтому выведенные выше формулы и схемы замещения для однофазного трансформатора справедливы и для трехфазного трансформатора.

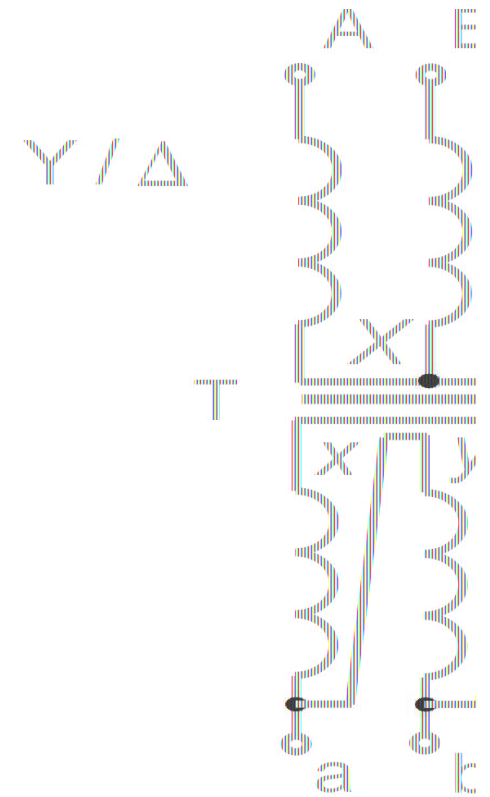
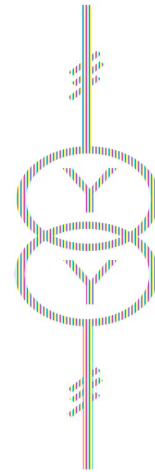
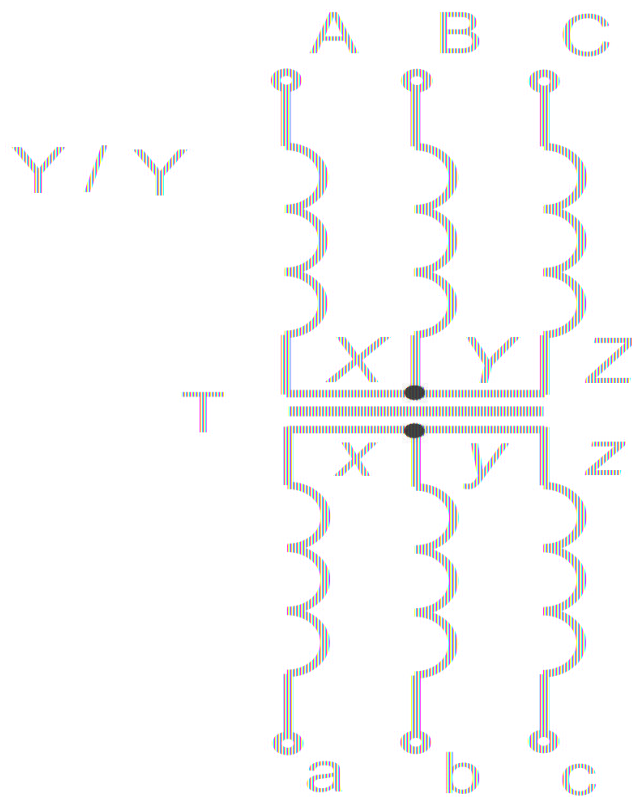
Схема трехфазного трансформатора



Схемы соединения обмоток

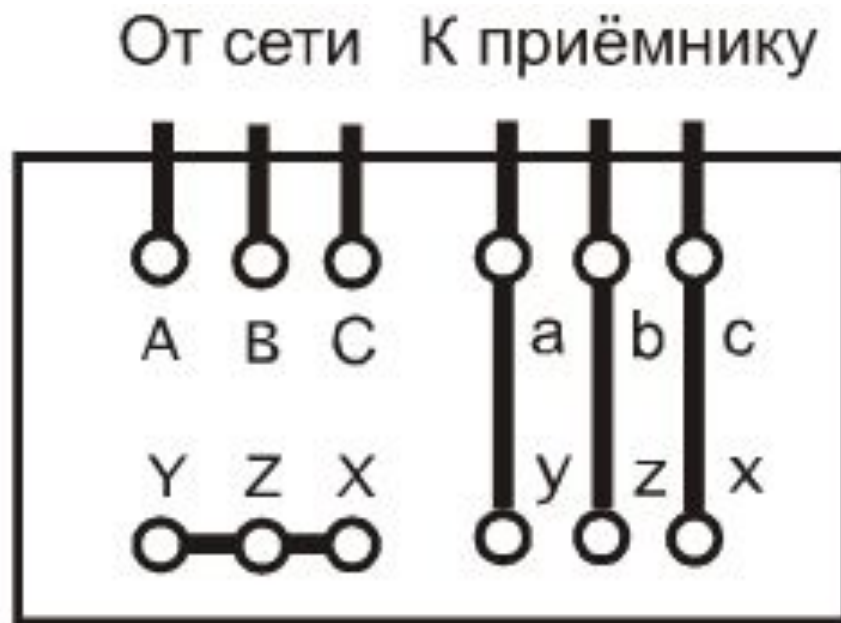
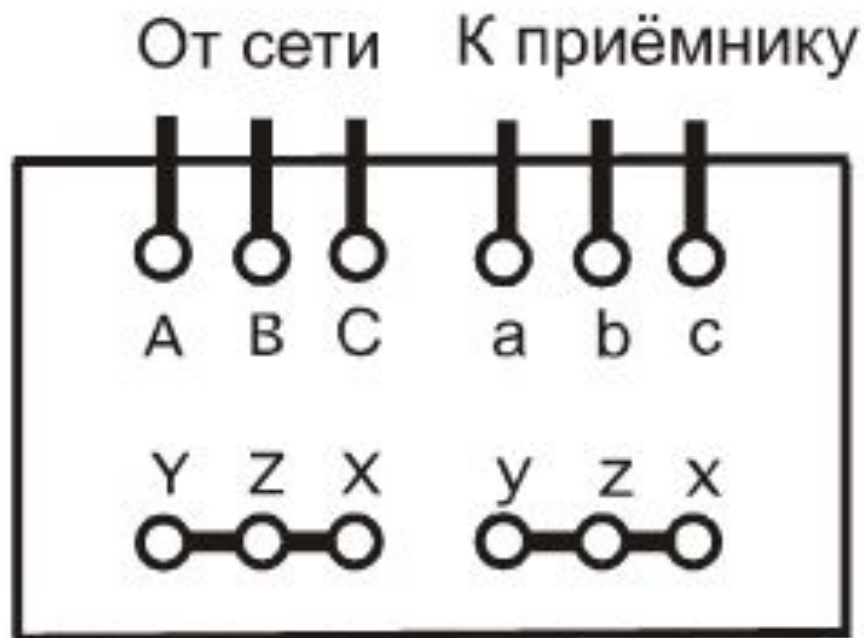
- Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам: звезда (символ Y или Y_0 при выведенной нейтральной (нулевой) точке) или *треугольник* (символ Δ). Таким образом, могут быть соединения Y/Y , Y/Δ , Δ/Δ , Δ/Y . Существуют и другие более сложные соединения, например, соединения типа «зигзаг». Кроме указания на способ соединения обмоток, на щитке трансформаторов обычно указывается и условное обозначение группы соединений трансформаторов, например, $Y/Y - 12$ и $Y/\Delta - 11$. Обычно обмотку высшего напряжения соединяют по схеме «звезда», что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе.
- Для получения схемы звезда концы фазных обмоток (XYZ , xyz) соединяют в общую точку (рис. а), а для получения схемы треугольник конец обмотки одной фазы соединяют с началом следующей и так далее в замкнутый контур (ay , bz , cx) (рис. б).

Схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов



Схемы соединений обмоток трехфазного трансформатора:

(а) схема Y / Y , б) схема Y / Δ



- Соединение обмоток трансформатора обозначают в технической документации Y/Y , Δ/Δ , Y/Δ , Δ/Y , при этом в числителе указывается способ соединения фаз высокого напряжения (ВН), в знаменателе — соединение фаз низкого напряжения (НН). Если от обмотки трехфазного трансформатора, соединенной в звезду, выводится нулевой провод, то такое соединение обозначают Y_0 .
- При соединении фаз обмотки «звездой»
- $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$; $I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}$. При соединении фаз обмотки «треугольником»
- $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}}$; $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$. Коэффициент трансформации трансформатора
- $n = W_1 / W_2 = E_1 / E_2 \approx U_1 / U_2$.

- Трехфазные трансформаторы характеризуются двумя коэффициентами трансформации:
- а) фазным — равным отношению числа витков $W_{ВН}$ фазы обмотки ВН к числу витков $W_{НН}$ фазы обмотки НН или же отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:
- $n_{\phi} = W_{ВН} / W_{НН} = U_{\phi.вн} / U_{\phi.нн}$,
- б) линейным — равным отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:
- $n_{л} = U_{л.вн} / U_{л.нн}$.
- Следует иметь в виду, что отношение линейных напряжений $U_{л1}$ и $U_{л2}$ трехфазного трансформатора зависит не только от чисел витков первичной и вторичной обмоток W_1 и W_2 , но и от способов их соединений:
- при Y/Y, Δ/Δ $U_{л1} / U_{л2} = W_1 / W_2$;
- при Y/Δ $U_{л1} / U_{л2} = W_1 / \sqrt{3} W_2$;
- при Δ/Y $U_{л1} / U_{л2} = W_1 / W_2 \cdot \sqrt{3}$.
- Поэтому можно изменять величину вторичного линейного напряжения соответствующим изменением схем соединения его обмоток.

- В зависимости от сдвига фаз между линейными первичными и вторичными напряжениями трансформаторы разделяются на группы соединений, причем каждую группу составляют трансформаторы с одинаковым сдвигом по фазе между указанными напряжениями.
- Для обозначения группы соединений обмоток трехфазного трансформатора выбирается ряд чисел от 1 до 12, причем здесь условно принято, что единица соответствует 30° , по аналогии с углами между минутной и часовой стрелками часов при 1, 2, ..., 12 час. При определении группы соединений с вектором напряжения обмотки высшего напряжения нужно совместить минутную стрелку, а с вектором напряжения обмотки низшего напряжения — часовую стрелку. Отсчет угла производится от минутной стрелки к часовой стрелке по направлению их вращения.
- Современные трансформаторы выпускаются с соединением фаз обмоток $Y/Y - 0$ и $Y/\Delta - 11$. Над знаком дроби указывается способ соединения фаз обмотки высшего напряжения, под знаком дроби — способ соединения фаз обмотки низшего напряжения, цифра указывает на группу соединения обмоток трансформатора.
- Номинальная мощность трехфазного трансформатора:
- $S_{ном} = \sqrt{3} U_{1ном} I_{1ном} \approx \sqrt{3} U_{2ном} I_{2ном} /$

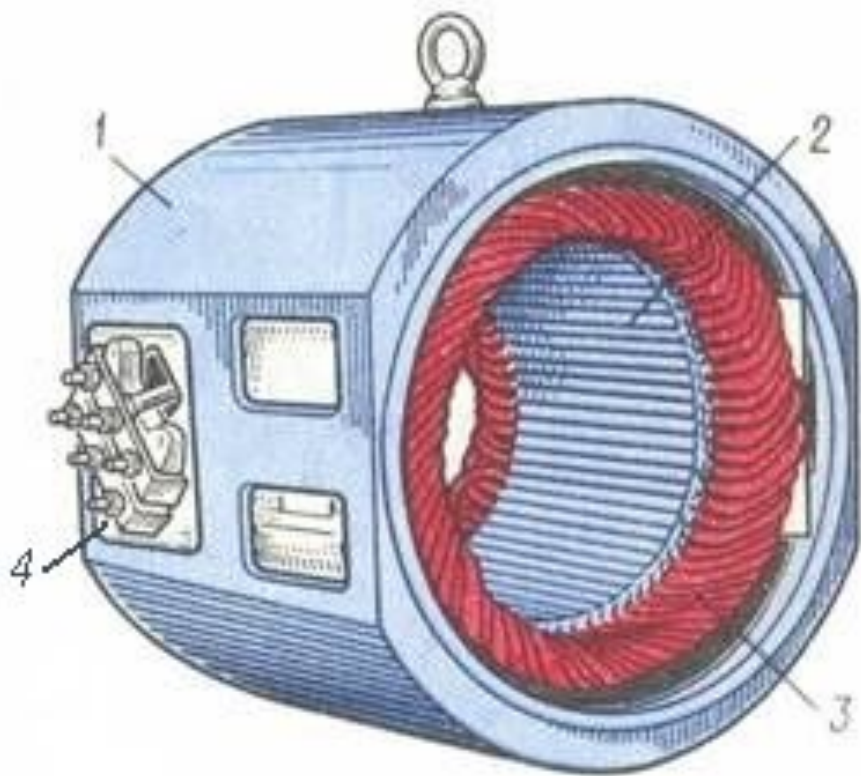
Трехфазный асинхронный двигатель

- **Асинхронный двигатель** – индукционная машина переменного тока в которой электрическая энергия от неподвижного статора к вращающемуся ротору передается магнитным полем.

Устройство трехфазного асинхронного двигателя

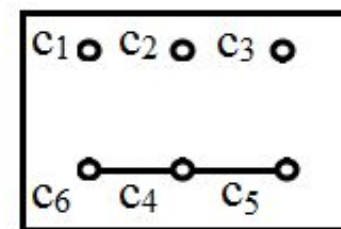
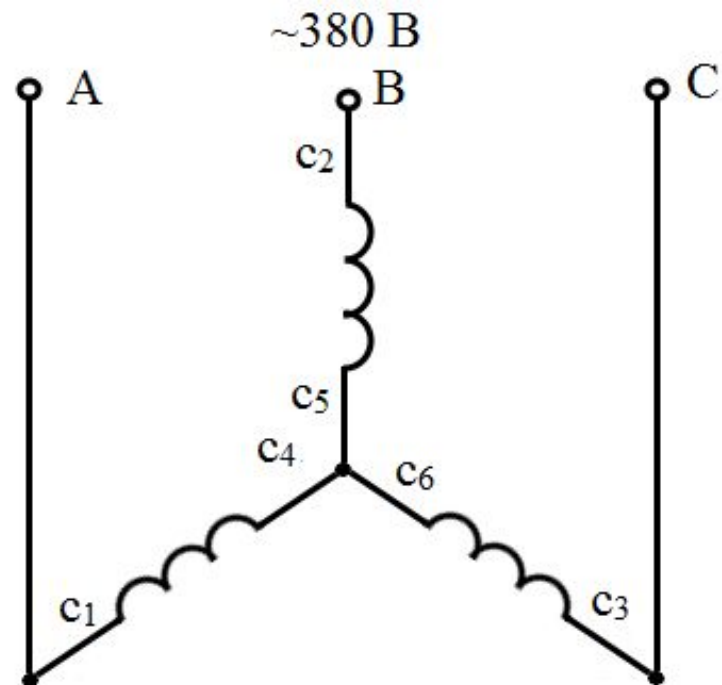
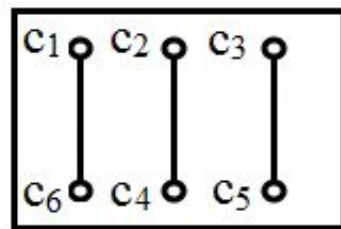
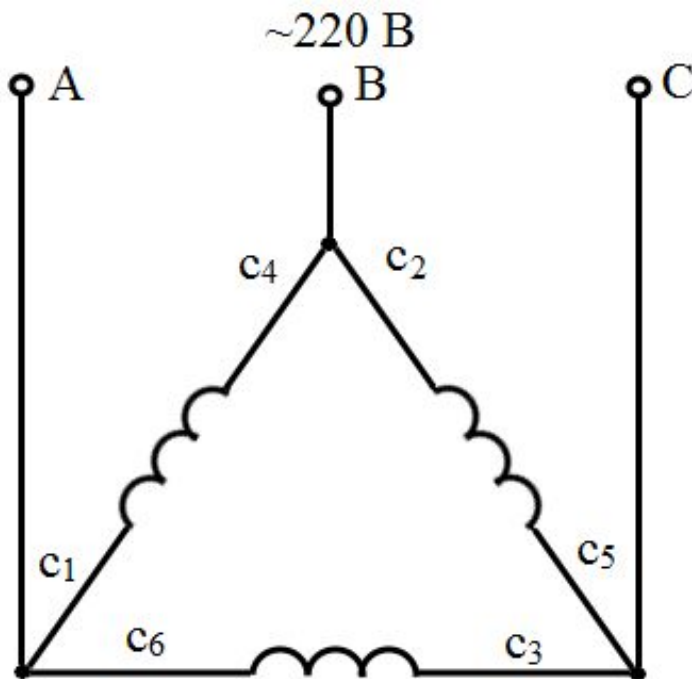
- Асинхронный двигатель (АД) состоит из неподвижной части — статора и подвижной — ротора. Сердечник статора (2) набирается из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком, и запрессовывается в литую станину (1). Станина выполняется из немагнитного материала: чугуна или алюминия.
- На внутренней поверхности сердечника в пазы укладывается трехфазная статорная обмотка (3) из изолированного медного провода.

Статор асинхронного двигателя



- Обмотка состоит из трех частей, называемых фазами. Начало фаз обозначается С1, С2, С3, концы — С4, С5, С6 .
- Начала и концы фаз выведены на клеммник 4 , закрепленный на станине.
- Статорная обмотка может быть соединена по схеме «треугольник» (рис. а) или по схеме «звезда» (см. рис. б).

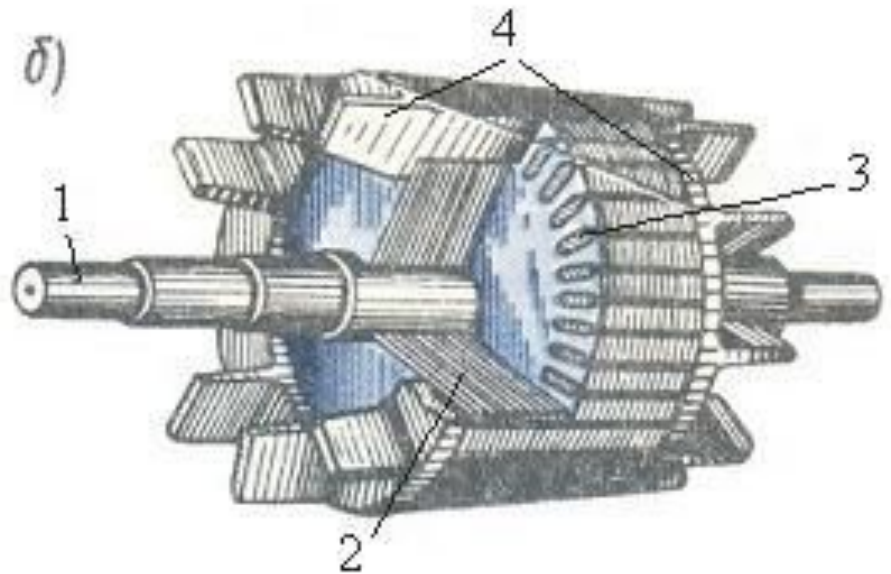
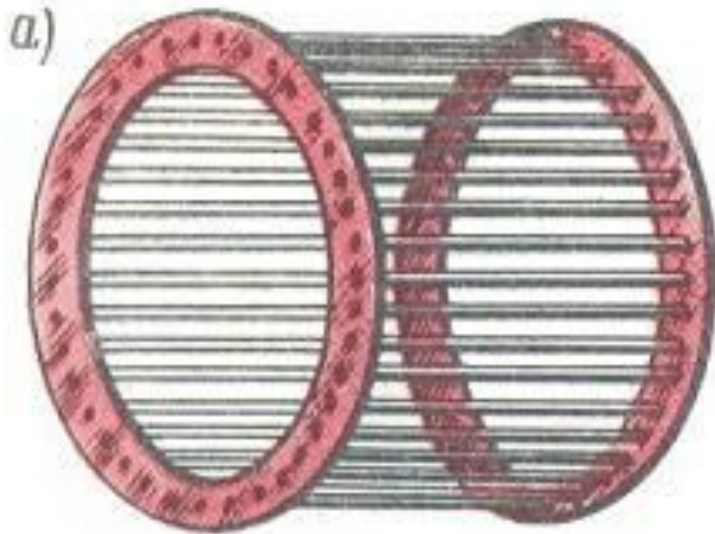
Схемы соединения фаз статорной обмотки



- Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трехфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора.
- Например, **380/220, Y/Δ**. Данный двигатель можно включать в сеть с **$U_{л}=380\text{В}$** по схеме «звезда» или в сеть с **$U_{л}=220\text{В}$** — по схеме «треугольник»

- Сердечник ротора набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: короткозамкнутая и фазная. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).

Ротор асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой



- Короткозамкнутая обмотка (рис. б) ротора состоит из стержней 3, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами 4. Такая обмотка напоминает «беличье колесо» и называют ее типа «беличьей клетки» (рис. а). Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счет этого такие двигатели обладают высокой надежностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.
- У фазного ротора обмотка выполняется трехфазной, аналогично обмотке статора, с тем же числом пар полюсов. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме звезда. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закрепленными на валу ротора. Через щетки в цепь ротора включаются добавочные сопротивления для улучшения пусковых и регулировочных свойств асинхронного двигателя.

Принцип действия асинхронного двигателя

- При подключении обмотки статора к источнику трехфазного напряжения в сердечнике статора возникает магнитное поле, вращающееся со скоростью
- $$n_0 = 60 f_1 / p$$
 , об/мин,
- где f_1 — частота тока питающей сети, Гц; p — число пар полюсов вращающегося магнитного поля.
-
- Число пар полюсов определяется устройством фаз статорной обмотки.
-
- Вращающееся магнитное поле наводит в обмотке ротора Э.Д. С., под действием которой в замкнутой обмотке ротора возникает ток. На обмотку ротора с током начинают действовать силы, образующие вращающий электромагнитный момент M , и ротор начинает вращаться в сторону вращения магнитного поля.

- Величина вращающего момента определяется выражением
- $$M = 9550 P/n$$
 , Н·м,
- где P — номинальная мощность на валу двигателя, кВт; n — частота вращения ротора двигателя, об/мин.
- Э.Д.С., а, следовательно, и электромагнитный момент M возникают только в том случае, если частота вращения ротора n будет отличаться от частоты вращения магнитного поля n_0 . Разница скоростей $\Delta n = n_0 - n$ называется скольжением асинхронного двигателя. Скольжение выражается в относительных единицах или в процентах:

- $$s = (n_0 - n)/n_0$$
 ; $s\% = ((n_0 - n)/n_0) \cdot 100\%$

- В зависимости от соотношения n и n_0 асинхронная машина может работать в одном из трех режимов. При $n < n_0$ — режим двигателя. При $n > n_0$ асинхронная машина работает в генераторном режиме. Электромагнитный момент M меняет направление и становится тормозным по отношению к силам, вращающим ротор с $n > n_0$. При $n = -n_0$ электромагнитный момент также меняет знак и асинхронная машина переходит в режим электромагнитного тормоза по отношению к внешним силам, вращающим ротор в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля.