

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Основные понятия

Для электродвигателя — привода вспомогательного оборудования, работающего с постоянной скоростью вращения, можно составить уравнение ЭДС:

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}}R_{\text{я}}. \quad (3.1)$$

Таким образом, подведенное к двигателю напряжение уравновешивается противоЭДС якорной обмотки $E_{\text{я}}$ и падением напряжения в цепи якоря. На основании уравнения (3.1) можно получить формулу для определения тока якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}. \quad (3.2)$$

Умножив обе части уравнения (3.1) на ток якоря $I_{\text{я}}$, получим уравнение мощности

$$UI_{\text{я}} = E_{\text{я}}I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2R_{\text{я}}, \quad (3.3)$$

где $UI_{\text{я}}$ — мощность в цепи обмотки якоря, Вт; $I_{\text{я}}^2R_{\text{я}}$ — мощность электрических потерь в цепи якоря, Вт.

Для выяснения сущности произведения $E_{\text{я}}I_{\text{я}}$ выполним следующее преобразование формулы (2.5) с учетом формул (1.4) и (1.35):

$$E_{\text{я}}I_{\text{я}} = \frac{pN}{60a} \Phi n I_{\text{я}} = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_{\text{я}} \quad (3.4)$$

или

$$E_{\text{я}}I_{\text{я}} = \frac{pN}{60a\pi} \Phi I_{\text{я}}\omega. \quad (3.5)$$

Известно, что

$$\frac{pN}{60a\pi} \Phi I_{\text{я}} = M, \quad (3.6)$$

тогда

$$E_{\text{я}}I_{\text{я}} = M\omega = P_{\text{эм}}, \quad (3.7)$$

где $\omega = \frac{2n\pi}{60}$ — угловая скорость вращения якоря, с^{-1} , $P_{\text{эм}}$ — электромагнитная мощность двигателя, кВт.

Следовательно, произведение $E_{\text{я}}U_{\text{я}}$ представляет собой электромагнитную мощность двигателя, численно равную той части мощности на входе двигателя, которая в процессе его работы преобразуется в механическую мощность, необходимую для вращения якоря.

Преобразовав уравнение (3.3) с учетом уравнения (3.7), получим

$$UI_{\text{я}} = M\omega + I_{\text{я}}R_{\text{я}}. \quad (3.8)$$

С увеличением нагрузки на вал двигателя, т.е. с увеличением электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$, возрастает мощность в цепи обмотки якоря $UI_{\text{я}}$ — мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным ($U = \text{const}$), то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря $I_{\text{я}}$.

В зависимости от способа возбуждения двигателя постоянного тока подразделяют на двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрические) и с электромагнитным возбуждением. Последние, в соответствии со схемой включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря, подразделяют на двигатели параллельного (шунтовые), последовательного (серийные) и смешанного (компаундные) возбуждения.

На вал двигателя действуют следующие моменты:

- вращающий (электромагнитный) момент $M_{\text{эм}}$, который приводит якорь двигателя во вращение, передаваемое через вал исполнительному механизму;

- момент холостого хода $M_{\text{хх}}$, обусловленный механическими (включая вентиляционные) и магнитными потерями в двигателе. Величина момента $M_{\text{хх}}$ не зависит от нагрузки, и в двигателях нормального исполнения она не превышает 2...6% от номинального значения вращающего момента $M_{\text{ном}}$;

- полезный момент M_2 , т.е. противодействующий момент механизма, приводимого в действие данным двигателем;

- динамический момент $M_{\text{д}}$, возникающий при всяком изменении частоты вращения якоря двигателя и обусловленный инерцией вращающихся частей двигателя и нагрузки. Динамический момент определяют по формуле

$$M_{\text{д}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.9)$$

где J — момент инерции всех вращающихся частей двигателя и нагрузки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, приведенный к валу двигателя и отнесенный к угловой скорости вращения ω .

Обычно моменты $M_{x,x}$ и M_2 рассматривают совместно как статический момент сопротивления вращению вала двигателя

$$M_{x,x} + M_2 = M_{ст}. \quad (3.10)$$

В общем случае уравнение моментов двигателя может быть записано как

$$M_{эм} = M_{x,x} + M_2 \pm M_d \quad (3.11)$$

или

$$M_{эм} = M_{ст} \pm M_d. \quad (3.12)$$

Знак «+» или «-» у динамического момента определяется характером изменения скорости: при увеличении скорости момент M_d складывается с моментом $M_{ст}$ (знак «+»), а при уменьшении скорости M_d действует встречно моменту $M_{ст}$ (знак «-»).

При неизменной скорости вращения якоря ($d\omega/dt = 0$) динамический момент $M_d = 0$, тогда уравнение моментов двигателя упростится:

$$M_{эм} = M_{x,x} + M_2 = M_{ст}, \quad (3.13)$$

т. е. в установившемся режиме работы вращающий момент двигателя и статический момент сопротивления на его валу взаимно уравновешиваются.

Вращающий момент двигателя пропорционален электромагнитной мощности, поэтому

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{P_{эм}}{2\pi n / 60} = \frac{60P_{эм}}{2\pi n} = 9,55 \frac{P_{эм}}{n}. \quad (3.14)$$

Величина полезного момента двигателя M_2 пропорциональна мощности двигателя P_2 , что дает возможность получить выражение для определения полезного момента, аналогичное выражению (3.14):

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n},$$

где M_2 — полезный момент, Н·м; P_2 — полезная мощность двигателя (мощность на валу), Вт; n — частота вращения якоря, об/мин.

На основании формулы для определения ЭДС $E_y = c_e \Phi n$, тогда частота вращения якоря двигателя

$$n = \frac{E_y}{c_e \Phi}. \quad (3.16)$$

Подставив в выражение (3.16) значение E_y из формулы (3.1), получим

$$n = \frac{U - I_y R_y}{c_e \Phi}, \quad (3.17)$$

где c_e — электрическая постоянная машины.

Таким образом, частота вращения якоря электродвигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения. Физически это объясняется тем, что увеличение напряжения U или уменьшение потока Φ вызывает увеличение разности $(U - E_{\text{я}})$, что, в свою очередь, ведет к увеличению тока $I_{\text{я}}$ (см. формулу (3.2)). Возросший ток $I_{\text{я}}$ увеличивает вращающий момент, и если при этом нагрузочный момент остается неизменным, то частота вращения якоря двигателя тоже увеличивается.

Следовательно, регулировать частоту вращения якоря двигателя можно, изменяя:

- напряжение U ;
- магнитный поток возбуждения Φ ;
- величину сопротивления якорной цепи $R_{\text{я}}$.

Направление вращения якоря определяется направлением магнитного потока возбуждения Φ и направлением тока в обмотке якоря. Поэтому, изменив направление того или другого, можно изменить направление вращения якоря. Следует иметь в виду, что переключение общих зажимов схемы у рубильника не дает изменения направления вращения якоря, так как при этом одновременно изменяется направление тока и в обмотке якоря, и в обмотке возбуждения.

При исследовании работы двигателей постоянного тока большое значение имеет зависимость частоты вращения якоря от вращающего момента $M_{\text{эм}} = M_{\text{х.х}} + M_2$. Эта зависимость графически выражается механической характеристикой двигателя $n = f(M_{\text{х.х}})$ при $U = \text{const}$ и $R_{\text{п.г}} = \text{const}$. Преобразуем выражение (3.17):

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_e \Phi} \quad (3.18)$$

и, подставив из формулы (2.6) значение тока $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{эм}}}{c_m \Phi}$, получим

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M_{\text{эм}} R_{\text{я}}}{c_e c_m \Phi^2}, \quad (3.19)$$

где c_m — электромашинная постоянная двигателя.

Из формулы (3.19) видно, что на рабочие характеристики двигателя существенно влияет способ возбуждения. Двигатель работает устойчиво, и якорь вращается с постоянной скоростью, если развиваемый им вращающий момент равен противодействующему моменту сопротивления:

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{ст}}. \quad (3.20)$$

Условие устойчивой работы двигателя формулируется следующим образом: при возрастании частоты вращения якоря прирост вращающего момента должен быть меньше прироста противодействующего момента:

$$\frac{dM_{эм}}{dn} < \frac{dM_{ст}}{dn}. \quad (3.21)$$

Обычно для выполнения этого условия необходимо, чтобы увеличение частоты вращения якоря двигателя сопровождалось уменьшением вращающего момента.

2. Двигатель параллельного возбуждения

Схема включения в сеть двигателя параллельного возбуждения показана на рис. 3.1. Реостат в цепи обмотки возбуждения $R_{р.г}$ служит для регулирования частоты вращения якоря двигателя. Так, при уменьшении сопротивления реостата увеличивается ток в обмотке возбуждения $I_{в}$, а следовательно, возрастает поток Φ , что согласно формуле (3.17) вызывает уменьшение частоты вращения якоря. При увеличении $R_{р.г}$ частота вращения якоря увеличивается. Зависимость частоты вращения от величины тока возбуждения выражается *регулирующей характеристикой двигателя*:

$$n = f(I_{в}) \text{ при } I = \text{const и } U = \text{const}.$$

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его *рабочими характеристиками*, под которыми понимают зависимость частоты вращения n , тока I , полезного момента M_2 , вращающего момента $M_{эм}$ от мощности на валу двигателя P_2 при $U = \text{const}$ и $I_{в} = \text{const}$ (рис. 3.2).

Для анализа зависимости $n = f(P_2)$, которая называется *скоростной характеристикой*, используем формулу (3.17). Из этой формулы видно, что при неизменном напряжении U на частоту вращения якоря влияют два фактора: падение напряжения в цепи якоря $I_{я}R_{я}$ и поток возбуждения Φ . При увеличении нагрузки уменьшается числитель в формуле (3.17), а вследствие увеличения реакции якоря уменьшается знаменатель. Обычно ослабление потока, вызванное реакцией якоря, невелико, и первый фактор влияет на частоту вращения сильнее, чем второй. В итоге частота вращения якоря с ростом нагрузки уменьшается. Если же усиление реакции якоря в двигателе сопровождается более значительным

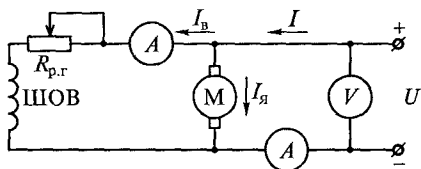


Рис. 3.1. Схема включения двигателя параллельного возбуждения

ослаблением потока Φ и $M_{эм}$, то частота вращения с увеличением нагрузки будет возрастать (пунктирная кривая на рис. 3.2). Однако такой характер зависимости $n = f(P_2)$ нежелателен, так как не удовлетворяет условию устойчивой работы двигателя (см. выражение (3.21)).

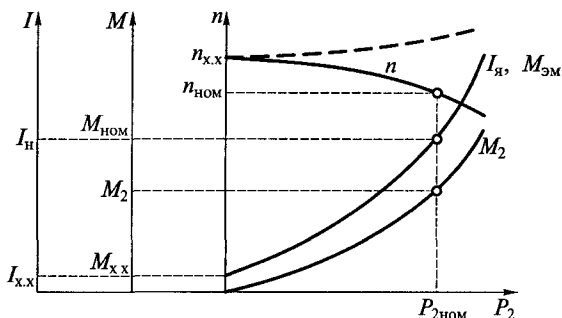


Рис. 3.2. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Чтобы скоростная характеристика имела вид падающей кривой, в некоторых двигателях параллельного возбуждения применяют легкую (с небольшим числом витков) последовательную обмотку возбуждения, которая называется *стабилизирующей* обмоткой.

При согласном включении этой обмотки с параллельной обмоткой возбуждения ее МДС компенсирует размагничивающее действие реакции якоря так, что поток Φ во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменным.

Изменение частоты вращения якоря при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах, называется *номинальным изменением скорости*

$$\Delta n = \frac{n_{x,x} - n_{ном}}{n_{ном}} 100, \quad (3.22)$$

где $n_{x,x}$ — частота вращения двигателя в режиме холостого хода, об/мин; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения двигателя, об/мин.

Обычно для двигателей параллельного возбуждения $\Delta n = 2 \dots 8 \%$, поэтому скоростную характеристику двигателя параллельного возбуждения называют *жесткой*.

Зависимость полезного момента M_2 от нагрузки отражена в формуле (3.15). При $n = \text{const}$ график $M_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой. Однако с увеличением нагрузки частота вращения якоря снижается, поэтому зависимость $M_2 = f(P_2)$ имеет нелинейный характер.

Согласно формуле (3.13), при $n = \text{const}$ вращающий момент двигателя $M_{эм} = M_{x,x} + M_2$. Так как рабочие характеристики двигателя строятся при условии $I_B = \text{const}$, что обеспечивает постоянство магнитных потерь в двигателе, то момент холостого хода тоже постоянен, т.е. $M_{x,x} = \text{const}$. Поэтому графики $M_{эм} = f(P_2)$ и $M_2 = f(P_2)$ проходят параллельно. Если принять поток $\Phi = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ является также выражением зависимости $I = f(P_2)$, поскольку $M_{эм} = c_m \Phi I_a$ (см. выражение (3.19)).

Если пренебречь реакцией якоря, то так как $I_b = \text{const}$, можно принять $\Phi = \text{const}$. Тогда механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет собой линию с небольшим наклоном к оси абсцисс.

Угол наклона тем больше, чем больше величина сопротивления, включенного в цепь якоря.

Механическая характеристика двигателя при отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря называется *естественной*, а при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря ($R_{я} + r_d$) — *искусственной*.

Устойчивость частоты вращения якоря и возможность ее плавной регулировки в широких пределах обеспечили двигателям параллельного возбуждения широкое применение на подвижном составе.

3. Двигатель последовательного возбуждения

В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря (рис. 3.3), поэтому магнитный поток Φ обмотки возбуждения зависит от тока якоря $I_{я}$.

При небольших нагрузках магнитная система машины ненасыщена, и потому изменение магнитного потока от тока якоря прямо пропорционально $\Phi = KI_{я}$, где K — коэффициент пропорциональности.

В этом случае выражение для определения электромагнитного момента можно записать как

$$M_{эм} = (c_m KI_{я}) I_{я} = c'_m I_{я}^2. \quad (3.23)$$

Подставив выражение (3.23) в выражение для частоты вращения (3.19), получим

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c'_m I_{я}^2} = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c'_m I_{я}^2}. \quad (3.24)$$

Таким образом, вращающий момент двигателя при ненасыщенном состоянии магнитной системы пропорционален квадрату тока якоря, а частота вращения обратно пропорциональна току нагрузки.

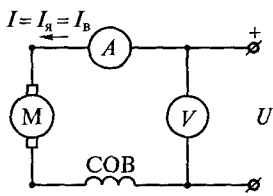


Рис. 3.3. Схема включения двигателя последовательного возбуждения

На рис. 3.4 представлены механические характеристики $M_{эм} = f(I_я)$ и $n = f(I_я)$ двигателя последовательного возбуждения. При больших нагрузках наступает насыщение магнитной системы двигателя. В этом случае магнитный поток при увеличении нагрузки практически не изменяется, и характеристика двигателя $M_{эм} = f(I_я)$ приобретает линейный характер.

Как видим, скоростная характеристика $n = f(I_я)$ двигателя последовательного возбуждения является *мягкой*, поскольку частота вращения якоря резко меняется при изменении нагрузки.

Следует иметь в виду, что при уменьшении нагрузки частота вращения якоря резко увеличивается — двигатель идет в «разнос». Поэтому работа двигателя последовательного возбуждения, а также его пуск при отсутствии нагрузки на валу **недопустимы**.

В качестве меры безопасности вал двигателя последовательного возбуждения должен быть жестко соединен с рабочим механизмом посредством муфты или зубчатой передачи. Применение ременной передачи недопустимо, так как при обрыве или сбросе ремня может произойти «разнос» двигателя. Свойство двигателя развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока якоря, имеет существенное значение, особенно в тяжелых условиях пуска и при перегрузках, так как при постепенном увеличении нагрузки двигателя мощность на входе растет медленнее, чем его вращающий момент.

Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой пусковой момент обусловило их широкое применение в качестве тяговых на тепловозах, электровозах и в различных подъемных устройствах.

Номинальное изменение частоты вращения якоря, %, последовательного возбуждения определяется по формуле

$$\Delta n_{ном} = \frac{n_{(0,25)} - n_{ном}}{n_{ном}} 100, \quad (3.25)$$

где $n_{(0,25)}$ — частота вращения при нагрузке двигателя, составляющей 25 % от номинальной, об/мин; $n_{ном}$ — частота вращения якоря при номинальной нагрузке, об/мин.

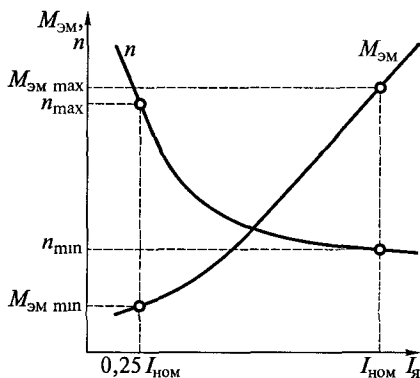


Рис. 3.4. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

Регулировать частоту вращения якоря двигателя последовательного возбуждения можно двумя способами: изменением напряжения питания U и изменением магнитного потока Φ обмотки возбуждения.

4. Двигатель смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения нашел наибольшее распространение в качестве привода агрегатов. Он имеет две обмотки возбуждения: параллельную (ШОВ) и последовательную (СОВ) (рис. 3.5). Частота вращения вала этого двигателя определяется по выражению (3.18) с учетом того, что

$$\Phi = \Phi_1 \pm \Phi_2,$$

где Φ_1 и Φ_2 — соответственно потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения, Вб.

Знак «+» соответствует согласному включению обмоток возбуждения (МДС обмоток складываются). В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток машины увеличивается (за счет потока последовательной обмотки Φ_2), что ведет к уменьшению частоты вращения якоря.

При встречном включении обмоток поток Φ_2 при увеличении нагрузки размагничивает машину (знак «-»), что, наоборот, увеличивает частоту вращения. Работа двигателя при этом становится неустойчивой, так как с увеличением нагрузки частота вращения неограниченно возрастает. Однако при небольшом числе витков последовательной обмотки с увеличением нагрузки частота вращения не возрастает и во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменной.

Механические характеристики двигателя смешанного возбуждения при согласном включении обмоток возбуждения (рис. 3.6) в сравнении с механическими характеристиками двигателя последовательного возбуждения имеют более жесткую характеристику.

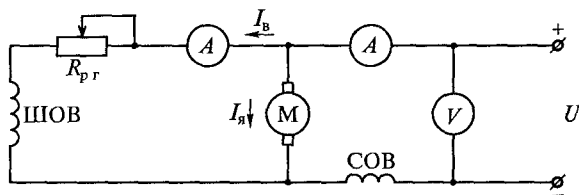


Рис. 3.5. Схема включения двигателя смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения имеет ряд преимуществ по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Например, этот двигатель может работать вхолостую, так как поток параллельной обмотки Φ ограничивает частоту вращения якоря в режиме холостого хода и устраняет опасность «разноса». Регулирование частоты вращения осуществляется реостатом $R_{\text{р}}$ в цепи параллельной обмотки возбуждения.

Однако наличие двух обмоток возбуждения увеличивает стоимость изготовления двигателя смешанного возбуждения по сравнению с двигателями предыдущих типов, что ограничивает его применение.

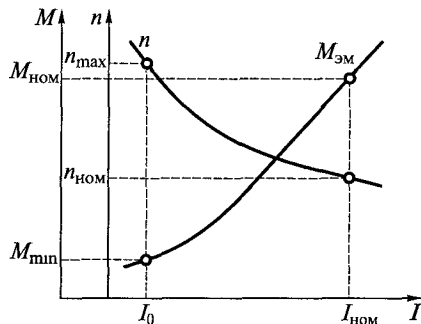


Рис. 3.6. Рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения

5. Торможение двигателей постоянного тока

При необходимости быстрой остановки или уменьшения скорости вращения якоря применяют его электродинамическое торможение.

Если внешний момент на валу двигателя становится вращающим, то частота вращения становится больше пограничной скорости $n_{\text{х}}$. При этом ЭДС $E_{\text{я}}$ начинает превышать напряжение сети U . В этом случае ток якоря $I_{\text{я}}$ изменяет свое направление, и машина переходит в генераторный режим. Электромагнитный момент машины также меняет свое направление и становится тормозящим по отношению к внешнему моменту, действующему на вал машины. Величина тормозного момента регулируется током возбуждения.

При электродинамическом торможении обмотку якоря двигателя отключают от сети и замыкают на нагрузочное сопротивление $R_{\text{н}}$. При этом механическая энергия вращающихся масс преобразуется в электрическую энергию, которая, в свою очередь, расходуется на нагрев сопротивления $R_{\text{н}}$ и других элементов цепи якоря. Ток якоря при динамическом торможении меняет свое направление на противоположное, а создаваемый им электромагнитный момент оказывает тормозящее действие на подвижные части приводного механизма.

При динамическом торможении двигателей последовательно возбуждения во избежание размагничивания машины необхо-

димо переключать обмотку возбуждения для того, чтобы направление тока в ней при переходе на динамическое торможение осталось неизменным.

Торможение противовключением (контрток) применяется при необходимости интенсивного торможения. Сущность его состоит в том, что путем изменения направления тока в обмотке возбуждения либо в обмотке якоря меняют направление электромагнитного момента двигателя, и он становится тормозящим. Обычно торможение противовключением предшествует изменению направления вращения якоря (реверсированию). Однако на практике такой режим работы электрической машины может вывести ее из строя.

Контрольные вопросы

1. Назовите отличительные признаки работы машин постоянного тока в режимах генератора и двигателя.
2. Укажите способы регулирования частоты вращения якоря электродвигателя.
3. Как производится реверсирование двигателей постоянного тока?
4. Проведите сравнение характеристик двигателей с различными схемами питания обмотки возбуждения