

4.6 Асинхронный электродвигатель, устройство, принцип действия.

Асинхронной называется машина, у которой в установившемся режиме работы ротор вращается со скоростью отличающийся от скорости вращающегося магнитного поля.

Наиболее широкое распространение получили трёхфазные асинхронные двигатели. Трёхфазный ток в обмотке статора, включённой в сеть, создает в машине магнитное поле, первая гармоническая которого вращается относительно статора со скоростью $n_1 = 60f / p$.

Ток пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. В результате взаимодействия этого тока с вращающимся магнитным полем на роторе асинхронной машины возникает вращат. электромагнитный момент.

В нормальных условиях работы асинхронной машины между статором и ротором существует только магнитная связь, такая же, как между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Обычно первичная обмотка асинхронной машины (к которой подводится эл.энергия) располагается на статоре, а вторичная обмотка, в которой происходит преобразование эл.энергии на роторе.

Скорость (n) с которой вращается ротор должна отличаться от скорости вращающегося магнитного поля так как при $n=n_1$ ротор неподвижен относительно поля статора, ЭДС в обмотке ротора и ток равны нулю и отсутствует электромагнитный момент.

Разность скоростей n и n_1 выражается в относительных единицах:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

$$s = \frac{n_c - n_p}{n_c} 100\%$$

называется скольжением асинхронной машины S -это коэффициент скольжения.

Основными частями асинхронного двигателя является неподвижный статор и вращающийся ротор между статором и ротором имеется воздушный зазор 0,1-0,5 мм (чем больше зазор тем мощнее двигатель). Статор состоит из станины, являющейся одновременно корпусом двигателя и закрепленных в ней магнитопровода и обмотки.

Магнитопровод статора представляет собой основную часть магнитной цепи машины как и магнитопровод трансформатор (для уменьшение потерь на вихревые токи) его набирают из штампованных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали толщиной 0,35 – 0,5мм. На внутренней цилиндрической поверхности магнитопровода имеются пазы, в которые укладываются проводники обмотки статора. К станине крепятся два боковых щита со сквозными центральными отверстиями для подшипников вала ротора.

Простейшим элементом обмотки является виток.



Рис. Элемент обмотки статора.

Несколько соединенных между собой витков лежащих двух пазах и имеющих общую изоляцию от стенок паза образуют секцию.

Совокупность секций принадлежащих одной фазе называется фазной обмоткой. Выводы обмотки фаз принято обозначать $C_1 C_2 C_3$ это начало и $C_4 C_5 C_6$ это концы соответственно первой второй и третьей фаз.

Отдельные фазы обмотки статора могут соединяться в звезду или треугольник.

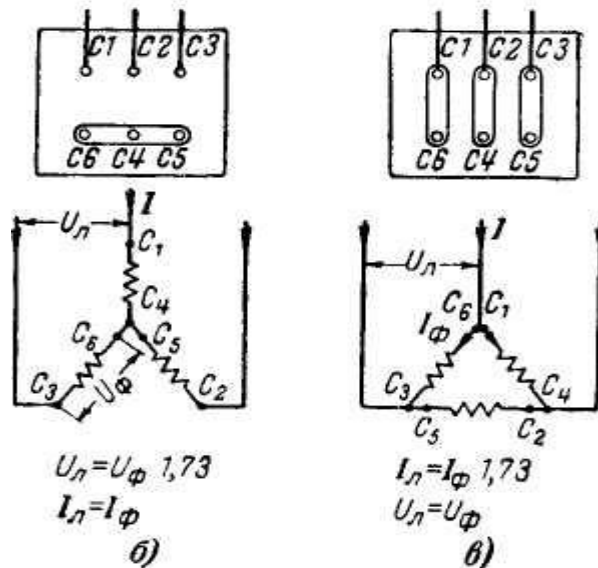


Рис. Соединение обмоток статора б) звездой в) треугольником.

Внутри статора двигателя помещается его вращающаяся часть-ротор. В зависимости от типа обмотки роторы делятся на короткозамкнутые и фазные. Короткозамкнутый ротор это цилиндр, набранный из стальных листов (как и статор) на поверхности которого имеются пазы. В пазы укладывается обмотка (медные или алюминиевые стержни) замкнутая на торцах алюминиевыми или медными кольцами. Такая обмотка имеет вид "белчьей клетки". Обмотка ротора короткозамкнутого двигателя является многофазной.

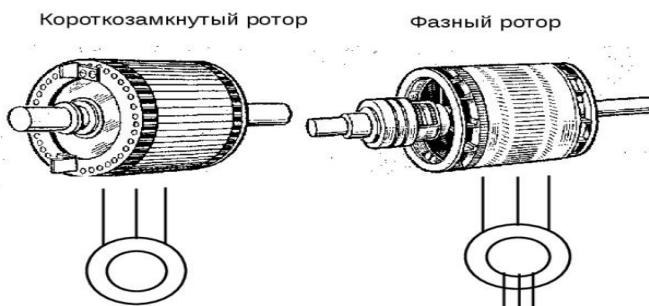


Рис. Типы роторов в зависимости от тока в обмотке.

В пазах фазного ротора укладывается проводка секций трехфазной обмотки обычно соединяемой звездой. Свободные выводы фаз обмотки ротора (обозначенные $P_1 P_2 P_3$) присоединяются к трем изолированным друг от друга и об вала контактными кольцами.

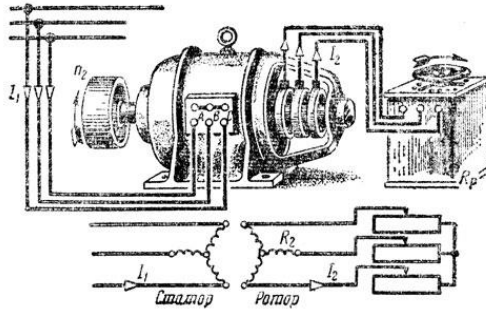


Рис. Схема соединения обмотки фазного ротора.

При помощи щеток расположенных на кольцах обмотки ротора присоединяется к реостату который служит для пуска двигателя или для регулирования его скорости.

В самолетном оборудовании используются двигатели с короткозамкнутым ротором, работающим при частоте переменного тока 400 Гц

Получение вращающегося магнитного поля

По трем одинаковым неподвижным обмоткам Ах, Ву, Сз, расположенных на внутренней поверхности статора под углом 120° относительно друг друга проходят токи трехфазной системы, сдвинутые по фазе друг относительно друга так же на 120° . Примем направление тока от начала к концу катушки принято за положительное.

В начальный момент а), ток катушки Ах наибольший и положительный. Токи в катушках Ву и Сз отрицательные равны друг другу и вдвое меньше тока в катушке Ах .

Таким образом ток в начале катушки Ах направлен от наблюдателя (+) а катушек Ву, Сз к наблюдателю (-). Также нанесены токи в катушках для моментов времени б) и в).

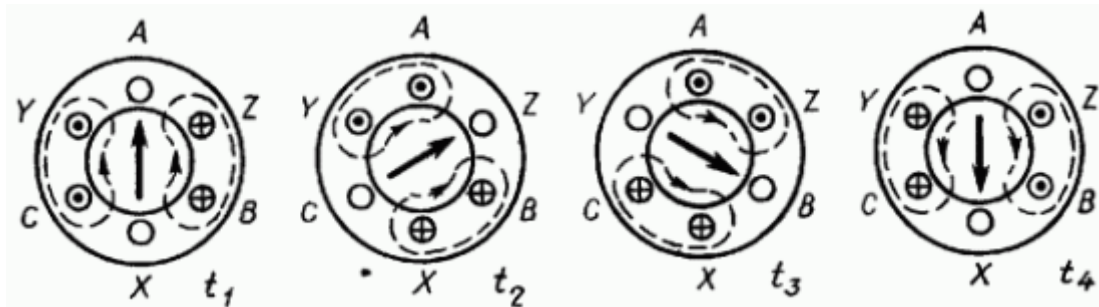


Рис. Получение вращающегося магнитного поля.

Легко видеть, что магнитные линии полей, охватывающие одинаково направленные токи для моментов времени а, б, в, оказываются повернутыми друг относительно друга в пространстве в направлении движения часовой стрелки и таким образом поле совершает поворот в течение одной шестой часа периода на 60° , а за полный период оборот 360° .

Необходимо заметить, что когда ток в одной из катушек достигает максимального значения, направление вращающегося поля совпадает с направлением оси этой катушки. Таким образом, установив порядок чередования амплитуд тока в катушках

Для изменения направление вращения нужно изменить порядок чередования амплитуд тока в катушках, то есть поменять местами два любых провода из трех, которыми обмотка присоединена к сети. Таким же образом осуществляется реверсирование асинхронных машин.

Частота вращения магнитного поля в оборотах минуту равна:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

эта частота n_1 называется синхронной.

Можно заметить, что М.Д.С. катушек F_a, F_b, F_c суммируются геометрически.

Тогда принимая во внимание значения токов I_a, I_b, I_c в катушках Ax, By, Cz для момента времени $a, б$ и в суммарная М.Д.С. трехфазной обмотки равна:

$$F = F_a + F_b + F_c = 1.5 F_{max}$$

Так как максимальные значения М.Д.С. катушек равны то:

$$F = 1.5 F_{фазы}$$

и являются неизменной в течении всего оборота, таким образом:

$$F = 1.5 F_{фазы} = const$$

Каждая фаза обмотки статора сцеплена с магнитным потоком которые следствие вращения магнитного поля непрерывно изменяется во времени от $\Phi = 0$ до $\Phi = \Phi_m$.

Этот общий поток который в 1,5 раза больше амплитуды пульсирующего потока каждой фазы, наводит в обмотках статора и ротора ЭДС e_1 и e_2 .

Принцип действия асинхронного двигателя.

Трехфазный ток, проходя по обмотке статора асинхронного двигателя, создает вращающееся в пространстве магнитное поле.

Это поле пересекая проводники обмотки ротора наводит в них Э.Д.С. Так как цепь обмотки ротора замкнута, то в её проводниках будут протекать токи $C2$ которые взаимодействуют с вращающимся магнитным полем статора. На проводники ротора действуют электромагнитные силы F , направленные касательно поверхности ротора (правило левой руки). Под действием сил приложенным к отдельным проводникам, ротор приходит в движение и вращается в ту же сторону что и магнитное поле.

Частота вращения n_1 магнитного поля статора, или синхронная частота вращения, прямо пропорциональна частоте переменного тока f и обратно пропорциональна числу пар полюсов статора P .

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

при $f = 400\text{Гц}$ и $P=1$ $n_1=2400$ об/мин.

Частота вращения ротора n должна быть меньше частоты вращения поля статора n_1 , так как только при этом условии магнитное поле статора будет двигаться относительно движущихся в ту же сторону проводников ротора и наводить в них необходимые для работы вторичные токи $C2$.

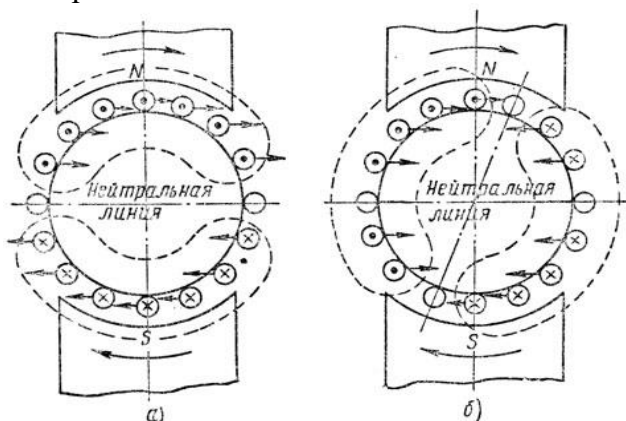


Рис. Действие сил на ротор асинхронного двигателя.

Таким образом, вращающееся магнитное поле и ротор двигателя принципиально вращаются с разными скоростями –асинхронно.

Разность частот вращения статора и ротора отнесенная к частоте вращения магнитного поля статора называется скольжением.

$$s = \frac{n_c - n_p}{n_c} 100\%$$

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться от 1, или 100%, когда ротор неподвижен, до 0, когда ротор вращается с частотой вращения поля. Чем больше нагрузка на валу, тем больше коэффициент скольжения S .

Номинальное скольжение асинхронных двигателей составляет от 1 до 6% при холостом ходе скольжение практически равно 0.

Энергетическая диаграмма.

Рабочий процесс асинхронных машин рассматривается на примере трехфазного двигателя.

Подводимая к статору электрическая мощность:

$$P_1 = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi_1$$

U_1 - подведенное напряжение на фазу;

I_1 - ток в фазе статора,

$\cos \varphi$ - коэффициент мощности двигателя.

Часть этой мощность затраченной в статоре на потери в обмотке статора:

$$P_{\Sigma 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r^2$$

и на потери от гистерезиса и вихревых токов в стали двигателя P_c .

Остальная мощность $P_{\Sigma 2}$ передается на ротор магнитным потоком и называется электромагнитной мощностью.

$$P_{\Sigma 2} = P_1 - (P_{\Sigma 1} + P_c)$$

Мощность переданная на ротор, частью затрачивается в нем на потери в обмотке $P_{\Sigma 2}$. Остальная часть мощности преобразуется в механическую мощность двигателя P_m - полная механическая мощность двигателя.

$$P_m = P_{\Sigma 2} - P_{\Sigma 2}$$

Полезная мощность на валу P_2 получается, если из P_m вычесть механические потери $P_{mх}$ и добавочные P_d .

Механические потери от трения в подшипниках, контактных колец о щетки, вентиляционные.

Добавочные потери возникают на зубцах статора и ротора при вращении ротора вследствие пульсации проходящего в зубец потока, а также потери, вызванные высшими гармоническими намагничивающих сил при нагрузке.

Таким образом, выходная мощность на валу равна:

$$P_2 = P_m - (P_{mх} + P_d).$$

4.7 Вращающий момент асинхронного электродвигателя.

Пусть поле статора вращается по направлению хода часовой стрелки и имеет показанную полярность.

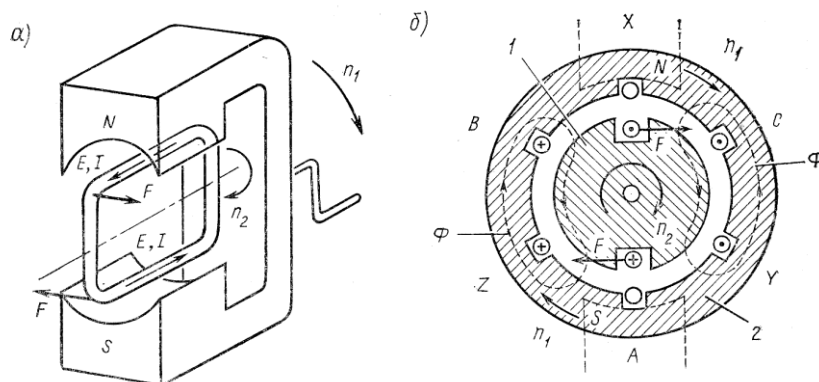


Рис. Вращающий момент асинхронного двигателя.

Если ротор неподвижен или вращается со скоростью $n < n_1$, то линии поля статора перемещаются относительно ротора слева направо со скоростью $n_1 - n$. По правилу правой руки в проводнике а обмотки ротора наводится эдс, направленная к нам. То же направление имеет и активная составляющая тока в проводнике а. Взаимодействие созданного этим током поля с полем статора образует результирующее поле. Из рисунка видно, что в данных условиях сила F , приложенная к проводнику создает на валу машины момент, который стремится повернуть ротор в направлении вращения поля, то есть является вращающим моментом. Если этот момент достаточен для преодоления нагрузочного момента на валу, то машина приходит во вращение со скоростью $n < n_1$ и работает двигателем преобразовывая подводимую к ней электрическую энергию в механическую.

При пуске двигателя $n=0$ и следовательно $S=+1$; при работе скорость вращения двигателя n зависит от нагрузки; при холостом ходе n примерно $= n_1$.

Таким образом, асинхронная машина работает двигателем в пределах от $S+1$ до S примерно $=0$.

Если считать что двигатель работает в установившемся режиме, то есть при $n = \text{const}$, то по условию равновесия моментов.

В любых условиях работы двигателя сумма всех моментов приложенных к якорю должна быть равна 0 то есть:

$$M_{эм} + M_{т0} + M_{т} + M_{j} = 0 \quad \text{или}$$

$$M_{эм} = M_2 + M_0 - M_j$$

$M_{т0}$ – внутренний тормозной момент связанный с направлением в двигатель при вращающемся якоре (механические и магнитные);

M_0 – момент холостого хода;

$M_{т}$ – нагрузочный тормозной момент, определяется свойствами приводимого во вращение механизма;

M_j – динамический момент, возникает при изменении скорости вращения якоря w , обуславливается наличием момента (J) инерции, вращающихся частей электропривода (главным образом якоря двигателя).

В уравнении (1) моменты, направления по вращению якоря остаются положительными, а моменты препятствующие движению отрицательными.

При установившейся скорости вращения $M_j = 0$ и

$$M_2 = M_{эм} - M_0 = -M_{т}$$

$$M_{эм} = M_0 + M_2$$

$M_{эм}$ – развиваемый двигателем вращающий момент;

M_0 и M_2 – составляющие вращающего момента, уравновешивающие момент $M_{т0}$ вызванный потерями холостого хода и нагрузочный момент $M_{т}$;

$M_2 = -M_{т}$ – задается приводом на который работает двигатель.

Моменту M_2 соответствует полезная мощность двигателя:

$$P_2' = M_{эм} \cdot \omega_2 = M_{эм} \frac{2\pi \cdot n_2}{60},$$

Моменту холостого хода M_0 соответствует мощность:

$$P_0 - P_{мх} + P_d = M_0 \cdot w = M_0 \cdot 2\pi \cdot n / 60$$

4.8 Характеристики асинхронного двигателя.

Под рабочими характеристиками асинхронного двигателя понимается зависимость n или S , $\cos \varphi$ и $n = f(P_2)$ при $U_1 = U_n = \text{const}$ $f = f_n = \text{const}$.

Эти характеристики часто дополняют характеристикой $I_1=f(P_2)$. Кроме того, к характеристикам двигателя относят перегрузочную способность

$M_M = M_M/M_H$ и его механическую характеристику $n = f(M_2)$.

Характеристика скорости

$n = f(P_2)$ или $S = f(P_2)$ при холостом ходе, то есть при $P_2=0$ ротор вращается со скоростью $n \sim n_1$, где $n_1 = 60 * f / p$ - скорость вращения магнитного поля.

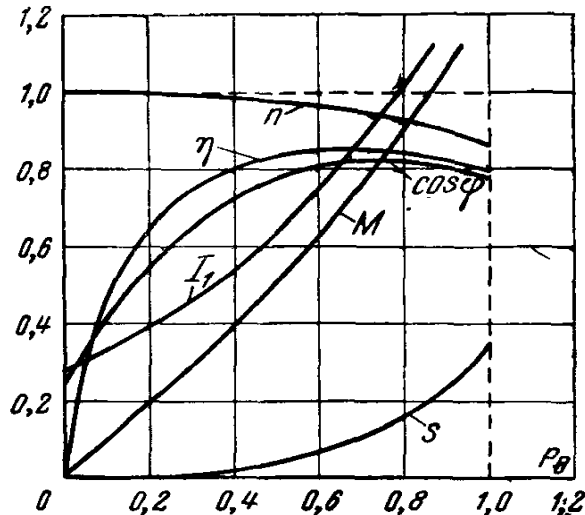


Рис. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

По мере увеличения нагрузки скорость вращения уменьшается а скорость скольжения растет в соответствии с выражением $S = P_2 / P_{эм}$.

Обычно при $P_2=P_{ном}$ скольжение $S=1.5 \div 5\%$, в соответствии с этим характеристика оборотов(n) имеет наклон к оси абсцисс.

Характеристика вращающего момента $M_2 = f(P_2)$ так как в пределах до минимальной нагрузки $n \sim const$, то зависимость $M_2=f(P_2)$ асинхронного двигателя имеет практически тот же характер что и для двигателя параллельного возбуждения.

Зависимость $\cos \varphi = f(P_2)$ асинхронный двигатель потребляет из сети значительно отстающий ток I_0 почти не зависящий от нагрузки P_2 в пределах от P_0 до $P_2 = P_H$. При холостом ходе $\cos \varphi \leq 0,2$ но при нагрузке он довольно быстро растет и обычно достигает максимума при мощности $P_2=P_{ном}$. При дальнейшем увеличении нагрузки скольжение увеличивается и $\cos \varphi$ начинает уменьшаться.

Зависимость $n=f(P_2)$ в асинхронных машинах существуют те же виды потерь, что и в других электрических машинах.

При $P_2=(0.25 \div 1.25)P_H$ изменения КПД незначительны. Это означает что довольно в большом диапазоне нагрузки, двигатель работает экономично с КПД близким к максимуму.

Регулирование скорости вращения

Регулирование скорости ротора асинхронного двигателя:

$$w = w_0 (1 - s) = \frac{2pf_1}{p} (1 - s)$$

или частоты его вращения:

$$n = \frac{60f_1}{P} (1 - S)$$

достигается изменением: 1) частоты источника питания(f), 2) числа пар полюсов (P), 3) скольжения (S).

1) Для уменьшения частоты (f), используют регулируемые полупроводниковые и машинные преобразователи. Одновременно с регулированием частоты необходимо изменять по определенному закону напряжение на обмотках статора двигателя, ибо только в этом случае остается неизменным магнитный поток (Φ) и перегрузочная способность двигателя по моменту.

2) Изменить число пар полюсов можно выполнив на статоре несколько обмоток с различным числом пар полюсов либо одну обмотку, допускающую переключение на различное число пар полюсов. Этот способ регулирования скорости вращения только для двигателя с короткозамкнутым ротором.

Двигатели, скорость которых регулируется изменением числа пар полюсов, называются многоскоростными.

3) Изменение напряжения при постоянном моменте на валу двигателя приводит к изменению скольжения, а следовательно к изменению скорости вращения двигателя.

Достоинства: плавность и надежность регулирования, возможность использования его в электроприводах с двигателями с короткозамкнутым ротором.

Недостатки: большие потери и ограниченность диапазона регулирования скорости вращения.

4.9 Однофазный асинхронный двигатель.

Были рассмотрены трехфазные асинхронные двигатели с вращающимся магнитным полем, которое создается при определенном пространственном положении фаз из обмотки статора и временном сдвиге протекающих по ним токов. Вместе с тем в нерегулируемых и нереверсируемых приводах малой мощности (до $1\div 2$ кВт) широко применяют однофазные асинхронные двигатели.

Однофазный асинхронный двигатель можно получить из трехфазного если одну фазу статора последнего (например С) отключить от сети, а фазы А и В соединить последовательно или параллельно между собой. Поэтому мощность однофазного двигателя при заданных размерах машины всегда меньше мощности трехфазного двигателя и составляет от нее примерно 70%.

Вторая характерная особенность однофазного двигателя состоит в том, что текущий по статору двигателя однофазный ток создает не вращающуюся, а пульсирующую намагничивающую силу, а стало быть, пульсирующее поле.

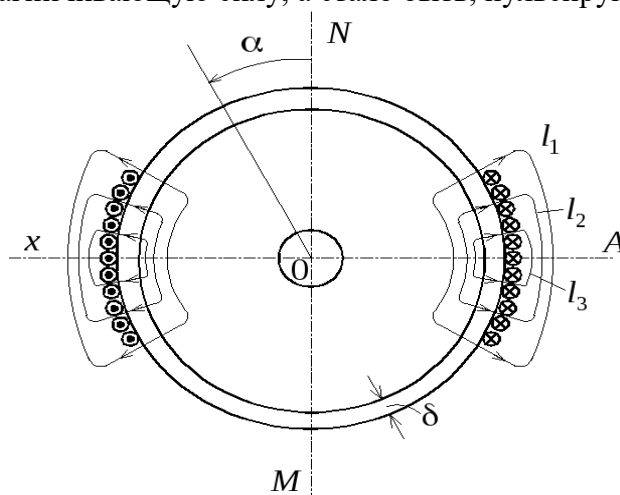


Рис. Взаимодействие пульсирующего поля статора с ротором.

Пример: Пусть на роторе уложен только один виток. В рассматриваемый момент времени угол между осью поля и витком равен ξ .

Возникающие в этом витке токи, взаимодействуя с полем будут стремиться поворачивать виток до тех пор, пока он не охватит максимум потока.

Если взять реальный ротор, то для каждого данного витка можно найти другой виток расположенный симметрично первому относительно оси поля. Результирующее усилие такой пары витков будет равно нулю, так как витки будут с одинаковой силой

стремиться вращаться в противоположные стороны, таким образом, пусковой момент однофазного асинхронного двигателя равен нулю.

Если ротор придет во вращение в каком-нибудь направлении, то одна намагничивающая сила будет вращаться в том же направлении что и ротор, а другая в обратном.

Первая - прямо вращающаяся намагничивающая сила создает те же эффекты что и в обыкновенном трехфазном двигателе, а именно: при увеличении скорости вращения ротора скольжение S уменьшается, а момент M_1 до определенного предела увеличивается.

Вторая - обратно вращающаяся относительно ротора намагничивающая сила создает режим электромагнитного тормоза, при котором в роторе наводятся токи повышенной частоты, а именно:

$$f_{2II} = \frac{p(n_1 + n)}{60} = \frac{p}{60} [2n_1 - (n_1 - n)] = (2 - s) f_1$$

Соответственно повышенной частоте возрастает индуктивное сопротивление ротора, вследствие чего момент ($M_{пр}$), создаваемый обратно вращающейся намагничивающей силой, постепенно уменьшается.

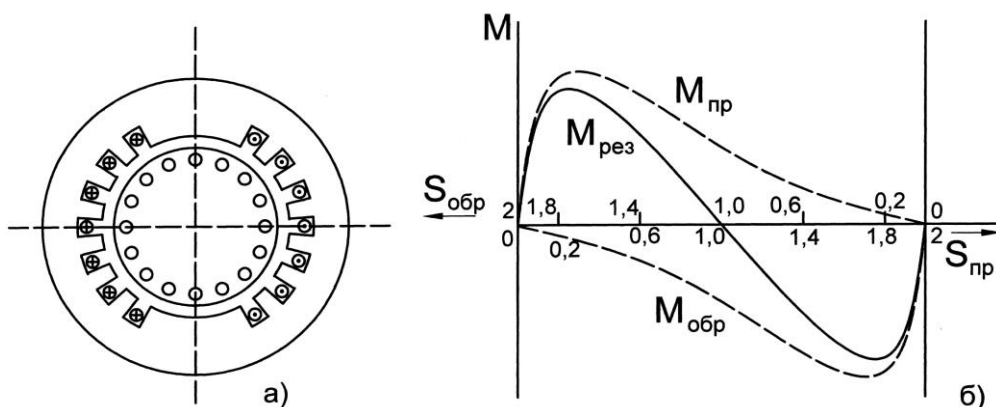


Рис. Зависимость электромагнитного момента от скольжения.

Обратная МДС и обратный магнитный поток вращаются по отношению к ротору с частотой вращения $n_1 + n_2 = 2n$, т.е. при скольжении $S = n_1 + n_2 / n_1 = 2$.

Частота $E_{2обр}$ и $I_{2обр}$ наведенных обратным потоком статора в роторе приблизительно равна $2f_1$.

Поэтому реактивное сопротивление обмотки ротора

$$X_{2обр} = 2\pi / f_2 * L_2$$

так велико, что ток $I_{2обр}$ отстает от ЭДС $E_{2обр}$ почти на 90° . Следовательно, ток $I_{2обр}$ почти целиком реактивный и создает с $\Phi_{обр}$ очень малый вращающий момент $M_{обр}$ противоположного направления. Таким образом, результирующий вращающий момент двигателя равен:

$$M = M_{пр} + M_{обр} \approx M_{пр}$$

Если привести ротор двигателя во вращение в сторону, противоположную первоначальной, то намагничивающие силы поменялись бы местами и явление повторилось бы в третьем порядке.

Таким образом, направление вращения ротора однофазного асинхронного двигателя определяется направлением приложенного начального вращающего момента.

Для получения пускового момента в однофазном двигателе необходимо создать тем или иным путем вращающееся магнитное поле. Чаще всего однофазный асинхронный двигатель пускается с помощью вспомогательной обмотки, которая также как главная,

располагается в пазах статора сдвинутая в пространстве на 90^0 относительно главной, то есть двигатель из однофазного превращается в двухфазный.

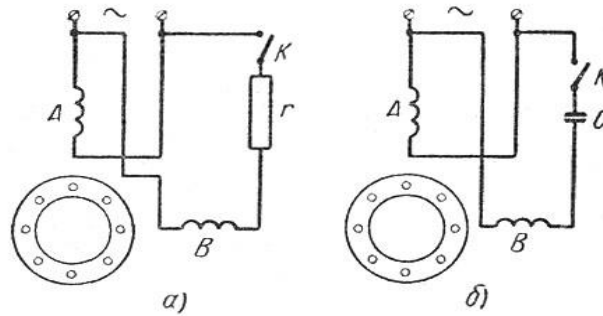


Рис. Схема включения пусковой обмотки В однофазного двигателя через:
а) активное сопротивление, б) конденсатор.

Однофазный асинхронный двигатель рассчитан на питание от однофазной сети и имеет на статоре две обмотки: рабочую А и пусковую Б, ротор двигателя выполнен короткозамкнутым. Переменный ток, протекая по рабочей обмотке занимающий $2/3$ пазов статора, создает пульсирующую намагничивающую силу, а последняя – пульсирующее магнитное поле.

После окончания пуска вспомогательная обмотка отключается.

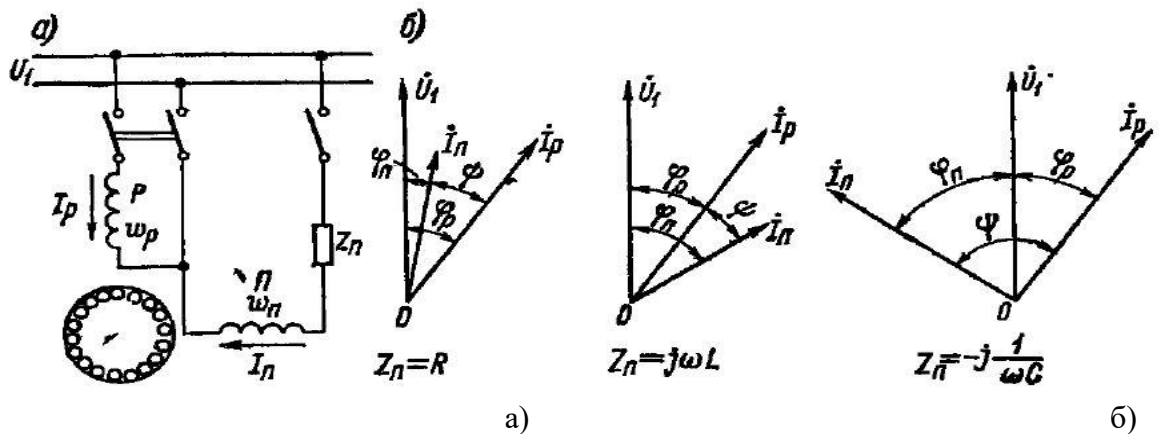
При включении в цепь пусковой обмотки активного сопротивления R угол ϕ будет меньше угла ϕ_a (рис. а), таким образом, будет получена разность фаз между векторами токов I_a и I_b .

При включении индуктивности (L) вектор тока I_b будет отставать от вектора I_a получится такая разность фаз $I_a - I_b$ (рис. б).

Но даже при включении обмотку Б активного сопротивления (R) и в обмотку А индуктивного (L) этот угол практически не достигает 90^0 .

Включение в цепь пусковой обмотки емкости (C) приводит к тому, что ток I_b опережает ток главной обмотки, а при достаточной величине емкости может опережать напряжение так что $I_a - (-I_b) = 90^0$.

С помощью емкости можно получить круговое вращающееся поле и наибольший пусковой момент (рис. в).



с)

Рис. Схема однофазного двигателя и векторные диаграммы с различными пусками.

Схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть.

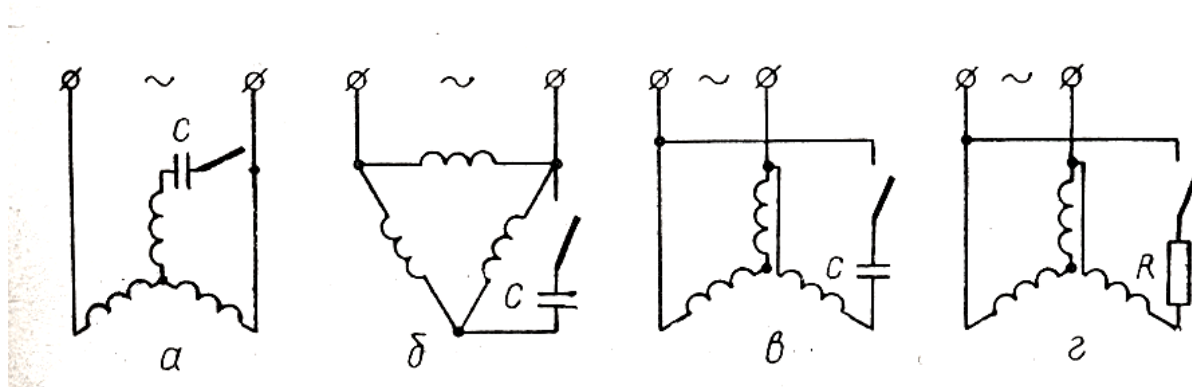


Рис. Схемы включения трехфазного двигателя в однофазную сеть:
 а) звезда б) треугольник в) с рабочей емкостью г) с пусковым сопротивлением.

4.10 Двухфазный электродвигатель типа ДИД, устройство, принцип работы.

ДИД-0.5 наиболее распространённым двигателем переменного тока в системах автоматического управления (АУ) является двухфазный асинхронный двигатель с тонкостенным полым ротором.

К двухфазным асинхронным двигателям относятся так называемые двухфазные индукционные двигатели типа ДИД. В зависимости от мощности эти двигатели обозначаются ДИД-0.1 (мощность $P=0.1$ Вт), ДИД-0.5, ДИД-1 и так далее.

Чаще всего применяются двигатели ДИД-0.5 (почти во всех следящих системах авиационных приборов).

Между фазным статором и корпусом двигателя вращается ротор в виде полого алюминиевого стакана. В роторе протекают токи по образующим цилиндра (стакана).

Двигатель обладает такой инерцией благодаря тому, что ротор очень тонкий и легкий.

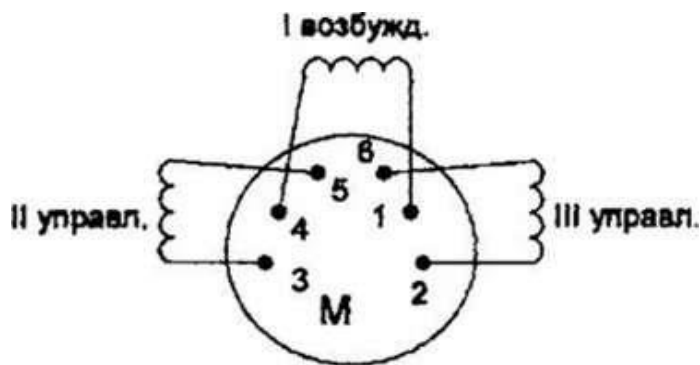


Рис. Схема распайки обмоток ДИД-0.5

Конструкция ДИД-0.5 выполнена так, что валик ротора проходит через отверстие на оси железа фазного статора и лежит на текстолитовых подшипниках статора и корпуса.

В двигателях большой мощности применяются шариковые подшипники. В корпусе ДИД-0.5 залито шлифованное железо, по которому проходит магнитный поток статора, то есть магнитный поток статора пронизывает ротор.

Статор имеет две обмотки, обмотку 1-4 называют обмоткой возбуждения, так как она подключена на постоянное напряжение сети 36 В.

Другая обмотка - обмотка управления состоит из двух половин 3-5 и 2-6. Это даст возможность удобно реверсировать ДИД-0.5. Оси обмоток статора сдвинуты между собой в пространстве на 90° .

Кроме того, токи этих обмоток обычно сдвинуты во времени на 90^0 . Сдвиг токов между обмотками возбуждения (ОВ) и обмоткой управления (ОУ) достигается включением их на разные фазы АБ и БВ.

Скорость вращения ДИД-0.5 при постоянном моменте в известных пределах пропорциональна напряжению, поданному на обмотку возбуждения (ОУ).

ДИД-0.5 может работать в следующих режимах:

- с редуктором при сдвиге фаз между токами возбуждения и управления $60-90-120^0$ при питании обмоток от различных фаз или через емкость (С).
- с редуктором при питании обмотки управления (ОУ) от усилителей прерывистым постоянным током 27В с частотой 400 Гц.
- без редуктора в заторможенном состоянии в качестве моментного двигателя.