

8. Трансформаторы. Назначение и области применения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока посредством электромагнитной индукции.

Трансформаторы широко используются в промышленности и быту для различных целей

1. Для передачи и распределения электрической энергии;
2. Для различных технологических целей: сварки, питания электротермических установок и др.;
3. Для питания различных цепей радиоаппаратуры, электронной аппаратуры, для согласования напряжения и пр.;
4. Для включения электроизмерительных приборов в цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности.

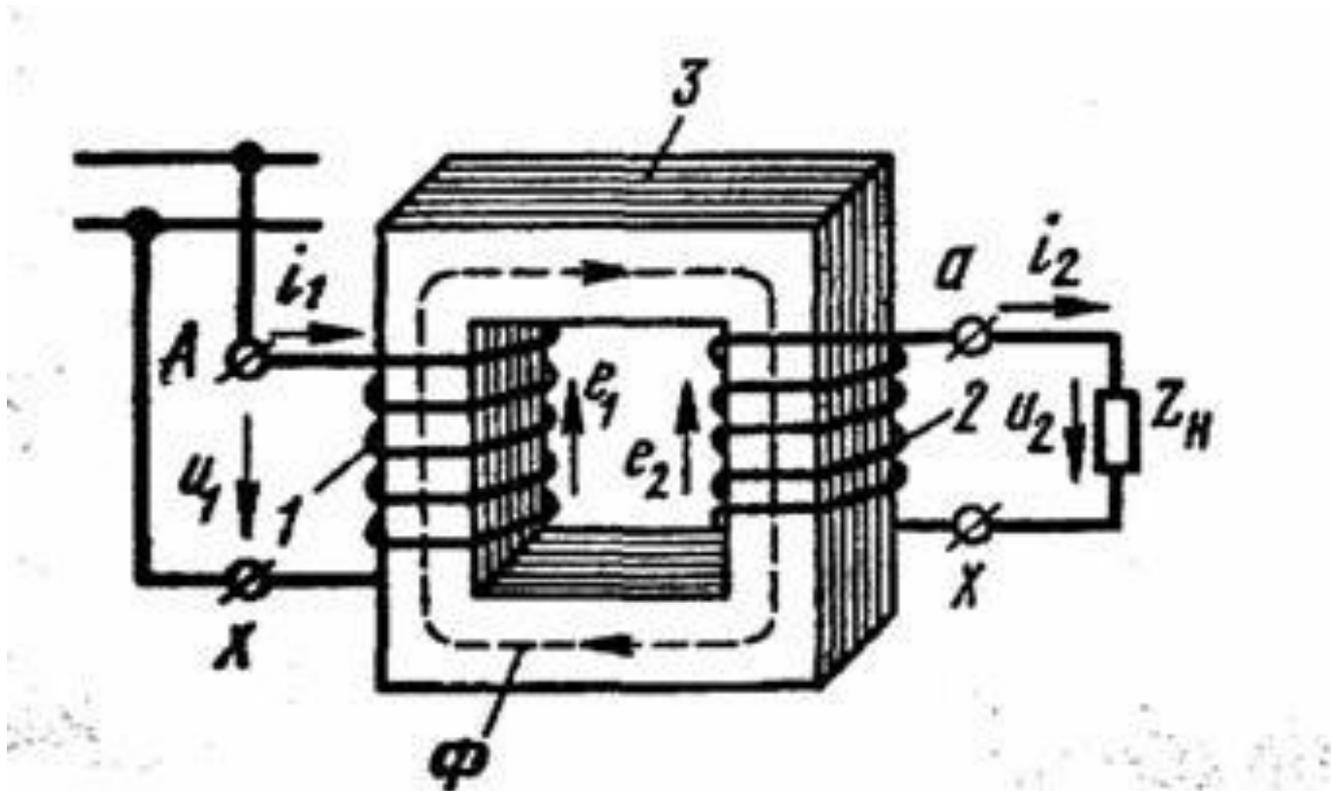
Классификацию трансформаторов можно произвести по нескольким признакам:

1. По назначению трансформаторы - силовые общего и специального применения.
2. По виду охлаждения – с воздушным и масляным охлаждением.
3. По числу фаз на первичной стороне – однофазные и трёхфазные.
4. По форме магнитопровода – стержневые, броневые, тороидальные.
5. По числу обмоток на фазу – двухобмоточные, трёхобмоточные, многообмоточные (более трёх обмоток).
6. По конструкции обмоток – с концентрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками

Принцип действия трансформатора.

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток, размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала.

Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока – электрической сети с напряжением сети u_1 . К вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_n .



Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами А и Х; обмотки НН – буквами а и х.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создаёт переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС – e_1 и e_2 , пропорциональные числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.

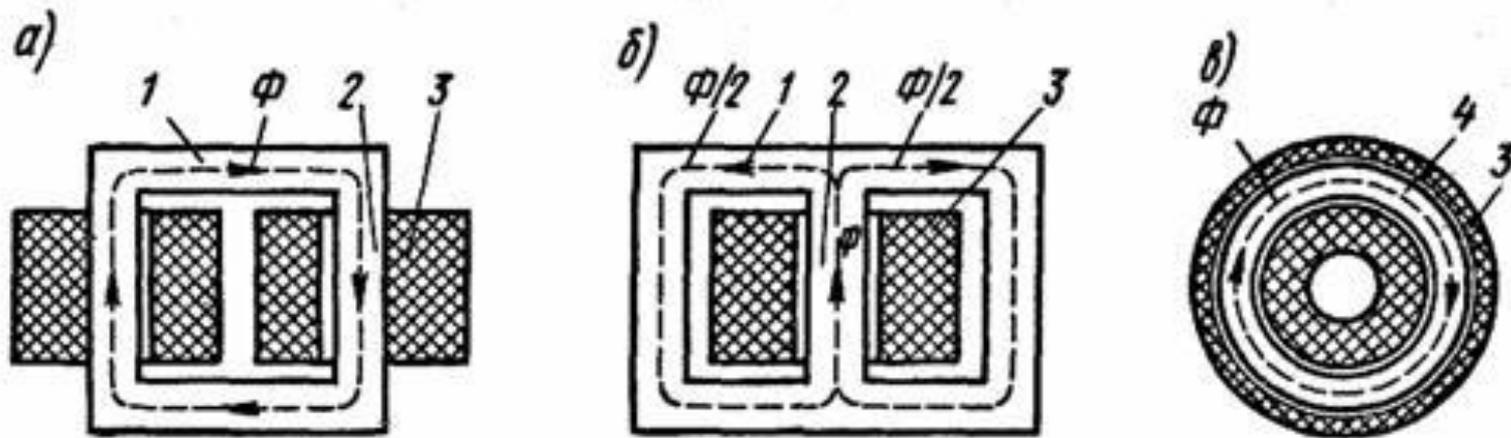
Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения E_{BH} к ЭДС обмотки низшего напряжения E_{HH} (или отношение их чисел витков) называют коэффициентом трансформации

$$n = \frac{E_{BH}}{E_{HH}} = \frac{W_{BH}}{W_{HH}}$$

Устройство трансформаторов.

В зависимости от конфигурации магнитной системы, трансформаторы подразделяют на стержневые, броневые и тороидальные.

Стержнем называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют ярмом. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.



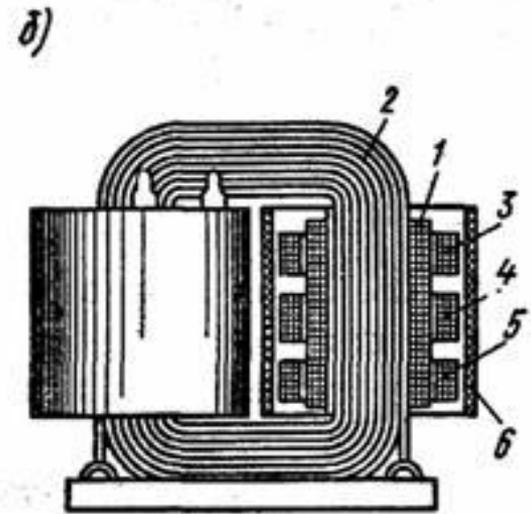
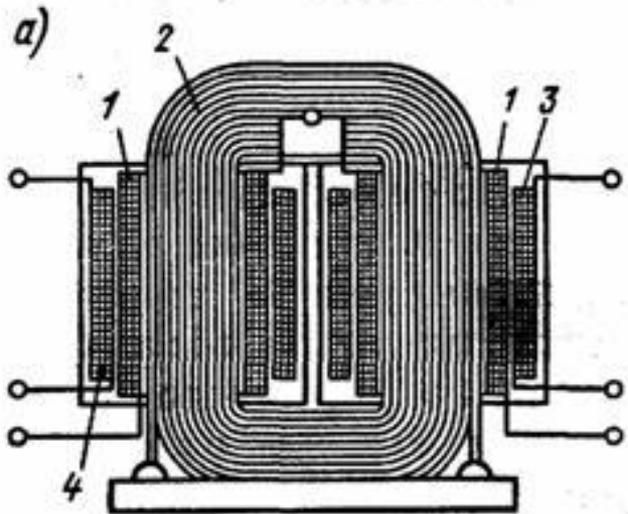
Для уменьшения потерь от вихревых токов, магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28-0,5 мм при частоте 50 Гц

Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления.

Обмотки.

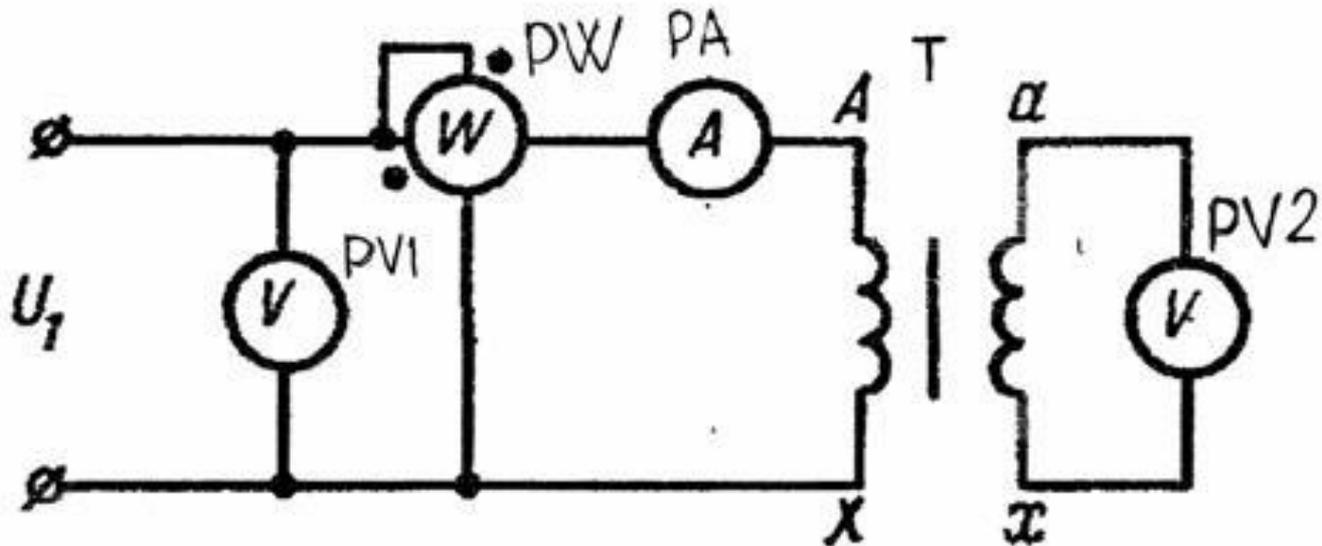
В современных трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо concentрически – одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующиеся по высоте стержня.

В силовых трансформаторах обычно применяют concentрические обмотки, причём ближе к стержням располагают обмотку НН, требующей меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи – обмотку ВН.



Опыт холостого хода

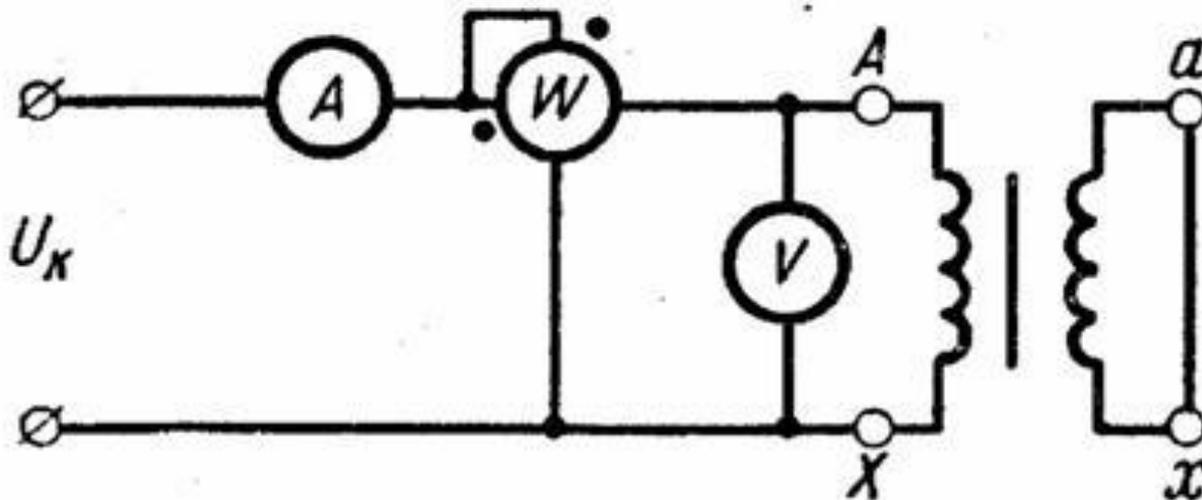
В опыте холостого хода вторичная обмотка трансформатора разомкнута, а к первичной подводится номинальное напряжение $U_{1н} = U_{10}$



Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями $\Delta P_{эл1} = I_{10}^2 R_1$ пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода.

Опыт короткого замыкания

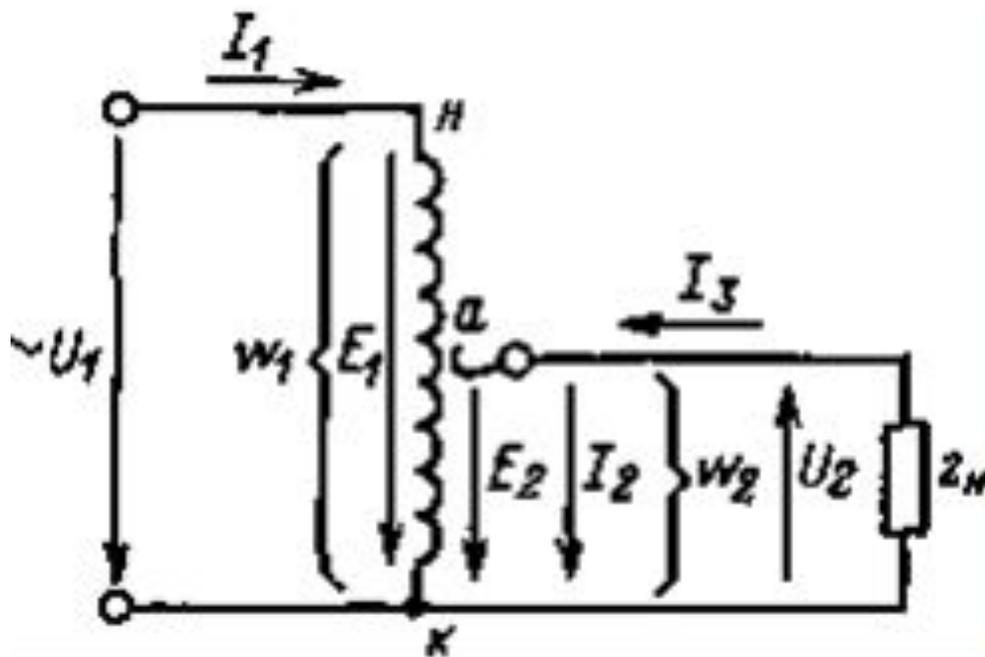
Вторичную обмотку замыкают накоротко (сопротивление $Z_H = 0$), а к первичной подводят пониженное напряжение такого значения, при котором по обмоткам проходит номинальный ток $I_{ном}$.



В мощных силовых трансформаторах напряжение U_K при коротком замыкании обычно составляет 5-15% от номинального. В трансформаторах малой мощности напряжение U_K может достигать 25-50% от $U_{ном}$

В ходе опыта короткого замыкания определяются потери энергии в обмотках трансформатора.

Автотрансформатором называется такой трансформатор, у которого имеется только одна обмотка, часть которой принадлежит одновременно вторичной и первичной цепям. Схема однофазного трансформатора изображена на рисунке



Так же как обычные трансформаторы, автотрансформаторы могут быть понижающими и повышающими, однофазными и трехфазными.

В автотрансформаторе электрическая энергия из первичной цепи во вторичную передается и через гальваническую связь, и посредством переменного магнитного потока.

Автотрансформатор целесообразно применять при малых коэффициентах трансформации ($n \leq 2$).

Автотрансформатор нельзя применять там, где по условиям техники безопасности или другим причинам недопустима гальваническая связь между первичной и вторичной обмотками.

Многообмоточные трансформаторы.

В энергетических устройствах довольно широко применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиотехники и автоматики — многообмоточные трансформаторы малой мощности.

Наиболее распространенная схема многообмоточного трансформатора — одна первичная и несколько вторичных обмоток.

Очевидно, что в данном случае двум вторичным напряжениям U_2 и U_3 , получаемым, например, от обмоток СН и НН, соответствуют два коэффициента трансформации:

$$k_{12} = w_{B.H} / w_{C.H}$$

$$k_{13} = w_{B.H} / w_{H.H.}$$

В трехфазной сети переменного тока преобразование напряжений осуществляется с помощью трехфазного трансформатора с общим для трех фаз сердечником. В трехфазном трансформаторе с общим магнитопроводом магнитный поток любой из фаз может замыкаться через стержни, на которых расположены обмотки двух других фаз. Затраты стали на трехфазный трансформатор значительно меньше, чем на три однофазных трансформатора

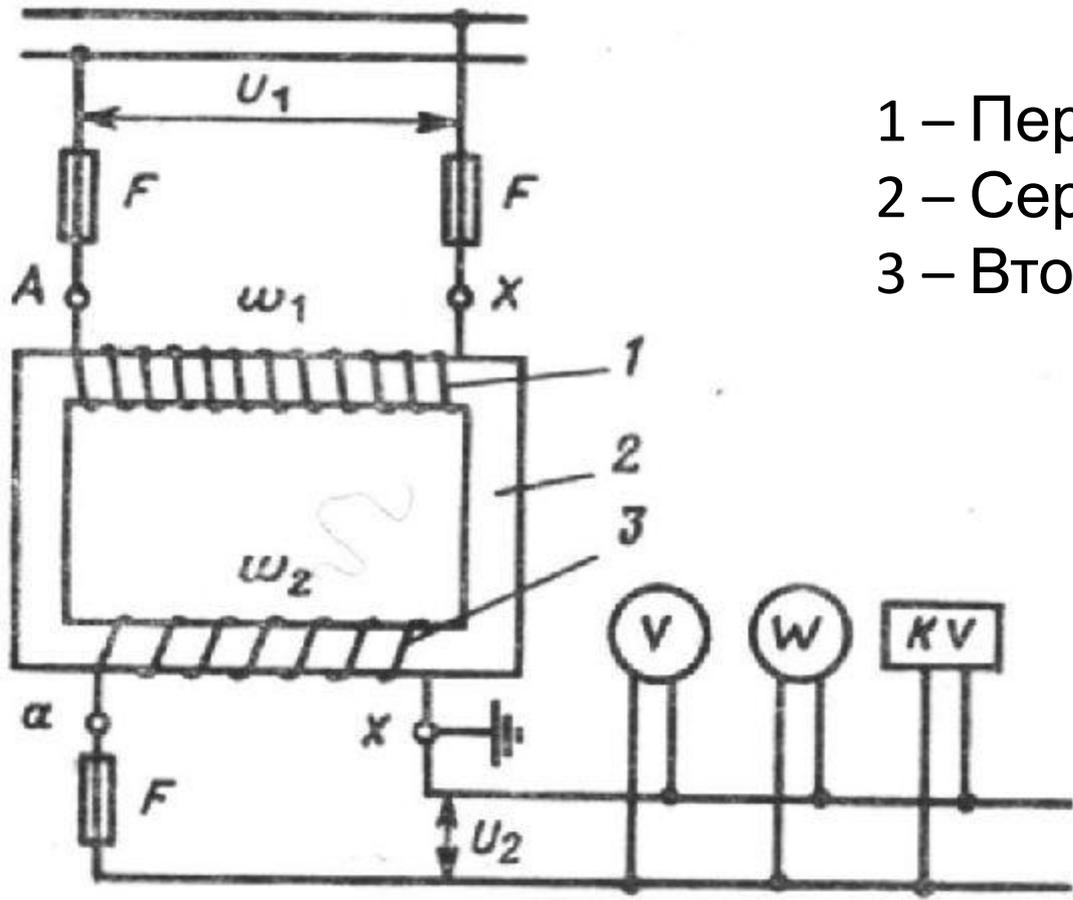
Измерительные трансформаторы

предназначены для изоляции измерительных приборов и аппаратов автоматической защиты от цепи высокого напряжения, расширения пределов измерения измерительных приборов.

Измерительные трансформаторы дают возможность использовать измерительные приборы со стандартными пределами измерения (100 В и 5 А) для проведения измерений в различных цепях

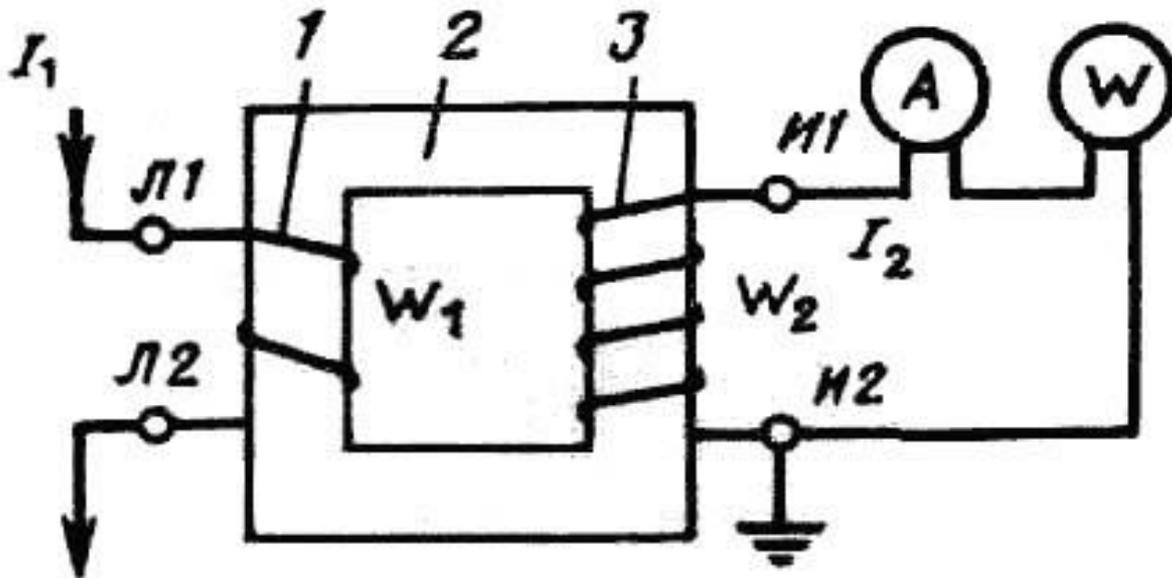
Различают измерительные трансформаторы напряжения, применяемые для включения вольтметров, частотомеров, цепей напряжения измерительных приборов (ваттметров, счетчиков, фазометров) и реле, а также трансформаторы тока, предназначенные для включения амперметров, цепей тока измерительных приборов и реле.

Трансформатор напряжения. Первичная обмотка таких трансформаторов, которая является и обмоткой высшего напряжения, имеет большое число витков и включается как вольтметр под измеряемое напряжение U_1 ; вторичная же обмотка является обмоткой низшего напряжения, имеет меньшее количество витков и замыкается на вольтметр и цепи напряжения других приборов.



- 1 – Первичная обмотка
- 2 – Сердечник
- 3 – Вторичная обмотка

Трансформатор тока включают в линию так же, как амперметр, последовательно с измеряемым объектом, а вторичную обмотку замыкают на амперметр и цепи тока других измерительных приборов.



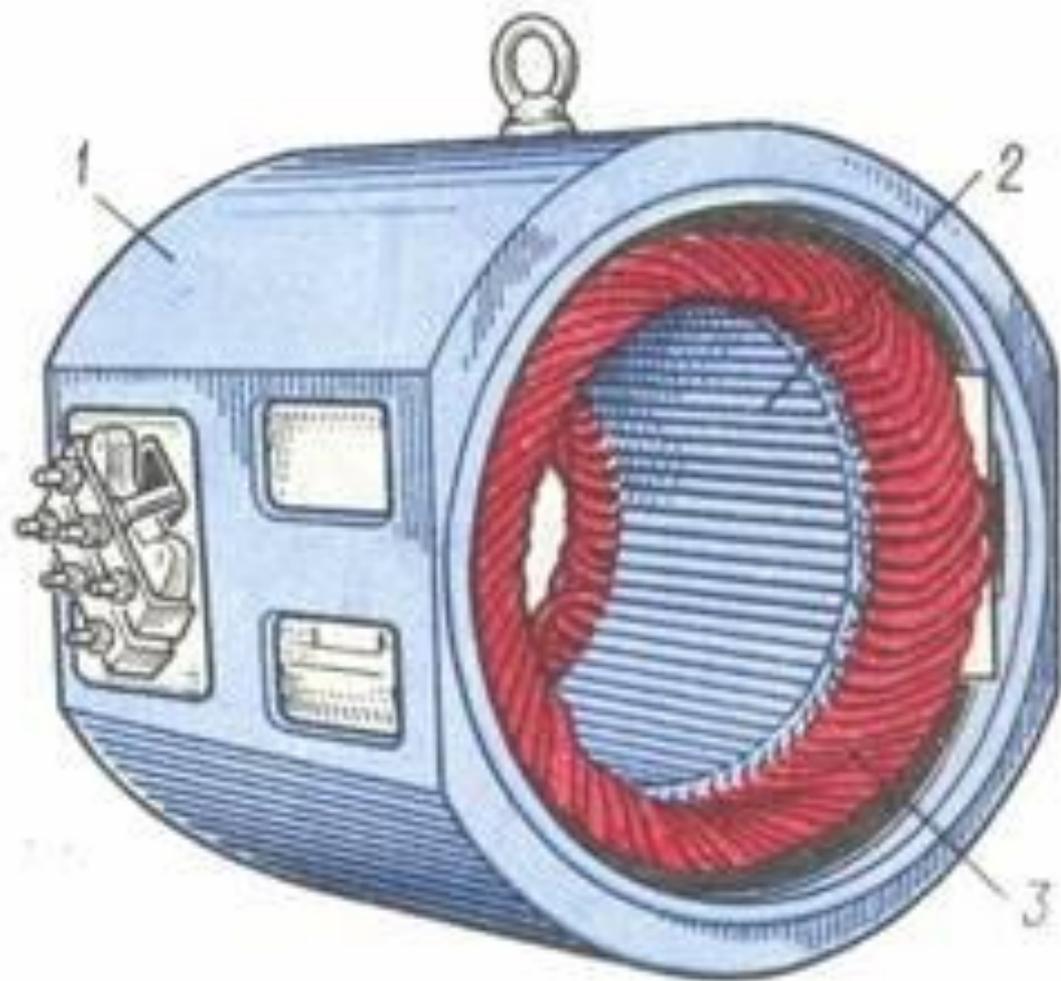
Сварочные трансформаторы. В отличие от силовых сварочные трансформаторы работают в режиме меняющихся напряжений и тока и рассчитаны на кратковременные короткие замыкания сети.

Для сварки переменным током широко применяют однофазные трансформаторы, которые разделяют силовую и сварочную цепи и понижают высокое напряжение 380 или 220 В до величины не более 80 В. Внешняя вольтамперная характеристика вторичной цепи этих трансформаторов, т. е. зависимость между величиной сварочного тока и напряжением, должна обеспечивать ведение устойчивого сварочного процесса, учитывающего статическую характеристику сварочной дуги. Наличие индуктивного сопротивления необходимой расчетной величины обеспечивает в трансформаторах стабилизацию дуги и ее восстановление при частом изменении полярности переменного тока.

9. Асинхронные машины

Устройство трёхфазной асинхронной машины

Неподвижная часть машины называется **статор**, подвижная – **ротор**. Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из чугуна или алюминия. На внутренней поверхности листов (2), из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается **трёхфазная обмотка** (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия

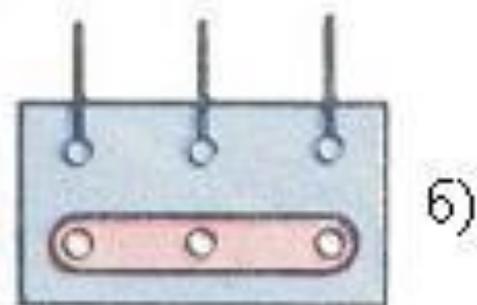
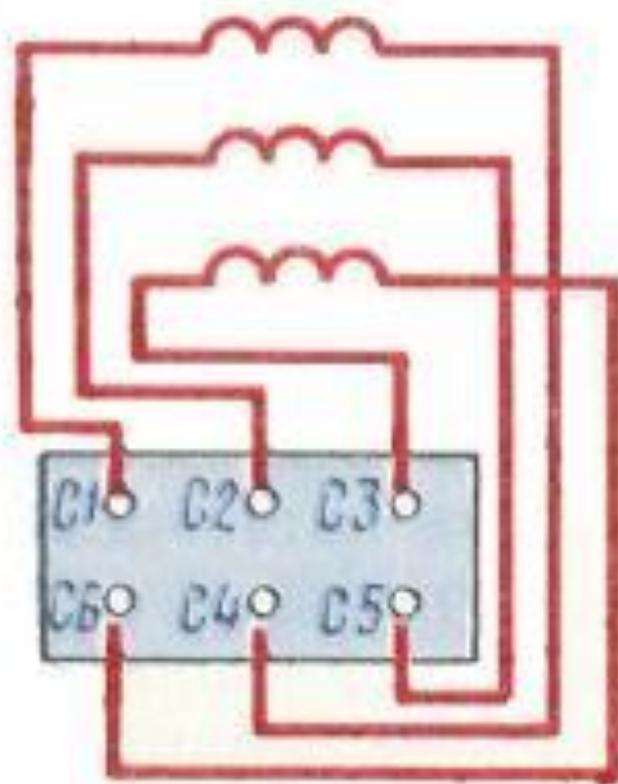


Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых **фазами**. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 , концы – c_4, c_5, c_6 .

Начала и концы фаз выведены на клеммник, закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора.

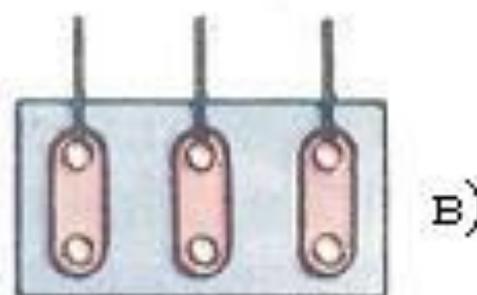
Основное назначение обмотки статора – создание в машине вращающегося магнитного поля

a)



b)

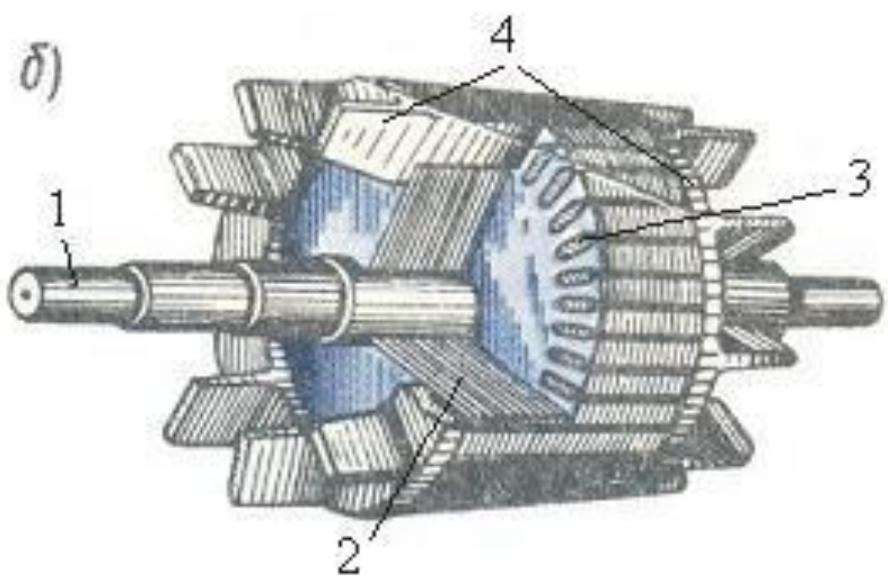
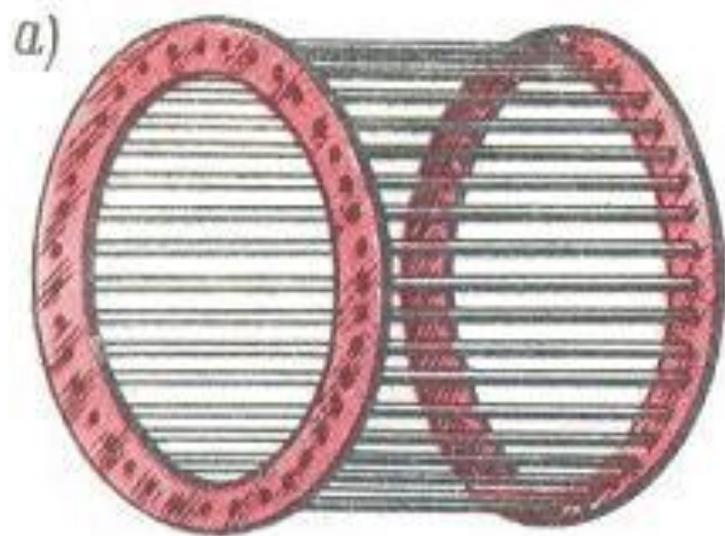
Y



B)

Δ

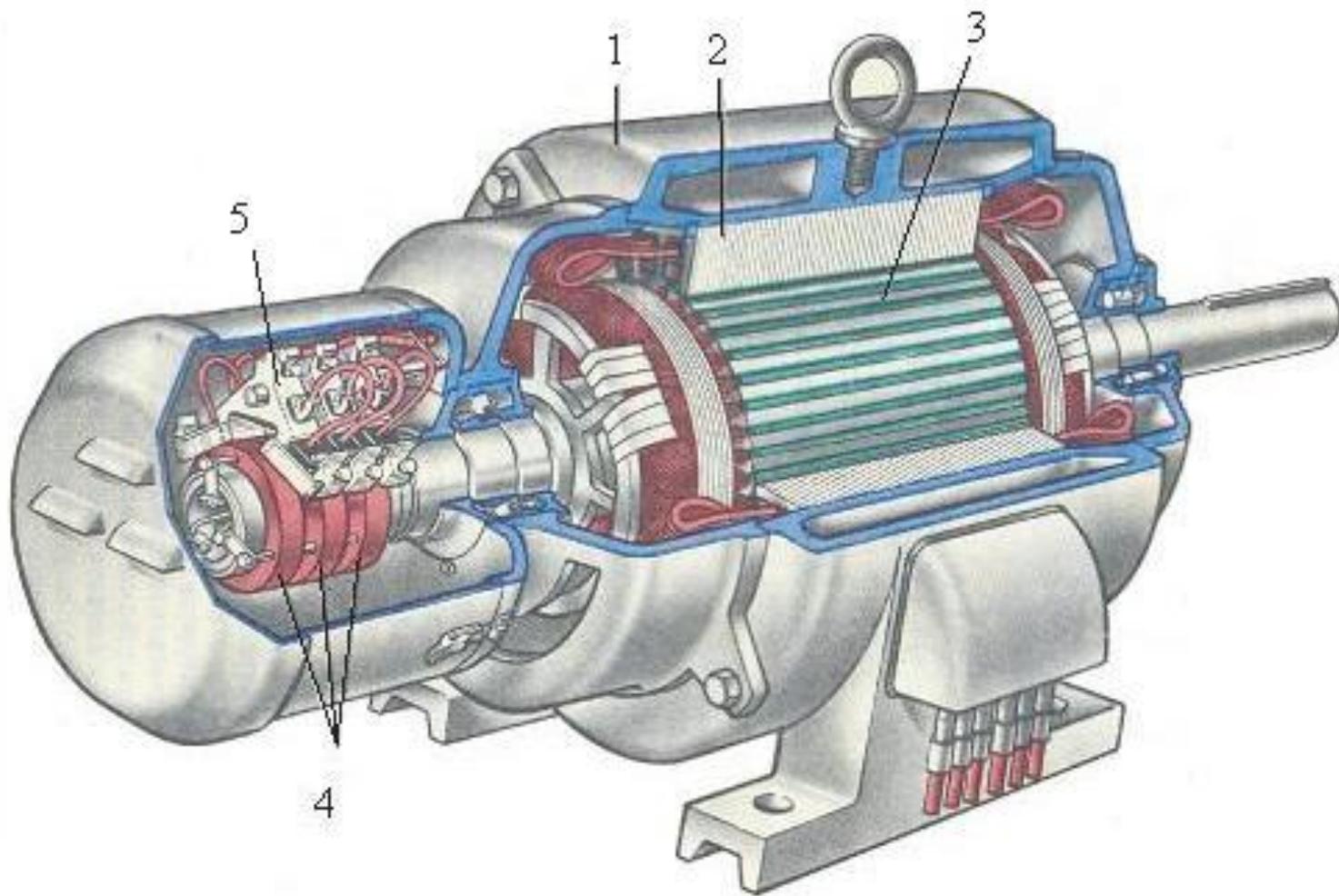
Сердечник ротора набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: **короткозамкнутая** и **фазная**. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором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



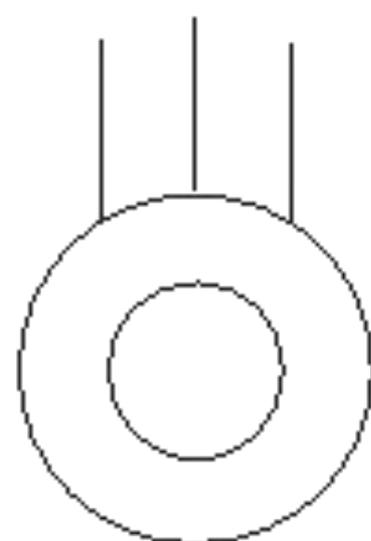
Короткозамкнутая обмотка ротора состоит из стержней 3, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами 4. Такая обмотка напоминает “беличье колесо” и называют её типа “беличьей клетки”. Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.

Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства. Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток – ограниченный пусковой момент. Доливо-Добровольский назвал причину этого недостатка – сильно закороченный ротор. Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

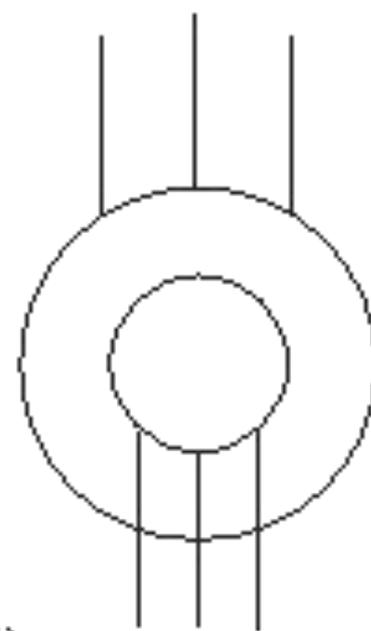
На рисунке приведен вид асинхронной машины с фазным ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактные кольца, 5 – щетки.



У фазного ротора обмотка выполняется трёхфазной, аналогично обмотке статора. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме звезда. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закреплёнными на валу ротора, и через щётки выводятся во внешнюю цепь. Контактные кольца изготавливают из латуни или стали, они должны быть изолированы друг от друга и от вала. В качестве щёток используют металлографитовые щётки, которые прижимаются к контактным кольцам с помощью пружин щёткодержателей, закреплённых неподвижно в корпусе машины.

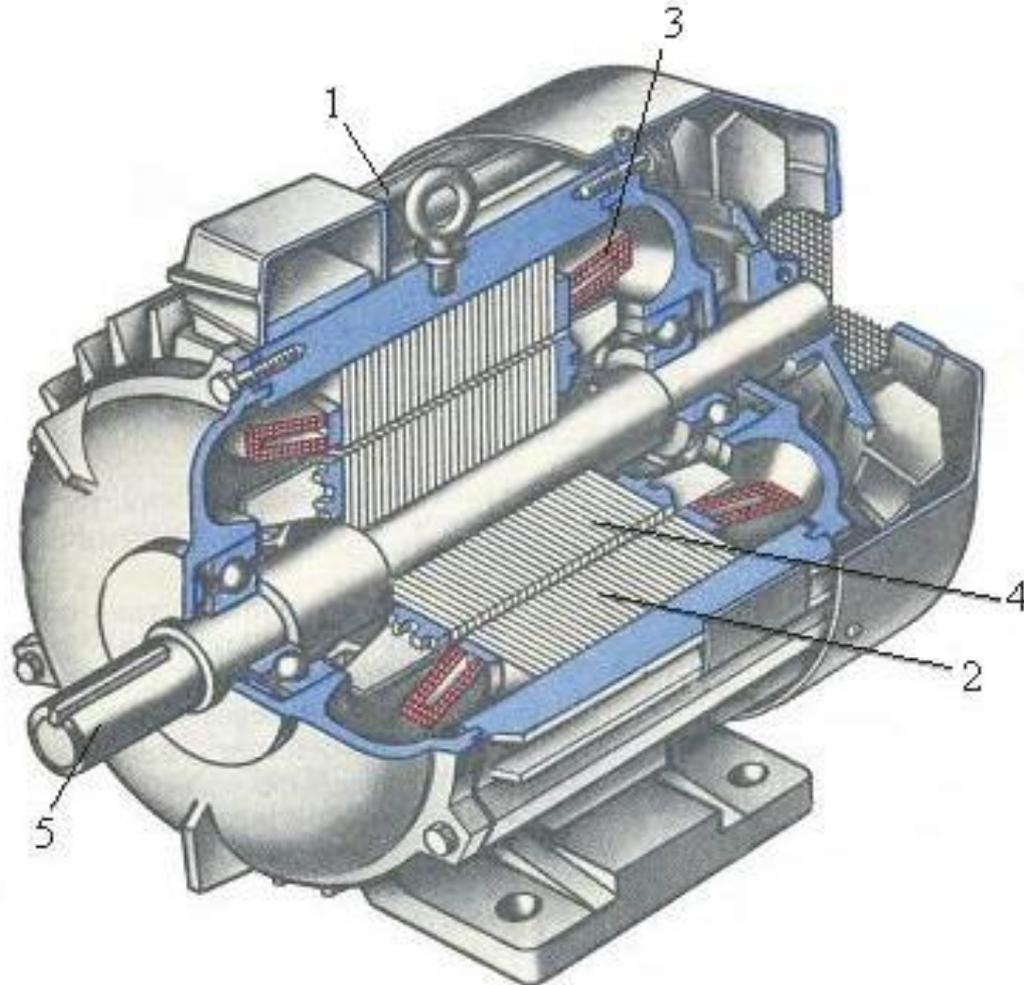


a)



b)

На рисунке приведен вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.



На щитке машины, закреплённом на станине, приводятся данные: P_H , U_H , I_H , n_H , а также тип машины.

P_H – это номинальная полезная мощность (на валу);

U_H и I_H – номинальные значения линейного напряжения и тока для указанной схемы соединения. Например, 380/220, Y/ Δ , $I_{HY}/I_{H\Delta}$;

n_H – номинальная частота вращения в об/мин.

Тип машины, например, задан в виде 4АН315S8. Это асинхронный двигатель (А) четвёртой серии защищённого исполнения. Если буква Н отсутствует, то двигатель закрытого исполнения.

315 – высота оси вращения в мм;

S – установочные размеры (они задаются в справочнике);

8 – число полюсов машины.

В режиме двигателя ротор будет вращаться несинхронно с магнитным полем. Отсюда появилось название двигателя – асинхронный (несинхронный). При увеличении нагрузки на валу двигатель должен развивать больший вращающий момент, а это происходит при снижении частоты вращения ротора. В отличие от частоты вращения ротора частота вращения магнитного поля не зависит от нагрузки. Для сравнения частоты вращения магнитного поля n_0 и ротора n ввели коэффициент, который назвали скольжением и обозначили буквой s . Скольжение может измеряться в относительных единицах и в процентах.

$$s = (n_0 - n) / n_0 \quad \text{или} \quad s = [(n_0 - n) / n_0] \cdot 100\%$$

При пуске в ход асинхронного двигателя $n=0, S=1$. В режиме идеального холостого хода $n=n_0, S=0$. Таким образом, в режиме двигателя скольжение изменяется в пределах:

$$0 < S \leq 1$$

При работе асинхронных двигателей в номинальном режиме:

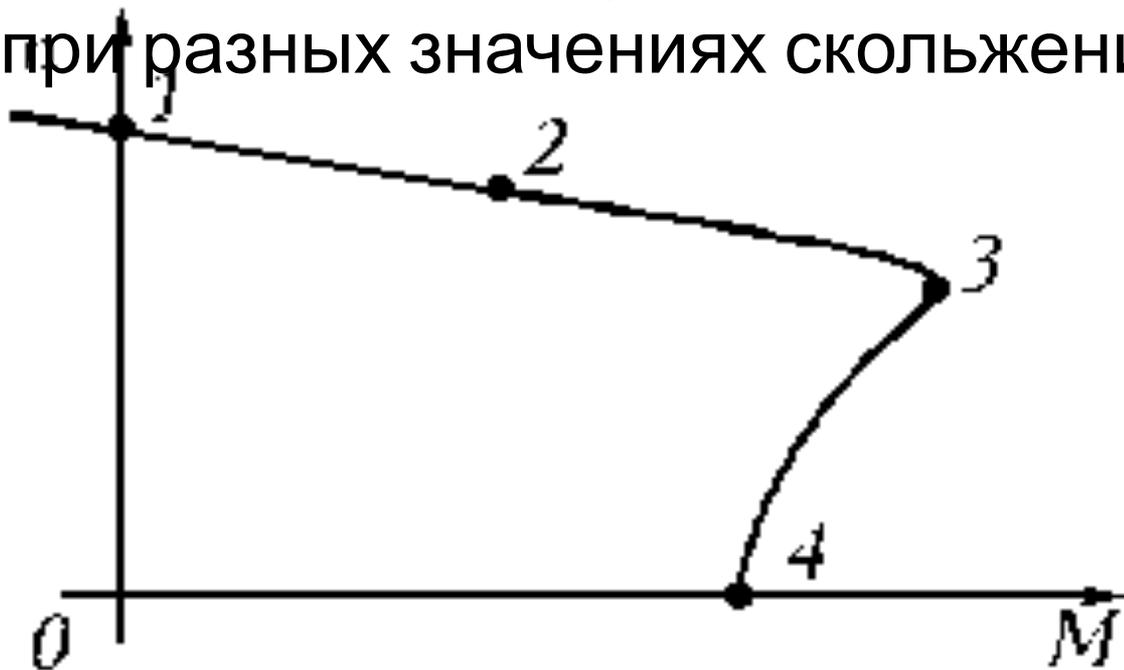
$$S_H = (2 \div 5)\%$$

В режиме реального холостого хода асинхронных двигателей:

$$S_{xx} = (0,2 \div 0,7)\%.$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя.

Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения ротора в функции от электромагнитного момента $n=f(M)$. Эту характеристику можно получить, используя зависимость $M=f(S)$ и пересчитав частоту вращения ротора при разных значениях скольжения.



Участок 1-3 соответствует устойчивой работе, участок 3-4 – неустойчивой работе. Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда $n=n_0$. Точка 2 соответствует номинальному режиму работы двигателя, ее координаты M_H и n_H . Точка 3 соответствует критическому моменту $M_{кр}$ и критической частоте вращения $n_{кр}$. Точка 4 соответствует пусковому моменту двигателя $M_{пуск}$. Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным.

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, т.к. частота вращения ротора (участок 1–3) мало зависит от

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

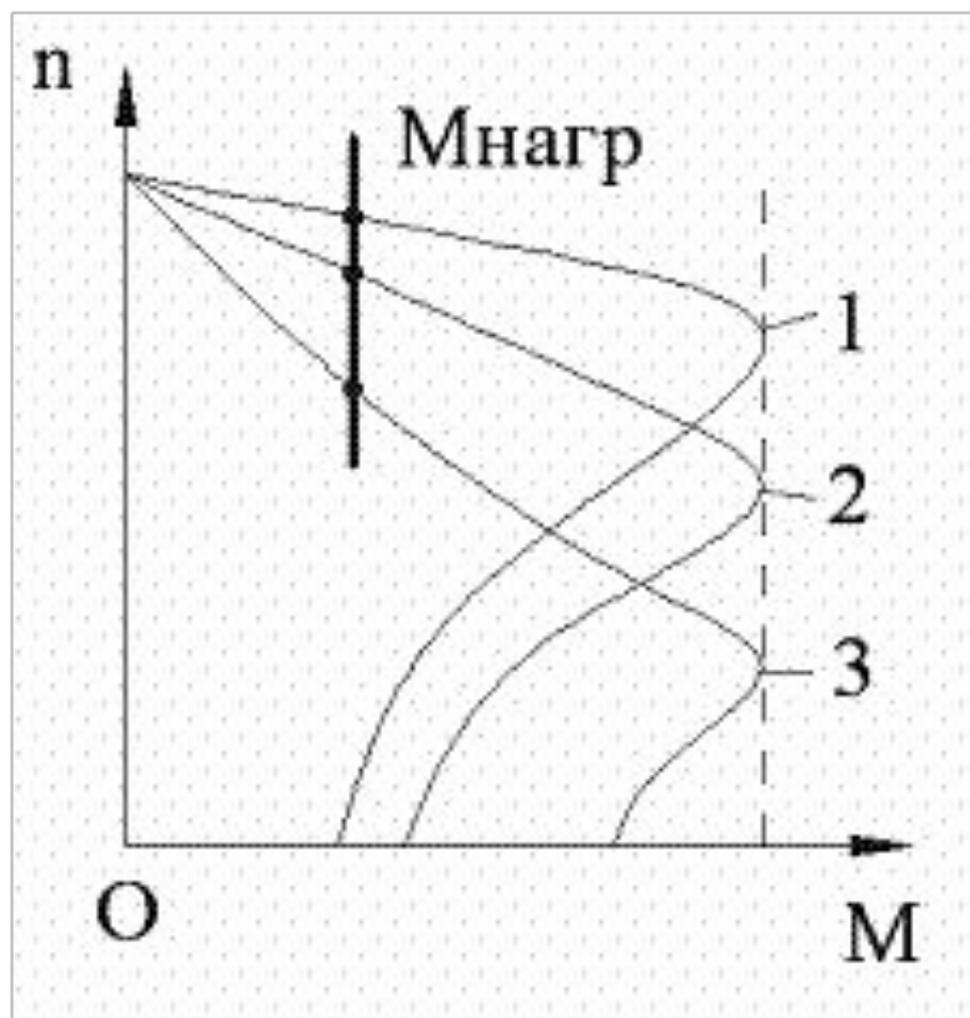
1. изменением скольжения;
2. изменением числа пар полюсов;
3. изменением частоты источника питания.

Изменение скольжения

Этот способ используют в приводе тех механизмов, где установлены асинхронные двигатели с фазным ротором.

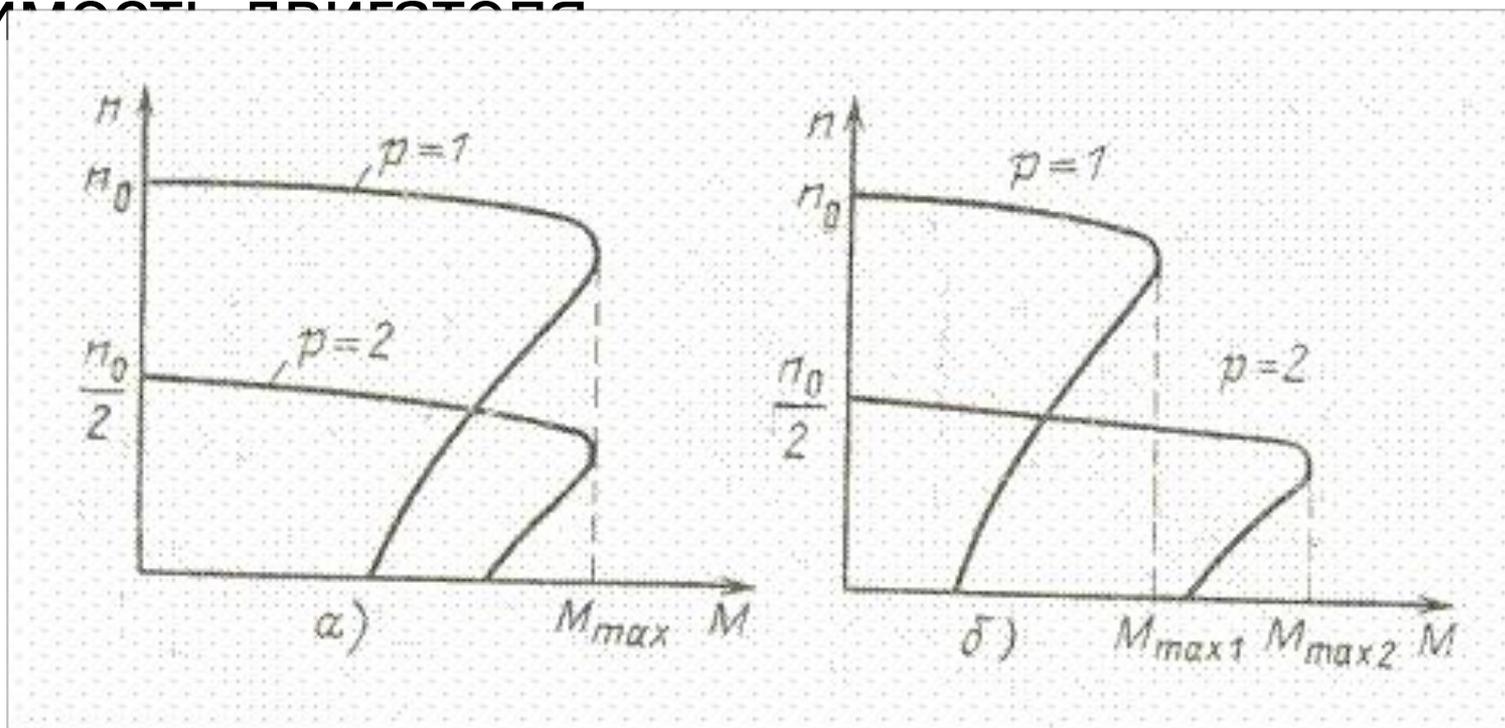
Основные недостатки этого способа:

1. Из-за больших потерь на регулировочном реостате снижается коэффициент полезного действия, т.е. способ неэкономичный.
2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче (снижается устойчивость работы двигателя).
3. Невозможно плавно регулировать частоту вращения



Изменение числа пар полюсов

Достоинства этого способа регулирования: сохранение жесткости механических характеристик, высокий К.П.Д. Недостатки: ступенчатое регулирование, большие габариты и большая стоимость привода.



Изменение частоты источника питания

Достоинства этого способа: плавное регулирование, возможность повышать и понижать частоту вращения, сохранение жесткости механических характеристик, экономичность.

Основной недостаток – требуется преобразователь частоты, т.е. дополнительные капитальные вложения.



10. Синхронные машины

Если в асинхронных машинах ротор имел частоту вращения, отличную от частоты вращения магнитного поля статора, то в синхронных эти частоты равны между собой.

Синхронной машиной называется электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора n находится в строгом соответствии с частотой сети f_1 : $n = n_1 = 60 f_1 / p$.

На статоре синхронной машины располагается трехфазная обмотка переменного тока, называемая *обмоткой якоря*, а на роторе располагается обмотка постоянного тока, называемая *обмоткой возбуждения*.

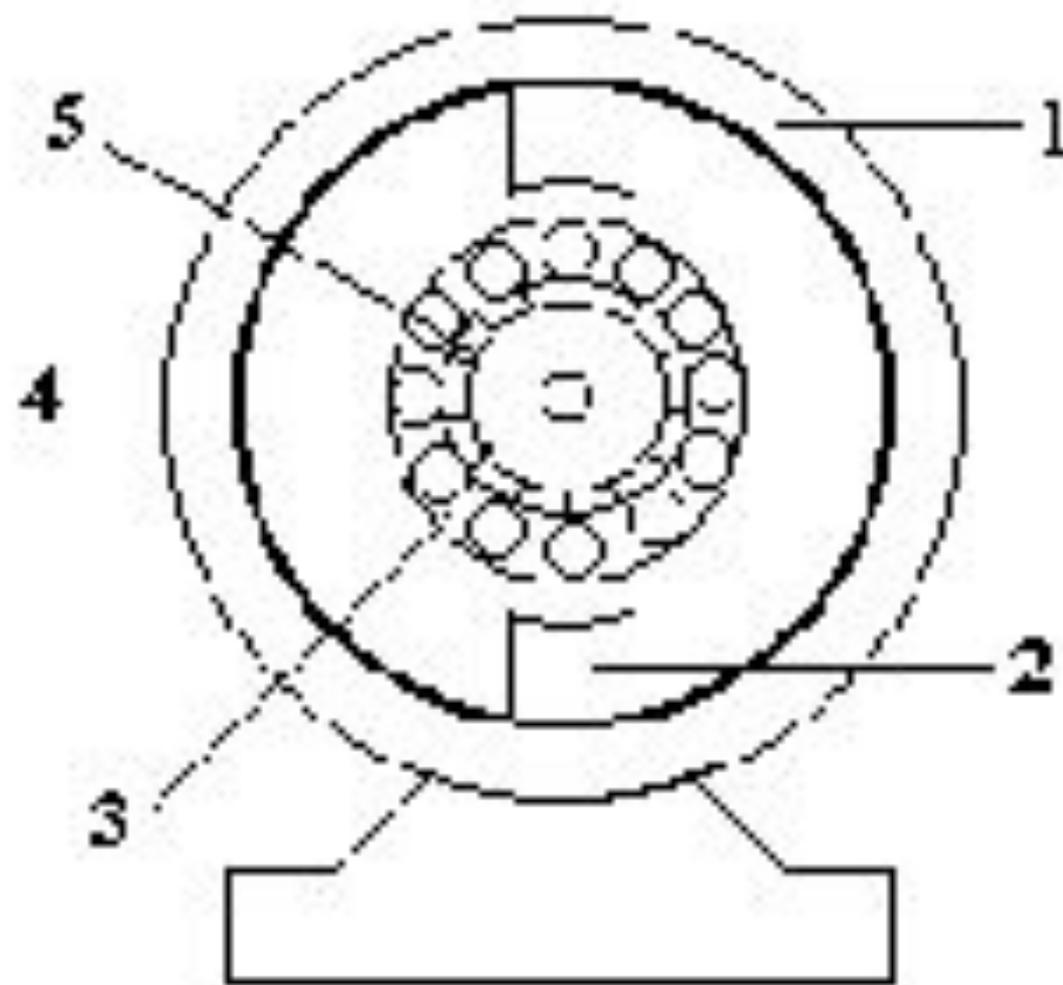
Для улучшения динамических свойств синхронной машины в полюсные наконечники помещают дополнительную короткозамкнутую обмотку (4), выполняемую аналогично короткозамкнутой обмотке асинхронной машины. Ее называют *успокоительной* или *демпферной*.

Синхронные машины могут работать как генераторами, так и электродвигателями. Основная область применения синхронных машин — энергетика, где они используются в качестве генераторов электрической энергии. В зависимости от типа привода синхронные генераторы делятся на турбогенераторы, гидрогенераторы и дизельные генераторы.

Синхронные электродвигатели широко применяют для привода мощных компрессоров, насосов, вентиляторов. Синхронные микродвигатели используют для привода лентопротяжных механизмов регистрирующих приборов, магнитофонов и так далее.

11. Электрические машины постоянного тока

Электрическая машина постоянного тока состоит из двух основных частей: **неподвижной** части (**индуктора**) и **вращающейся** части (**якоря** с барабанной обмоткой).



Индуктор состоит из станины 1 цилиндрической формы, изготовленной из ферромагнитного материала, и полюсов с обмоткой возбуждения 2, закрепленных на станине. Обмотка возбуждения создает основной магнитный поток.

Магнитный поток может создаваться постоянными магнитами, укрепленными на станине.

Якорь состоит из следующих элементов: сердечника 3, обмотки 4, уложенной в пазы сердечника, коллектора 5.

Сердечник якоря для уменьшения потерь на вихревые точки набирается из изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Работа электрической машины постоянного тока в режиме двигателя.

Под действием напряжения, подведенного к якорю двигателя, в обмотке якоря появится ток $I_{\text{я}}$. При взаимодействии тока с магнитным полем индуктора возникает электромагнитный вращающий момент

$$M_{\text{эм}} = C_{\text{м}} \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi,$$

где $C_{\text{м}}$ - коэффициент, зависящий от конструкции двигателя.

В установившемся режиме электромагнитный вращающий момент $M_{\text{эм}}$ уравнивается противодействующим тормозным моментом M_2 механизма, приводимого во вращение.

$$M_{\text{эм}} = M_2$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$-E = -U + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

откуда

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = C_e \cdot \Phi \cdot n_2 + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

Уравнение называется основным уравнением двигателя

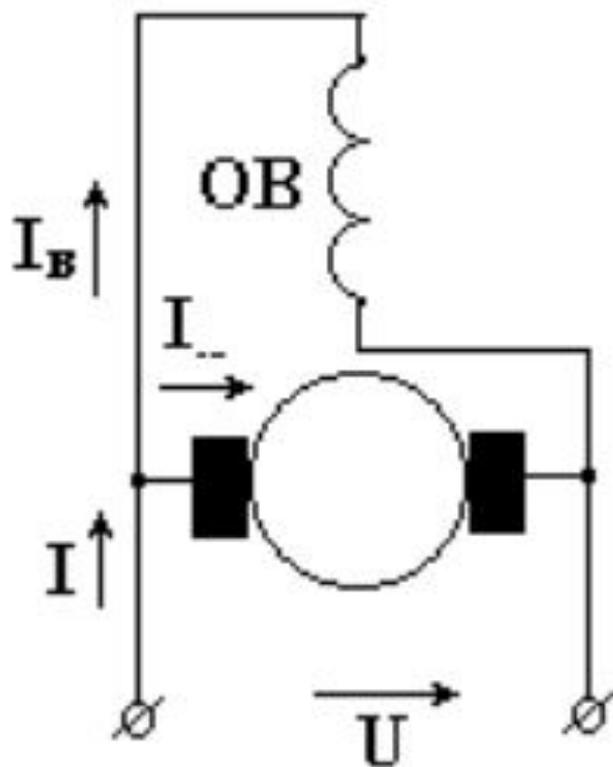
Магнитный поток Φ зависит от тока возбуждения $I_{\text{в}}$, создаваемого в обмотке возбуждения. Частоту вращения двигателя постоянного тока n_2 можно регулировать следующими способами:

1. изменением тока возбуждения с помощью реостата в цепи обмотки возбуждения;
2. изменением напряжения U на зажимах якорной обмотки.

Чтобы изменить направление вращения двигателя на обратное (реверсировать двигатель), необходимо изменить направление тока в обмотке якоря или индуктора.

Механические характеристики электродвигателей постоянного тока.

Рассмотрим двигатель с параллельным возбуждением в установившемся режиме работы. Обмотка возбуждения подключена параллельно якорной обмотке.



$$M_{эм} = M_2 = C_M \cdot \Phi \cdot I_я$$

откуда

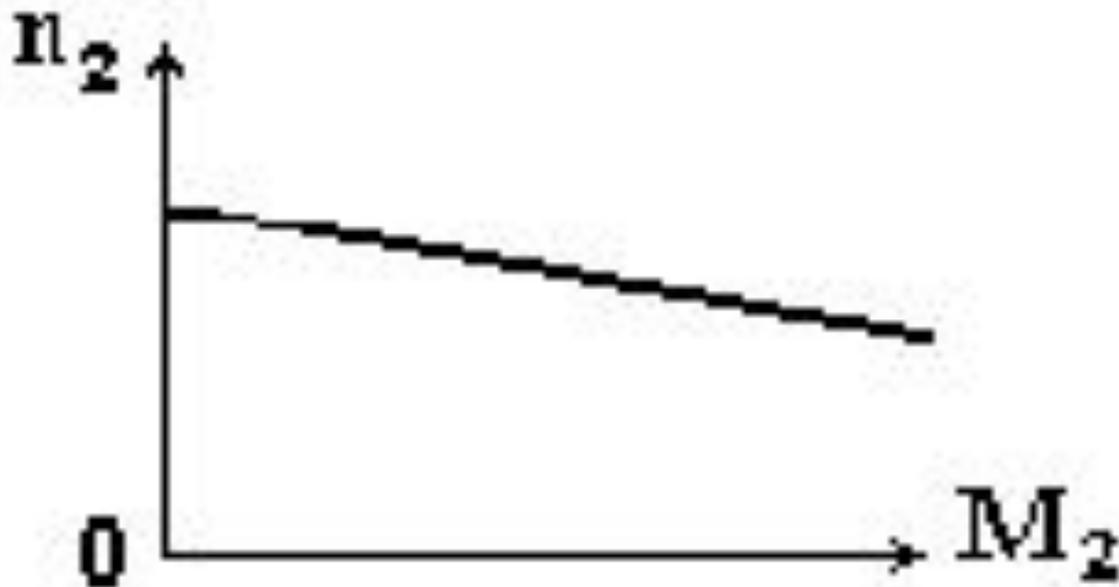
$$I_я = \frac{M_2}{C_M \cdot \Phi}$$

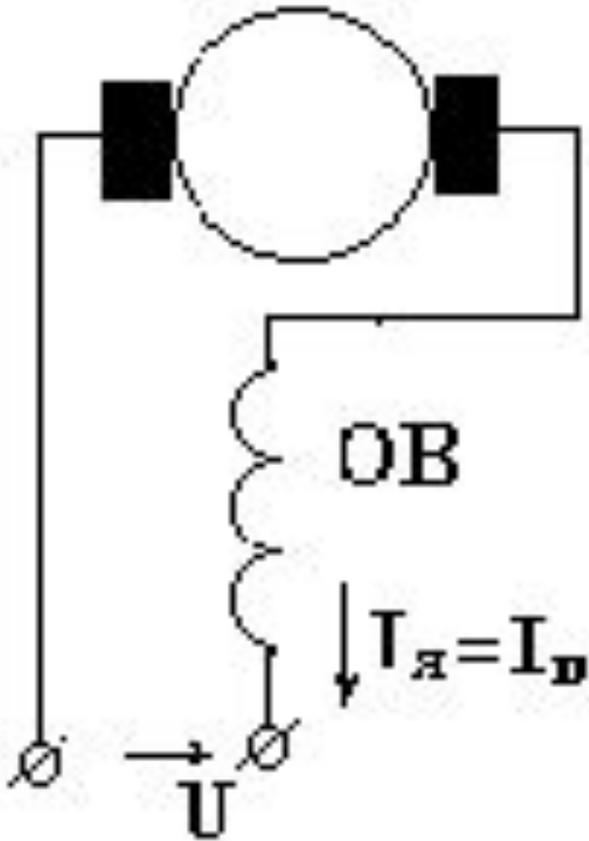
$$n_2 = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{I_я \cdot R_я}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{R_я \cdot M_2}{C_e \cdot C_M \cdot \Phi^2}$$

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения якоря n_2 от момента на валу M_2 при $U = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$.

Уравнение является уравнением механической характеристики двигателя с параллельным

Эта характеристика является жесткой. С увеличением нагрузки частота вращения такого двигателя уменьшается в небольшой степени.





На рисунке изображен двигатель последовательного возбуждения. Якорная обмотка и обмотка возбуждения включены последовательно. Ток возбуждения двигателя одновременно является током якоря. Магнитный поток индуктора пропорционален току якоря.

$$\Phi = k \cdot I_{\text{я}}$$

где k - коэффициент пропорциональности

Момент на валу двигателя пропорционален квадрату тока якоря.

$$M_2 = C_M \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi = C_M \cdot k \cdot I_{\text{я}}^2$$

откуда

а

$$I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{M_2}{C_M \cdot k}}$$

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения является мягкой.



Уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения выглядит следующим образом:

$$n_2 = \frac{U \cdot \sqrt{C_m \cdot k}}{C_e \cdot k \cdot \sqrt{M_2}} - \frac{R_\lambda}{C_e \cdot k}$$

С увеличением нагрузки скорость двигателя резко падает.

С уменьшением нагрузки на валу двигатель развивает очень большую частоту вращения.

Работа двигателя последовательного возбуждения без нагрузки недопустима.

Двигатель смешанного возбуждения имеет механическую характеристику, представляющую собой нечто среднее между механическими характеристиками двигателя параллельного и последовательного возбуждения.

Двигатели с параллельным возбуждением применяются для привода станков и различных механизмов, требующих широкой регулировки скорости.

Двигатели с последовательным возбуждением применяются в качестве тяговых двигателей электровозов, трамваев и т.д.