

ЛЕКЦИЯ 16. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока широко применяются в качестве двигателей и меньше в качестве генераторов. Это объясняется тем, что двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование частоты вращения простыми способами и, при равных токах, имеют больший вращающий момент, чем другие двигатели. Поэтому их используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте.

Генераторы и двигатели постоянного тока взаимно заменяемые. Однако применение генераторов ограничено. Их используют в промышленности (для питания электролитических ванн, для зарядки аккумуляторов, в прокатных станах), а также в составе электрооборудования подвижных средств (автомобильных, судовых, самолетных).

Как правило, машины постоянного тока – коллекторные. Поэтому их работа может сопровождаться возникновением дуги или множества мелких электрических разрядов. Такое явление называют *круговым огнем*. Искрение снижает надежность машин постоянного тока, требует дополнительных затрат на обслуживание, усложнения конструкции.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. 1. Конструкция машины.

Магнитная система двухполюсной машины постоянного тока приведена на рис 16.1. Как и на рис. 15.3, здесь обмотка возбуждения размещена на статоре, а рабочая обмотка – на роторе. Обмотка возбуждения состоит из двух последовательно соединенных катушек, каждая из которых размещается на своем полюсе. Катушки образуют цепь возбуждения, которая называ-

ется *вспомогательной цепью машины*.

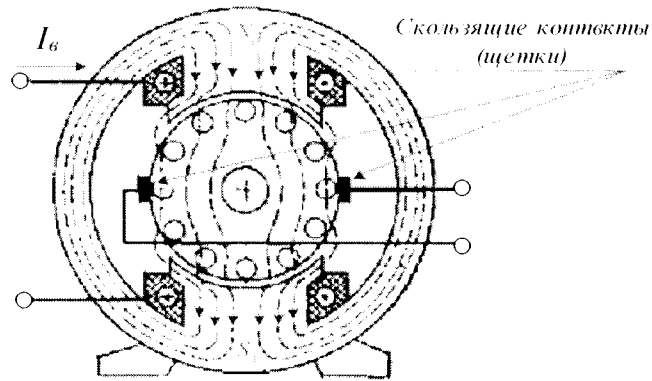


Рис. 16.1. Магнитное поле двухполюсной машины

На рис. 16.1 силовыми линиями изображено магнитное поле возбуждения. Магнитная система и поле машины симметричны относительно продольных осей полюсов N – S . Линия, проходящая посередине между смежными полюсами, называется *геометрической нейтралью*.

Ротор с рабочей обмоткой в машинах постоянного тока называют *якорем*. Для равномерного распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между полюсами и якорем используются *полюсные наконечники*. Обмотка якоря состоит из уложенных в пазах ротора активных проводников.

С помощью лобовых частей активные проводники соединяются в витки так, что обмотка образует замкнутый контур. Стороны витков расположены под разноименными полюсами так, что Э.Д.С. в них складываются. В реальных обмотках якоря число активных проводников большое. Обозначим это число N , тогда число витков равно $N/2$.

Для улучшения формы Э.Д.С. и для ее увеличения соседние витки объединяются в секции, как показано на рис. 16.2, по a витков в секции. Так как якорь вращается, то соединение его обмотки (секций) с внешней цепью осуществляется *скользящим контактом*, с помощью неподвижных электрографических *щеток*. Цепь якоря называют *главной цепью машины*.

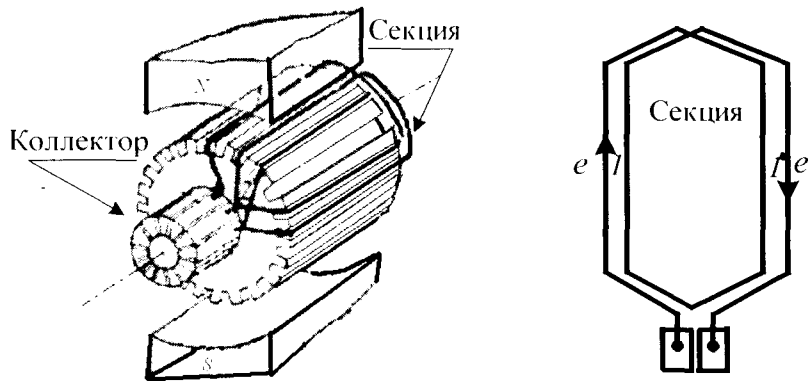


Рис.16.2. Пример укладки проводников и схема секции обмотки якоря

В реальных машинах выводы каждой секции соединяются с пластинами коллектора. Коллектор якоря имеет несколько десятков пластин (в общем случае $N/2a$). Поэтому щетки скользят по пластинам коллектора. Устанавливают их так, чтобы касание осуществлялось в точках, расположенных на линии геометрической нейтрали (рис.16.3).

При таком размещении обмотка якоря представляет собой замкнутый контур. Это хорошо видно по рис. 16.3, *а*. Щетками этот контур делится на две равные части так, что под каждым из полюсов находится равное число активных проводников.

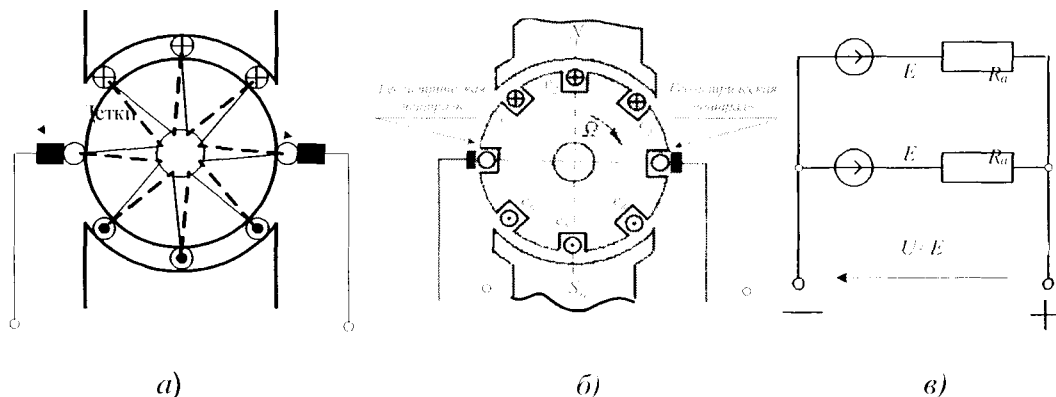


Рис. 16 .3 Схема (а), размещение простейшей обмотки якоря (б) и схема замещения обмотки (в)

При вращении ротора в каждой группе проводников будут наводиться одинаково направленные Э.Д.С., сумма которых максимальна и постоянна.

Схема замещения обмотки якоря приведена на рис. 16.3, в. Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных ветвей обмотки R_a называют внутренним сопротивлением якоря и обозначают $R_{я}$. Обычно оно не превышает единиц Ом.

1. 2. Работа машины в режиме генератора.

Чтобы машина постоянного тока работала как генератор, ее якорь необходимо вращать с помощью какого-либо приводного двигателя. В этом случае в активных проводниках якоря возникают Э.Д.С., направление которых можно определить по правилу правой руки. Значение Э.Д.С. в каждом из активных проводников определено выражением (15.2), которое имеет вид:

$$E = l \cdot v_{\text{омт}} \cdot B_{\delta}$$

где B_{δ} – действующее значение магнитной индукции в зазоре.

Если общее число проводников якоря равно N , а число параллельных ветвей $2a$, то каждая ветвь содержит $N/2a$ проводников. Тогда

$$E = l \cdot v_{\text{омт}} \cdot \sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta} \quad (16.1)$$

В (16.1) линейная скорость движения проводника определяется выражением:

$$v_{\text{омт}} = \frac{D}{2} \cdot \Omega, \quad (16.2)$$

где Ω – угловая скорость якоря.

Выразим сумму $\sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta}$ через среднее значение магнитной индукции

B_{cp} на полюсном делении τ :

$$\sum_{i=1}^{N/2a} B_{\delta} = \frac{N}{2a} \cdot B_{cp}, \quad (16.3)$$

где $B_{cp} = \frac{\Phi}{\tau \cdot l}$ – магнитный поток полюса; $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$ – полюсное деление.

Подставив (16.2) и (16.3) в (16.1), получим:

$$E = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot \Omega. \quad (16.4)$$

Обозначим первый множитель в (16.4) индексом c . Учтем, что $n = 60 \cdot \Omega / 2 \cdot \pi$ об/мин. Введем обозначение $c_E = p \cdot N / 60 \cdot a$. Тогда выражение (16.4) приходит к виду:

$$E = c_E \cdot n \cdot \Phi. \quad (16.5)$$

Теперь очевидно, что Э.Д.С. якоря пропорциональна частоте его вращения и магнитному потоку полюсов.

Если к зажимам якоря подключить приемник (рис.16.4, а), то Э.Д.С. якоря вызовет в цепи ток. Но на проводники с током, пересекающие магнитное поле, действует сила со стороны магнитного поля (электромагнитная сила).

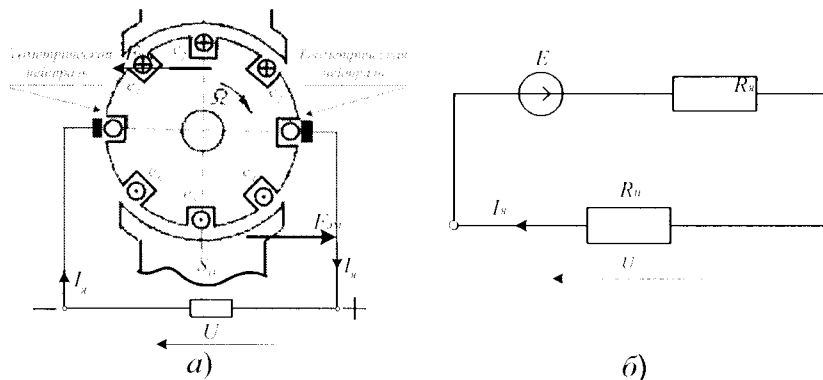


Рис.16.4. Принцип работы генератора (а), схема замещения якоря под нагрузкой (б)

Токи в проводниках якоря направлены так же, как и вызвавшие их Э.Д.С. Электромагнитные силы создают момент, противодействующий вращению якоря. Если скорость вращения якоря Ω постоянна, то вращающий момент приводного двигателя равен противодействующему электро-

магнитному моменту генератора:

$$M_{гр} = M_{пр} = M .$$

Таким образом, для производства электроэнергии машинами постоянного тока необходимо затрачивать механическую энергию.

Схема замещения генератора (рис. 16.4, б) позволяет записать равенство:

$$E = U + R_{я} \cdot I_{я} . \quad (16.6)$$

Умножим это выражение на $I_{я}$

$$E \cdot I_{я} = U \cdot I_{я} + R_{я} \cdot I_{я}^2 . \quad (16.7)$$

Первое слагаемое правой части (16.7) представляет мощность приемника, второе – мощность электрических потерь в обмотке якоря. Левая часть (16.7) составляет электромагнитную мощность, развиваемую генератором и равную механической мощности приводного двигателя.

1.3 Работа машины в режиме электродвигателя.

Чтобы машина постоянного тока работала как двигатель, необходимо подать напряжение от источника постоянного тока на обмотку якоря, как показано на рис. 16. 5. В обмотке якоря возникнет ток $I_{я}$. В результате взаимодействия тока $I_{я}$ с полем возбуждения появятся электромагнитные силы, создающие электромагнитный момент. Под действием этого момента якорь приходит во вращение. Машина работает в качестве электродвигателя.

Если скорость вращения ротора Ω постоянна, то вращающий момент равен противодействующему моменту на валу двигателя:

$$M_{гр} = M_{пр} = M .$$

В активных проводниках якоря, пересекающих магнитное поле возбуждения, наводится противо – Э.Д.С. Ее направление противоположно направлению тока якоря. Схема замещения якоря приведена на рис. 16.5. Она представляет замкнутый контур, для которого справедлив второй закон

Кирхгофа. Поэтому можем записать:

$$U = E + I_{я} \cdot R_{я}. \quad (16.8)$$

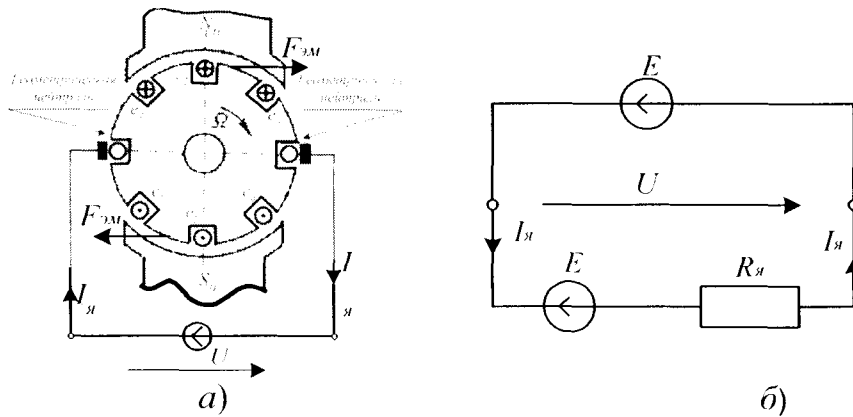


Рис.16.5. Принцип работы двигателя (а), схема замещения якоря двигателя (б)

Отсюда определим ток якоря двигателя:

$$I_{я} = (U - E) / R_{я}. \quad (16.9)$$

Уравнение баланса мощности цепи якоря имеет вид:

$$U \cdot I_{я} = E \cdot I_{я} + R_{я} \cdot I_{я}^2. \quad (16.10)$$

Выражение (16.10) показывает, что электрическая мощность $P_{эл} = U \cdot I_{я}$, подводимая к двигателю от внешнего источника, превращается в электромагнитную мощность $P_{эм} = E \cdot I_{я}$ и мощность потерь в обмотке якоря. Электромагнитная мощность равна механической мощности, развиваемой двигателем:

$$E \cdot I_{я} = P_{эм} = M \cdot \Omega. \quad (16.11)$$

Электромагнитный момент для двигателя и для генератора одинаков и определяется как момент машины постоянного тока. Для его определения обратимся к выражению (15.6), которое имеет вид:

$$F_{ср} = l \cdot B_{\delta} \cdot I_a$$

В поле одного полюса находится $N/2a$ проводников якоря с одинако-

вым током параллельной ветви $I_a = I_y/2a$. Все силы одинаково направлены по касательной к окружности якоря. Используя те же обозначения, что и при выводе формулы Э.Д.С. E , выразим момент сил, действующих на проводники одной ветви:

$$M_1 = \frac{D}{2} \cdot \sum_{i=1}^{N/2p} B_\delta \cdot I_a \cdot l = \frac{D \cdot l \cdot I_y}{4 \cdot a} B_{cp} \cdot \frac{N}{2 \cdot p} = \frac{N}{4 \cdot \pi \cdot a} \cdot I_y \cdot \Phi. \quad (16.12)$$

Общий момент машины в $2p$ раз больше M_1 :

$$M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I_y \cdot \Phi. \quad (16.13)$$

Проведенный анализ показал, что физические процессы, происходящие в генераторах и двигателях постоянного тока и определяющие преобразование энергии, одинаковы. Это объясняет их взаимозаменяемость. Однако, как генераторы, так и двигатели постоянного тока имеют специфические параметры, характеристики и особенности эксплуатации. Кратко рассмотрим эти особенности в следующих вопросах лекции.

2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Генератор постоянного тока – это источник электрической энергии. Качество источника определяется способностью плавно регулировать напряжение на выходе и сохранять его постоянным при изменении нагрузки. Количественно эти качества определяются *характеристикой холостого хода* $E(I_y)$ и *внешней характеристикой* $U(I)$ генератора.

Характеристика холостого хода определяет зависимость E , а значит, и магнитного потока возбуждения Φ от тока якоря I_y . Величина магнитного потока зависит от способа возбуждения генератора. Возбуждение магнитного поля в генераторах производится постоянными магнитами, током незави-

симого источника или током от якоря генератора. В последнем случае генераторы называются самовозбуждающимися. В таких генераторах обмотки возбуждения могут быть включены параллельно якорю (рис. 16.6, б), последовательно с ним (рис. 16.6, в) или параллельно и последовательно (рис. 16.6, г). В соответствии с этим различают генераторы независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

При независимом и параллельном возбуждении (рис. 16.6, а; б) обмотка выполняется из тонкого провода и имеет большое число витков. Сопротивление такой обмотки большое, а ток мал. Необходимая величина магнитодвижущей силы $F = \varpi_a \cdot I_a$ создается малой потребляемой мощностью обмотки возбуждения.

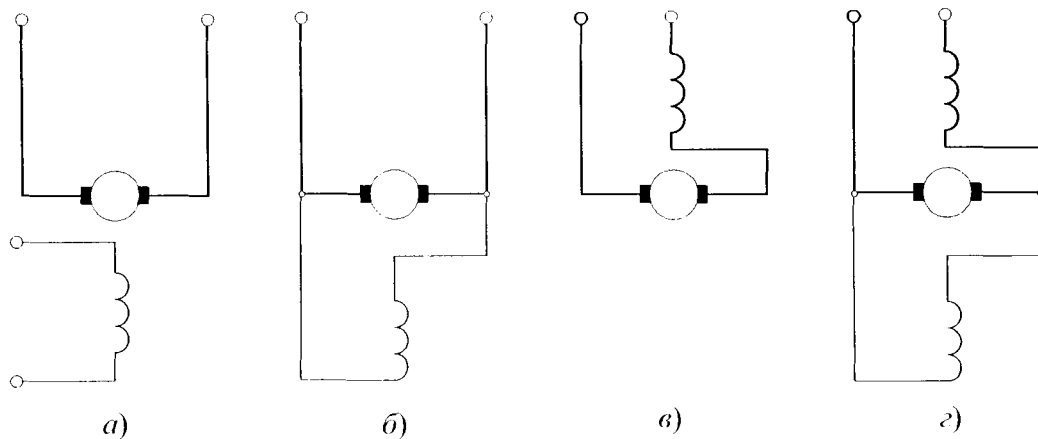


Рис. 16.6. Схемы возбуждения генераторов

Через обмотку последовательного возбуждения (рис. 16.6, в) проходит полный ток якоря. Чтобы потери энергии в обмотке были малы, ее выполняют из провода большого сечения. Число витков обмотки невелико.

В генераторах смешанного возбуждения (рис. 16.6, г) цепь обмотки возбуждения имеет две катушки – параллельную и последовательную.

Зависимость магнитного потока полюса Φ от тока возбуждения I_a называют магнитной характеристикой машины и определяют на основании закона полного тока или экспериментально. Так как магнитопровод генерато-

ра выполнен из магнитомягкого материала, то зависимость представляет узкую петлю гистерезиса. Обычно ее изображают одной линией (рис. 16. 7).

При $\Omega = const$ Э.Д.С. якоря пропорциональна магнитному потоку полюса (16.4). Поэтому зависимость $\Phi(I_c)$ подобна характеристике холостого хода генератора $E(I_c)$. На начальном участке характеристики магнитный поток Φ и Э.Д.С. E возрастают пропорционально току возбуждения I_c . С увеличением тока I_c наступает насыщение магнитопровода, рост магнитного потока (и Э.Д.С.) замедляется и кривая характеристики плавно наклоняется к оси токов. Магнитная цепь генераторов рассчитывается так, чтобы при $I_c = I_{ном}$ магнитный поток также соответствовал бы номинальному значению.

Внешняя характеристика генератора $U(I)$ строится при номинальном токе возбуждения $I_c = I_{ном}$. Такая характеристика для генератора независимого возбуждения приведена на рис. 16. 8. Она представляет прямую, наклоненную к оси токов и описывается равенством

$$U = E - R_{я} \cdot I.$$

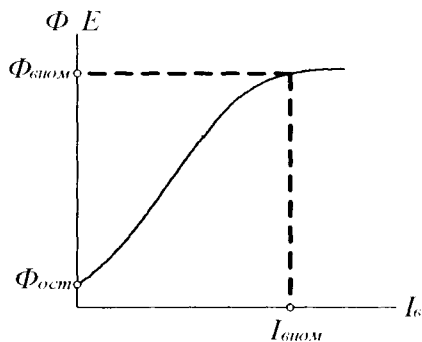


Рис. 16.7. Характеристика холостого хода генератора $E(I_c)$

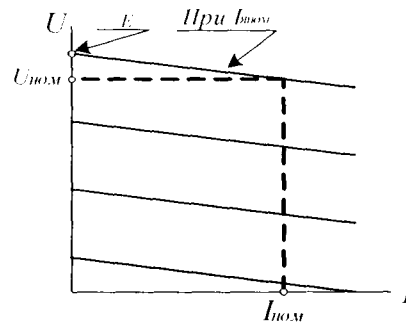


Рис. 16.8. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

В режиме холостого хода ($I = 0$) напряжение на выходе генератора равно E . С увеличением тока нагрузки I увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря $R_{я} \cdot I$, а напряжение на зажимах генератора уменьшается. Генераторы проектируют так, чтобы при номи-

нальном токе нагрузке напряжение уменьшалось не более чем на (6 – 12)%. Это значение напряжения считается номинальным.

Если характеристику $U(I)$ снимать при $I < I_{ном}$, то и значения E и U , при прочих равных условиях, будут меньше. Так получают семейство характеристик, приведенных на рис. 16.8. Видим, что генератор независимого возбуждения позволяет плавно регулировать напряжение на выходе, изменяя ток возбуждения.

Внешние характеристики генераторов иного возбуждения получают аналогично. Для примера, на рис. 16.9, а приведена характеристика генератора параллельного, а на рис. 16.9, б – смешанного возбуждения.

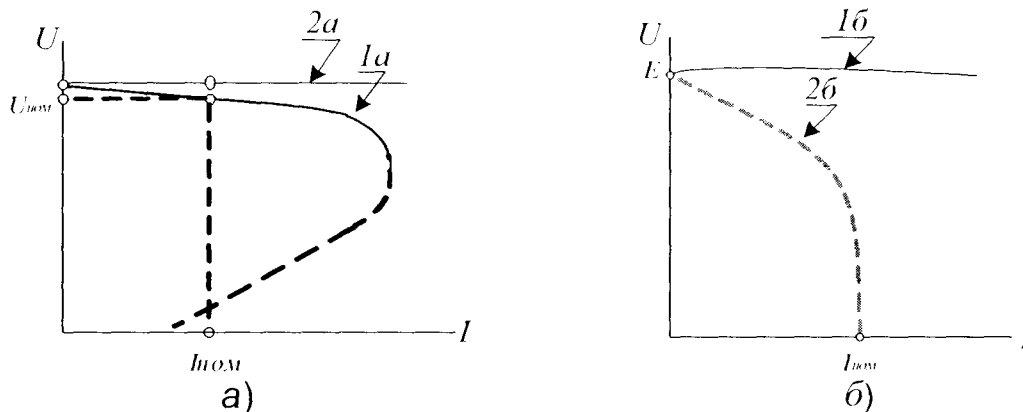


Рис. 16.9. Внешняя характеристика генератора параллельного ($1a$) и смешанного ($1b$) возбуждения. $2a$ - характеристика генератора независимого возбуждения; $2b$ - характеристика генератора смешанного возбуждения при встречном включении обмоток

3. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Это энергия вращения якоря двигателя. Она определяется угловой скоростью вращения $\Omega [c^{-1}]$ и вращающим моментом $M [Н·м]$. Поэтому основной характеристикой электродвигателя является механическая. *Механическая характеристика – это зависимость скорости Ω или частоты вращения n от вращающего момента (момента на валу)*

$\Omega(M)$ или $n(M)$.

Вращающий момент определен выражением (16.13). Из выражения следует, что момент зависит от тока якоря и от магнитного потока полюсов. Но эти величины определяются способом возбуждения. В настоящее время применяют двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Их обмотки возбуждения выполнены так же, как и у соответствующих генераторов. Это означает, что каждый из двигателей обладает механической характеристикой, отличающейся от других. Однако, всем электродвигателям присущи и общие свойства и процессы. К ним относятся:

- процессы пуска и регулирования;
- свойство саморегулирования;
- регулирование частоты вращения.

3.1. Общие свойства электродвигателей постоянного тока.

Пуском называют процесс разгона якоря двигателя от неподвижного состояния до установившегося значения скорости вращения. Пусковые качества двигателя характеризуют отношением пускового тока и пускового момента к их номинальным значениям.

В стационарном режиме, когда $\Omega = \Omega_{ном}$, ток якоря определяется по выражению (16.8):

$$I_{я} = (U - E) / R_{я}.$$

В момент включения на неподвижный якорь подается номинальное напряжение. Но в неподвижных проводниках против Э.Д.С. не наводится, т. е. $E = 0$. В этом случае

$$I_{я} = U / R_{я} \approx (10 \div 30) I_{яном}. \quad (16.14)$$

Такой большой ток (рис. 16.10) вызывает опасное искрение на коллекторе и очень большой пусковой момент

$$M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot I_{я} \cdot \Phi.$$

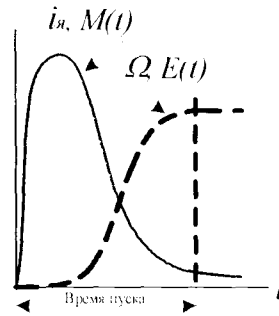


Рис. 16.10. Графики изменения $i_{я}$, $M(t)$, Ω и $E(t)$ при пуске двигателя

Физически это выражается как удар на валу, что отрицательно воздействует на передачу и механизм. Чтобы исключить этот недостаток, в схему двигателя включают пусковой реостат R_n , ограничивающий бросок тока до кратковременно допустимого значения

$$I_{я} = U / (R_{я} + R_n) \leq (2 \div 2.5) \cdot I_{ном}.$$

Бросок пускового тока длится недолго, так как с разгоном якоря возникает и увеличивается противо-Э.Д.С., уменьшающая ток. Пусковой реостат полностью выводят (уменьшая R_n до нуля), так как теперь он только увеличивает потери на нагрев.

Процесс пуска завершается, когда вращающий момент $M_{ср}$ становится равным противодействующему моменту на валу $M_{пр}$. Наступает статический режим, при котором соблюдается баланс мощностей.

С изменением нагрузки на валу изменяется противодействующий момент $M_{пр}$. Как следствие, нарушается равенство $M_{ср} = M_{пр}$, а двигатель переходит в динамический режим, при котором скорость вращения получает ускорение. Знак ускорения противоположен знаку разности $(M_{пр} - M_{ср})$. Например, если $M_{пр1} > M_{ср}$, начинается торможение двигателя. Вместе с уменьшением Ω происходит увеличение $M_{ср}$. Процесс продолжается до тех пор, пока не выполнится условие баланса мощностей при новых значениях

Ω и M , т. е.:

$$E \cdot I_{я} = M_{срл} \cdot \Omega_l,$$

причем $M_{срл} = M_{нрл}$.

Способность электродвигателя автоматически изменять скорость вращения якоря в соответствии с изменением нагрузки на валу называют *свойством саморегулирования*.

Очевидно, что направление вращающего момента определяет направление вращения якоря. В свою очередь, знак вращающего момента определяется знаками тока якоря и магнитного потока полюсов (16.13). Отсюда следует, что для изменения направления вращения (реверса) якоря достаточно переключить концы обмотки якоря.

3.2. Механические характеристики электродвигателей.

Механическая характеристика электродвигателя параллельного возбуждения может быть построена экспериментально. Для этого достаточно применить схему рис. 16.11. В этой схеме реостаты возбуждения и пуска позволяют регулировать токи возбуждения и пуска в широких пределах и, следовательно, получать данные во всем диапазоне изменения параметров.

Для более глубокого анализа свойств двигателя получим аналитическое выражение механической характеристики $n(M)$. Для этого выразим частоту вращения n из (16.5) и (16.8):

$$n = \frac{U - R_{я} \cdot I_{я}}{c_E \cdot \Phi} = \frac{U}{c_E \cdot \Phi} \cdot \left(1 - \frac{R_{я} \cdot I_{я}}{U} \right). \quad (16.15)$$

Введем обозначение

$$c_M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}.$$

Тогда на основании (16.13) можно записать:

$$I_{я} = \frac{M}{c_M \cdot \Phi}. \quad (16.16)$$

Применяя (16.16) к (16.15), получаем искомое выражение

$$n = n_0 \cdot \left(1 - \frac{M}{M_{\text{пю}}}\right), \quad (16.17)$$

где $n_0 = \frac{U}{c_E \cdot \Phi}$ — частота вращения при идеальном холостом ходе ($M_{\text{пр}} = 0$),

$M_{\text{пю}} = \frac{c_M \cdot \Phi \cdot U}{R_{\text{я}}}$ — начальный пусковой момент при пусковом токе $I_n = U/R_{\text{я}}$.

Из (16.17) следует, что механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет наклонную прямую (рис. 16.12), проходящую через точки n_0 на оси ординат и $M_{\text{пю}}$ на оси абсцисс графика. При номинальных значениях $U = U_{\text{ном}}$ и $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ характеристика называется *естественной*. Как следует из характеристики, при $M = M_{\text{ном}}$ частота вращения уменьшается на величину $(3 \div 7)\%$ от n_0 .

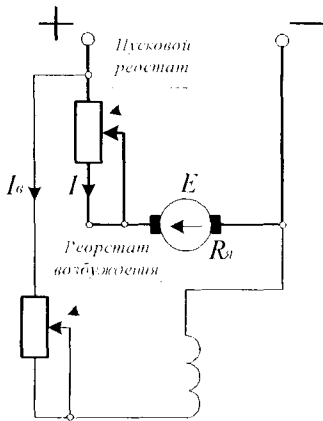


Рис. 16.11. Схема двигателя параллельного возбуждения

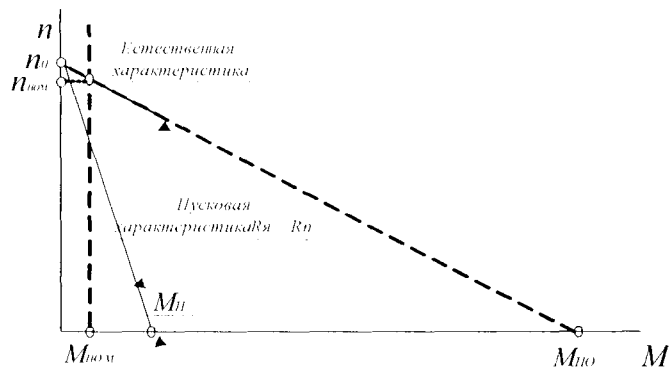


Рис. 16.12. Механическая характеристика двигателей параллельного и независимого возбуждения

При пуске двигателя с пусковым реостатом пусковой момент ограничивается до допустимого значения $M_{\text{п}}$. В этом случае механическая характеристика двигателя проходит через точки $M_{\text{п}} - n_0$ графика рис. 16.12 и называется *пусковой*. Когда пусковой реостат выводят ($R_{\text{п}} = 0$), двигатель переходит на естественную характеристику.

Выражение (16.15) показывает, что частоту вращения якоря двигателя

можно регулировать пусковым реостатом (изменяя ток якоря), реостатом возбуждения (изменяя магнитный поток возбуждения), а также изменением напряжения, подаваемого на якорь двигателя.

Механическая характеристика *двигателя независимого возбуждения* аналогична рассмотренной.

Схема для построения механической характеристики двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 16.13, *а*. Для вывода аналитического выражения этой характеристики учтем, что ток якоря и ток возбуждения в этом двигателе одинаковы и что $\Phi = I_a \cdot \overline{\omega}_c / R_M = \xi$ (здесь R_M – магнитное сопротивление магнитопровода двигателя). Применяя это значение Φ к (16.15), после преобразований получим

$$n = \frac{R_a + R_c}{c_M \cdot \xi} \cdot \left(\sqrt{\frac{M_{\text{НО}}}{M}} - 1 \right). \quad (16.18)$$

Полученное выражение показывает, что механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения имеет гиперболическую зависимость (рис. 16.13, *б*).

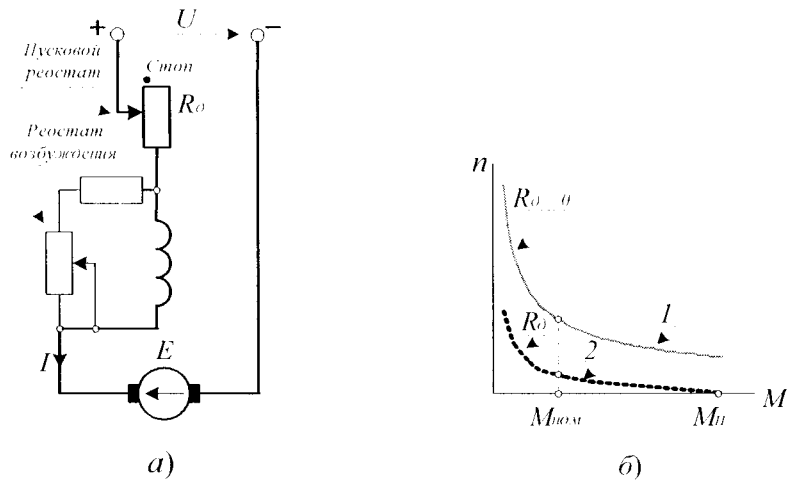


Рис. 16.13. Схема двигателя последовательного возбуждения (*а*) и его механическая характеристика (*б*)

Естественную механическую характеристику представляет кривая *1*. Видим, что при увеличении нагрузки частота вращения якоря уменьшается обратно пропорционально. Так как естественная характеристика формиру-

ется без пускового реостата ($R_s = 0$), то начальный пусковой момент $M_{п0}$ может быть очень большим. Эта точка выходит за рамки графика рис. 16.13, б. Поэтому пуск двигателя без нагрузки может привести к аварии из-за недопустимо большой частоты вращения якоря.

При пуске с реостатом, ограничивающим пусковой ток и момент до допустимых значений $M = M_n$, механическую характеристику представляет кривая 2.

Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения может выполняться реостатами пуска и возбуждения, а также изменением подаваемого напряжения.

Схема смешанного возбуждения дает двигателю преимущества каждого из способов и устраняет их недостатки.

ЛЕКЦИЯ 17. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Из общего перечня электрических машин переменного тока (рис. 15.2) большее распространение нашли асинхронные и синхронные машины. Несмотря на различия в устройстве, эти машины имеют много общего в принципе работы. Их принцип действия основан на использовании двух явлений: на явлении искусственно созданного вращающегося магнитного поля и на воздействии этого поля на проводники с токами.

Асинхронные машины используют, в основном, как двигатели. Трехфазные асинхронные двигатели находят самое широкое применение в различных областях народного хозяйства. Их широкое распространение обусловлено простотой конструкции и надежностью в работе. Недостатком