

Лекция 3

*Механические характеристики
электродвигателей в процессе
работы, пуска и торможения.*

Механические характеристики электродвигателей в процессе работы, пуска и торможения.

- 1. Характеристики ДПТ*
- 2. Способы пуска и реверса ДПТ*
- 3. Характеристики трехфазных АД*
- 4. Трехфазный АД в 1 фазном режиме*
- 5. Характеристики АД в 1 фазном режиме*
- 6. Механическая и угловая характеристика
синхронного двигателя*
- 7. Способы пуска и реверса АД и синхронных
двигателей*
- 8. Тормозные режимы ДПТ и трехфазных
асинхронных двигателей*

3.1 Характеристики ДПТ

Механические характеристики двигателя
постоянного тока независимого возбуждения

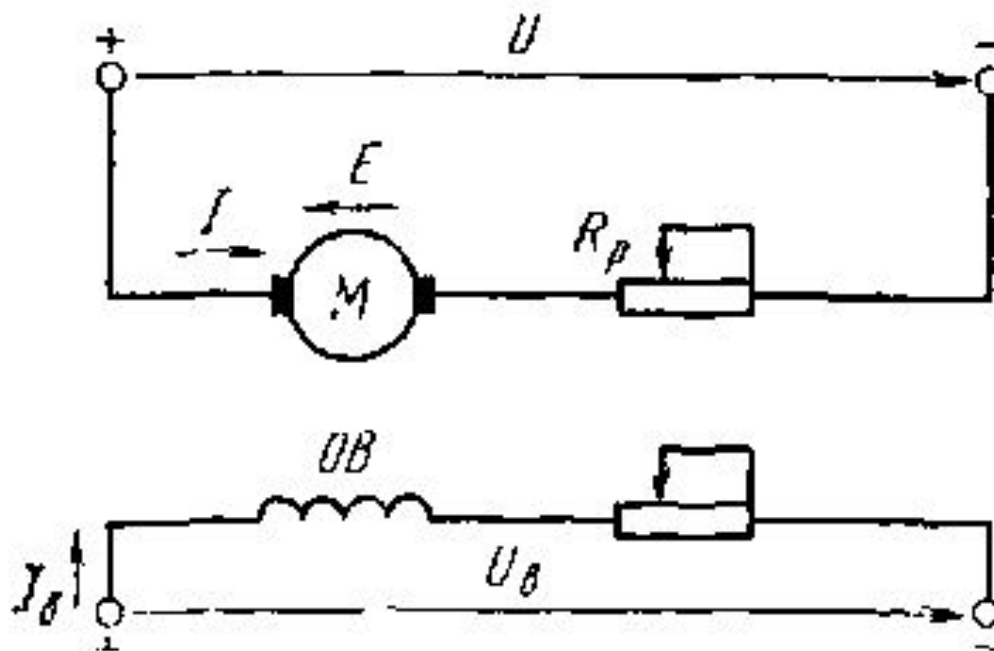


Рисунок 3.1 Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Якорь двигателя M и его обмотка возбуждения OB обычно получают питание от разных, независимых друг от друга источников (преобразователей) напряжения U и U_B , что позволяет отдельно регулировать напряжение на якоре двигателя и на обмотке возбуждения и выполнять их на разное номинальное напряжение.

Аналитическое выражение механической характеристики двигателя может быть получено из уравнения равновесия напряжений, составленного для якорной цепи схемы (рис. 3.1).

При установившемся режиме работы двигателя приложенное напряжение U , V , уравновешивается падением напряжения в якорной цепи IR и наведенной в якоре ЭДС вращения E , V , т. е.

$$U = IR + E; \quad (3.1)$$

здесь I - ток в якорной цепи двигателя, A ; R - суммарное сопротивление якорной цепи, Ом, включающее внешнее сопротивление резистора R_p и внутреннее сопротивление якоря двигателя $R_{я}$ (при наличии дополнительных полюсов учитывается и их сопротивление);

$$E = k\Phi\omega, \quad (3.2)$$

где **k** - коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя, $k = pN/2\pi a$ (**p** - число пар полюсов двигателя; **N** - число активных проводников обмотки якоря; **a** - число пар параллельных ветвей обмотки якоря); **Φ** и **ω** — соответственно магнитный поток, Вб, и угловая скорость двигателя, рад/с.

Если в (3.1) вместо **E** подставим ее значение **E** из (3.2), то получим уравнение для скорости двигателя

$$\omega = (U - IR)/k\Phi. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) представляет собой зависимость скорости двигателя от тока якоря.

Такую зависимость $\omega=f(I)$ называют электро механической характеристикой двигателя.

Для получения уравнения механической характеристики необходимо найти зависимость скорости от момента двигателя.

Это легко сделать, если учесть, что момент, Н·м, развиваемый двигателем, связан с током якоря и магнитным потоком простой зависимостью, а именно:

$$M = k\Phi I, \quad (3.4)$$

Подставив в (3.3) значение тока I , найденное из (3.4), получим выражение для *механической характеристики*:

$$\omega = U/k\Phi - MR/k^2\Phi^2, \quad (3.5)$$

ИЛИ

$$\omega = U/c - MR/c^2, \quad (3.6)$$

где

Коэффициент c принимается постоянным, не зависящим от нагрузки, если у двигателя с независимым возбуждением имеется компенсационная обмотка. Он может считаться неизменным, если для обычных двигателей пренебречь реакцией якоря.

Механическая характеристика двигателя при неизменных параметрах U , Φ и R представляется прямой линией.

Изменяя тот или иной параметр механической характеристики, можно при определенном моменте сопротивления на валу двигателя получать различные скорости двигателя, т. е. *регулировать скорость электропривода.*

На рис. 3.2 представлены механические характеристики двигателя независимого возбуждения для различных сопротивлений якорной цепи. Как видно из (3.5), при $M = 0$ все характеристики проходят через одну точку, лежащую на оси ординат. Угловая скорость в этой точке имеет вполне определенное значение, не зависящее от сопротивления якорной цепи. Эта скорость носит название скорости идеального холостого хода ω_0 и определяется выражением

$$\omega_0 = U/k\Phi. \quad (3.8)$$

При скорости идеального холостого хода ЭДС якоря, направленная навстречу приложенному напряжению, равна ему по абсолютному значению. Если двигатель до приложения нагрузки работал с угловой скоростью ω_0 , то при появлении на его валу момента сопротивления угловая скорость будет снижаться. Угловая скорость будет снижаться до тех пор, пока момент двигателя не сравняется с моментом сопротивления. Разность значений установившихся скоростей электропривода до и после приложения заданной статической нагрузки называется статическим падением (перепадом) скорости

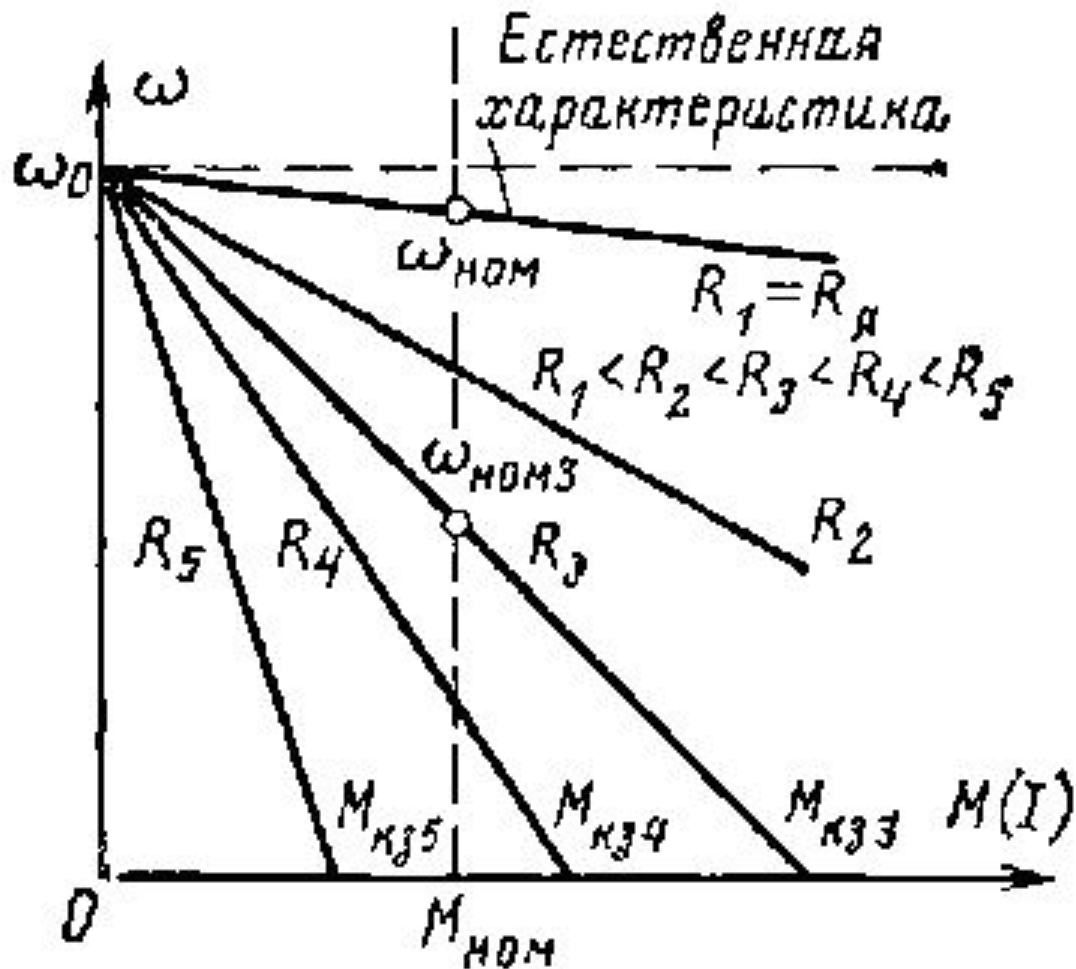


Рисунок 3.2 Естественная характеристика и семейство реостатных механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Второй член (3.6) характеризует собой статическое падение угловой скорости (перепад) относительно угловой скорости идеального холостого хода:

$$\Delta\omega = MR/k^2\Phi^2. \quad (3.9)$$

Таким образом, уравнение для скорости двигателя может быть записано так:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (3.10)$$

Верхняя характеристика из семейства, приведенного на рис. 3.2, носит название естественной. *Естественной характеристикой* называется такая характеристика двигателя, которая получается при отсутствии внешних резисторов в якорной цепи и номинальных значениях напряжения и магнитного потока двигателя. *Жесткость* естественной характеристики зависит от внутреннего сопротивления якорной цепи двигателя.

Внутреннее сопротивление якорной цепи включает собственное сопротивление якорной обмотки, сопротивление обмотки дополнительных полюсов, компенсационной обмотки и щеток.

Соответственно перепад скорости для естественной характеристики

$$\Delta\omega = MR_{я}/k^2\Phi^2 \text{ ном.}$$

По (3.9) определяется статическое падение скорости для любой из характеристик двигателя независимого возбуждения, представленных на рис. 3.2. Например, при дополнительно включенном реостате, имеющем сопротивление R_p , статическое падение скорости определится из соотношения

$$\Delta\omega = M(R_{я} + R_p)/k^2\Phi^2. \quad (3.11)$$

Разделив (3.10) на ω_0 , получим статическое падение скорости в относительных единицах:

$$\Delta\omega_{oe} = \Delta\omega/\omega_0 = (\omega_0 - \omega)/\omega_0.$$

Если в якорную цепь двигателя включен дополнительный резистор (реостат), то механические характеристики, получаемые при этом, называются искусственными или реостатными. Эти характеристики пересекаются все в одной точке ω_0 . Реостатные характеристики так же линейны, как и естественная характеристика, но имеют значительно больший наклон к оси моментов, т. е. обладают меньшей жесткостью. Чем больше введенное в цепь якоря сопротивление резистора, тем круче идет характеристика, тем меньше ее жесткость.

Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Для электродвигателя последовательного возбуждения, принципиальная схема включения которого представлена на рис. 3.3, уравнение электромеханической характеристики, так же как и для двигателя независимого возбуждения, имеет вид:

$$\omega = (U - IR)/k\Phi,$$

где R - суммарное сопротивление якорной цепи, состоящее из сопротивления обмотки якоря, обмотки возбуждения и сопротивления внешнего резистора.

В отличие от двигателя независимого возбуждения здесь магнитный поток Φ является функцией тока якоря I . Эта зависимость, приведенная на рис. 3.4, носит название кривой намагничивания.

Если для упрощения анализа предположить, пренебрегая насыщением магнитной системы, линейную зависимость между потоком и током якоря, как это показано пунктиром на рис. 3.4, т. е. считать $\Phi = \alpha I$, то момент двигателя

$$M = k\Phi I = \alpha k I^2. \quad (3.12)$$

Подставив в равенство для угловой скорости двигателя значение тока из (3.12), получим выражение для механической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{\alpha k \sqrt{M/\alpha k}} - \frac{R}{\alpha k} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B \quad (3.13)$$

Отсюда следует, что при ненасыщенной магнитной цепи двигателя механическая характеристика изображается кривой (рис. 3.5), для которой ось ординат является асимптотой. Особенностью механической характеристики двигателя последовательного возбуждения является ее большая крутизна в области малых значений момента.

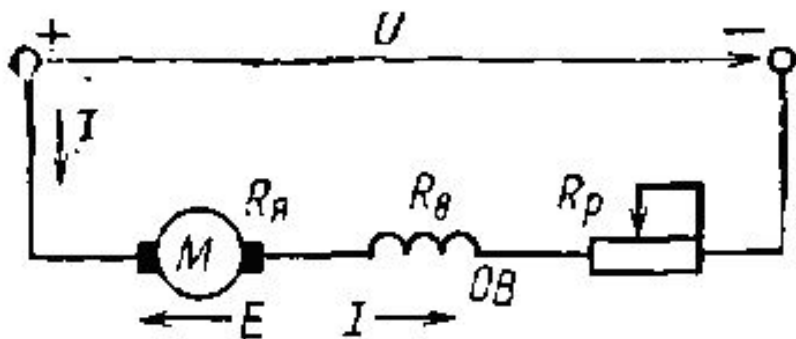


Рисунок 3.3 Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

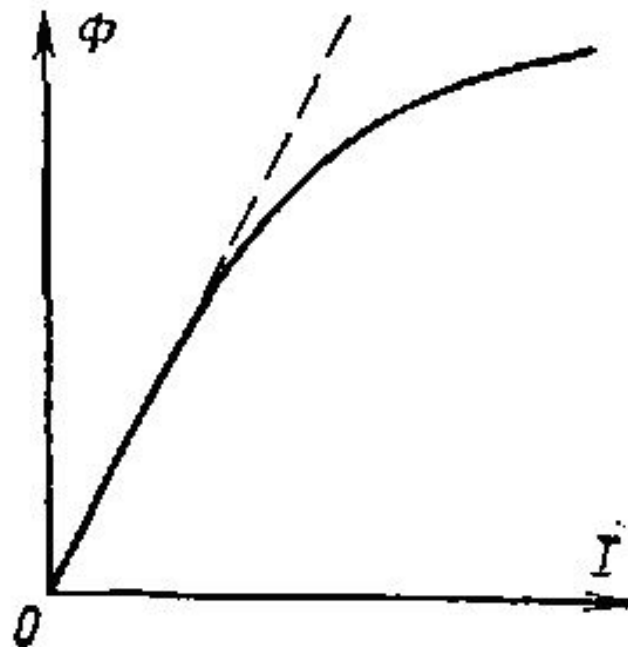


Рисунок 3.4 Кривая намагничивания двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Значительное увеличение угловой скорости при малых нагрузках обуславливается соответствующим уменьшением магнитного потока.

Уравнение (3.13) дает лишь общее представление о механической характеристике двигателя последовательного возбуждения. Вследствие того, что действительные механические характеристики сильно отличаются от кривой, выраженной уравнением (3.13), построение характеристик приходится вести графоаналитическими способами. Обычно построение искусственных характеристик производится на основании данных каталогов, где приводятся естественные характеристики: $n = f(I)$ и $M = \psi(I)$.

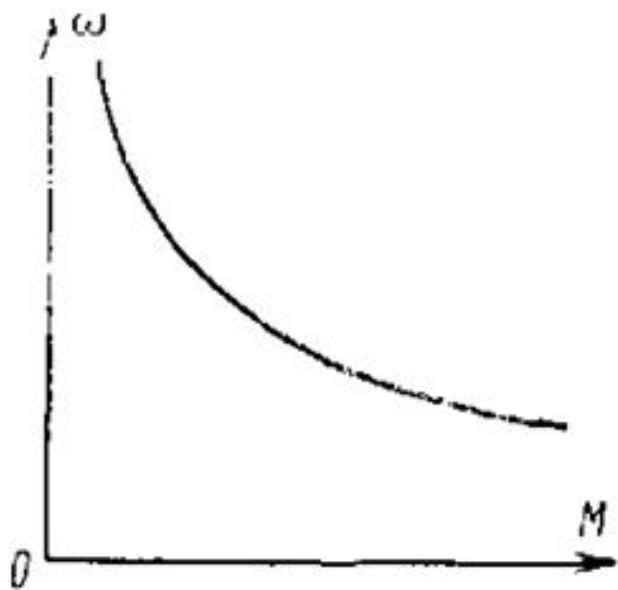


Рисунок 3.5 Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

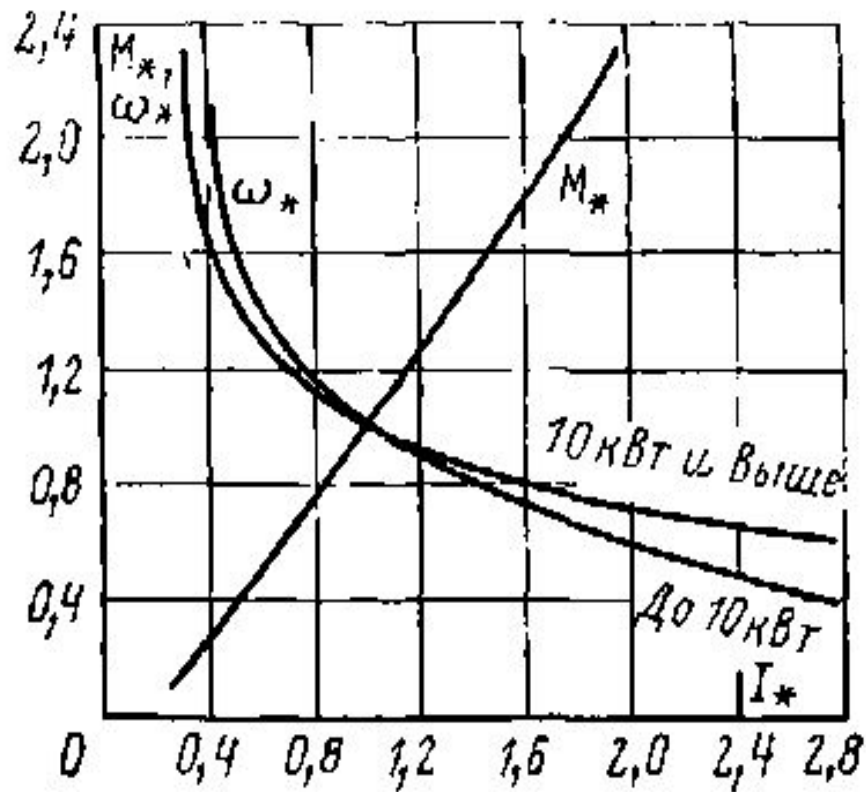


Рисунок 3.6 Зависимость момента и угловой скорости от тока якоря двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (в относительных единицах).

Механические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения (рис. 3.7) имеет две обмотки возбуждения: независимую ОВ2 и последовательную ОВ1, поэтому его механические характеристики занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей независимого и последовательного возбуждения.

Механическая характеристика рассматриваемого двигателя вследствие изменения магнитного потока при изменении нагрузки не имеет аналитического выражения, поэтому при расчетах обычно пользуются естественными универсальными характеристиками момента и скорости от тока якоря, которые даются в каталогах. Такие характеристики в относительных единицах представлены на рис. 3.8.

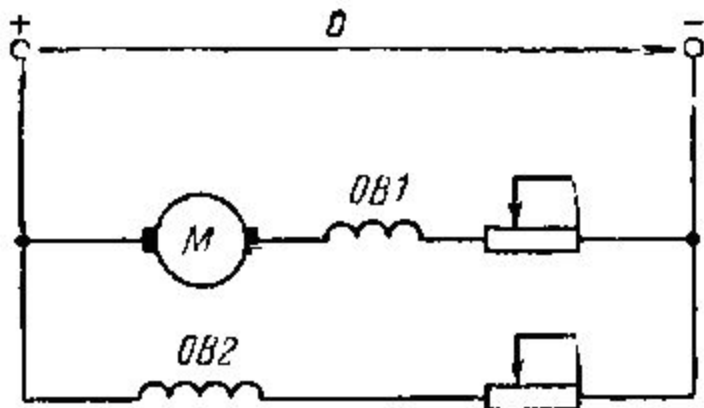


Рисунок 3.7 Принципиальная схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

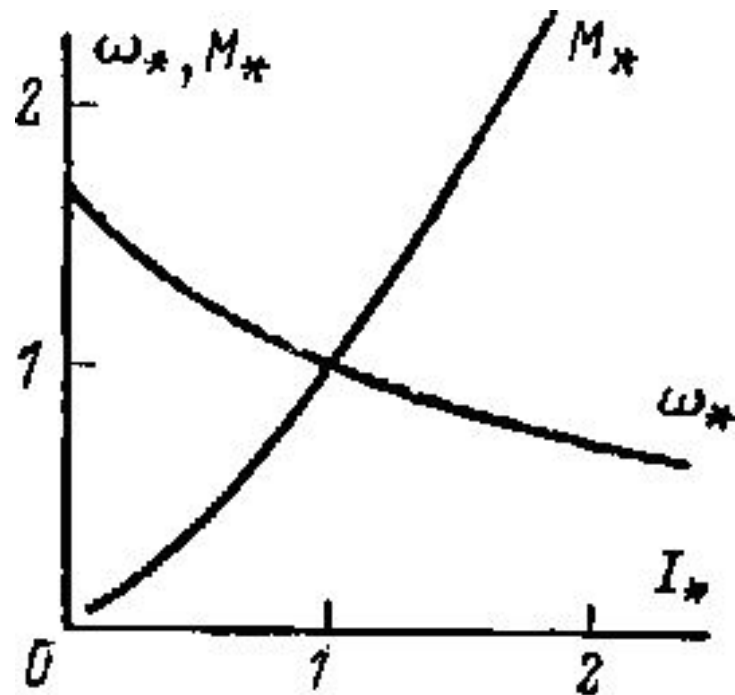


Рисунок 3.8 Зависимость момента и угловой скорости от тока якоря двигателя постоянного тока смешанного возбуждения (в относительных единицах).

В отличие от двигателя последовательного возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет конечное значение скорости идеально холостого хода. Эта скорость определяется только магнитным потоком, созданным МДС независимой обмотки, и равна:

$$\omega_0 = U/k\Phi_0,$$

где Φ_0 — магнитный поток, созданный током возбуждения независимой обмотки.

Соотношения МДС независимой и последовательной обмоток различны для двигателей разных серий. Наиболее употребительным является соотношение, которое при номинальном токе дает равенство МДС обеих обмоток возбуждения. Скорость двигателя смешанного возбуждения при малых нагрузках изменяется значительно, а затем при увеличении нагрузки медленно уменьшается почти по прямой, как у двигателя независимого возбуждения. Происходит это вследствие того, что при больших нагрузках наступает насыщение машины, и хотя МДС последовательной обмотки возрастает, магнитный поток уже почти не изменяется.

3.2 Способы пуска и реверса ДПТ

Двигатель независимого возбуждения

Напряжение, подведенное к зажимам электрического двигателя, в любых условиях и в любой момент времени уравнивается суммой ЭДС якоря.

При вращении якоря электродвигателя в магнитном поле полюсов в обмотке якоря индуцируется ЭДС $E_{дв}$. Согласно правилу правой руки, эта ЭДС направлена против тока, притекающего в обмотку якоря из сети, и ее поэтому называют противо ЭДС (рис. 3.9, а).

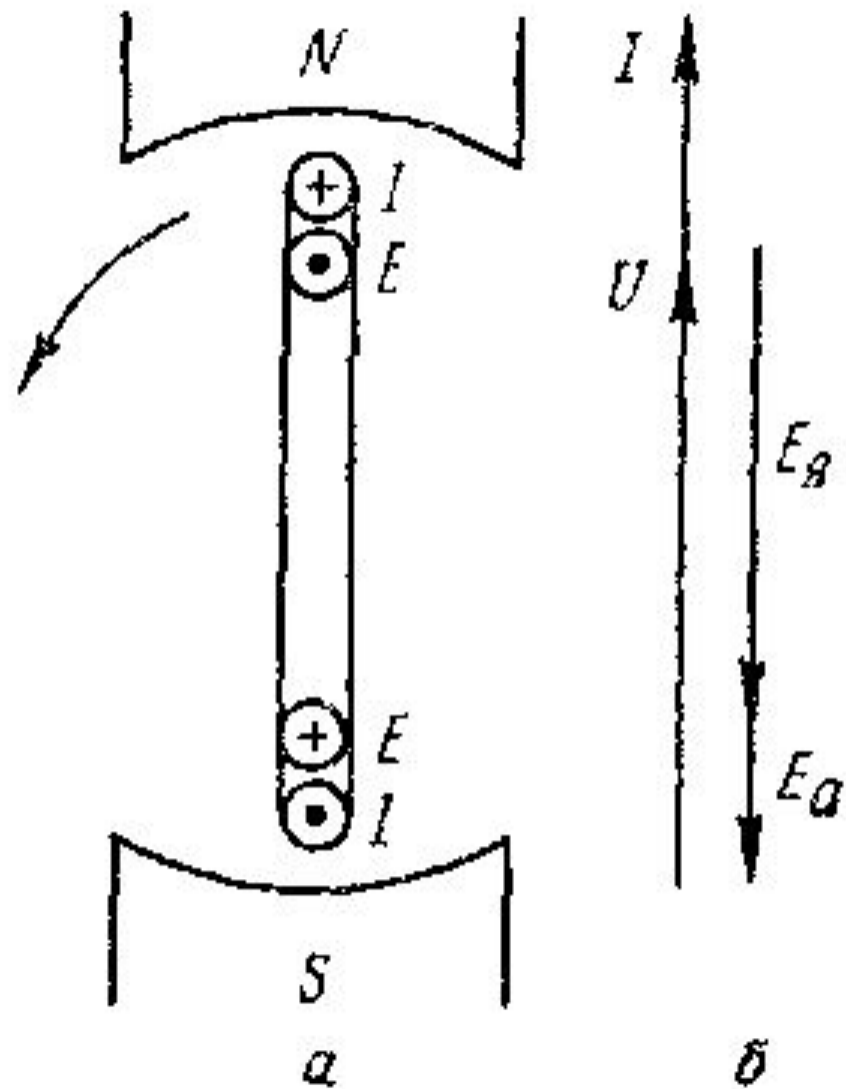


Рисунок 3.9 Направление тока и противоЭДС в обмотке якоря двигателя: а- схема; б – векторная диаграмма.

Кроме противоЭДС, в обмотке якоря имеется ЭДС E_a , образуемая на активном сопротивлении цепи якоря $R_{я}$ при протекании по нему тока $I_{я}$. Численно E_a равна падению напряжения на сопротивлении обмотки якоря $I_{я}R_{я}$.

Тогда

$$U = E_{дв} + I_{я}R_{я} \quad (3.14)$$

где $R_{я}$ - активное сопротивление всей цепи якоря, включающее сопротивления обмотки, щеток, переходного контакта между щеткой и коллектором, дополнительных полюсов, а также токопроводящих проводов.

Из векторной диаграммы (рис. 3.9, б) видно, что приложенное к двигателю напряжение уравнивается противоЭДС $E_{я}$ и ЭДС активного сопротивления E_a , причем противоЭДС $E_{дв} = E_{я} + E_a$ направлена против тока двигателя.

Из формулы (3.14) можно определить величину тока в якоре при работе электродвигателя

$$I_{я} = \frac{U - E_{дв}}{R_{я}} \quad (3.15)$$

Сопротивление цепи якоря очень мало, порядка десятых долей Ома.

При пуске двигателя в ход, когда якорь неподвижен, противоЭДС в якоре равна нулю. Поэтому ток в якоре в момент пуска достигает очень большой величины, определяемой по формуле (3.15),

$$I_{Я.пуск} = \frac{U - 0}{R_{Я}}$$

Для уменьшения тока в якоре при пуске в цепь его обмотки включают пусковой реостат (рис. 3.10).

Величину сопротивления пускового реостата можно определить по формуле

$$I_{Я} = \frac{U}{R_{Я} + R_{реост}}$$

откуда

$$R_{реост} = \frac{U - I_{Я}R_{Я}}{I_{Я}} \text{ (Ом)}. \quad (3.16)$$

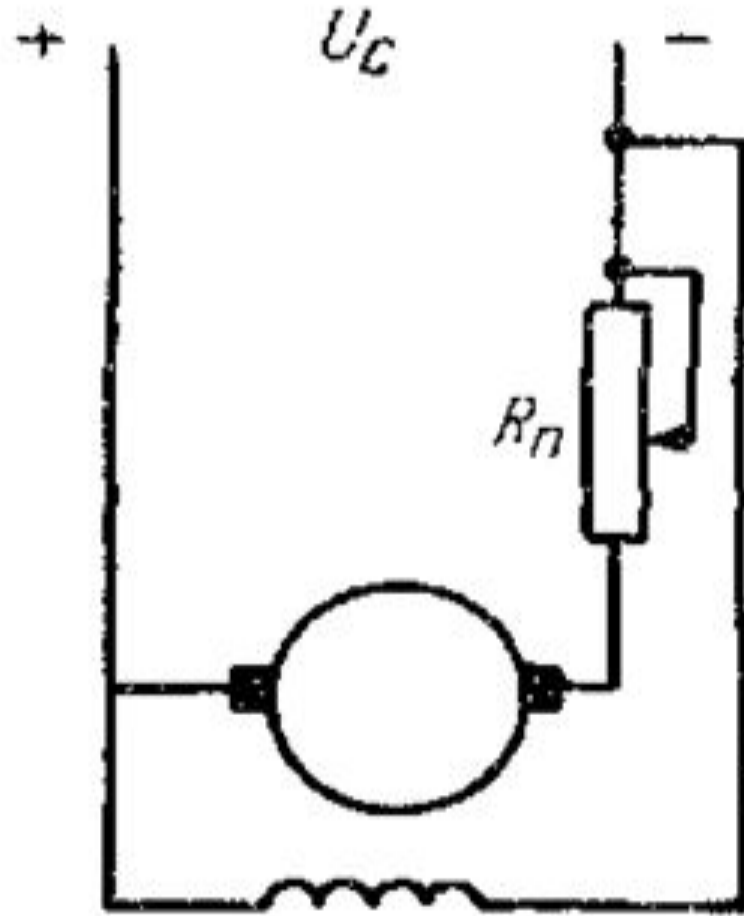


Рисунок 3.10 Включение пускового реостата в цепь обмотки якоря двигателя.

Двигатель параллельного возбуждения

У двигателя параллельного возбуждения, который часто называют шунтовым, обмотку возбуждения включают параллельно якорю. Для пуска двигателя в ход применяют трехзажимной пусковой реостат (рис.3.11). Напряжение сети подключают к двигателю рубильником. Один провод идет прямо к двигателю, а второй на зажим пускового реостата *L* (линия). Ток по металлической планке реостата проходит на металлическую дугообразную планку и через шунтовой реостат *Rш* на параллельную обмотку возбуждения. Это одна цепь тока.

Большая часть тока проходит по металлической рукоятке реостата на пусковое сопротивление ***R_n*** и в обмотку якоря. В начале пуска включены все элементы пускового сопротивления. По мере разгона двигателя рукоятку реостата поворачивают вниз, при этом пусковое сопротивление реостата уменьшают. При работе двигателя сопротивление ***R_n*** выведено. Зажимы реостата имеют следующие обозначения:

L — линия,

Я — якорь и ***Ш*** — шунт.

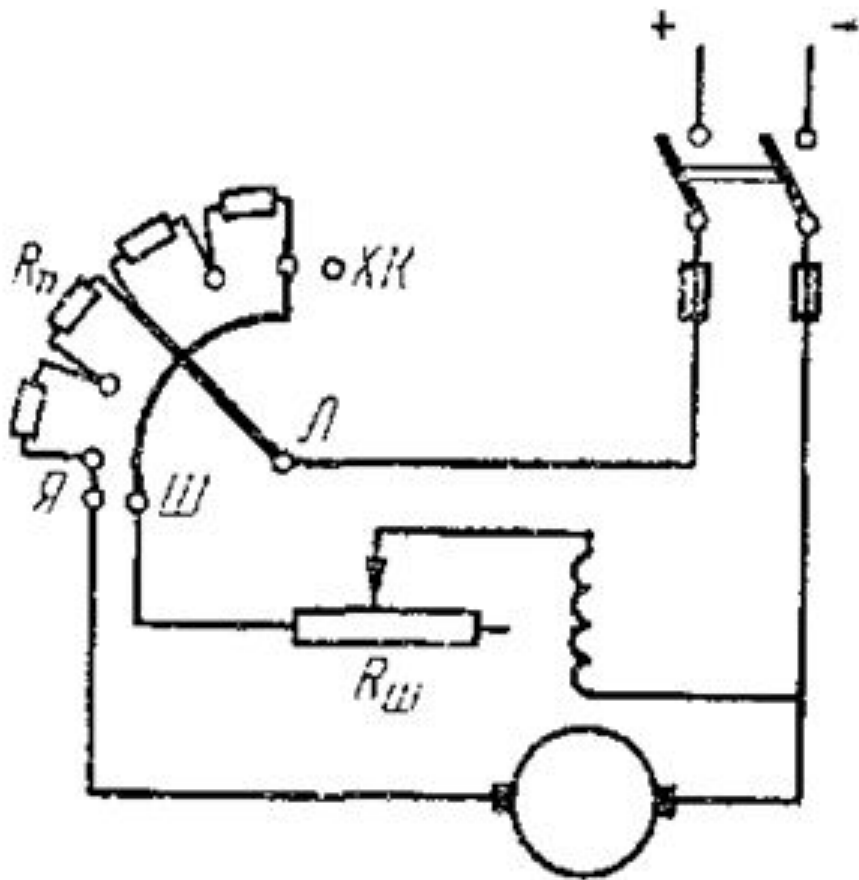


Рисунок 3.11 Схема двигателя параллельного возбуждения.

Так как вращающий момент двигателя $M = C_M I_a \Phi$, то для того, чтобы пусковой момент при пуске был наибольшим, нужно обеспечить получение максимального магнитного потока полюсов Φ . Поэтому пусковой реостат оборудован металлической дугообразной планкой, соединенной с обмоткой возбуждения. Благодаря этой планке, к обмотке возбуждения при пуске подводят полное напряжение сети, что обеспечивает достаточный для пуска ток возбуждения. Кроме того, при выведении рукоятки реостата на холостой контакт **XK** цепь возбуждения окажется замкнута на реостат и якорь, вследствие чего в обмотке не может индуцироваться большая ЭДС самоиндукции.

Из формулы ЭДС можно вывести формулу, определяющую обороты двигателя, т. е.

$$n = \frac{E_{\text{Я}}}{\Phi_{\text{E}}} = \frac{U - I_{\text{Я}}R_{\text{Я}}}{\Phi_{\text{E}}} \quad (\text{об/мин}). \quad (3.17)$$

Как видно из формулы, число оборотов двигателя прямо пропорционально напряжению U и обратно пропорционально величине магнитного потока Φ .

Почему же с увеличением магнитного потока число оборотов двигателя уменьшается и, наоборот, с уменьшением увеличивается? Дело в том, что величина тока якоря с ростом нагрузки должна увеличиваться, а со снижением уменьшаться, при постоянной же нагрузке ток якоря не будет изменяться.

Величина тока якоря при работе двигателя определяется уравнением

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{дв}}}{R_{\text{я}}}$$

Если напряжение сети не изменяется, то, так как $R_{\text{я}}$ величина постоянная, ток якоря будет зависеть от величины противоЭДС двигателя $E_{\text{дв}}$. С увеличением нагрузки противоЭДС двигателя уменьшается, а это вызовет увеличение тока якоря и соответственно увеличение вращающего момента двигателя.

При постоянной же нагрузке противоЭДС двигателя $E_{\text{дв}}$ должна оставаться постоянной по величине. Если же увеличить магнитный поток Φ , то, как видно из формулы $E = C_E n \Phi$, для сохранения постоянной величины противоЭДС E число оборотов двигателя n должно уменьшиться и, наоборот, с уменьшением Φ n должно увеличиться.

Чтобы изменить направление вращения якоря двигателя, необходимо изменить направление тока или только в якоре, или только в обмотке возбуждения (рис. 3.12).

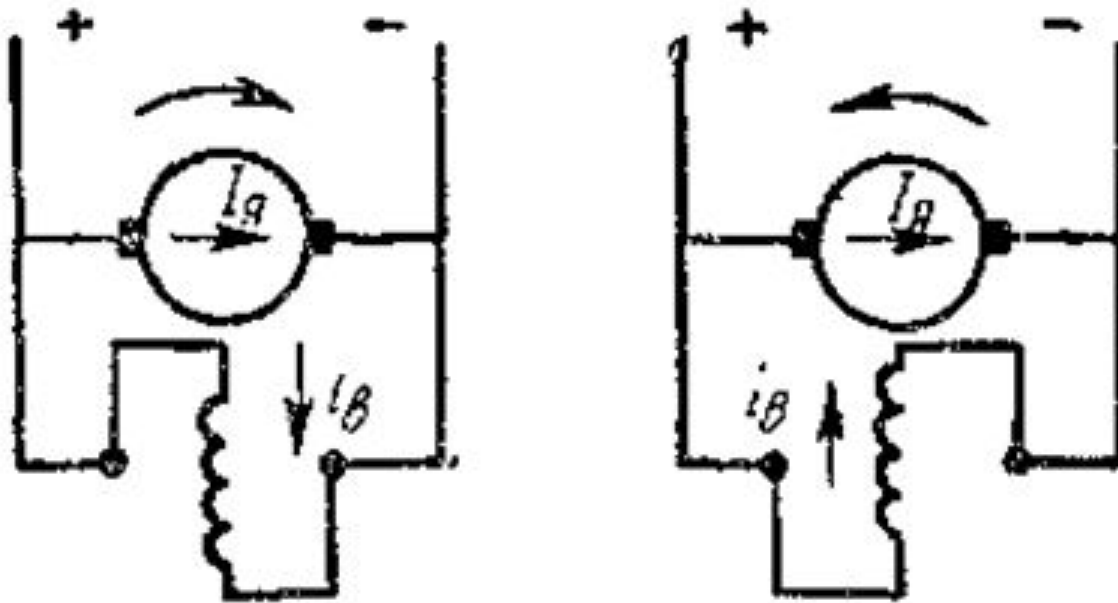


Рисунок 3.12 Изменение направления вращения двигателей.

Если изменить направление тока в обмотке возбуждения, то изменится полярность полюсов, а направление тока в якоре останется прежним. Применяв правило левой руки, можно убедиться, что направление вращения якоря двигателя изменится. То же будет при изменении направления тока в якоре. Если поменять полярность проводов на зажимах двигателя, то направление вращения якоря останется прежним.

Скорость в двигателях параллельного возбуждения регулируют изменением магнитного потока, для чего в цепь обмотки возбуждения включают регулировочный реостат *R_ш* (рис.3.11).

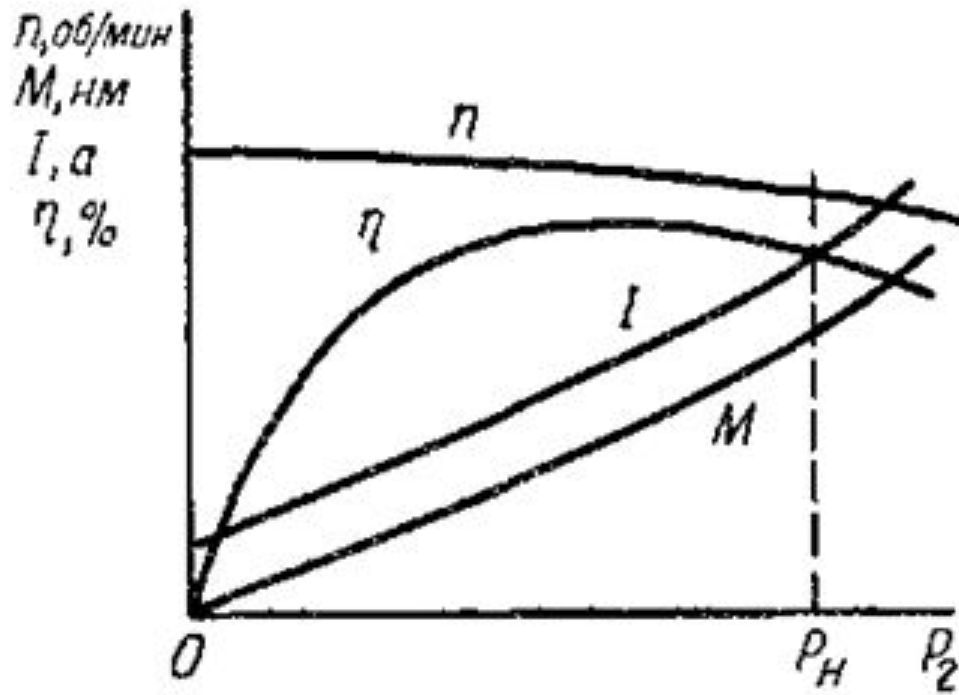


Рисунок 3.13 Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения.

Свойства двигателя определяют его рабочие характеристики.

Рабочими характеристиками называют зависимость скорости вращения n , величины тока I , вращающего момента M и коэффициента полезного действия η от мощности на валу двигателя P_2 при постоянных напряжении ($U = \text{const}$) и токе возбуждения ($i_B = \text{const}$) (рис. 3.13).

Обороты двигателя n с увеличением нагрузки изменяются незначительно. Уменьшение оборотов происходит вследствие увеличения падения напряжения в обмотке якоря $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$.

Ток двигателя с увеличением нагрузки возрастает, вращающий момент M также увеличивается почти прямо пропорционально нагрузке. Так как обороты двигателя n при увеличении нагрузки несколько снижаются, то кривая момента M слегка загибается вверх. Так как $P=M\omega$, то с уменьшением ω момент M должен увеличиваться. Коэффициент полезного действия η с увеличением нагрузки возрастает и достигает своего максимального значения примерно при $1/2$ номинальной мощности, затем остается почти постоянным, но при перегрузке двигателя уменьшается.

Двигатель последовательного возбуждения

У двигателей последовательного возбуждения, которые часто называются серийными, обмотки якоря и возбуждения соединены последовательно (рис. 3.14, а).

При малом насыщении стали магнитопровода двигателя магнитный поток полюсов пропорционален току якоря

$$\Phi \equiv I_{\text{я}}.$$

Но так как вращающий момент двигателя $M = C_M \Phi I_{\text{я}}$, то можно считать, что вращающий момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока якоря

$$M \equiv I_{\text{я}}^2.$$

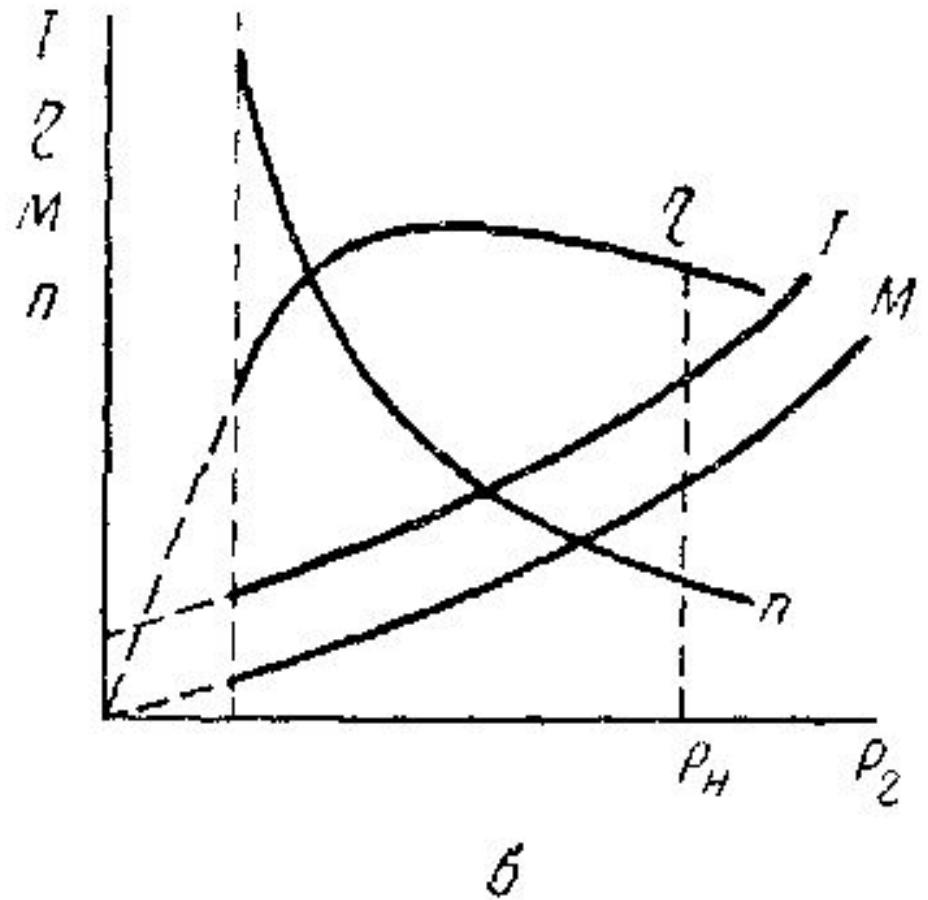
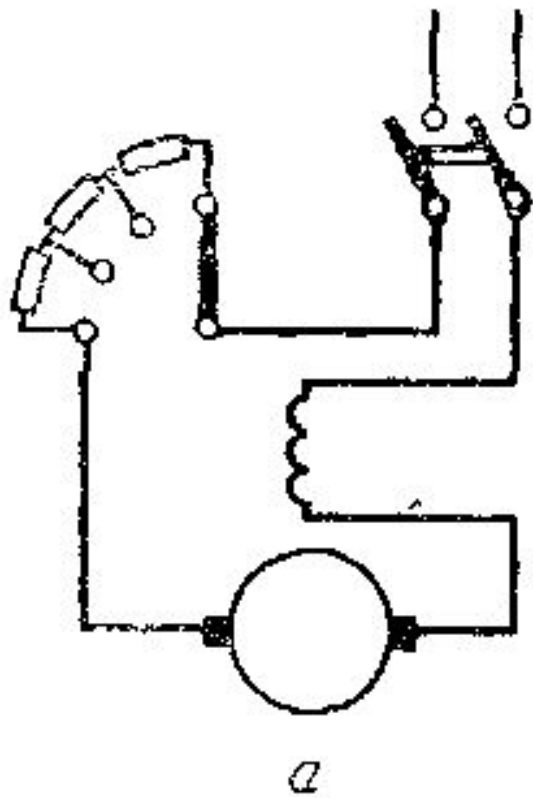


Рисунок 3.14 Двигатель последовательного возбуждения:
 а — схема, б — рабочие характеристики

Рабочие характеристики двигателя представлены на рисунке 3.14,б. Так как зависимость вращающего момента от тока квадратичная, то кривая момента имеет вид параболы в начальной части, в пределах насыщения стали двигателя. При достижении насыщения вращающий момент изменяется почти пропорционально току, как и у двигателя параллельного возбуждения.

Формула оборотов двигателя последовательного возбуждения имеет следующий вид:

$$n = \frac{U - I_{\text{Я}}(R_{\text{Я}} + R_{\text{С}})}{\Phi_{\text{Е}}} \quad (\text{об/мин}). \quad (3.18)$$

Она отличается от формулы (3.17) оборотов двигателя параллельного возбуждения тем, что в ней учитывается также падение напряжения на обмотке последовательного возбуждения $I_{\text{я}}R_{\text{с}}$.

Так как при увеличении нагрузки магнитный поток Φ сильно возрастает, то обороты двигателя с увеличением нагрузки резко снижаются.

Скорость двигателя последовательного возбуждения регулируют несколькими способами.

Как видно из формулы оборотов (3.18), скорость двигателя можно регулировать изменением подводимого напряжения, для этого вместо пускового реостата ставят регулировочный, так как пусковой реостат рассчитан на кратковременное прохождение по нему тока (рис. 3.15, а).

Более экономичным способом регулирования скорости является изменение магнитного потока Φ . Для этого регулировочным реостатом шунтируют обмотку возбуждения (рис. 3.15, б) или обмотку якоря (рис. 3.15, в).

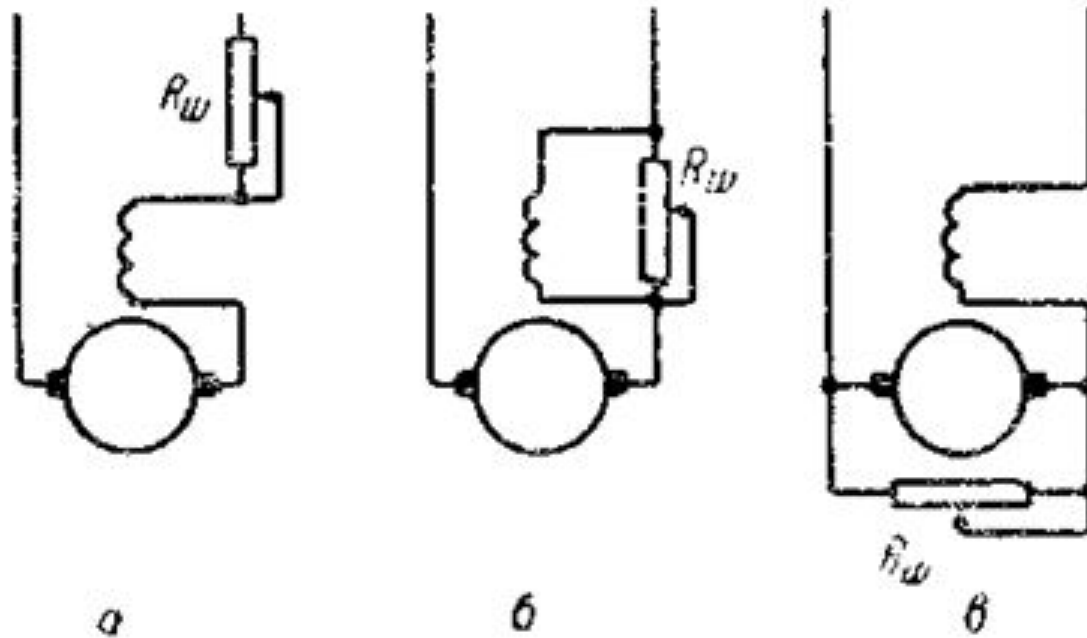


Рисунок 3.15 Регулирование скорости двигателей последовательного возбуждения: а — изменением подводимого напряжения, б — шунтированием обмотки возбуждения, в — шунтированием обмотки якоря

Двигатель смешанного возбуждения

Двигатели смешанного возбуждения, которые часто называют компаундными, имеют две обмотки возбуждения, и поэтому им присущи свойства двигателей с параллельным и с последовательным возбуждением, т. е. они обладают и постоянством оборотов и большим вращающим моментом (рис. 3.16).

Благодаря наличию обмотки параллельного возбуждения двигатель со смешанным возбуждением не может пойти в «разнос».

Число оборотов двигателя смешанного возбуждения определяют по формуле

$$n = \frac{U - I_{\text{Я}}(R_{\text{Я}} + R_{\text{С}})}{\Phi_{\text{Е}}(\Phi_{\text{Ш}} \pm \Phi_{\text{С}})} \quad (\text{об/мин}). \quad (3.19)$$

где $\Phi_{\text{Ш}}$ — магнитный поток обмотки параллельного возбуждения (Вб); $\Phi_{\text{С}}$ — магнитный поток обмотки последовательного возбуждения.

Знак **плюс** в формуле соответствует согласному включению обмоток, когда магнитные потоки обмоток складываются.

Так в подавляющем большинстве двигателей включены обмотки возбуждения. В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток возрастает, так как растет поток Φ_c , а обороты двигателя уменьшаются.

Знак **минус** соответствует встречному включению обмотки, когда магнитные потоки обмоток вычитаются.

В двигателях нормального исполнения встречное включение обмоток приводит к значительному уменьшению вращающего момента вследствие снижения общего магнитного потока, а при небольшой нагрузке — к резкому увеличению скорости двигателя, т. е. к неустойчивой его работе.

Встречное включение обмоток применяют в том случае, когда хотят получить постоянное число оборотов двигателя при изменении нагрузки. Для этого на сердечники полюсов наматывают небольшое число витков обмотки последовательного возбуждения с таким расчетом, чтобы с увеличением нагрузки и уменьшением общего магнитного потока обороты двигателя оставались постоянными.

Из рабочих характеристик рассмотрим только зависимость оборотов двигателя от нагрузки (рис. 3.16, б), она называется скоростной характеристикой.

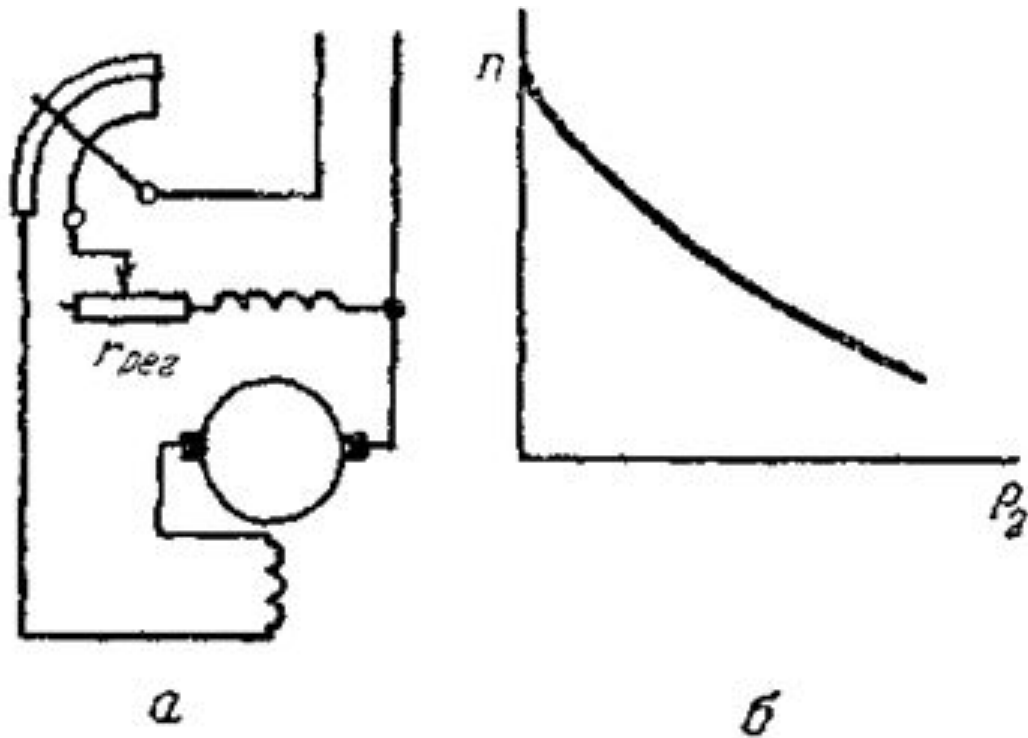


Рисунок 3.16 Двигатель смешанного возбуждения:
 a — схема, b — скоростная характеристика

Скоростная характеристика имеет промежуточное значение между соответствующими кривыми двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

Скорость двигателей смешанного возбуждения регулируют регулировочным реостатом $r_{\text{рег}}$ в цепи обмотки параллельного возбуждения.

Двигатели смешанного возбуждения применяют в качестве тяговых и крановых двигателей.

3.3 Характеристики трехфазных АД

Для вывода уравнения механической характеристики асинхронного двигателя можно воспользоваться упрощенной схемой замещения, приведенной на рис. 3.17, где:

$U_{\text{ф}}$ - первичное фазное напряжение; I_1 - фазный ток статора; I_2 - приведенный ток ротора; X_1 и X'_2 - первичное и вторичное приведенные реактивные сопротивления рассеяния; R_0 и X_0 — активное и реактивное сопротивления контура намагничивания; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ - скольжение двигателя; $\omega_0 = 2\pi n_0 / 60$ - синхронная угловая скорость двигателя;

$\omega_0 = 2\pi f_1 / p$; R_1 и R'_2 - первичное и вторичное приведенные активные сопротивления; f_1 - частота сети; p - число пар полюсов.

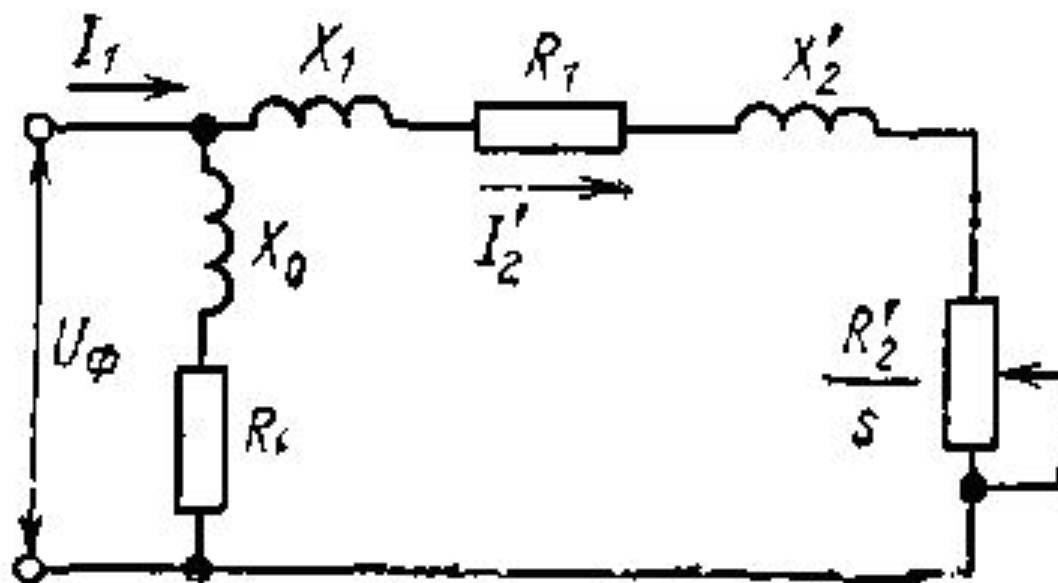


Рисунок 3.17 Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя.

В соответствии с приведенной схемой замещения можно получить выражение для вторичного тока

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (3.20)$$

Момент асинхронного двигателя может быть определен из выражения потерь $M\omega_0 s = 3(I'_2)^2 R'_2$, откуда

$$M = 3(I'_2)^2 R'_2 / \omega_0 s. \quad (3.21)$$

Подставляя значение тока I'_2 в (3.21), получаем:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 \left[(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] s} \quad (3.22)$$

Кривая момента $M=f(s)$ имеет два максимума: один — в генераторном режиме, другой — в двигательном.

Приравнивая $dM/ds=0$, определяем значение критического скольжения s_k , при котором двигатель развивает максимальный (критический) момент

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (3.23)$$

Подставляя значение s_k в (3.22), находим выражение для максимального момента

$$M_K = \frac{3U^2_{\Phi}}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]} \quad (3.24)$$

Знак «+» в равенствах (3.23) и (3.24) относится к двигательному режиму (или торможению противовключением), знак «—» — к генераторному режиму работы параллельно с сетью (при $\omega > \omega_0$).

Если выражение (3.22) разделить на (3.24) и произвести соответствующие преобразования, то можно получить:

$$M = \frac{3M_K(1 + as_K)}{s/s_K + s_K/s + 2as_K} \quad (3.25)$$

где M_K — максимальный момент двигателя; s_K — критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту; $a = R_1/R_2$.

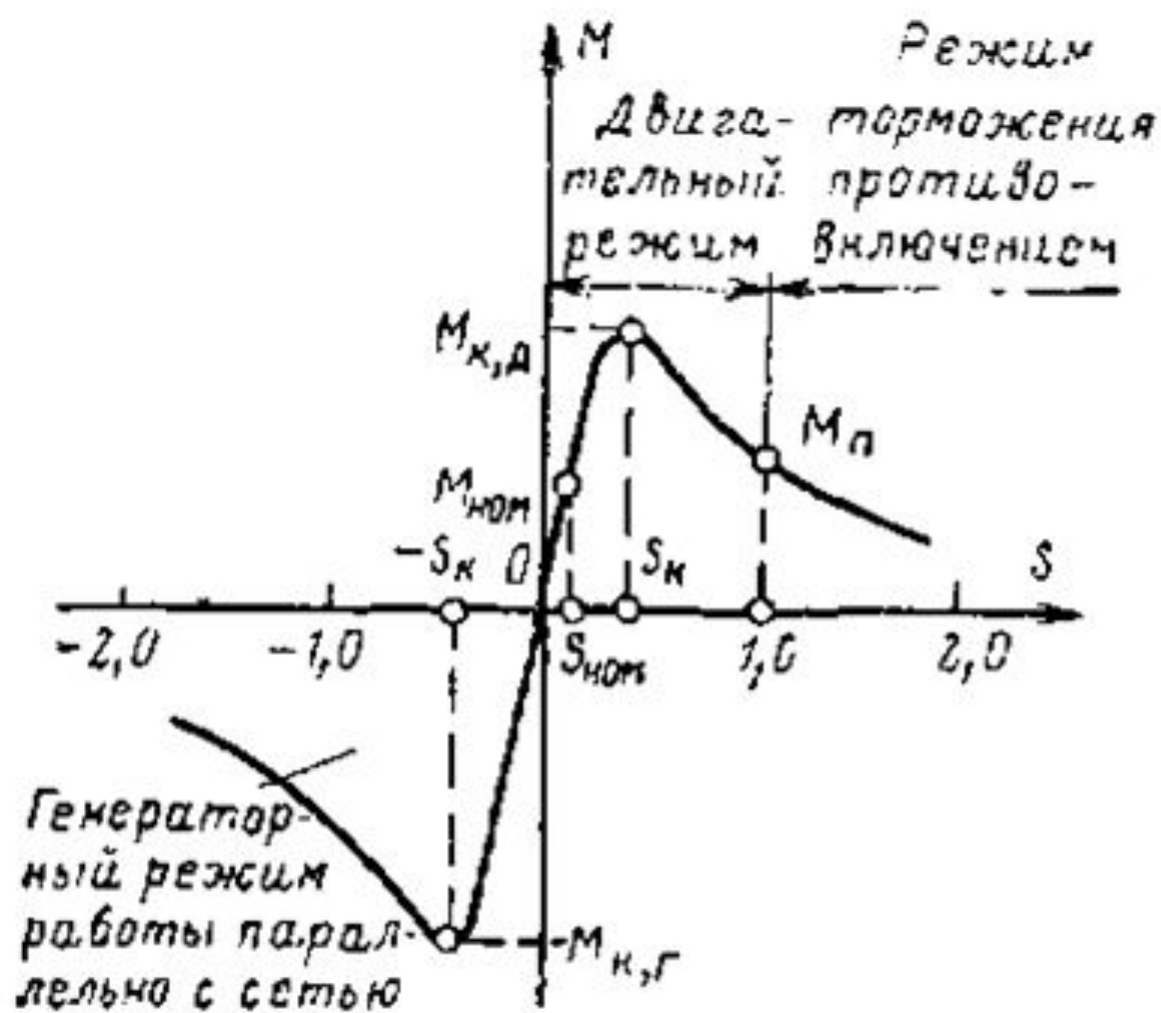


Рисунок 3.18 Механические характеристики асинхронного двигателя.

На рис. 3.18 приведена механическая характеристика асинхронного двигателя. Ее характерные точки:

- 1) $s = 0$; $M = 0$, при этом скорость двигателя равна синхронной;
- 2) $s = s_{H0M}$; $M = M_{H0M}$, что соответствует номинальной скорости и номинальному моменту;
- 3) $s = s_K$; $M = M_{к.д}$ — максимальный момент в двигательном режиме;
- 4) $s = 1,0$; $M = M_H = \frac{2M_K(1+as_K)s_K}{1+s_K^2(1+2a)}$ — начальный пусковой момент;
- 5) $s = -s_K$; $M = -M_{кг}$ — максимальный момент в генераторном режиме работы параллельно с сетью.

При $s > 1,0$ двигатель работает в режиме торможения противовключением, при $s < 0$ имеет место генераторный режим работы параллельно с сетью.

Необходимо подчеркнуть, что абсолютные значения s_K в двигательном и генераторном параллельно с сетью режимах одинаковы.

В генераторном режиме работы параллельно с сетью максимальный момент по абсолютному значению больше, что следует из соотношения

$$M_{KT} = M_{K.д} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_K^2}}$$

где

$$X_K = X_1 + X_2.$$

Если в уравнении (3.25) пренебречь активным сопротивлением статора, то получится формула, более удобная для расчетов:

$$M = \frac{2M_K}{s/s_K + s_K/s} \quad (3.26)$$

здесь $s_K = \pm R'_2/X_K$; $M_K = 3U^2\phi/2\omega_0 X_K$.

Подставив в выражение (3.26) вместо текущих значений M и s их номинальные значения и обозначив кратность максимального момента $M_k/M_{ном}$ через λ , получим:

$$s_K = s_{ном} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

В последнем выражении перед корнем следует брать знак «+».

Анализ формулы (3.26) показывает, что при $s > s_K$ (нерабочая часть характеристики) получится уравнение гиперболы, если в этом случае пренебречь вторым членом знаменателя в уравнении (3.26), т.е.

$$M = 2M_K \frac{s_K}{s}$$

или

$$M = A/s,$$

где

$$A = 2M_K s_K.$$

Эта часть характеристики практически соответствует лишь пусковым и тормозным режимам.

При малых значениях скольжения ($s < s_K$) для $M=f(s)$ получится уравнение прямой, если пренебречь первым членом в знаменателе (3.26):

$$M = 2M_K \frac{s}{s_K}$$

или

$$M = Bs;$$

здесь

$$B = 2M_K/s_K.$$

Эта линейная часть характеристики является ее рабочей частью, на которой двигатель обычно работает в установившемся режиме. На этой же части характеристики находятся точки, соответствующие номинальным данным двигателя:

$M_{\text{ном}}, I_{\text{ном}}, n_{\text{ном}}, s_{\text{ном}}$

Статическое падение (перепад) скорости в относительных единицах на естественной механической характеристике асинхронного двигателя при номинальном моменте определяется его номинальным скольжением.

Номинальное скольжение зависит от сопротивления ротора. Наименьшим номинальным скольжением при одинаковой мощности и числе полюсов обладают обычно двигатели с короткозамкнутым ротором нормального исполнения.

Значение сопротивления R_2 , необходимое для построения естественной и реостатных характеристик двигателя с фазным ротором, определяется из выражения

$$R_2 = s_{НОМ} E_{2К} / \sqrt{3} I_{2НОМ}$$

где $E_{2К}$ — линейное напряжение при

неподвижном роторе и номинальный ток ротора.

На рис. 3.20 приведено семейство реостатных характеристик в двигательном режиме в координатных осях M и ω для различных значений сопротивлений роторной цепи. С известным приближением реостатные характеристики в рабочей их части могут быть приняты линейными.

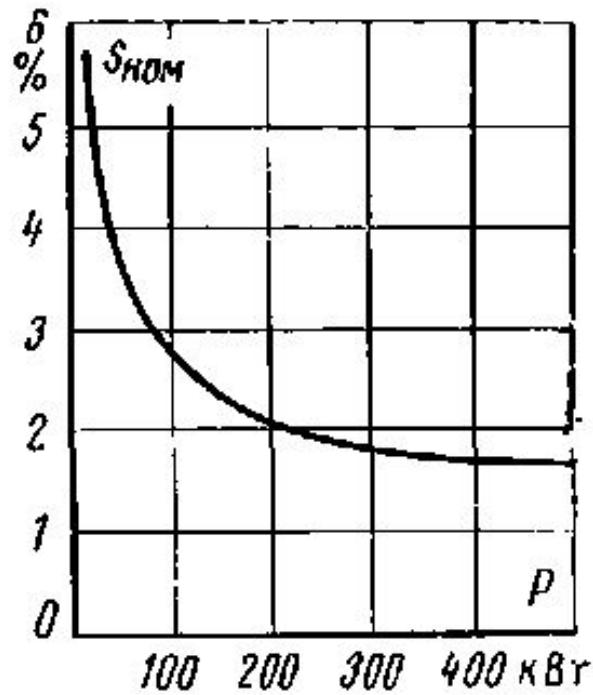


Рисунок 3.19 Кривая номинального скольжения для асинхронных двигателей разной мощности.

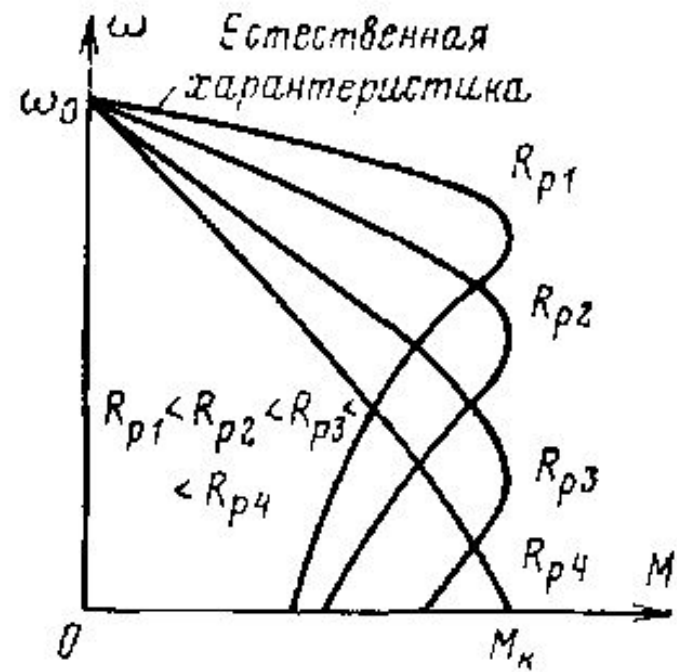


Рисунок 3.20 Естественная и реостатные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

Более точным является метод, когда спрямление характеристик производится на меньшем участке. Кратность максимального момента $\lambda = M_{\text{к,д}} / M_{\text{н0м}}$, должна быть у двигателей нормального исполнения с фазным ротором не ниже 1,8, а у двигателей с короткозамкнутым ротором не ниже 1,7. Крановые двигатели отличаются более высокой кратностью максимального момента.

Для двигателей с короткозамкнутым ротором существенное значение с точки зрения электропривода имеют кратности начального пускового момента и начального пускового тока.

На рис. 3.21 представлены примерные естественные характеристики двигателя с нормальным короткозамкнутым ротором, имеющим круглые пазы. Эти характеристики показывают, что двигатель с короткозамкнутым ротором, потребляя из сети весьма большой ток, имеет сравнительно низкий начальный пусковой момент. Кратность начального пускового момента двигателей

$$k_{\Pi} = M_{\Pi} / M_{H0M} = 1 \div 1,8,$$

а для крановых двигателей

$$k_{\Pi} \geq 1,7.$$

Кратность пускового тока

$$K_I = I_{\Pi} / I_{H0M} = 5 \div 7.$$

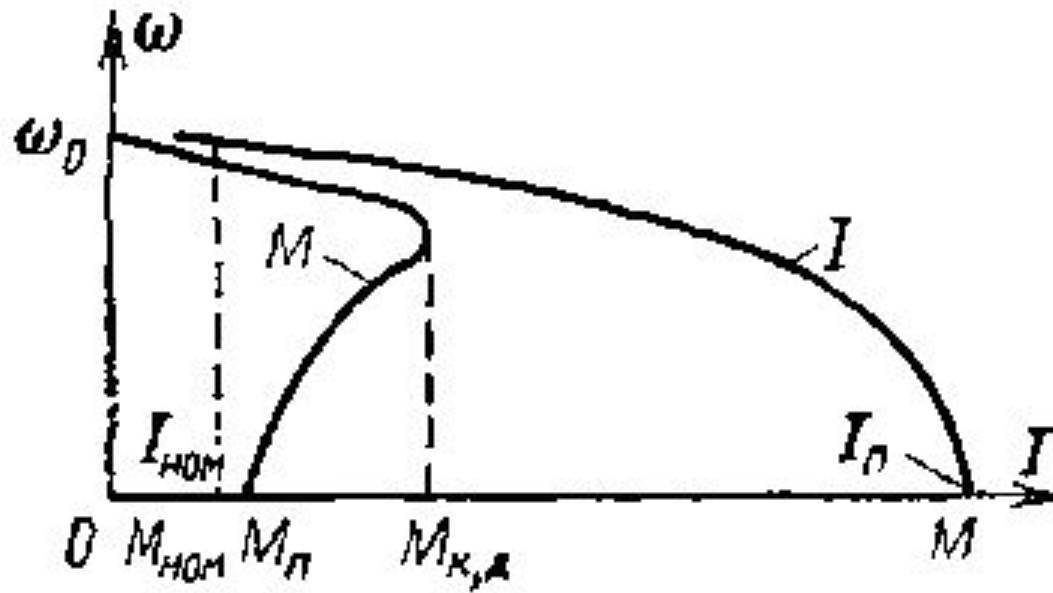


Рисунок 3.21 Характеристики $\omega=f(M)$ и $\omega= f_1(I)$ для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с круглыми пазами.

Отсутствие пропорциональности между моментом двигателя и током статора во время пуска (рис. 3.21) объясняется значительным снижением магнитного потока двигателя, а также уменьшением коэффициента мощности вторичной цепи при пуске.

Момент асинхронного двигателя, как и любой электрической машины, пропорционален магнитному потоку Φ и активной составляющей вторичного тока

$$M = k' \Phi I'_2 \cos \psi_2, \quad (3.27)$$

где k' — конструктивная постоянная асинхронного двигателя; ψ — угол сдвига между ЭДС и током ротора;

$$\cos \psi_2 = \frac{R'_2}{\sqrt{(R'_2)^2 + (X'_2)^2 s^2}} \quad (3.28)$$

При увеличении скольжения растет ЭДС ротора $E_2 = I_{2k} s$, возрастает ток ротора I'_2 в соответствии с (3.20), асимптотически стремясь к некоторому предельному значению, а $\cos\psi_2$ с ростом s уменьшается (на рабочем участке характеристики очень мало), асимптотически стремясь к нулю при

$s \rightarrow \infty$. Поток двигателя также не остается неизменным, уменьшаясь при возрастании тока из-за падения напряжения на сопротивлениях обмотки статора. Все это и обуславливает отсутствие пропорциональности между током и моментом двигателя.

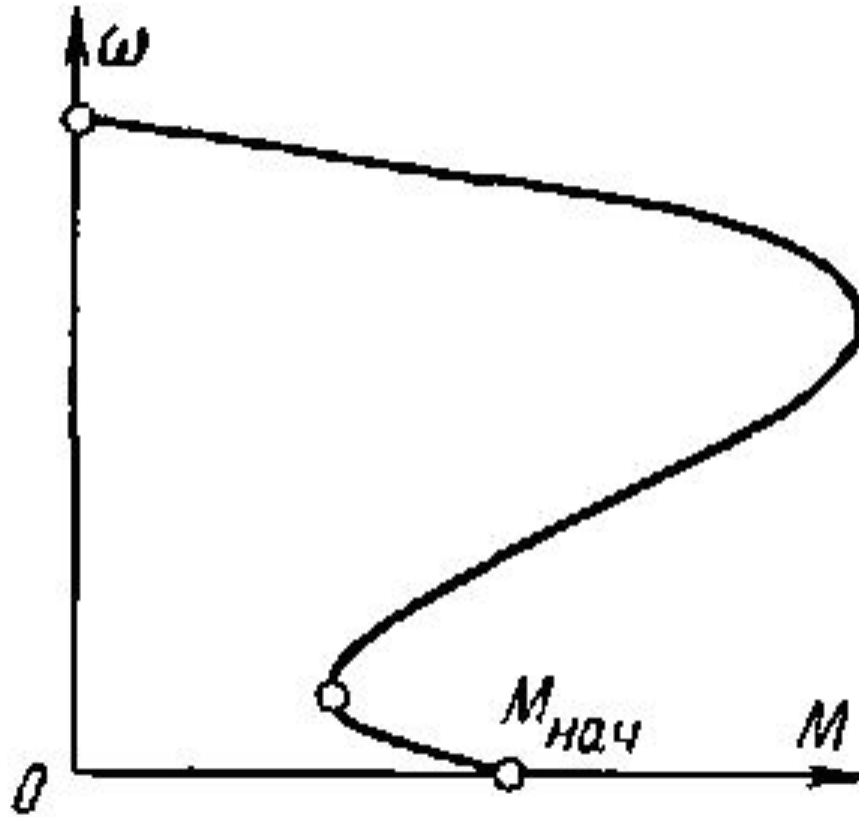


Рисунок 3.22 Механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с провалом при малых угловых скоростях.

Необходимо отметить, что у двигателей с короткозамкнутым ротором пусковой момент практически не всегда является наименьшим значением момента в области двигательного режима. Как видно из рис. 3.22, механическая характеристика двигателя с короткозамкнутым ротором иногда при малых угловых скоростях имеет провал, вызванный влиянием высших гармоник зубцовых полей. Это обстоятельство следует учитывать при пуске двигателя под нагрузкой.

У двигателей с фазным ротором начальный пусковой момент увеличивается по мере возрастания до известных пределов сопротивления резистора (рис. 3.20), а пусковой ток при увеличении сопротивления уменьшается. Начальный пусковой момент может быть доведен до максимального момента. С дальнейшим ростом сопротивления роторной цепи увеличение $\cos\psi_2$ уже не компенсирует уменьшения тока ротора и пусковой момент уменьшается.

3.4 Трехфазный АД в 1 фазном режим

Если на статоре асинхронного двигателя выполнить одну фазу обмотки, то при протекании по ней однофазного тока будет создаваться пульсирующее магнитное поле.

Переменное пульсирующее поле Φ может быть заменено двумя, вращающимися в разные стороны, со скоростью $n = \pm \frac{60 f_1}{p}$, величины которых равны половине амплитуды пульсирующего поля

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi_M}{2}$$

Такая замена возможна, так как эти два поля Φ_1 и Φ_2 , вращающиеся в разные стороны, создают эквивалентное пульсирующее поле Φ (рис. 3.23).

Вращающиеся поля будут индуцировать в неподвижной обмотке ротора одинаковые по величине, но противоположные по знаку ЭДС и токи, в результате чего к ротору будет приложено два одинаковых по величине, но противоположных по знаку вращающих момента. Поэтому начальный вращающий момент будет отсутствовать, и двигатель не сможет развернуться.

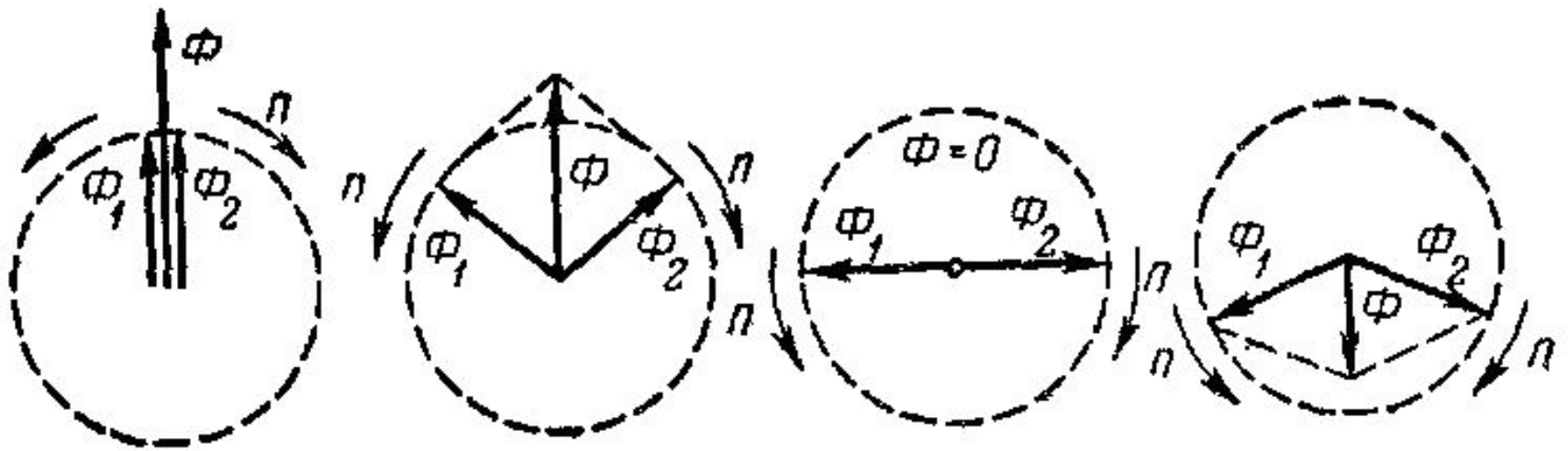


Рисунок 3.23 Разложение пульсирующего поля на два вращающихся.

Если же посторонней силой раскрутить ротор двигателя, то он будет вращаться и может быть нагружен.

При обрыве фазы на ходу у трехфазного асинхронного двигателя он будет продолжать вращаться и развивать около $1/2$ — $2/3$ своей номинальной мощности. Пустить же такой двигатель в ход можно лишь в том случае, если раскрутить его посторонним усилием.

Поле, вращающееся в ту же сторону, что и ротор, называют **прямым полем**, а в сторону, противоположную вращению ротора, — **обратным**.

Скорость прямого поля Φ_1 относительно ротора равна разности скоростей ноля и ротора

$$n_1 - n_2 = n_1 - n_1(1-s) = n_1s. \quad (3.29)$$

Прямое поле индуцирует в роторе ток частотой $f_2 = sf_1$, т. е. примерно 2-5 Гц.

Скорость обратного поля Φ_2 относительно ротора равна сумме скоростей поля и ротора

$$n_1 + n_2 = n_1 + n_1(1-s) = n_1(2-s). \quad (3.30)$$

Обратное поле индуцирует в роторе токи частотой $f_2 = f_1(2 - s)$, т.е. примерно 95-98 Гц.

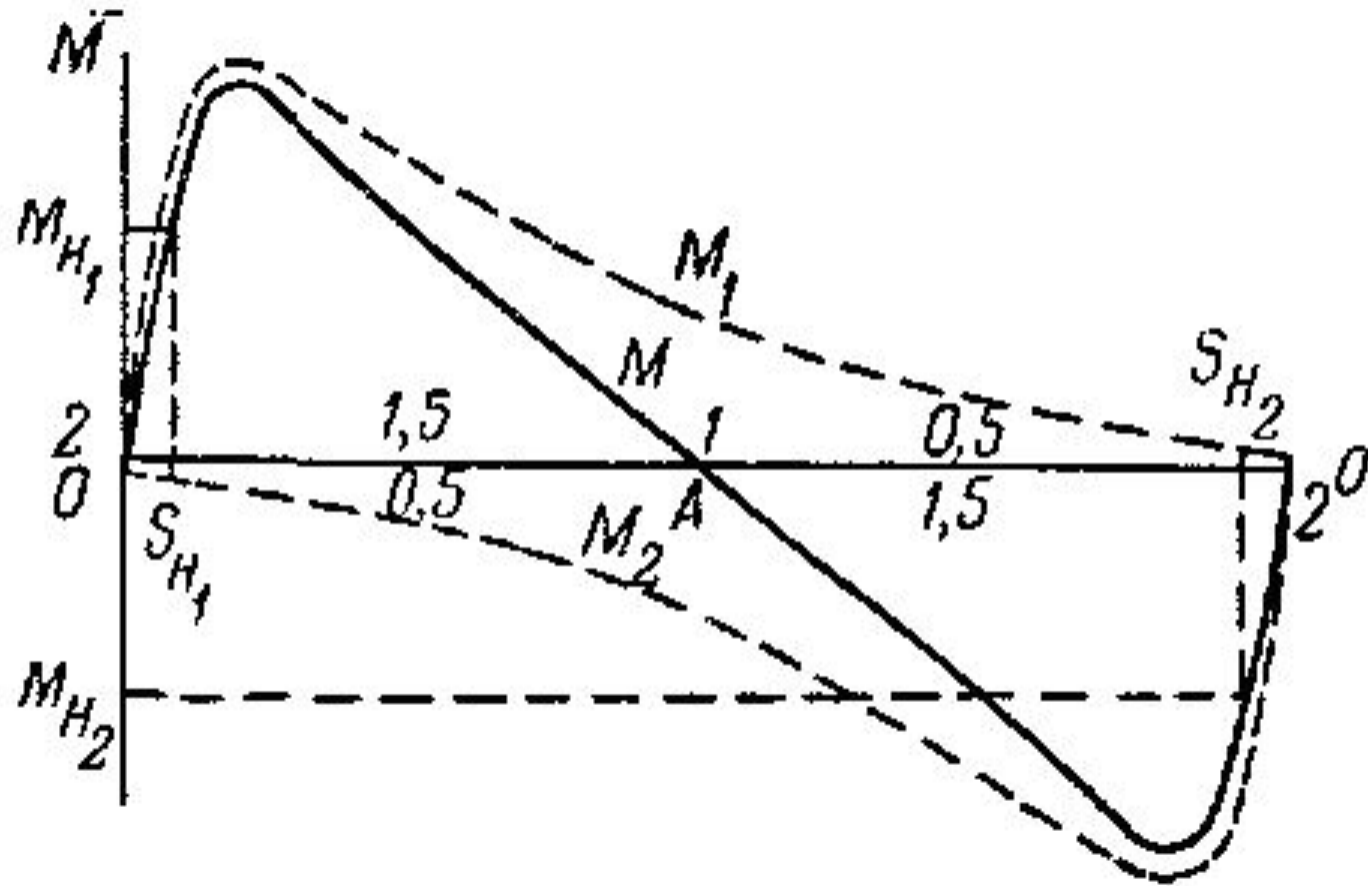


Рисунок 3.24 Кривые вращающих моментов однофазного двигателя в зависимости от скольжения.

Ток, индуцируемый прямым полем, взаимодействуя с ним, создает большой вращающий момент, так как активная составляющая этого тока вследствие малой частоты будет значительной.

Ток, индуцируемый обратным полем, при взаимодействии с ним создаст небольшой вращающий момент, вследствие того, что частота этого тока большая, а активная составляющая тока незначительная.

Отсутствие пускового момента является существенным недостатком АД в однофазном режиме, из нее вытекает проблема непосредственного пуска АД в однофазном режиме, решение которой и рассматривается ниже.

Поскольку обратный момент носит тормозной характер по отношению к прямому, то это приводит к ухудшению характеристик двигателя: его скольжение возрастает, т. е. скорость вращения АД в этом режиме при одинаковой нагрузке на валу меньше, чем скорость такого же АД в трехфазном режиме. АД в однофазном режиме имеет меньшие КПД и коэффициент мощности по сравнению с таким же АД в трехфазном режиме. Уменьшение КПД связано с возрастанием потерь, обусловленных появлением обратного поля.

Отмеченные выше недостатки трехфазного АД в однофазном режиме в известной мере преодолеваются путем создания в его воздушном зазоре эллиптического или кругового вращающегося магнитного поля при помощи пассивных элементов: резистора, катушки индуктивности, либо конденсатора.

Условием получения кругового вращающегося поля при двух статорных обмотках должно быть равенство по величине их магнитодвижущих сил (МДС), сдвинутых в пространстве и во времени на 90 электрических градусов.

Как уже отмечалось, для получения кругового или близкого к круговому эллиптического поля двигателя применяют фазосдвигающие устройства: резисторы, катушки индуктивности или конденсаторы.

Схемы пуска АД в однофазном режиме с пульсирующим полем

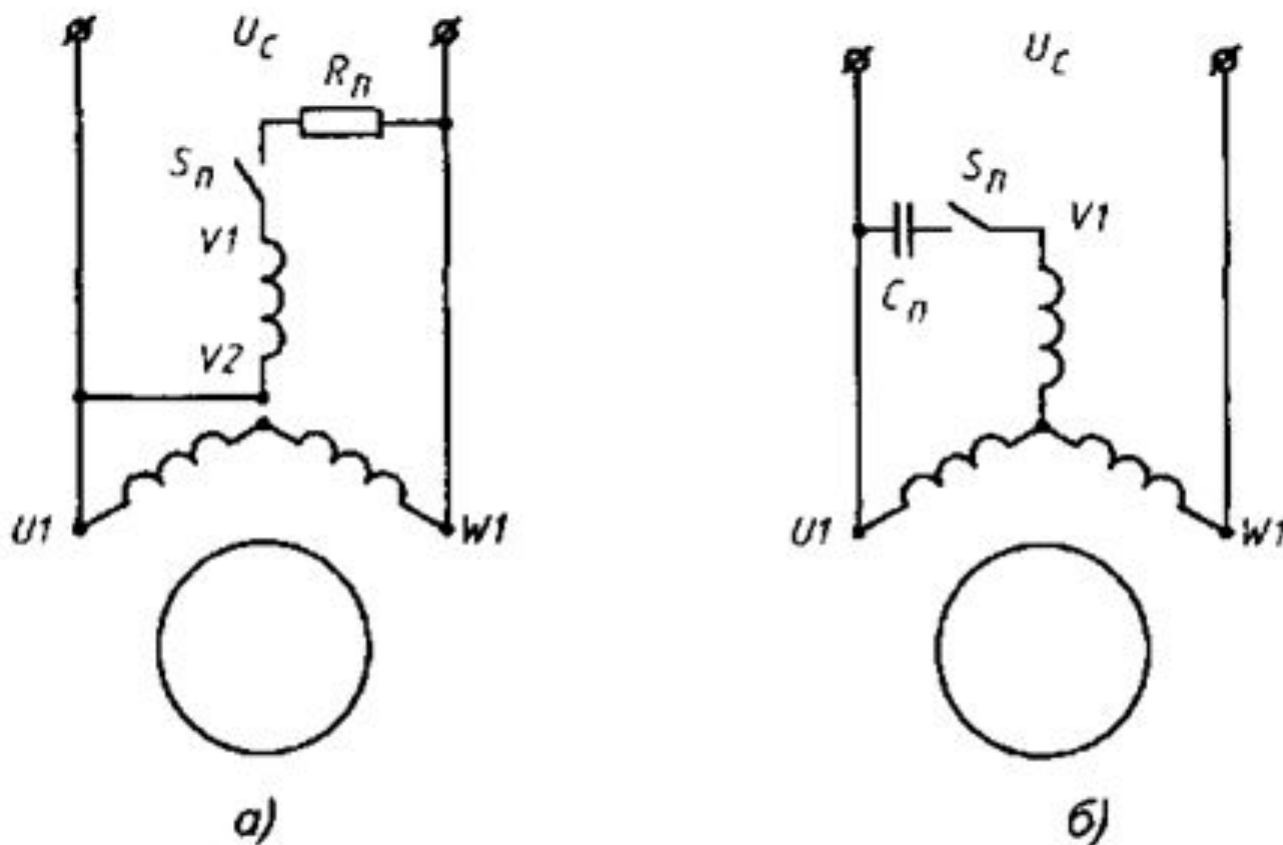
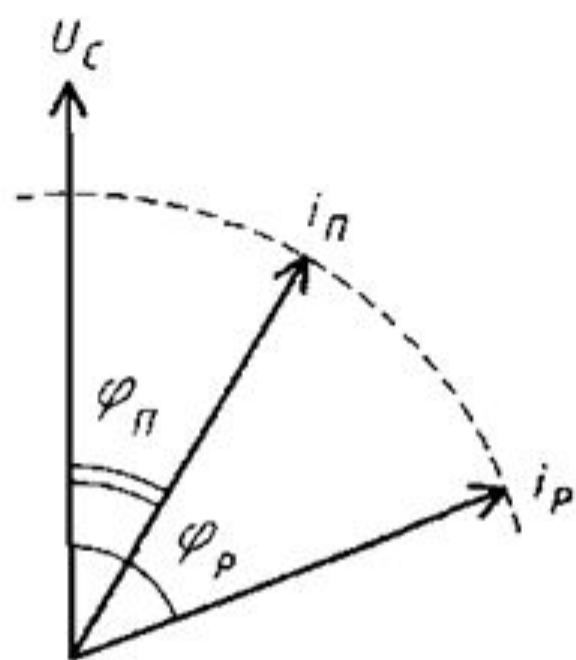
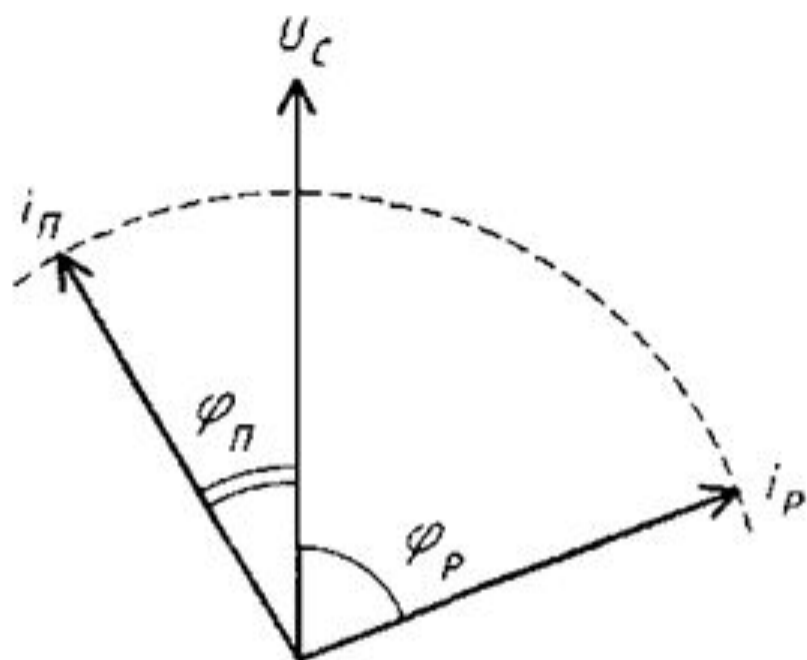


Рисунок 3.25 Схемы включения АД с пусковыми элементами: а — с резистором R_n ; б — с конденсатором C_n



a)



b)

Рисунок 3.26 Векторные диаграммы напряжения сети и токов пусковой и рабочей обмоток

Включение резистора приводит к сдвигу вектора тока пусковой обмотки по отношению к вектору тока рабочей обмотки на угол Ψ_R :

$$\Psi_R = \varphi_P - \varphi_{II}$$

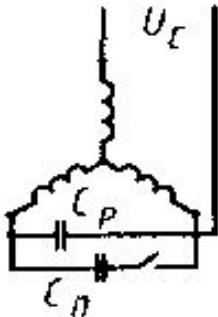
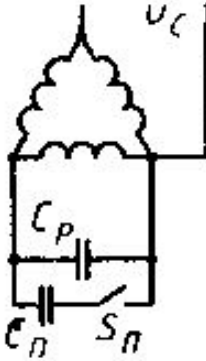
При включении конденсатора последний может в зависимости от величины его емкости компенсировать:

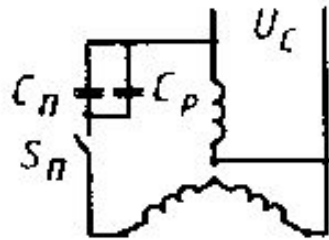
- 1) часть реактивной мощности пусковой обмотки;
- 2) полностью компенсировать требующуюся для создания поля реактивную мощность;

3) перекомпенсировать реактивную мощность, т. е. двигатель с таким конденсатором не только покрывает свои потребности в реактивной мощности, но отдает ее избыток в сеть и является источником реактивной мощности; на практике третий случай не используется, поскольку связан с большими токами.

Приведем сводную таблицу схем соединения фазных обмоток конденсаторного АД, включения рабочего и пускового конденсаторов и приближенных расчетных формул рабочей и пусковой емкости, а также наибольших действующих значений напряжений на конденсаторе.

Таблица 3.1 Схемы соединения и расчетные формулы конденсаторного АД

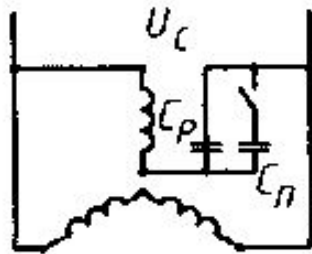
Схема соединения обмоток АД	Рабочая и пусковая емкости, мкФ	Наибольшее напряжение на конденсаторе
	$C_{PY} \approx 2780(I_H / U_H).$ $C_{П} \approx (2,5...3)C_{P\Delta}.$	$U_K \approx 1,15U_H.$
	$C_{P\Delta} \approx 4800(I_H / U_H).$ $C_{П} \approx (2,5...3)C_{PY}.$	$U_K \approx 1,15U_H.$



$$C_{PY} \approx 1600(I_H / U_H).$$

$$C_{\Pi} \approx (2,5 \dots 3) C_{PY}.$$

$$U_K \approx 2,2 U_H.$$



$$C_{PY} \approx 2780(I_H / U_H).$$

$$C_{\Pi} \approx (2,5 \dots 3) C_{PY}.$$

$$U_K \approx 2,2 U_H.$$

Особенности работы и эффективное использование конденсаторного АД

Зависимость величины емкости рабочего конденсатора от нагрузки на валу двигателя является линейной. Она представлена на рис. 3.33. Эта зависимость позволяет легко определить значение рабочей емкости конденсаторов для произвольной нагрузки при известной номинальной. Для этого по заданному относительному значению нагрузки двигателя P/P_n находят соответствующую относительную величину емкости C_p/C_{pH} , а по ней — искомое значение емкости.

Например, для $P=0,2P_H$ отношение CP/CPH — 0,75. Это означает, что при такой длительной нагрузке величина рабочей емкости должна быть снижена на 25%. Для этой цели в некоторых случаях применяют системы автоматического регулирования емкости конденсатора в функции от нагрузки.

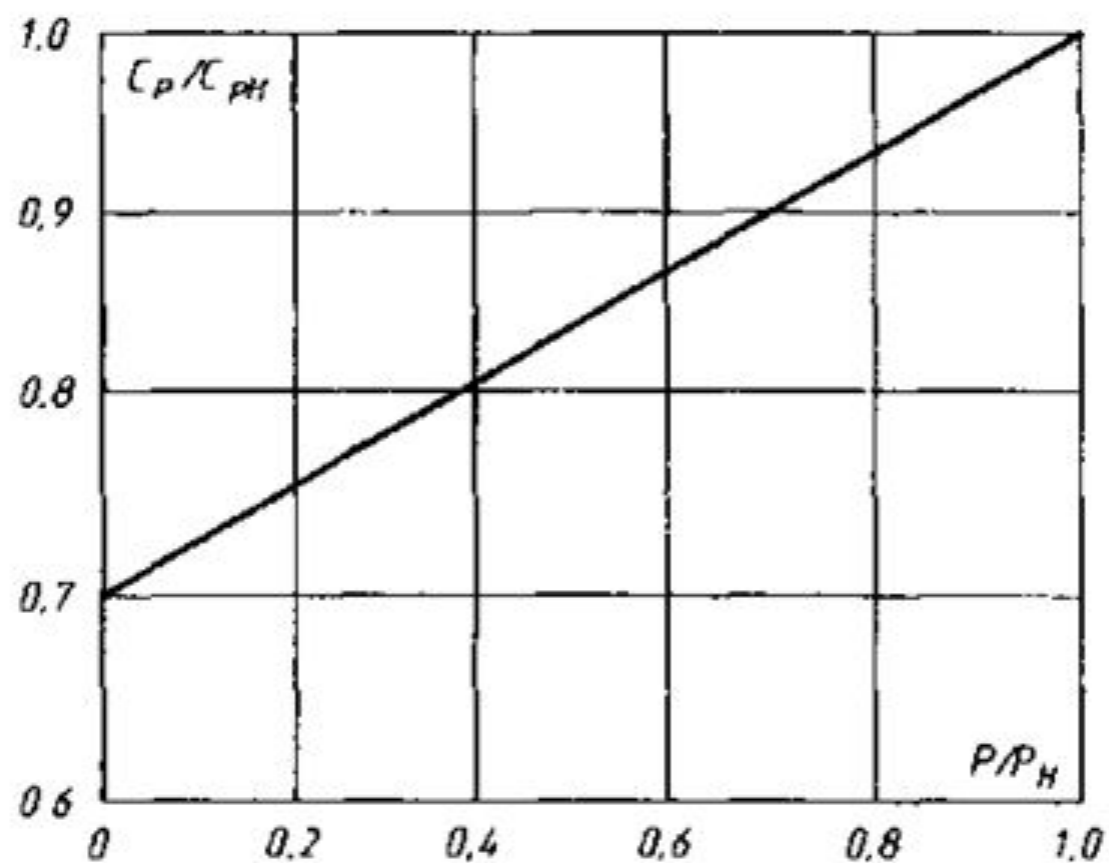


Рисунок 3.33 Зависимость величины рабочей емкости от нагрузки АД

Однофазные двигатели

Двигатели, которые называют однофазными, имеют на статоре, как правило, две обмотки. Одна из них называется главной или рабочей, другая — вспомогательной или пусковой. Необходимость иметь две пространственно сдвинутые обмотки, питаемые сдвинутыми на 90 электрических градусов токами для получения пускового момента была рассмотрена выше.

Сдвиг токов во времени обеспечивают включением во вспомогательную фазу фазосдвигающего элемента — резистора или конденсатора.

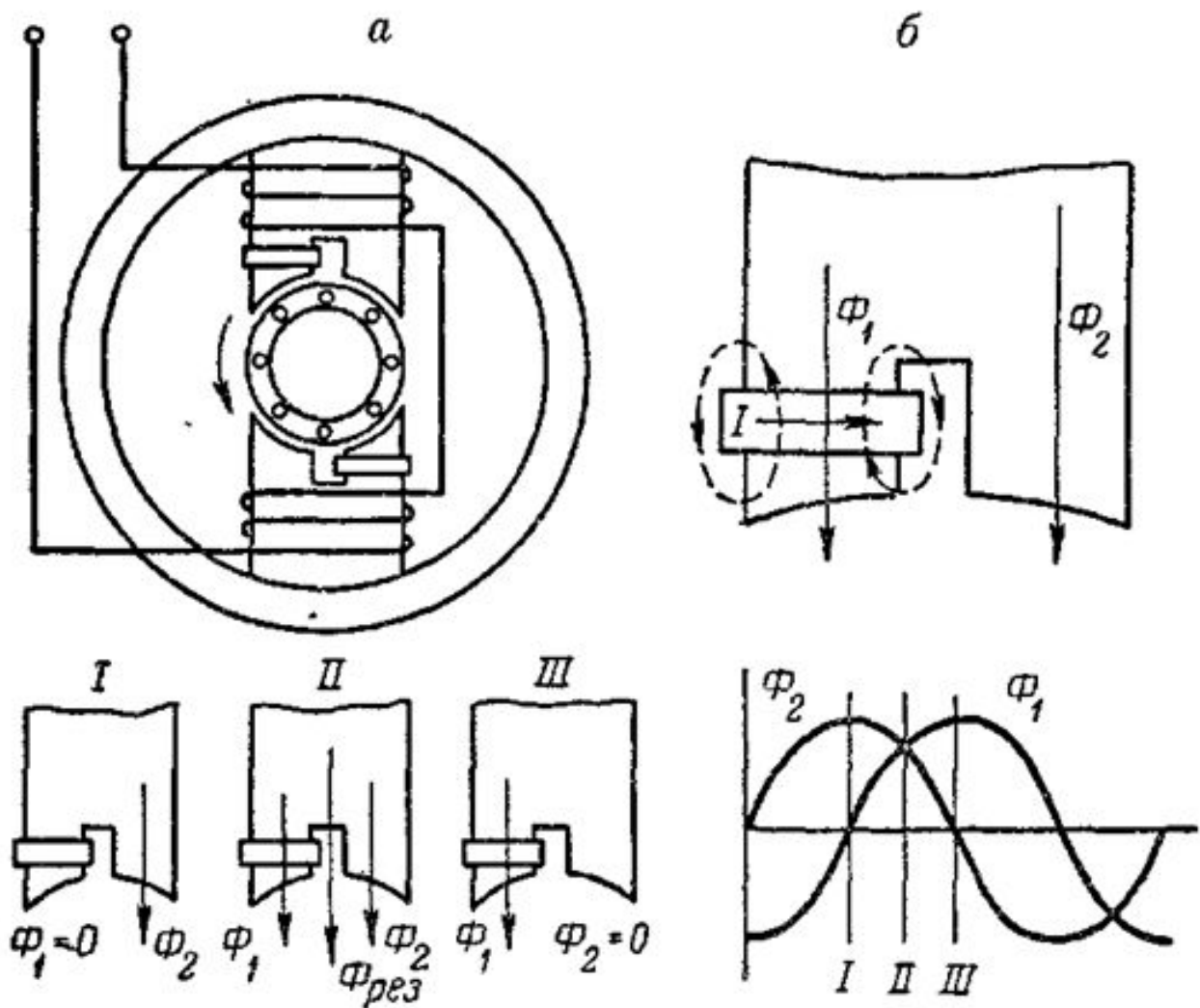


Рисунок 3.34 Однофазный двигатель с расщепленными полюсами.

Как видно из этих рисунков, результирующий магнитный поток **Фрез** перемещается справа налево, т. е. в электродвигателе образуется бегущее поле, которое, взаимодействуя с токами обмотки ротора, приводит ротор двигателя во вращение. В данном случае ротор будет вращаться против часовой стрелки.

Для изменения направления вращения двигателя достаточно переместить экранирующие кольца на другие части полюсов.

3.5 Характеристики АД в 1 фазном режиме

После пуска ротор двигателя вращается в том или ином направлении. Поле, вращающееся в том же направлении, считается прямым. Скольжение ротора относительно прямого поля $s_{\Pi} = \frac{n_{\Pi} - n_2}{n_{\Pi}}$, где n_n - синхронная частота вращения прямого поля. Скольжение ротора относительно обратного поля определяется по выражению: $S_{об} = 2 - S_n$. В области рабочих режимов $S_n = 0,05$, $S_{об} = 1,95$. Токи ротора от полей прямой $I_{2\Pi}$ и обратной $I_{2об}$ последовательностей, согласно формуле,

$$I_{2n} = \frac{S_n E_2}{\sqrt{r_2^2 + (S_n x_2)^2}} \quad I_{2об} = \frac{S_{об} E_2}{\sqrt{r_2^2 + (S_{об} x_2)^2}}$$

Учитывая, что скольжение обратной последовательности $S_{об}$ в 39 раз больше, чем прямой последовательности S_n , можно заключить, что ток прямой последовательности будет практически чисто активным, а ток обратной последовательности — индуктивным.

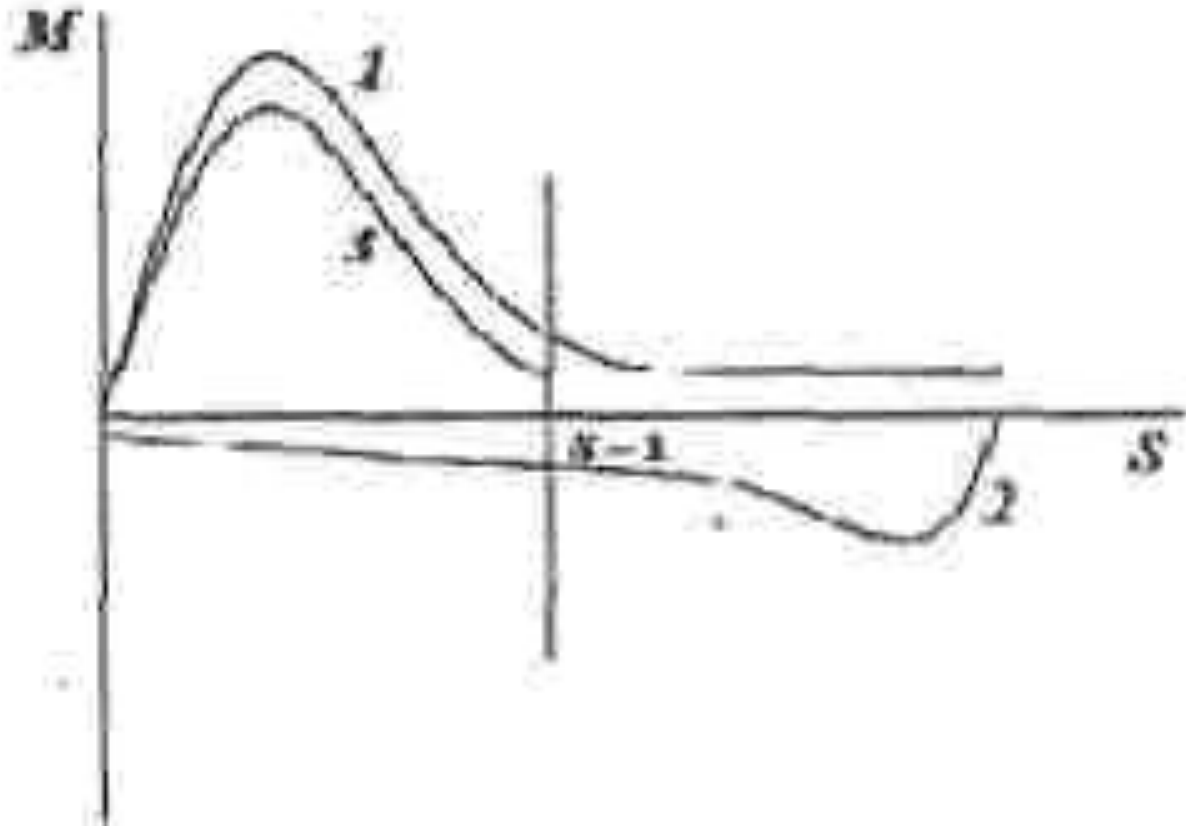


Рисунок 3.36 Механическая характеристика асинхронного двигателя от полей прямой (1), обратной (2) и результирующей (3) последовательностей

3.6 Механическая и угловая характеристика синхронного двигателя

Синхронные двигатели, если они работают при постоянной частоте с неизменной угловой скоростью, применяются для приводов, не требующих регулирования скорости. К таким приводам относятся: компрессоры, холодильные машины, камнедробилки и т. п.

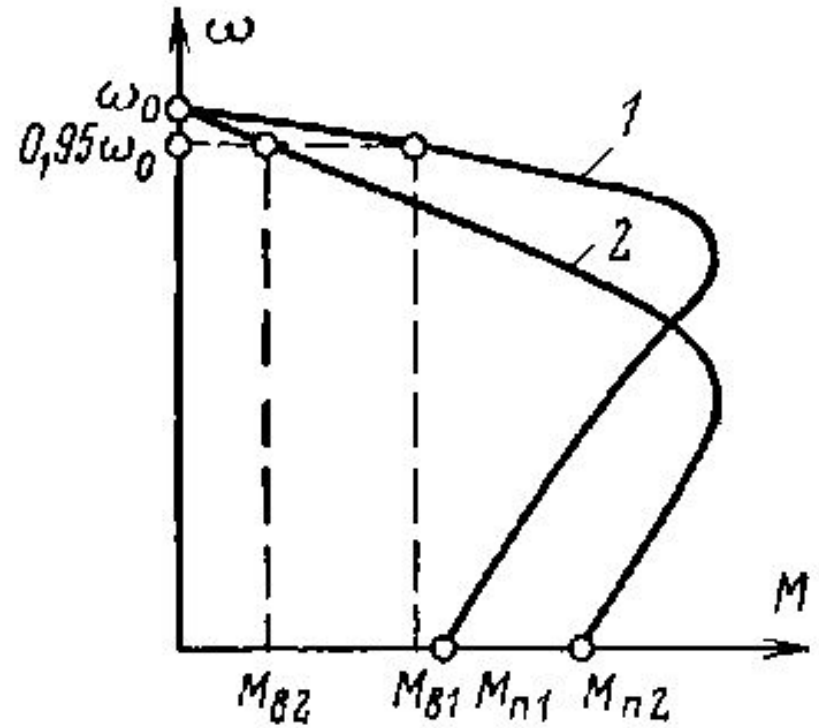
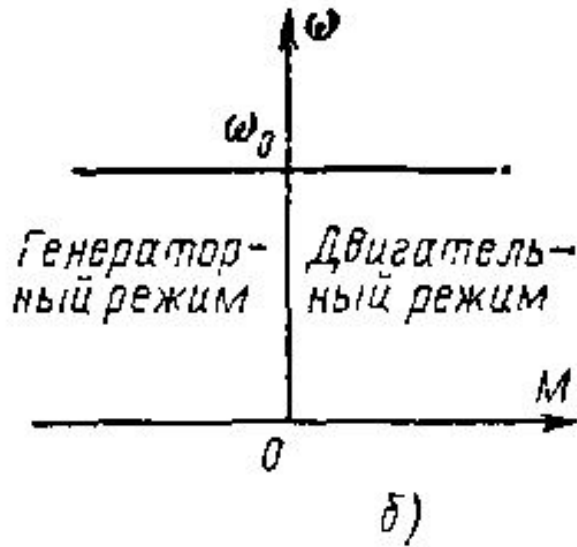
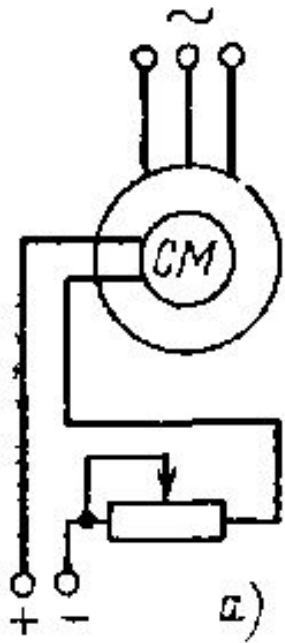


Рисунок 3.37 Схема включения (а) и механическая характеристика (б) синхронного двигателя.

Рисунок 3.38 Пусковые характеристики синхронного двигателя

При пульсации нагрузки на валу двигателя в установившемся режиме значение мгновенной скорости колеблется около среднего значения. Эти колебания происходят за счет изменения угла между напряжением и ЭДС синхронной машины. Для решения вопроса об устойчивой работе двигателя в таких случаях необходимо знать зависимость момента M от угла θ между напряжением и ЭДС.

Зависимость момента синхронной машины от угла θ носит название *угловой характеристики*.

Если пренебречь потерями в активном сопротивлении статора, считая $R_1 = 0$ (рис. 3.40), то подводимая к синхронному двигателю мощность, Вт, может быть принята равной электромагнитной мощности:

$$P = 3IU \cos \varphi, \quad (3.32)$$

где I и U — фазные ток и напряжение статора.

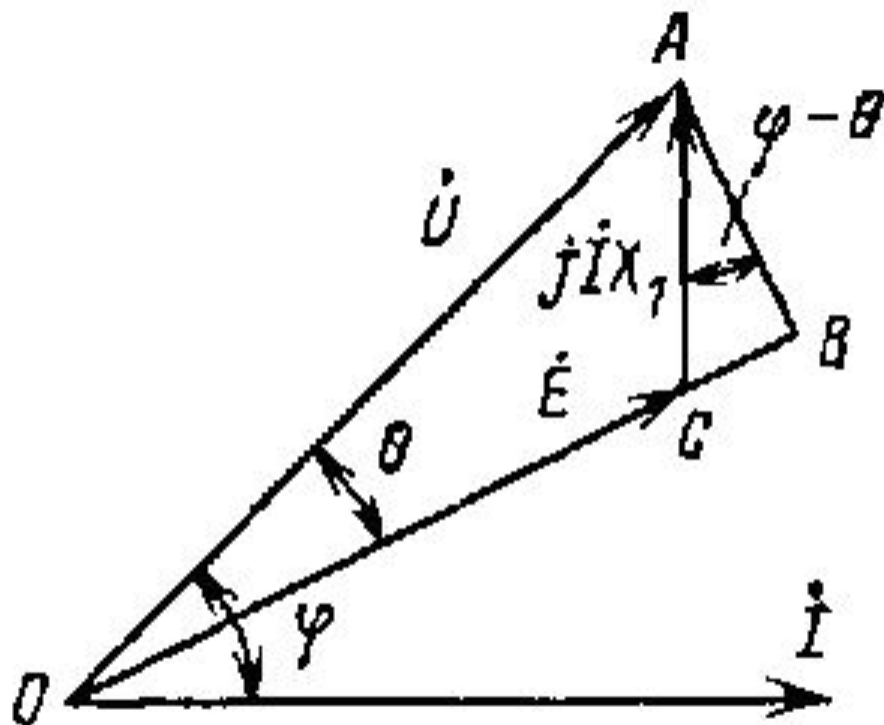


Рисунок 3.40 Векторная диаграмма синхронного двигателя при $R_1 = 0$.

Из векторной диаграммы (рис. 3.40) следует, что **$U \cos \varphi = E \cos (\varphi - \theta)$** .

Из рассмотрения вспомогательного треугольника ABC видно, что

$$\cos (\varphi - \theta) = AB/AC = U \sin \theta / I X_1$$

следовательно,

$$U \cos \varphi = E U \frac{\sin \theta}{I X_1}.$$

Теперь, подставив полученное выражение в (3.32), получим уравнение электромагнитной мощности, Вт,

$$\mathbf{P = 3EI_{кз} \sin \theta,} \tag{3.33}$$

где $I_{кз}$ — ток короткого замыкания,

$$I_{к3} = U/X_1$$

Отсюда электромагнитный момент

$$M = \frac{P}{\omega_0} \sin \theta = \frac{3}{\omega_0} EI_{к3} \sin \theta \quad (3.34)$$

В случае явнополюсной машины появляется еще дополнительный реактивный момент. Однако для практических расчетов им можно пренебречь и пользоваться формулой (3.34).

При $\theta = 90^\circ$ момент имеет максимальное значение:

$$M_{\max} = \frac{3}{\omega_0} EI_{к3} \quad (3.35)$$

Поэтому искомое уравнение угловой характеристики принимает следующий вид:

$$M = M_{\max} \sin \theta \quad (3.36)$$

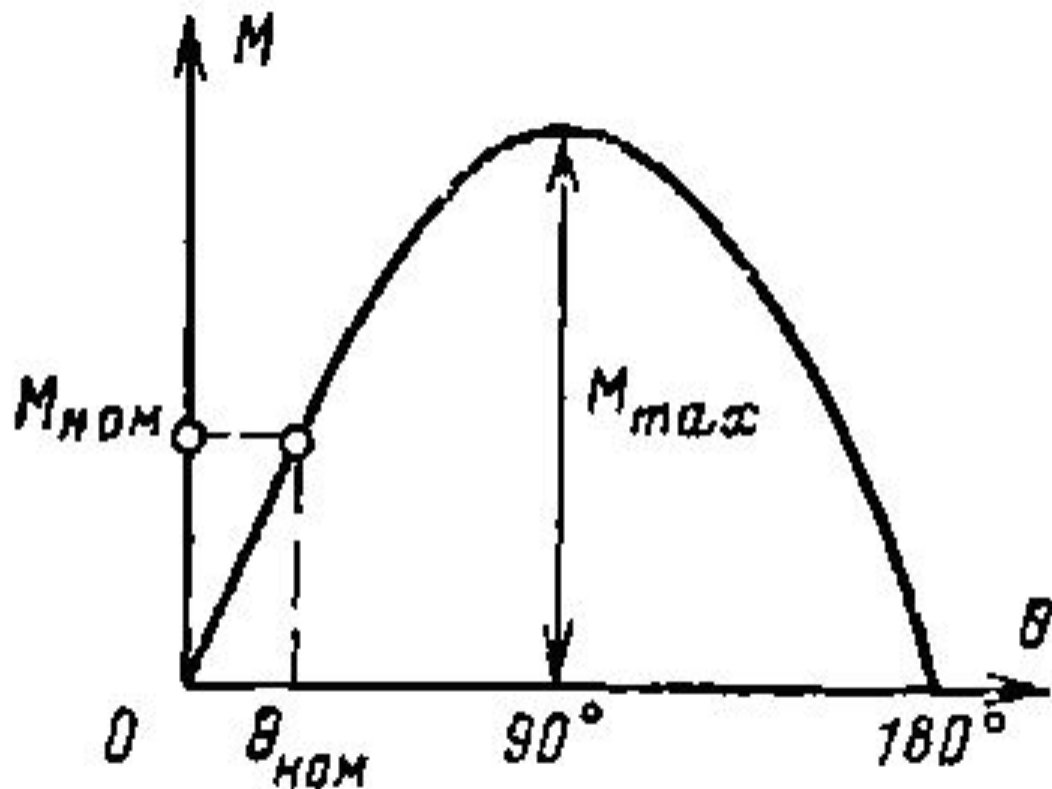


Рисунок 3.41 Угловая характеристика синхронного двигателя.

Номинальному моменту двигателя $M_{\text{НОМ}}$ практически соответствует угол $\theta_{\text{НОМ}} = 30 \dots 25^\circ$. При этом кратность максимального момента к номинальному составляет:

$$\lambda = M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}} = 2 \dots 2,5.$$

СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Возможность работы СД в качестве источника (компенсатора) реактивной мощности иллюстрируют так называемые U-образные характеристики (рис. 3.43), представляющие собой зависимости тока статора двигателя I_1 и его $\cos\varphi$ от тока возбуждения I_b при постоянных напряжении, частоте и мощности $U\varphi = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $P_1 = \text{const}$.

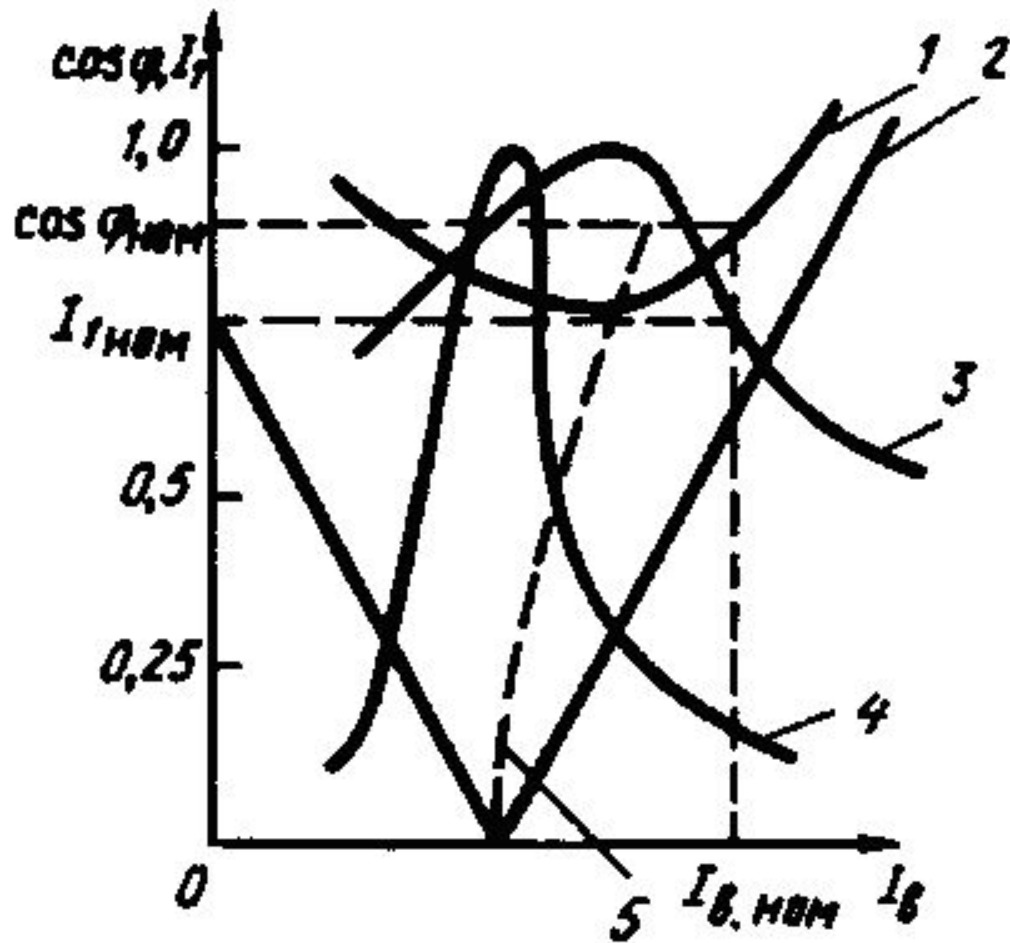


Рисунок 3.43 U-образные характеристики

На рис. 3.43 показаны зависимости $I_1(I_B)$ - кривые 1,2 и $\cos\varphi(I_B)$ -кривые 3,4 при номинальной нагрузке СД $P_{ном}$ (1 и 3) и его холостом ходе (2 и 4). Область характеристик справа от штриховой линии 5 соответствует работе СД с опережающим $\cos\varphi$, слева от нее - с отстающим, на самой этой линии $\cos\varphi = 1$. Отметим, что СД без механической нагрузки на валу носит название компенсатора реактивной мощности и часто используется в этой функции в системах электроснабжения.

3.7 Способы пуска и реверса АД и синхронных двигателей

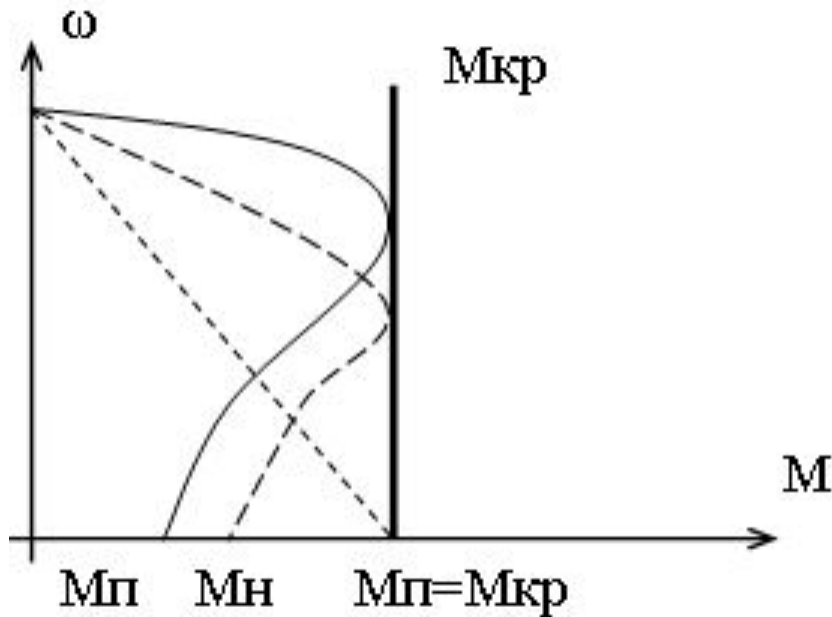
Используются следующие способы пуска:

1) Прямой пуск

2) Пуск с переключением обмоток со схемы на Δ в сети 380 В, напряжение двигателя должно быть Δ - 380 В, - 600В.

Такой пуск обеспечивается снижением пусковых токов в 3 раза, но одновременно момент двигателя уменьшается в 3 раза.

- 3) Пуск с ограничением тока через пусковые резисторы, включенные в цепь статора.
- 4) Пуск с повышением напряжения тиристорных пускателей.
- 5) Пуск с изменением частоты тока при использовании преобразователей частоты (идеальный пуск).
- 6) Двигатель с фазным ротором запускается путем включения дополнительных резисторов в ротор, при этом пусковой ток уменьшается, а пусковой момент увеличивается.



$$s_{KI} = s_{KE} \frac{r'_2 + R_{доб}}{r'_2}$$

Рисунок 3.45

Реверс двигателя осуществляется изменением чередования фаз. При реверсе двигателя в приводе возникают удары от резкого изменения знака M , рекомендуется в цепь реверса включать дополнительные резисторы.

3.8 Тормозные режимы ДПТ и трехфазных асинхронных двигателей

Различают следующие основные способы торможения:

- 1) *Торможение с отдачей энергии в сеть*
(генераторный режим работы).
- 2) *Динамическое торможение.*
- 3) *Торможение противовключением.*

1) *Торможение с отдачей энергии в сеть* (генераторный режим работы параллельно с сетью) осуществляется в том случае, когда скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода и его ЭДС E больше приложенного напряжения U . Двигатель здесь работает в режиме генератора параллельно с сетью, которой он отдает электрическую энергию; ток при этом изменяет свое направление. Последнее очевидно из равенства

$$I = (U - E) / R = - (E - U) / R, \quad (3.38)$$

следовательно, изменяет знак и момент двигателя, т. е. он становится тормозным $M = -k\Phi I$. Если обозначить тормозной момент через $M_T = -M$, то при $\omega > \omega_0$ примет следующий вид:

$$\omega = U / k\Phi + M_T R / k^2 \Phi^2. \quad (3.39)$$

2) *Динамическое торможение* происходит при отключении якоря двигателя от сети и замыкании его на резистор (рис. 3.46), поэтому иногда его называют реостатным торможением. Обмотка возбуждения при этом должна оставаться присоединенной к сети. Режим динамического торможения также соответствует работе машины в качестве генератора.

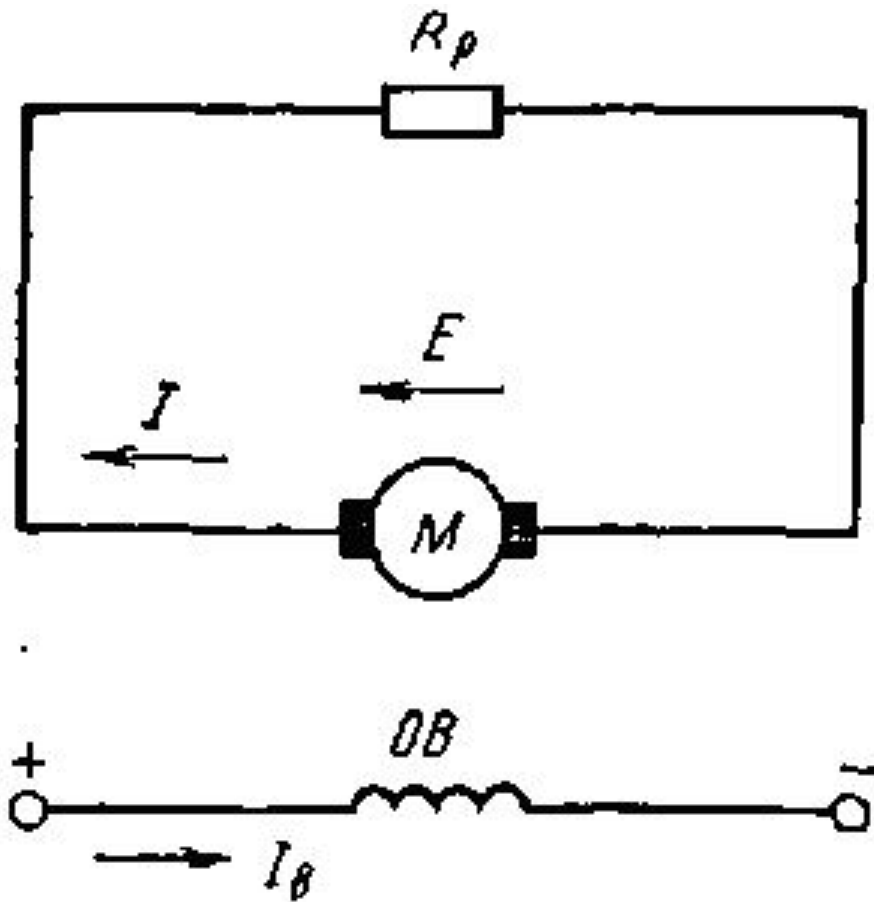


Рисунок 3.46 Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при динамическом торможении.

Ток якоря определяется по формуле

$$\mathbf{I} = -\mathbf{E}/\mathbf{R}, \quad (3.40)$$

где \mathbf{R} — сопротивление якорной цепи.

Тормозной момент при динамическом торможении, если пренебречь реакцией якоря, может быть выражен равенством

$$-\mathbf{M}_T = \mathbf{k}\Phi\mathbf{I} = -\mathbf{k}^2\Phi^2\omega/\mathbf{R}. \quad (3.41)$$

При $\Phi = \text{const}$ получим:

$$\omega = \mathbf{M}_T\mathbf{R}/\mathbf{c}^2. \quad (3.42)$$

При динамическом торможении механическая характеристика двигателя, как это видно из (3.42), представляет собой прямую, проходящую через начало координат.

3) *Торможение* *противовключением* (генераторный режим работы последовательно с сетью) осуществляется в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположную сторону. Это может происходить, например, в приводе подъемника, когда двигатель включен на подъем, а момент, развиваемый грузом, заставляет привод вращаться в сторону спуска груза. Такой же режим получается и при переключении обмотки якоря (или обмотки возбуждения) двигателя для быстрой остановки или для изменения направления вращения на противоположное.

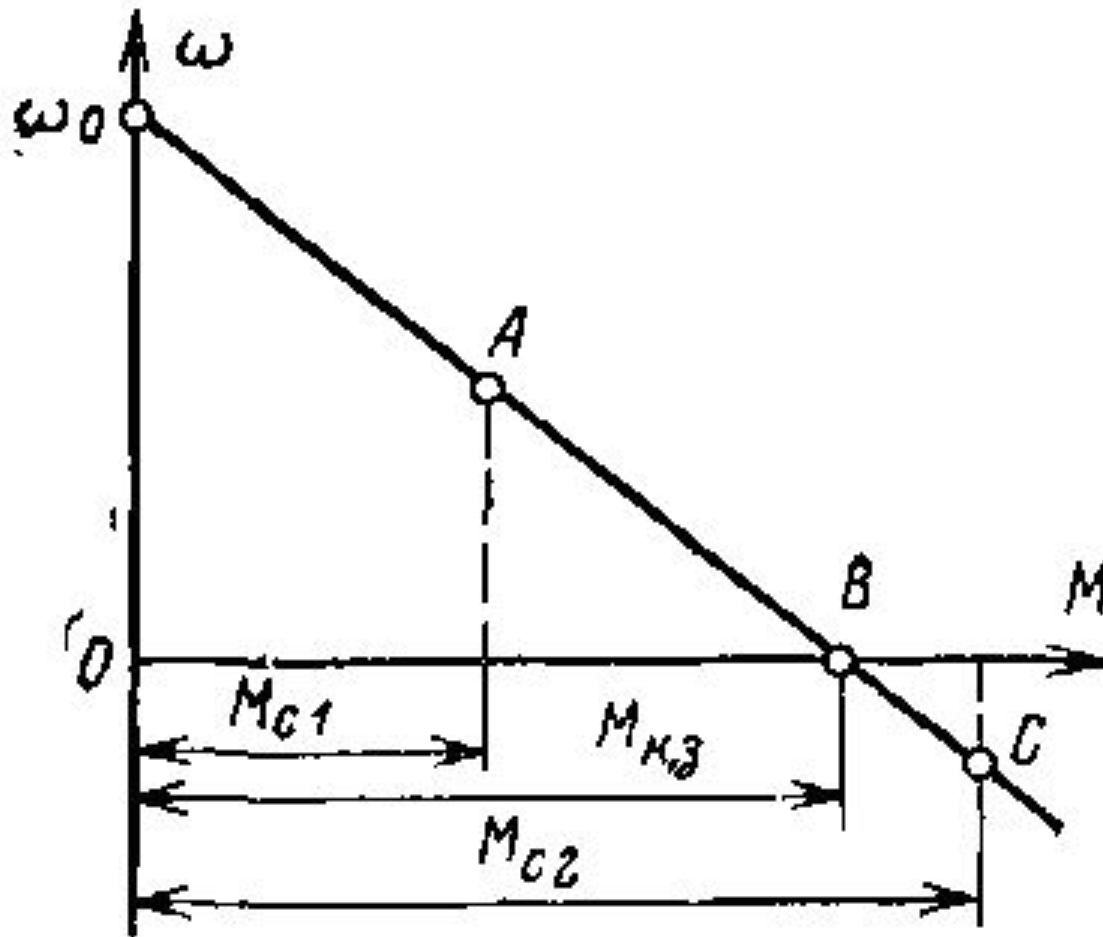


Рисунок 3.47 Механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения при торможении противовключением в случае тормозного спуска.

При этом ток в якоре, как обычно в двигательном режиме, определяется по формуле

$$I = (U - E) / R.$$

С увеличением момента груза угловая скорость двигателя уменьшается соответственно характеристике АВ, и если момент груза будет равен $M_{к.з}$, двигатель остановится. В этом состоянии при $\omega = 0$ ЭДС двигателя равна нулю, поэтому ток определяется равенством

$$I = I_{кз} = U / R.$$

Когда момент сопротивления при дальнейшем увеличении груза превысит момент двигателя в неподвижном состоянии, последний начнет вращаться в противоположном направлении и груз станет опускаться. При моменте, равном $M_{с2}$ будет достигнута установившаяся скорость спуска, соответствующая точке С на приведенной характеристике. Поскольку якорь теперь вращается в обратную сторону, а направление магнитного потока не изменилось, ЭДС двигателя изменит направление на обратное. Ток, определяемый уравнением

$$I = (U + E)/R,$$

будет больше, чем в двигательном режиме, и соответственно момент, развиваемый двигателем при торможении противовключением, тоже возрастет

Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения в тормозных режимах

Для двигателя последовательного возбуждения возможны два тормозных режима: торможение противовключением и динамическое торможение. Торможение с отдачей энергии в сеть для этих двигателей осуществить невозможно, так как их ЭДС не может быть больше приложенного напряжения сети.

При торможении противовключением в цепь якоря двигателя вводится дополнительный резистор для ограничения тока.

Механические характеристики для этого торможения являются продолжением характеристик двигательного режима в область отрицательной угловой скорости. Это иллюстрируется характеристиками, которые проходят в квадрантах I и IV (рис. 3.50).

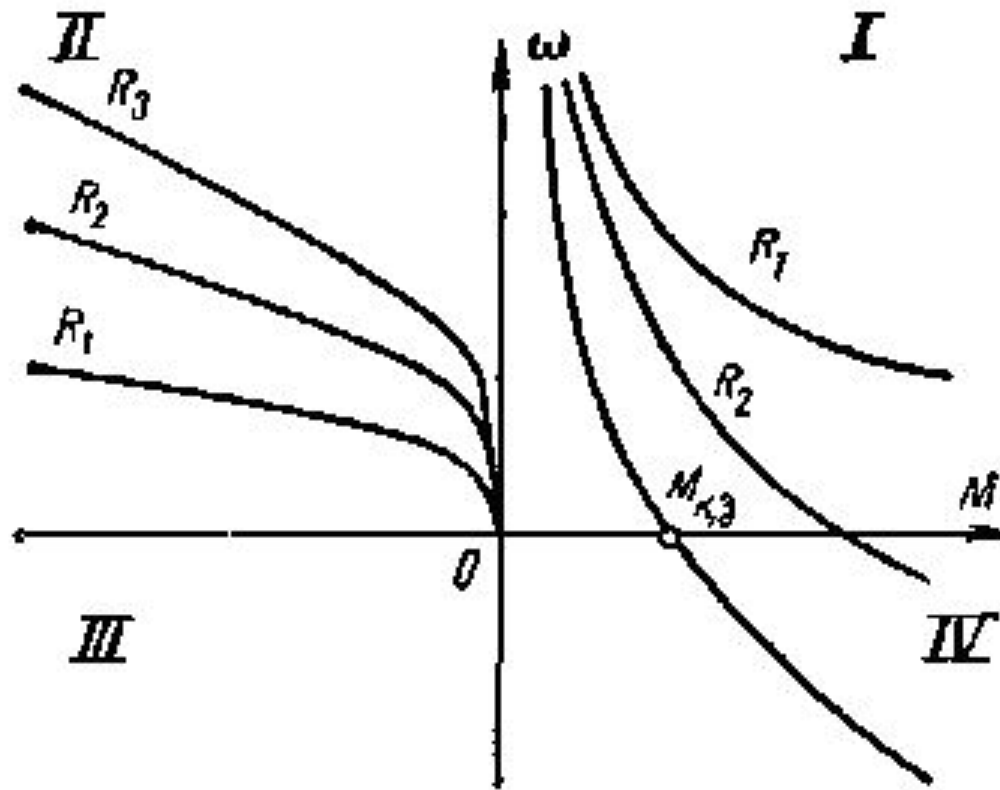


Рисунок 3.50 Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при различных режимах работы.

Динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения может быть осуществлено двумя способами; с самовозбуждением и с независимым возбуждением.

При торможении с самовозбуждением (рис. 3.52) якорь и обмотка возбуждения двигателя отключаются от сети и замыкаются на резистор.

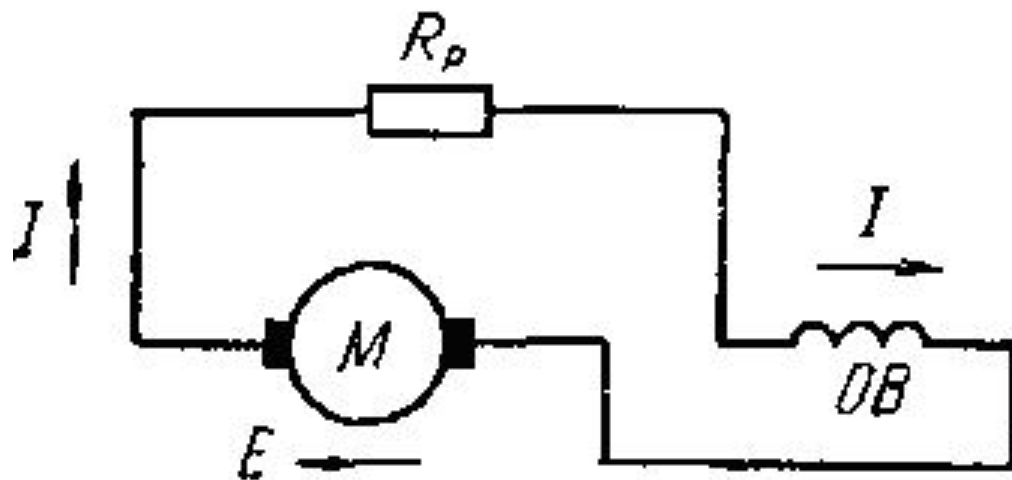


Рисунок 3.52 Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при динамическом торможении с самовозбуждением.

Механические характеристики

асинхронного двигателя в тормозных режимах.

Торможение с отдачей энергии в сеть

Механические характеристики асинхронного двигателя в координатах M и ω представлены на рис. 3.54. В квадранте I расположены участки характеристик двигательного режима для трех различных сопротивлений роторной цепи.

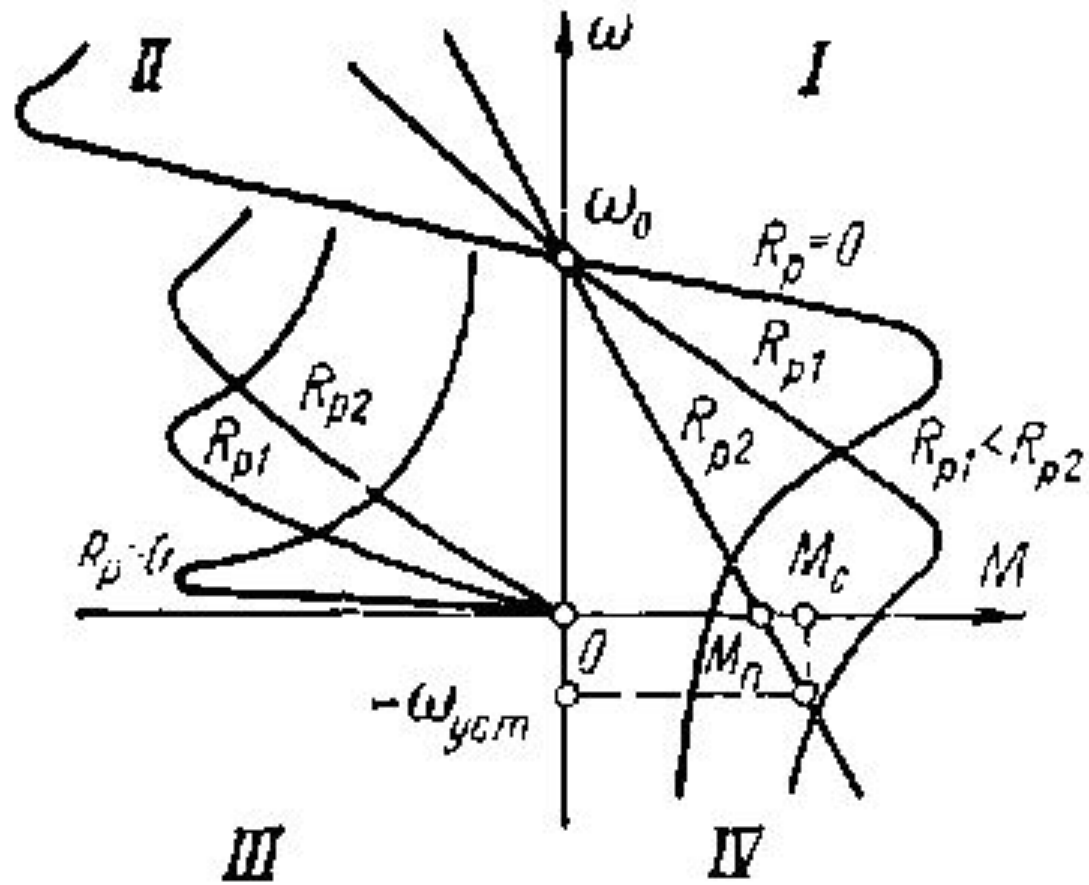


Рисунок 3.54 Механические характеристики асинхронного двигателя для различных режимов работы.

Торможение противовключением

Торможение противовключением имеет значительно большее применение на практике. Режим торможения противовключением может быть получен, так же как и для двигателя постоянного тока, при движущем моменте нагрузки $M_c > M_n$ (рис. 3.54). Для ограничения тока и получения соответствующего момента необходимо при использовании двигателя с фазным ротором в его роторную цепь включить дополнительный резистор. Установившемуся режиму при торможении противовключением соответствует, например, точка — $\omega_{уст}$, M_c , на характеристике Rp_2 (рис. 3.54).

Торможение противовключением может быть получено также путем переключения на ходу двух фаз обмотки статора, что ведет к перемене направления вращения магнитного поля (переход из точки А в точку В на рис.3.55). Ротор при этом вращается против направления движения поля и постепенно замедляется. Когда угловая скорость спадет до нуля (точка С), двигатель нужно отключить от сети, иначе он может вновь перейти в двигательный режим, причем ротор его будет вращаться в направлении, обратном предыдущему (точка D).

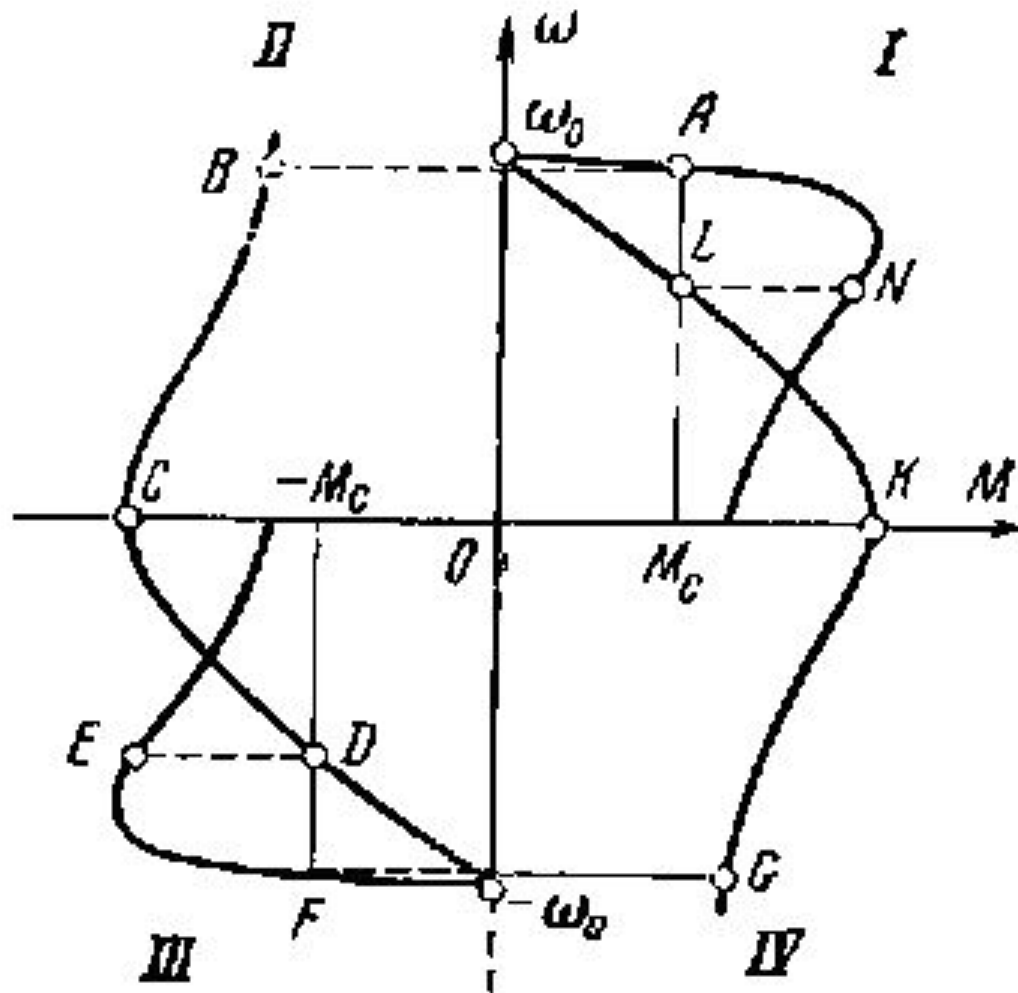


Рисунок 3.55 Механические характеристики асинхронного двигателя при переключении двух фаз статора.

Динамическое торможение

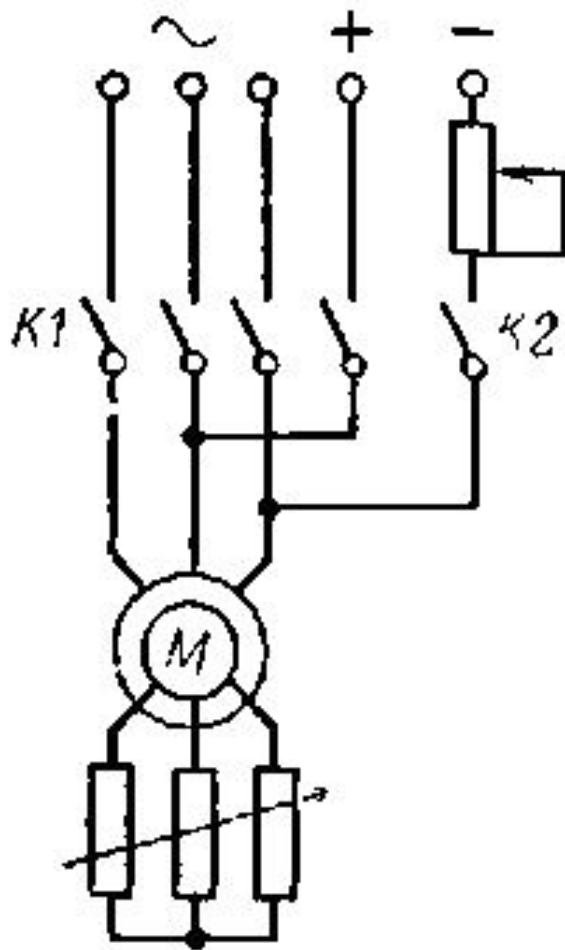


Рисунок 3.56 Схема включения асинхронного двигателя для перехода на режим динамического торможения.