

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

---

### 6.1 Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

**А**синхронный электродвигатель (АЭД) предназначен для преобразования электрической энергии в механическую. Принцип работы АЭД основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля, возникающего при прохождении трёхфазного переменного тока по обмоткам статора, с током, индуцированным полем статора в обмотках ротора, в результате чего возникают механические усилия, заставляющие ротор вращаться в сторону вращения магнитного поля при условии, что частота вращения ротора  $n$  меньше частоты вращения поля  $n_1$ . Таким образом, ротор совершает асинхронное вращение по отношению к полю.

На рисунке 53 приведен вид асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина (корпус); 2 – обмотка статора; 3 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 4 – сердечник статора; 5 – вал.

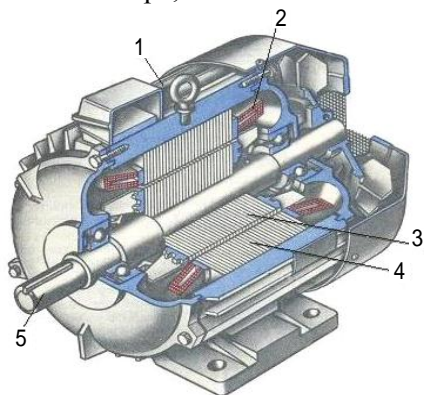


Рисунок 53 – Асинхронный двигатель переменного тока

*Корпус* АЭД защищает статор и ротор от механических повреждений и служит для крепления в нем подвижной и неподвижной частей АЭД.

*Статор* (неподвижная часть) асинхронного двигателя представляет собой полый цилиндр, собранный из пластин электро-

технической стали, изолированных друг от друга слоем лака. В пазах на внутренней стороне статора размещаются три фазных обмотки, которые соединяются между собой звездой или треугольником и подключаются к трёхфазной сети. Обмотки сдвинуты в пространстве. Токи фазных обмоток сдвинуты по фазе на треть периода, т. е. на  $120^\circ$  (электрических). Они возбуждают вращающееся магнитное поле с числом пар полюсов  $p$ , равным числу катушечных групп в каждой фазной обмотке.

Поле вращается с частотой

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (62)$$

где  $f_1$  – частота питающего тока, Гц.

При частоте тока  $f_1 = 50$  Гц и числе пар полюсов  $p = 1$  частота вращения магнитного поля составляет 3000 об/мин. Такие двигатели называют быстроходными. При числе пар полюсов, равном 2 и 3, частота вращения магнитного поля равна соответственно 1500 и 1000 об/мин. Это двигатели средней скорости. При числе пар полюсов 4 и более частота вращения составляет 750 и менее оборотов в минуту. Это тихоходные двигатели.

*Ротор* (подвижная часть) асинхронного двигателя представляет собой цилиндрический сердечник, собранный из пластин электро-технической стали, изолированных друг от друга слоем лака. В пазах ротора располагаются стержни из меди или алюминия, по торцам соединённые кольцами из того же материала (беличья клетка). Часто короткозамкнутая обмотка изготавливается путём заливки пазов ротора расплавленным алюминием.

Силовые линии вращающегося магнитного поля пересекают проводники роторной обмотки, наводя в них электродвижущие силы (ЭДС). Так как ротор короткозамкнутый, то эти ЭДС создают в нём токи. Частота и сила токов тем больше, чем больше скорость пересечения. Вращающееся магнитное поле, взаимодействуя с наводимыми токами, тянет их за собой, увлекает ротор и приводит его во вращение с частотой

$$n = n_1(1 - s), \quad (63)$$

где  $s$  – коэффициент скольжения, показывает, насколько ротор отстаёт от поля; измеряется в долях или процентах.

Рассмотрим график механической характеристики, который связывает между собой две механические величины: вращающийся момент ( $M$ ), развиваемый асинхронным двигателем, и скорость вращения  $n$  (рисунок 54).

На графике отмечены точки номинального, критического и пускового режимов. На холостом ходу, когда момент сопротивления равен 0, частота вращения ротора  $n$  приближается к частоте вращения магнитного поля  $n_1$ . По мере появления и увеличения момента нагрузки до номинального  $M_n$  частота вращения ротора уменьшается до номинальной  $n_n$ , соответствующей номинальному скольжению  $S_n$ .

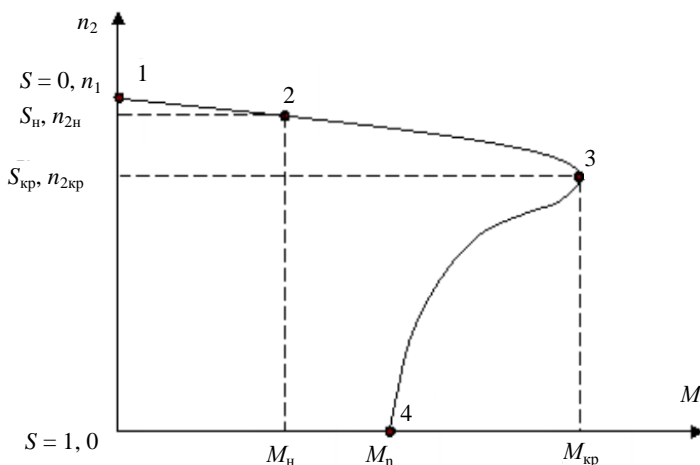


Рисунок 54 – График механической характеристики асинхронного двигателя

Дальнейшее увеличение момента нагрузки до максимального  $M_m$  приводит к дальнейшему уменьшению частоты вращения до значения, соответствующего критическому скольжению  $S_{кр}$ . При превышении моментом максимального значения двигатель останавливается ( $n = 0$ ;  $s = 1$ ), его обмотки начинают гореть; он должен быть отключен. Эта же точка графика соответствует первоначальному моменту.

Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{60 P_n}{2\pi n_n} . \quad (64)$$

Перегрузочная способность двигателя  $\lambda$  – это отношение максимального момента к номинальному:

$$\lambda = M_M / M_H . \quad (65)$$

Номинальное скольжение

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} . \quad (66)$$

Критическое значение скольжения

$$S_{\delta\delta} = s_f (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) . \quad (67)$$

Для построения механической характеристики задаются значениями коэффициента скольжения  $s$  и определяют по нему соответствующее значение частоты вращения ротора  $n$ , а также момент  $M$  по формуле Клосса

$$M = \frac{2M_i}{\frac{S_{\delta\delta}}{s} + \frac{s}{S_{\delta\delta}}} . \quad (68)$$

Пусковой момент двигателя

$$M_{II} = k_M M_H , \quad (69)$$

где  $k_M$  – кратность пускового момента.

Сила тока, потребляемого двигателем из сети при номинальной нагрузке,

$$I_H = \frac{P_H}{\eta_H \sqrt{3} U_H \cos \varphi_H} , \quad (70)$$

где  $P_H$  – номинальная мощность, Вт;

$\eta_H$  – номинальный коэффициент полезного действия;

$U_H$  – номинальное напряжение питания;

$\cos \varphi$  – номинальный коэффициент мощности.

В момент пуска асинхронный двигатель потребляет из сети ток  $I_{II}$  в несколько раз больше номинального. Кратность пускового тока

$$k_I = \frac{I_{II}}{I_H} . \quad (71)$$

Если двигатель работает с соединением обмоток по схеме «треугольник», то для уменьшения его пускового тока можно на время пуска соединить его обмотки по схеме «звезда», а затем, после разгона, перекоммутировать их в «треугольник». При этом пусковой ток в фазах двигателя уменьшится в  $\sqrt{3}$  раз, а в проводах линии – в 3 раза. Однако такая операция возможна, только если двигатель запускается на холостом ходу или с маленькой нагрузкой, потому что пусковой момент снижается в 3 раза.

В схеме подключения асинхронного двигателя используются кнопки «Пуск» и «Стоп», магнитный контактор  $KM$  и реле тепловой защиты  $KK$  (рисунок 55).

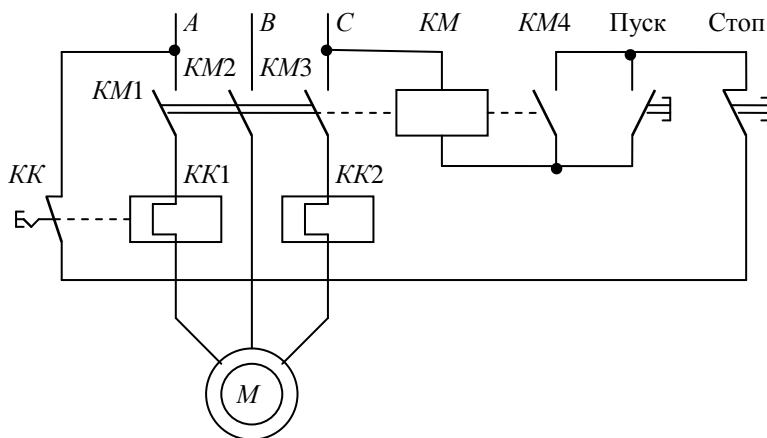


Рисунок 55 – Схема управления асинхронным двигателем

При нажатии кнопки «Пуск» создаётся цепь для протекания электрического тока: фаза  $C$  – обмотка магнитного контактора;  $KM$  – замыкающийся контакт кнопки «Пуск» – замкнутый контакт кнопки «Стоп» – замкнутый контакт реле тепловой защиты  $KK$  – фаза  $A$ .

При поступлении тока в обмотку контактора замыкаются контакты  $KM1 \dots KM1$  и в обмотки двигателя подаётся ток. Двигатель приходит во вращение. Одновременно замыкается контакт  $KM4$ , который шунтирует контакт кнопки «Пуск»; кнопку можно отпустить. Для выключения двигателя нужно нажать кнопку «Стоп», контакт которой разорвёт цепь питания обмотки магнитного контактора. При работе двигателя сила тока в его обмотках

контролируется датчиками реле тепловой защиты  $KK1$  и  $KK2$ , которые представляют собой биметаллические пластинки. При превышении током допустимого значения биметаллические пластинки, нагреваясь, изгибаются настолько, что включают расцепитель, размыкающий контакт  $KK$  теплового реле. При этом разрывается цепь питания обмотки контактора и двигатель выключается. После остывания биметаллических пластинок контакт реле тепловой защиты может быть восстановлен нажатием на специальный флажок.

Основные недостатки асинхронного двигателя – малый пусковой момент и большой пусковой ток – могут быть также устранены, если на время пуска увеличить значение активного сопротивления роторной обмотки. Для этих целей применяют специальные двигатели:

- с фазным ротором;
- с двойной клеткой, а также с бутылочными или глубокими пазами.

## **6.2 Асинхронный двигатель с фазным ротором**

Фазный ротор применяют для увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока (рисунок 56).

Искусственное увеличение активного сопротивления роторной обмотки приводит к опусканию механической характеристики на горизонтальную ось. Этот эффект используется в двигателях с фазным ротором. Фазный ротор имеет трёхфазную обмотку, выполненную изолированным проводом и соединённую  $Y$  или  $\Delta$ . Концы трёхфазной обмотки присоединены к трём латунным кольцам. С помощью щёток ЭДС роторной обмотки выводят наружу. К ним подключаются пусковые реостаты.

В начальный момент пуска к роторной обмотке присоединены все реостаты  $R$ , сопротивление максимально. Разгон двигателя до т. 1 происходит по нижней линии. По мере разгона ток, потребляемый двигателем, уменьшается. Это чувствует специальное токовое реле, которое включает контактор  $K1$ , закорачивающий половину пусковых реостатов. Рабочая точка двигателя перескакивает на среднюю линию, и разгон двигателя происходит до т. 2. Увеличившийся в момент переключения ток вновь снижается, и с помощью токового реле включается контактор  $K2$ . Все пусковые

реостаты закорочены, рабочая точка двигателя перескакивает на верхнюю (короткозамкнутую) линию.

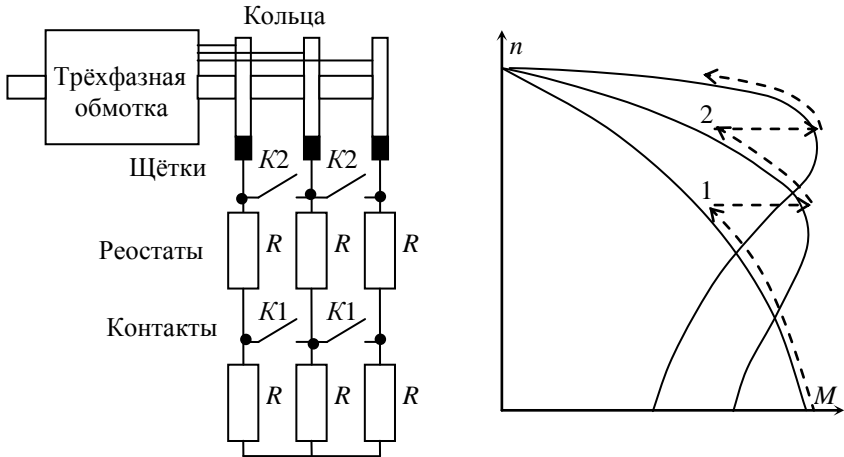


Рисунок 56 – Фазный ротор и его механические характеристики

Фазные роторы применяют для двигателей, работающих в режиме тяжёлых пусков, например на грузоподъёмных механизмах.

Эффекта автоматического увеличения активного сопротивления ротора в момент пуска можно добиться и в короткозамкнутом роторе за счёт его особой конструкции. Это двигатели с двойной клеткой, с бутылочными и с глубокими пазами. Здесь используется поверхностный эффект и зависимость глубины проникновения переменных токов вглубь ротора от их частоты. В пазы ротора укладываются стержни двух короткозамкнутых обмоток. Медные стержни большого сечения с малым сопротивлением укладывают в глубину, а латунные стержни малого сечения, с большим сопротивлением – на поверхности. В первый момент пуска скольжение  $s = 1$ , частота  $f_2 = f_1/p$  велика и глубина проникновения переменного электромагнитного поля вглубь ротора мала, ток идёт по латунным стержням большого сопротивления, лежащим на поверхности (рисунок 57). Латунной беличьей клетке соответствует наклонная линия 1 графика механической характеристики. По мере разгона двигателя скольжение уменьшается, уменьшается частота тока ротора  $f_2 = f_1s/p$ , электромагнитное поле проникает вглубь ротора, доходит до медных стержней малого сопротивления,

лежащих в глубине. Медной беличьей клетке соответствует обычная механическая характеристика 2. Результирующая механическая характеристика 1+2 получается сложением горизонтальных координат.

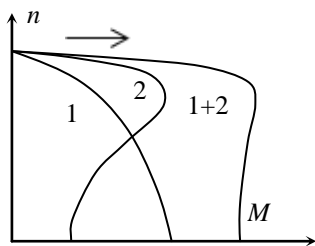


Рисунок 57 – Механическая характеристика ротора с двойной клеткой

Аналогичный эффект временного увеличения сопротивления ротора наблюдается при залитых алюминием пазах, если эти пазы в сечении имеют форму бутылки с узким горлышком на поверхности и расширением в глубине паза. Менее выраженный, но тоже заметный эффект увеличения пускового момента имеют двигатели с глубокими пазами ротора.

### 6.3 Двигатели постоянного тока

Электрический двигатель постоянного тока (ЭДПТ) – электродвигатель, питание которого осуществляется постоянным током. Он преобразует электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию. Широко используется в разных отраслях промышленности благодаря возможности регулировки частоты вращения. Диапазон мощности ЭДПТ от долей ватт (для привода устройств автоматики) до нескольких тысяч киловатт (для привода прокатных станов, шахтных подъемников и других механизмов).

Основные преимущества двигателей постоянного тока по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока – хорошие пусковые и регулировочные свойства, возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин, а недостатки – относительно высокая стоимость, некоторая сложность в изготовлении и пониженная надежность. Все эти недостатки двигателей постоянного тока обусловлены наличием в них щеточно-коллекторного узла, который к тому же является источником радиопомех и пожароопасности.

ЭДПТ являются обратимыми электрическими машинами и в определенных условиях способны работать как генераторы.

Основными узлами двигателя постоянного тока (рисунок 58) являются якорь 3 с обмоткой и коллектором 2, щеточно-коллекторное устройство 1, статор 6 с магнитными полюсами 4, содержащими обмотки возбуждения 5.



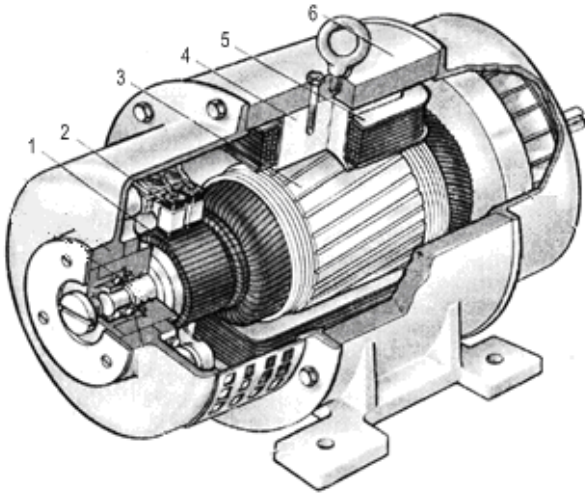


Рисунок 58 – Разрез электродвигателя постоянного тока

На *статоре* ЭДПТ располагаются в зависимости от конструкции: постоянные магниты; обмотки возбуждения – катушки, наводящие магнитный поток возбуждения.

*Ротор* (якорь) вращается в магнитном поле, и для уменьшения вихревых токов его сердечник набирают из кольцевых пластин кремнистой электротехнической стали. В пластинах проштампованы пазы, а также круглые отверстия для воздушного охлаждения.

Провода якорной обмотки укладывают в пазы ротора. Якорная обмотка состоит из отдельных секций, подключённых к коллекторным пластинам и образующих общую электрическую цепь. Для подключения якорной обмотки к внешней электрической цепи используют щётки, изготовленные из угля, графита или медно-графитной композиции. Эти материалы не прихвываются к коллекторным пластинам при искрении. Щётки прижаты к коллектору пружинами.

Для того чтобы двигатель работал, его нужно возбудить, т. е. создать в нём магнитное поле. Только в микромашинах для этих целей могут быть использованы постоянные магниты. В большинстве случаев магнитный поток создаётся электрическим током. Для этого на полюса укладывается обмотка возбуждения ОВ, по которой пропускают постоянный ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ . Для усиления магнитного потока станину, полюса и сердечник якоря делают из материалов с большой магнитной проницаемостью, а

воздушные зазоры по возможности малыми.

*Коллектор* собирает отдельные витки (секции обмоток) в общую электрическую цепь – якорную обмотку. Различают несколько типов обмоток: простые (петлевая, волновая) и более сложные. В зависимости от вида обмотки в ней может быть две, четыре и более параллельных ветвей. При вращении якоря щётки скользят по коллекторным пластинам, при этом секция якорной обмотки, подключённая между этими пластинами, переходит из одной параллельной ветви в другую. Этот процесс называют коммутацией. Коммутация необходима для того, чтобы изменить направление тока в секции якорной обмотки при перемещении её от одного полюса к другому.

Проводники якорной обмотки испытывают действие механических сил, которые пропорциональны значению магнитной индукции, силе тока в якорной обмотке и активной длине проводника. Складывая силы, действующие на отдельные проводники, и учитывая плечо действия этих сил, т. е. их расстояние до оси вала, можно получить выражение для электромагнитного момента  $M$  через значение магнитного потока  $\Phi$  и силу тока якорной обмотки  $I_{я}$ :

$$M = c_m \Phi I_{я}. \quad (72)$$

Электромагнитный момент пропорционален величине магнитного потока и силе тока якорной обмотки. Коэффициент  $c_m$  называют механической постоянной электрического двигателя.

Под действием вращающего электромагнитного момента якорь приходит в движение. Витки якорной обмотки пересекают силовые линии магнитного поля, в каждом из них наводится электродвижущая сила

$$e = \nu Bl, \quad (73)$$

где  $\nu$  – линейная скорость проводника;

$B$  – значение индукции магнитного поля;

$l$  – активная длина проводника.

Результирующая ЭДС якорной обмотки

$$E = c_E n \Phi, \quad (74)$$

где  $c_E$  – электрическая постоянная двигателя;

$n$  – частота вращения;

$\Phi$  – магнитный поток.

Якорь двигателя разгоняется до тех пор, пока ЭДС его обмотки  $E$  не уравновесит приложенного напряжения  $U$  за вычетом падения напряжения на сопротивлении якорной цепи  $r_{я}$ :

$$E = U - r_{я}I_{я}. \quad (75)$$

Выражая ЭДС и ток якоря через магнитный поток, получим

$$c_A n \Phi = U - \frac{r_{я} M}{c_1 \Phi}, \quad (76)$$

откуда определим частоту вращения двигателя  $n$

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_{я} M}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (77)$$

где  $n_0$  – частота вращения ротора в условиях идеального холостого хода;

$\Delta n$  – уменьшение частоты под нагрузкой.

Таким образом, принцип работы ЭДПТ заключается в том, что на проводник с током, расположенный в магнитном поле, действует сила магнитной индукции перпендикулярная как магнитному полю, так и току, и создающая вращающийся момент ротора.

Регулировать частоту вращения можно как путём изменения питающего напряжения, так и за счёт изменения магнитного потока. При увеличении напряжения питания частота вращения двигателя возрастает. При увеличении магнитного потока двигатель замедляет своё вращение, так как требуемое значение ЭДС достигается при меньшей скорости движения проводников. Под нагрузкой двигатель замедляет своё вращение; уменьшение частоты вращения  $\Delta n$  пропорционально моменту нагрузки.

## 6.4 Коллекторные двигатели переменного тока

Коллекторные электродвигатели переменного тока предназначены для привода различных механизмов и аппаратов и имеют хорошие регулировочные и пусковые свойства.

Возможность применения коллекторных двигателей на переменном токе обусловлена тем фактом, что при изменении полярности питающего напряжения при переходе от положительной

полуволны переменного тока к отрицательной направлению вращающего момента не изменяется. Это происходит потому, что одновременно с изменением направления тока в якорной обмотке, происходит изменение направления тока в обмотке возбуждения, то есть изменяется полярность полюсов. Однако для работы на переменном токе подходят только двигатели последовательного возбуждения. У двигателей параллельного возбуждения в этом случае был бы слишком большой сдвиг фаз между якорным током и током возбуждения из-за большой индуктивности обмотки возбуждения.

Электромагнитный момент двигателя последовательного возбуждения является пульсирующим. Он имеет постоянную составляющую и переменную, изменяющуюся с удвоенной частотой сети. Однако пульсации момента не нарушают работу двигателя, так как сглаживаются за счёт инерции вращающегося якоря.

В конструктивном отношении коллекторные двигатели переменного тока имеют существенное отличие от машин постоянного тока. Магнитопровод статора коллекторного двигателя делается шихтованным из листовой электротехнической стали. Это даёт возможность сократить потери от вихревых токов, которые при работе двигателя от сети переменного тока повышаются, так как переменный ток в обмотке возбуждения вызывает перемагничивание всей магнитной цепи, включая станину и сердечники полюсов.

Основной недостаток коллекторных двигателей переменного тока – тяжелые условия коммутации из-за наведения дополнительной трансформаторной ЭДС, наводимой переменным магнитным потоком возбуждения. Недостатками их являются также сравнительно высокая стоимость, пониженная надёжность и ограниченная мощность (до нескольких кВт).