

## Глава 2.

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1. Механические характеристики электродвигателей и рабочих механизмов

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость установившейся скорости двигателя от создаваемого им момента, т.е.  $\omega = f(M)$ . Иногда под механической характеристикой понимают зависимость частоты его вращения от момента на валу, т.е.  $n = f(M)$ .

У большинства электродвигателей с увеличением нагрузки на валу частота вращения снижается. Характер изменения частоты вращения двигателя при изменении момента на его валу определяет жесткость механической характеристики. Критерием для оценки жесткости характеристик служит их крутизна

$$\beta = \frac{dn}{dM}. \quad (2.1)$$

Если изменение момента и соответствующее изменение частоты вращения двигателя выразить в процентах, то

$$\beta\% = \frac{\Delta n\%}{\Delta M\%} 100\% \quad (2.2)$$

Механические характеристики электродвигателей по степени жесткости могут быть разделены на три группы (рис. 2.1): абсолютно жесткие, жесткие и мягкие.

1. *Абсолютно жесткие механические характеристики* (прямая 1), имеющие крутизну  $\beta = 0$ . Такими характеристиками обладают синхронные двигатели при нагрузках, не превышающих перегрузочной способности.

2. *Жесткие механические характеристики* (прямая 2) со сравнительно небольшим снижением частоты вращения двигателя при

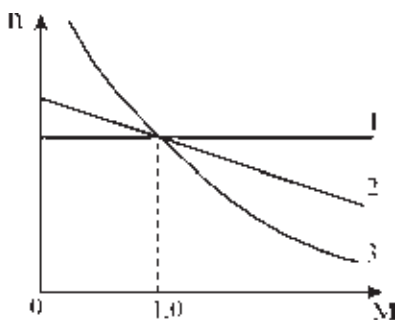


Рис. 2.1. Механические характеристики электродвигателей

возрастании момента. Крутизна таких характеристик  $\beta \leq 10\%$ . Такими характеристиками обладают двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения, асинхронные двигатели в области рабочих скольжений.

3. *Мягкие механические характеристики* двигателей с большим относительным снижением частоты вращения при увеличении момента (кривая 3). Крутизна ее

$\beta > 10\%$ . Такими характеристиками обладают двигатели постоянного тока последовательного возбуждения или смешанного возбуждения с сильной последовательной обмоткой возбуждения.

Иногда вместо механических характеристик свойства электродвигателя целесообразно отражать электромеханическими характеристиками, представляющими собой зависимость установившейся скорости двигателя от потребляемого им тока, т.е.  $\omega = f(I)$ . Подобно механическим электромеханические характеристики можно представить в виде зависимости частоты вращения электродвигателя от тока, протекающего по цепи его якоря или ротора, т.е.  $n = f(I)$ . Как механические, так и электромеханические характеристики могут быть естественными и искусственными.

*Естественной характеристикой* называется характеристика, соответствующая работе ЭД при номинальных параметрах питающей сети, нормальной схеме подключения к ней и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепях электродвигателя. Каждому электродвигателю присуща только одна естественная характеристика.

*Искусственные характеристики* получаются: а) при питании ЭД от сети с напряжением или частотой, отличающимися от номинальных значений; б) при включении хотя бы в одну из цепей ЭД добавочных сопротивлений; в) при включении ЭД к источнику тока по специальной схеме.

Очевидно, что степень жесткости искусственных характеристик всех типов электродвигателей (кроме синхронного) можно изменять в достаточно широких пределах.

Работа любого электропривода возможна лишь при согласованности механических характеристик электродвигателя и рабочего механизма.

*Механической характеристикой рабочего механизма* по аналогии с электродвигателями называется функциональная зависимость между создаваемым механизмом статическим моментом, приведенным к валу электродвигателя, и частотой вращения последнего, т.е.  $n = f(M_c)$ . Механические характеристики наиболее распространенных на судах рабочих механизмов можно классифицировать, исходя из следующей эмпирической формулы:

$$M_c = M_0 + (M_{c,ном} - M_0) (n/n_{ном})^x, \quad (2.3)$$

где  $M_c$  – статический момент рабочего механизма;

$M_0$  – момент сил трения в движущихся частях механизма;

$M_{c,ном}$  – статический момент рабочего механизма при номинальной частоте вращения;

$x$  – коэффициент, характеризующий изменение статического момента при изменении частоты вращения механизма.

При  $x = 0$  статический момент  $M_c$  не зависит от частоты вращения (прямая 1 на рис. 2.2). Такой характеристикой обладают краны, лебедки и другие погрузочные устройства.

При  $x = 1$  статический момент  $M_c$  имеет линейно-возрастающую зависимость от частоты вращения (прямая 2 на рис. 2.2). Такой характеристикой обладает, например, преобразовательный агрегат, у которого генератор постоянного тока независимого возбуждения работает на внешнюю цепь с постоянным сопротивлением (для упрощения принято  $M_0 = 0$ ).

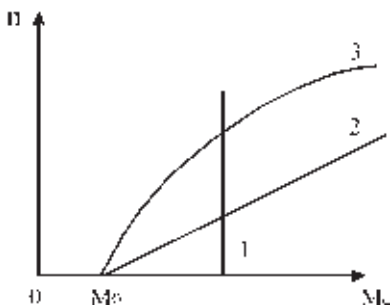


Рис. 2.2. Механические характеристики производственных механизмов

При  $x = 2$  статический момент  $M_c$  имеет параболическую зависимость от частоты вращения (кривая 3 на рис. 2.2).

При всех значениях  $x$  для упрощения принято, что  $M_0 = 0$ . В общем случае показатель степени  $x$  может принимать и другие значения.

Построение механических характеристик рабочих механизмов в координатах  $n$  и  $M_c$  (см. рис. 2.2) выполняется в предположении, что моменты, действующие согласно с направлением движения механизма, положительны, а направленные навстречу ему – отрицательны.

В процессе работы вращающий момент, развиваемый электродвигателем, может быть для привода движущим или тормозным. Для электропривода также свойственны два направления вращения. Исходя из этого при изображении механических характеристик электродвигателя в прямоугольной системе координат одно из направлений вращающего момента электродвигателя и его угловой скорости (частоты вращения) принимают условно положительным и откладывают положительное значение скорости вверх, а положительное значение момента – вправо от начала координат (рис. 2.3).

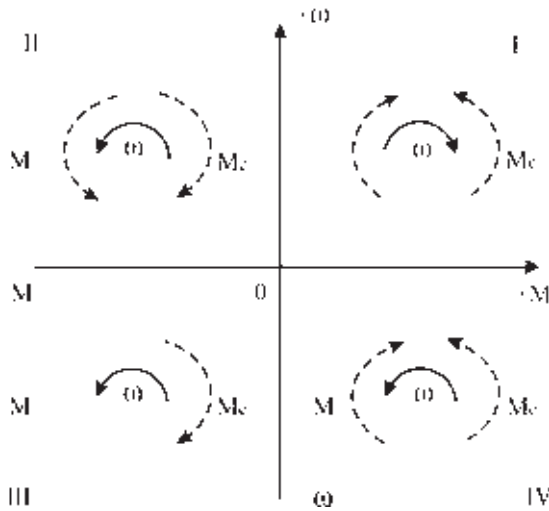


Рис. 2.3. Расположение механических характеристик в системе координат

Так как мощность электродвигателя пропорциональна произведению момента и скорости, то, следовательно, при совпадении знаков сомножителей мощность положительна и направлена от электродвигателя к механизму. Подобный режим, когда мощность передается от электродвигателя механизму, называется двигательным. Этому режиму работы соответствуют механические характеристики электродвигателя, расположенные в I и III квадрантах.

Если направление момента электродвигателя меняется, например, вследствие изменения направления тока в его обмотках, а направление скорости остается прежним, то мощность электродвигателя становится отрицательной, направленной от механизма к электродвигателю. Такой режим работы называется тормозным и ему соответствуют механические характеристики электродвигателя, расположенные во II и IV квадрантах.

Совместная работа электродвигателя с рабочим механизмом может осуществляться лишь при определенной согласованности их механических характеристик. Графический анализ согласованности свойств электродвигателя и рабочего механизма можно осуществить путем наложения в одних координатных осях  $n$  и  $M$  как механической характеристики ЭД, так и механической характеристики механизма, построенных в одном масштабе. При этом необходимо: во-первых, статический момент механизма привести к валу электродвигателя, и во-вторых, учитывать, что при переводе механических характеристик механизма из осей  $n$  и  $M_c$  в оси координат электродвигателя  $n$  и  $M$  знаки статических моментов механизма изменятся на противоположные. Если при этом в любом квадранте координатных осей окажется точка пересечения механических характеристик электродвигателя и рабочего механизма, следовательно, в этой точке электромагнитный момент двигателя  $M$  будет равен и противоположно направлен приведенному к валу электродвигателя статическому моменту механизма  $M_c$ , т.е.  $M = M_c$ , что соответствует установившемуся режиму работы электропривода. Таким образом, например, точка А на рис. 2.4 является точкой установившегося режима работы электропривода, приводящего в действие механизм с

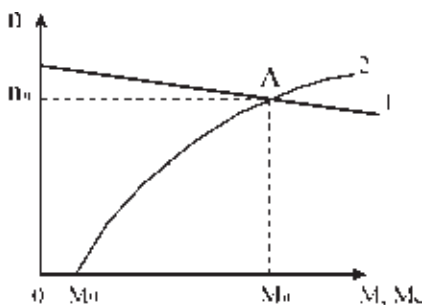


Рис. 2.4. Совмещенные механические характеристики электродвигателя и механизма

механической характеристикой, соответствующей кривой 2, и снабженного электродвигателем с механической характеристикой, соответствующей прямой 1.

Следовательно, наличие точек пересечения между механическими характеристиками электродвигателя и рабочего механизма, построенными в одних координатных осях, является основным условием возможности их совместной работы в установившихся режимах.

Однако это условие является недостаточным, поскольку должен быть решен также вопрос о статической устойчивости работы электропривода.

*Под статической устойчивостью* понимается такое состояние установившегося режима работы привода, когда при случайно возникшем отклонении скорости от установившегося значения привод возвращается к режиму установившейся работы. При *отсутствии устойчивости* состояние установившегося режима работы привода таково, что любое, даже самое малое, отклонение скорости от установившегося значения приводит к изменению состояния привода – он не возвращается к первоначальному установившемуся режиму.

Привод статически устойчив, если при положительном приращении частоты вращения момент двигателя окажется меньше статического момента и привод вследствие этого затормозится до прежнего значения скорости. При отрицательном приращении частоты вращения момент двигателя окажется больше статического момента и привод разгонится до прежнего значения скорости.

Таким образом, устойчивая работа электропривода обеспечивается при условии, когда

$$dM/dn < dM_c/dn. \quad (2.4)$$

Проанализируем, например, устойчивость работы асинхронного короткозамкнутого двигателя при нагрузке его постоянным статическим моментом (рис. 2.5). Такой режим соответствует, например, электроприводу лебедки при подъеме груза. Возможные установившиеся режимы работы электропривода определяются точками *a* и *b* пересечения механических характеристик асинхронного двигателя 1 и рабочего механизма 2.

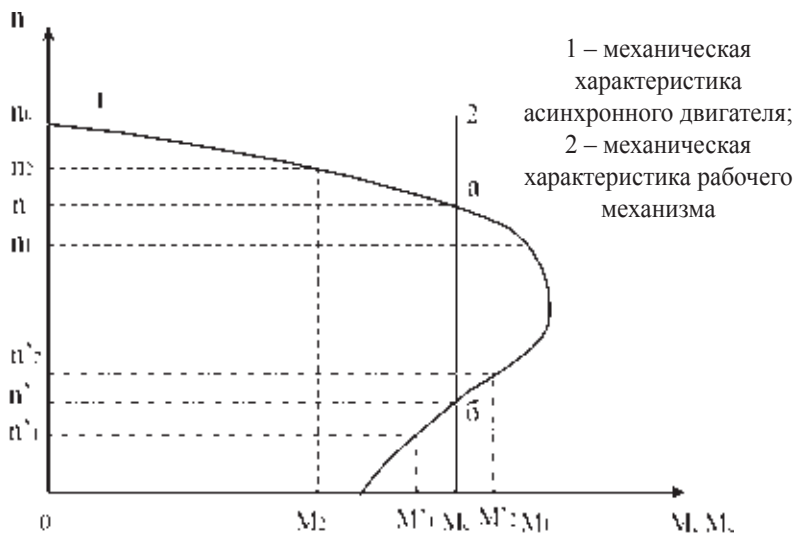


Рис. 2.5. Механическая характеристика асинхронного короткозамкнутого двигателя при нагрузке его постоянным статическим моментом

Предположим, что работа электропривода соответствует точке *a* с частотой вращения электродвигателя  $n$ . Если частота вращения электродвигателя изменится, например, уменьшится до значения  $n_1$ , то электромагнитный момент двигателя возрастет до величины  $M_1$  и окажется больше статического момента сопротивления  $M_c$  на его валу. Под действием избыточного момента, равного разности  $M_1 - M_c$ , частота вращения двигателя возрастет до прежнего значения  $n$ . В случае увеличения частоты вращения двигателя до значения  $n_2$  окажется, что  $M_2 < M_c$ . Это приведет к снижению частоты вращения двигателя до первоначального

значения  $n$ . Следовательно, точка  $a$  является точкой устойчивой работы электропривода.

Предположим теперь, что работа электропривода характеризуется точкой  $b$  на рис. 2.5. Установившийся режим двигателя осуществляется при частоте вращения  $n'$  и равенстве электромагнитного вращающего момента  $M$  и статического момента сопротивления  $M_c$  на его валу. Снижение частоты вращения приведет к уменьшению вращающего момента двигателя до значения  $M_1' < M_c$ , что вызовет дальнейшее снижение частоты вращения двигателя, вплоть до его остановки.

Нетрудно видеть, что при увеличении частоты вращения двигателя вращающий момент возрастает и превысит по значению статический момент сопротивления ( $M_2' > M_c$ ), в результате чего будет происходить дальнейший рост частоты вращения до значения, соответствующего точке  $a$ , т.е. точке устойчивой работы двигателя. Следовательно, в точке  $b$  работа электропривода оказывается неустойчивой. В общем случае неустойчивая работа электропривода имеет место, когда

$$dM/dn > dM_c/dn. \quad (2.5)$$

Обычно при проектировании электропривода механическая характеристика рабочего механизма уже задана. Следовательно, для обеспечения устойчивой работы в установившихся режимах электропривода при определенных скоростях и статических моментах рабочего механизма необходимо подбирать механическую характеристику электродвигателя соответствующей формы. Это достигается выбором типа электродвигателя и изменением электрических параметров его цепей. Иногда для получения требуемых механических характеристик электродвигателей целесообразно использовать специальные схемы их включения.

## **2.2. Механические характеристики электродвигателей в двигательных режимах**

А. Электродвигатели параллельного возбуждения. Схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения представлена



на рис. 2.6, где  $R_p$  – регулировочный резистор в цепи якоря;  $R_b$  – регулировочный резистор в цепи обмотки возбуждения LM. Направления токов, показанные на схеме, соответствуют двигательному режиму работы, при котором электрическая энергия потребляется двигателем из сети с напряжением  $U$  и преобразуется в механическую энергию, мощность которой равна  $P = M\omega$ , где  $\omega$  – угловая скорость вращения двигателя.

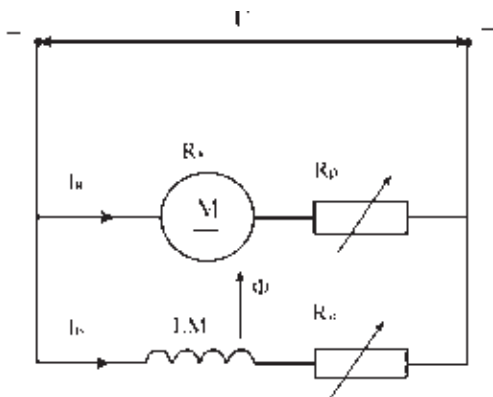


Рис. 2.6. Схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Аналитическое выражение двигателя может быть получено из уравнения равновесия ЭДС, составленного для якорной цепи (см. рис. 2.6):

$$U = E_a + I_a (\sum R + R_p), \quad [B], \quad (2.6)$$

где  $E_a$  – ЭДС якоря двигателя;

$I_a$  – ток в цепи якоря;

$\sum R$  – сумма сопротивлений обмоток цепи якоря.

В общем случае

$$\sum R = R_a + R_d + R_c + R_k, \quad [Om], \quad (2.7)$$

т.е. состоит из сопротивлений обмотки якоря  $R_a$ , обмотки добавочных полюсов  $R_d$ , последовательной обмотки возбуждения

$R_c$  и компенсационной обмотки  $R_k$ . При отсутствии в двигателе каких-либо из указанных обмоток в выражение (2.7) не входят соответствующие слагаемые.

ЭДС обмотки якоря машины постоянного тока определяется формулой

$$E_a = \frac{pN}{60a} n\Phi = C_e n\Phi, \text{ [В]}, \quad (2.8)$$

где  $p$  – число пар полюсов;

$N$  – число проводников обмотки якоря;

$a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Таким образом,  $C_e = pN/60a$  – постоянная величина для данной машины.

Подставляя в уравнение (2.6) значение ЭДС из формулы (2.8), после очевидных преобразований получим

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{\sum R + R_p}{C_e \Phi} I_a, \text{ [об/мин]}. \quad (2.9)$$

Из формулы электромагнитного момента машины постоянного тока

$$M = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = C_m I_a \Phi, \text{ [н·м]}$$

следует, что

$$I_a = \frac{M}{C_m \Phi}, \text{ [А]},$$

где  $C_m$  – постоянная величина для данной машины;

$\Phi$  – магнитный поток главных полюсов.

Подставив значение тока  $I_a$  в выражение (2.9), получим зависимость частоты вращения двигателя от электромагнитного момента  $n = f(M)$ , т.е. выражение для механической характеристики двигателя постоянного тока:

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{\sum R + R_p}{C_e C_m \Phi^2} M = n_0 - \Delta n, \quad (2.10)$$

где  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ , [об/мин] – частота вращения идеального холостого хода двигателя;  $\Delta n = \frac{\sum R + R_p}{C_e C_M \Phi^2} M$  – изменение частоты вращения

двигателя при заданных значениях нагрузки и сопротивления регулирующего резистора в цепи якоря.

С достаточной для практики степенью точности магнитный поток главных полюсов  $\Phi$  в электродвигателях параллельного возбуждения можно считать величиной постоянной, не зависящей от нагрузки, если ток  $I_b$  обмотки возбуждения LM неизменен. Тогда механическая характеристика двигателя согласно уравнению (2.10) имеет прямолинейный характер (рис. 2.7).

Механическая характеристика, снятая при номинальном напряжении и при отсутствии резисторов в цепях якоря и возбуждения, является естественной. Рассмотрим далее искусственные механические характеристики, снятые при невыполнении этих условий.

На рис. 2.7 приведены механические характеристики двигателя параллельного возбуждения с резисторами, включенными в цепь якоря.

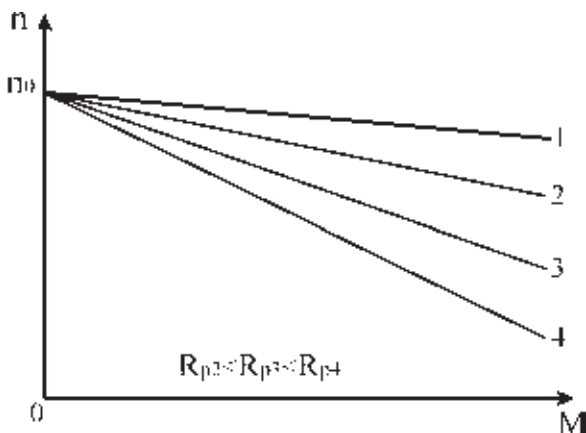


Рис. 2.7. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при изменении сопротивления

Прямая 1 ( $R_{p1} = 0$ ) соответствует естественной характеристике. Характеристики 2, 3, 4 сняты, соответственно, с резисторами  $R_{p2}$ ,

$R_{p3}, R_{p4}$ . При этом сопротивления  $R_{p2} < R_{p3} < R_{p4}$ . Таким образом, увеличение сопротивления цепи якоря при неизменных значениях напряжения и тока возбуждения приводит к увеличению наклона механической характеристики, т.е. уменьшению ее жесткости. Все характеристики при этом будут пересекаться в одной точке  $n_0$  на оси ординат, так как частота вращения идеального холостого хода от значения сопротивления цепи якоря не зависит.

Изменение магнитного потока  $\Phi$  при  $U = \text{const}$  и  $\sum R + R = \text{const}$ , согласно выражению (2.10), приводит к изменению как частоты вращения идеального холостого хода двигателя, так и наклона механической характеристики по отношению к оси абсцисс, т.е. величины  $\Delta n$ .

С уменьшением магнитного потока  $\Phi$ , что достигается введением в цепь обмотки возбуждения резистора  $R_b$ , частота вращения  $n_0$  возрастает, а наклон механической характеристики увеличивается, т.е. жесткость ее снижается. Прямые 1, 2, 3 на рис. 2.8 являются механическими характеристиками двигателя, снятыми соответственно при значениях магнитных потоков  $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ .

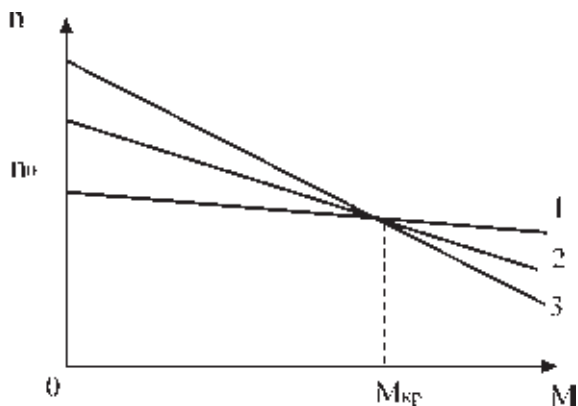


Рис. 2.8. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при изменении магнитного потока

Изменение напряжения  $U$  на зажимах цепи якоря двигателя при неизменных значениях магнитного потока  $\Phi$  и сопротивления цепи якоря ведет, согласно уравнению (2.10), к изменению частоты

ты вращения идеального холостого хода двигателя при неизменной жесткости механических характеристик. Прямые 1, 2 и 3 на рис. 2.9 являются механическими характеристиками, снятыми при напряжениях на зажимах цепи якоря соответственно  $U_1 > U_2 > U_3$ .

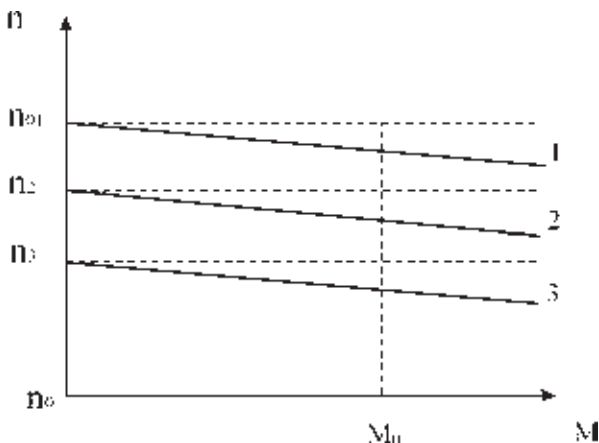


Рис. 2.9. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при изменении напряжения

**Б. Электродвигатели последовательного возбуждения.** Схема двигателя последовательного возбуждения представлена на рис. 2.10. В этом двигателе ток возбуждения равен току якоря ( $I_g = I_a$ ), поэтому магнитный поток  $\Phi$  является некоторой функцией тока якоря.

При токе якоря  $I_a < (0,8 - 0,9)I_{аном}$ , когда магнитная цепь машины не насыщена  $\Phi = \alpha I_a$ , причем коэффициент пропорциональности  $\alpha$  с достаточной степенью точности можно принять величиной постоянной.

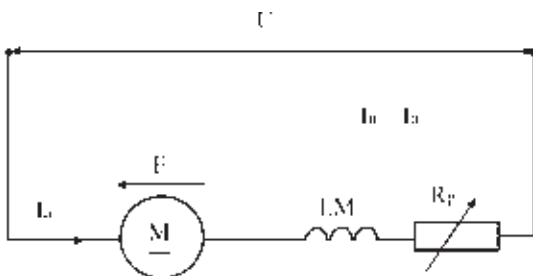


Рис. 2.10. Схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

При дальнейшем возрастании тока якоря и, следовательно, тока возбуждения происходит насыщение магнитной цепи машины, поэтому магнитный поток  $\Phi$  растет медленнее, чем ток  $I_a$ , а при больших нагрузках, когда  $I_a > I_{a\text{ном}}$ , можно принять, что  $\Phi = \text{const}$ .

Для линейного участка зависимости  $\Phi = f(I_a)$  можно записать, что

$$M = C_m \Phi I_a = C_m \alpha I_a^2 = c \Phi^2, \text{ где } c = C_m/\alpha.$$

Тогда уравнение механической характеристики для двигателя последовательного возбуждения запишется в виде

$$n = \frac{U\sqrt{c}}{C_e\sqrt{M}} - \frac{\sum R + R_p}{\alpha C_e}, \text{ [об/мин]}. \quad (2.11)$$

При  $U = \text{const}$  и  $R_p = \text{const}$ , получим

$$n = \frac{a}{\sqrt{M}} - b, \text{ [об/мин]}, \quad (2.12)$$

где

$$a = \frac{U\sqrt{c}}{C_e}; \quad b = \frac{\sum R + R_p}{\alpha C_e}.$$

Уравнение (2.12) представляет собой гиперболу. Напомним, что эта зависимость имеет место лишь при ненасыщенной машине, т.е. при малых нагрузках. В случае больших нагрузок машина насыщается, магнитный поток  $\Phi$  становится практически неизменным и механическая характеристика принимает линейную зависимость.

Если  $R_{p1} = 0$ , то при номинальном напряжении получим естественную механическую характеристику (кривая 1 на рис. 2.11).

Теоретически частота вращения идеального холостого хода двигателя ( $M = 0$ ) равна бесконечности.

Реальная частота вращения холостого хода ввиду наличия механических потерь и магнитного потока остаточного намагничивания ограничена, но она в 5–6 раз превышает номинальное значение.

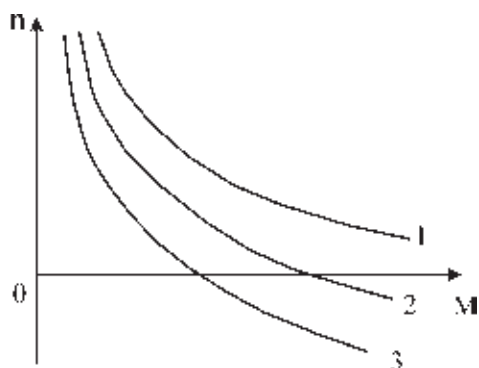


Рис. 2.11. Механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением при изменении сопротивления

По условиям механической прочности машины такая частота вращения недопустима, поэтому двигатель последовательного возбуждения нельзя пускать без нагрузки, а также нельзя снижать нагрузку во время работы менее, чем на 15–20% от номинального значения.

В случае одинаковых пусковых токов якоря пусковой момент двигателя последовательного возбуждения будет больше, чем у двигателя параллельного возбуждения, поскольку у первого при этом оказывается большим магнитный поток.

Изменение сопротивления цепи якоря приводит к изменению жесткости механических характеристик (см. рис. 2.11): с увеличением сопротивления резистора  $R_p$  жесткость характеристик уменьшается, что приводит к снижению частоты вращения и пускового момента электродвигателя. Если  $M_c = \text{const}$ , то снижение частоты вращения пропорционально увеличению сопротивления цепи якоря двигателя.

Изменение напряжения сети также вызывает изменение жесткости механических характеристик, частоты вращения и пускового момента электродвигателя. При снижении напряжения сети жесткость механических характеристик и пусковой момент двигателя снижаются.

Изменение магнитного потока двигателя можно осуществить шунтированием обмотки возбуждения ЛМ резистором  $R_{ш}$  (рис. 2.12).