

Тема № 2

ДПТ НВ

1. Устройство, принцип работы двигателя постоянного тока ДПТ.
2. Выводы уравнения скоростных и механических характеристик ДПТ НВ (ПВ – параллельным возбуждением).
3. Искусственные скоростные и механические характеристики ДПТ НВ (параллельным возбуждением)
4. Построение естественной скоростной и механической характеристики ДПТ с НВ по паспортным данным.
5. Тормозные режимы ДПТ НВ. Механические характеристики тормозных режимов.
6. Расчет пусковых сопротивлений ДПТ с независимым (параллельным) возбуждением аналитическим методом.

1. Устройство, принцип работы двигателя постоянного тока ДПТ.

На рис. 2.1 показано устройство двигателя постоянного тока (ДПТ) средней мощности. Неподвижная часть электрической машины называется статором, вращающаяся часть – якорем. Эти части разделены воздушным зазором.

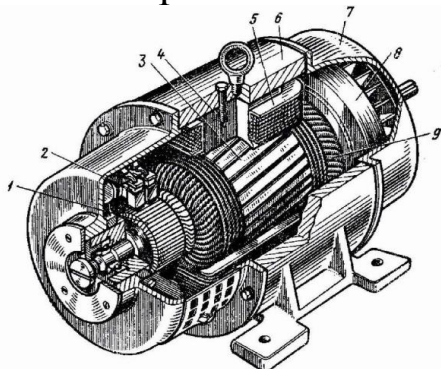


Рис. 2.1. Устройство ДПТ

Статор состоит из станины 6, на внутренней поверхности которой расположены главные полюса 4, прикрепленные к станине болтами. Станина, помимо механической нагрузки, выполняет роль элемента магнитной цепи и служит для замыкания магнитного потока. Станина изготавливается из стали или чугуна - материалов, в которых сочетается высокая механическая прочность с большой магнитной проницаемостью.

Главные полюса машины состоят из сердечника полюса, полюсного наконечника и катушки возбуждения 5. Сердечник полюса может быть литым, но чаще его набирают из штампованных листов электротехнической стали, стягивая их шпильками. Полюсный наконечник обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Катушка полюса изготавливается из медного изолированного провода. Катушки всех главных полюсов электрически соединяются, образуя обмотку возбуждения, питаемую постоянным током. В машинах малой мощности главные полюса могут выполняться в виде постоянных магнитов. Полярность полюсов чередуется. Число полюсов $2p$ всегда четное. В теории обычно рассматриваются двухполюсные машины, так как процессы под каждой парой полюсов идентичны, хотя в реальных машинах число полюсов может быть больше двух. В машинах мощностью свыше 1 кВт между главными полюсами устанавливают дополнительные полюса для уменьшения искрения под щетками.

Сердечник якоря 3 (рис. 2.1) представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы стали оксидируются или покрываются изолирующим лаком для уменьшения потерь на вихревые токи, которые возникают в результате вращения якоря в магнитном поле. Листы стали имеют пазы для укладки обмотки. Часто пазы якоря делают со скосом (рис. 2.1), что ослабляет пульсацию магнитной индукции в воздушном зазоре и способствует уменьшению вибраций и шума в процессе работы.

Обмотка якоря 9 состоит из секций (катушек), выполненных из медного изолированного провода. Концы обмотки якоря присоединяются к коллектору 1, укрепленному на валу. Коллектор представляет собой

набор медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. В машинах малой и средней мощности пластины коллектора часто запрессовывают в пластмассу. На коллектор налегают щетки 2. Щетки располагаются в щеткодержателях и прижимаются к коллектору пружинами. Щетки соединены с коробкой выводов клеммной платой.

Помимо указанных частей машина имеет подшипниковые щиты: передний (со стороны коллектора) и задний 7 (с противоположной стороны). Подшипники обычно применяются шариковые и роликовые (со стороны привода). Для охлаждения машины служит встроенный вентилятор 8.

Принцип работы двигателя постоянного тока основан на электромагнитном взаимодействии неподвижного магнитного потока возбуждения Φ с током $I_{я}$, протекающим по обмотке якоря. На каждый из проводников с током действует электромагнитная сила и создается результирующий электромагнитный момент

$$M = c\Phi I_{я} \quad (2.4)$$

c - конструктивный коэффициент, зависящий от конструктивных параметров машины.

Этот момент заставляет ротор вращаться, направление момента и скорости совпадают.

При вращении проводников якоря в поле возбуждения в каждом из них наводится ЭДС вращения и с щеток снимается результирующая ЭДС обмотки якоря.

$$E = c\Phi\omega \quad (2.4)$$

ω - угловая скорость якоря. В режиме двигателя ЭДС направлена навстречу к току якоря.

Электродвигатели постоянного тока подразделяются по способу присоединения обмотки возбуждения к якорю на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. (2.3)

2. Выводы уравнения скоростных и механических характеристик ДПТ НВ (ПВ – параллельным возбуждением).

Из курса электрических машин известно, что при установившемся режиме работы двигателей **приложенное** к якорной цепи напряжение уравнивается наводимой в якоре эдс (электродвижущей силой) и падением напряжения на сопротивлениях в цепи якоря.

$$U = E + I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}}) \quad (\text{из 2 закона Кирхгофа}) \quad (2.4)$$

Электродвижущая сила пропорциональна угловой скорости, а электромагнитный момент пропорционален току якоря, т.е.

$$E = c\Phi\omega \quad \text{и} \quad M = c\Phi I_{\text{я}} \quad (2.4)$$

где U – напряжение, подведенное к якорной цепи двигателя, V ;

$I_{\text{я}}$ – ток, протекающий по обмотке якоря, A ;

E – электродвижущая сила (ЭДС), наводимая в обмотке якоря, V ;

M – электромагнитный момент двигателя, Hm ;

$r_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом ;

$R_{\text{д}}$ – добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря, Ом ;

c – конструктивная постоянная обмотки якоря;

Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Vc ;

ω –угловая скорость двигателя, c^{-1} .

Подставим значение ЭДС из ($E = c\Phi\omega$) в первое выражение ($U = E + I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})$) и решим его относительно тока якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} - \frac{c\Phi}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} \omega \quad (2.4)$$

Полученное выражение представляет собою зависимость тока от угловой скорости.

Зависимость тока от угловой скорости принято называть **скоростной или электромеханической характеристикой двигателя постоянного тока**. Умножив обе части выражения ($I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} - \frac{c\Phi}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} \omega$) на $c\Phi$, получим зависи-

мость момента, развиваемого двигателем от угловой скорости, называемую механической характеристикой $M = \frac{Uc\Phi}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} - \frac{(c\Phi)^2}{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}} \omega$ (2.4)

Уравнения скоростных и механических характеристик в общем виде справедливы для двигателей постоянного тока всех систем возбуждения.

Свойства характеристик отдельных типов двигателей определяются схемой присоединения обмотки возбуждения.

3. Искусственные скоростные и механические характеристики ДПТ НВ (параллельным возбуждением)

Механические и электромеханические (скоростные) характеристики двигателей при номинальных параметрах (номинальном напряжении, номинальном магнитном потоке и отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря) называются естественными.

При изменении любого из этих параметров характеристики приобретают новые свойства и называются искусственными.

Искусственные характеристики при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря

При введении добавочного сопротивления в цепь якоря выражение ($M = \frac{Uc\Phi}{r_a + R_d} - \frac{(c\Phi)^2}{r_a + R_d} \omega$) можно выразить через угловую скорость как:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_a + R_d}{(c\Phi)^2} M \quad (2.6)$$

Сомножитель $\frac{r_a + R_d}{(c\Phi)^2}$ при моменте есть коэффициент, который характеризует собою угол наклона механической характеристики к положительному направлению оси скорости.

Угловая скорость двигателя состоит из двух слагаемых. Первый из них, называемая скоростью идеального холостого хода, может быть достигнута при отсутствии нагрузки на валу двигателя и момента сопротивления трения (идеальный холостой ход, $M=0$)

$$\omega_o = \frac{U}{c\Phi} \quad (2.6)$$

Вторая составляющая в выражении ($\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_a + R_d}{(c\Phi)^2} M$), пропорциональна нагрузке; Вторая составляющая показывает на сколько падает скорость с увеличением нагрузки. Эта составляющая называется статическим падением (перепадом) скорости.

$$\Delta\omega = \frac{(r_a + R_d)}{(c\Phi)^2} M \quad (2.6)$$

Таким образом, выражение ($\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_a + R_d}{(c\Phi)^2} M$) можно представить как

$$\omega = \omega_o - \Delta\omega \quad (2.6)$$

Из выражения статического падения скорости ($\Delta\omega = \frac{(r_a + R_d)}{(c\Phi)^2} M$) следует, что при определенном значении момента статический перепад скорости будет тем больше, чем больше добавочное сопротивление в якорной цепи. Такие характеристики носят название резисторных.

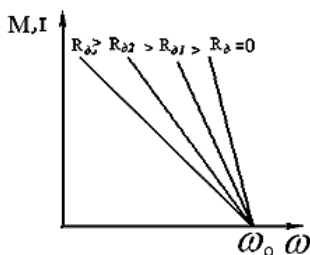


Рис. 2.7 Естественные и искусственные механические и скоростные характеристики ДПТ НВ ($R = \text{var}$)

На рис. М.16 показаны: *естественная механическая характеристика при $R_d=0$ и искусственные при $R_d>0$, причем с увеличением сопротивления наклон характеристик увеличивается, жесткость их уменьшается.*

При как следует из $(\omega = \omega_i - \Delta\omega)$, все они пересекаются в точке идеального холостого хода ω_0 .

Искусственные характеристики при изменении напряжения на якоре

Из выражения ($\omega_0 = \frac{U}{c\Phi}$ 2.6) видно, что изменение подводимого к цепи якоря напряжения приводит к пропорциональному изменению скорости идеального холостого хода. *Подавать на токоприемники напряжение выше номинального не принято, т.к. это может привести к негативным последствиям: увеличивается вероятность пробоя изоляции, искрения щеток и др. С понижением подводимого напряжения скорость идеального холостого хода уменьшается.*

Из ($\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_a + R_o}{(c\Phi)^2} M$ 2.6) мы так же видим, что коэффициент при переменной (угловой коэффициент) остается неизменным, характеристики смещаются в сторону уменьшения скорости, оставаясь между собою параллельными. *На рис. 2.8 показаны механические и скоростные характеристики этих двигателей, из которых видно, что жесткость их остается неизменной.*

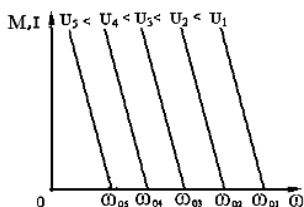


Рис. 2.8 Механическая и скоростные характеристики ДПТ НВ ($U = \text{var}$)

Искусственные характеристики при изменении магнитного потока

При регулировании тока возбуждения путем изменения напряжения на зажимах обмотки, или сопротивления $R_{ш}$ (см. рис. 2.9) изменяется основной магнитный поток двигателя. Величина магнитного потока считается номинальной при номинальном напряжении на зажимах обмотки возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в этой цепи. Поэтому Под регулированием магнитного потока следует понимать его уменьшение. Как видно из выражения ($I_a = \frac{U}{r_a + R_o} - \frac{c\Phi}{r_a + R_o} \omega$) при любом значении магнитного потока тип уравнения скоростных характеристик не изменяется, следовательно, они остаются линейными. Пусковой ток (ток при скорости, равной нулю) от величины магнитного потока не зависит, тогда как согласно $(\omega_0 = \frac{U}{c\Phi})$ скорость идеального холостого хода с уменьшением магнитного потока увеличивается. Характеристики двигателя, как показано на рис. 2.9 (сплошные линии),

При регулировании тока возбуждения путем изменения напряжения на зажимах обмотки, или сопротивления $R_{ш}$ (см. рис. 2.9) изменяется основной магнитный поток двигателя. Величина магнитного потока считается номинальной при номинальном напряжении на зажимах обмотки возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в этой цепи. Поэтому Под регулированием магнитного потока следует понимать его уменьшение. Как видно из выражения ($I_a = \frac{U}{r_a + R_o} - \frac{c\Phi}{r_a + R_o} \omega$) при любом значении магнитного потока тип уравнения скоростных характеристик не изменяется, следовательно, они остаются линейными. Пусковой ток (ток при скорости, равной нулю) от величины магнитного потока не зависит, тогда как согласно $(\omega_0 = \frac{U}{c\Phi})$ скорость идеального холостого хода с уменьшением магнитного потока увеличивается. Характеристики двигателя, как показано на рис. 2.9 (сплошные линии),

выходят из одной точки и проходят с тем меньшим наклоном к оси абсцисс, чем меньше магнитный поток.

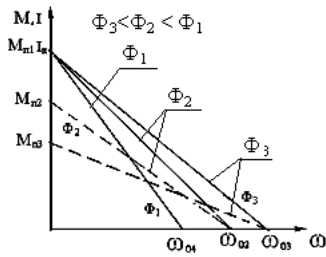


Рис. 2.9 Механические и скоростные характеристики ДПТ НВ ($\Phi = var$)

Механические характеристики при изменении магнитного потока согласно $(M = \frac{Uc\Phi}{r_a + R_d} - \frac{(c\Phi)^2}{r_a + R_d} \omega$

доска!) также остаются линейными. Из выражения $(\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_a + R_d}{(c\Phi)^2} M)$ видно, что при моменте,

равном нулю, скорость идеального холостого хода с уменьшением магнитного потока увеличивается, а пусковой момент, определяющийся как произведе-

ние неизменного пускового тока на магнитный поток, уменьшается. На **рис. 2.9** штриховыми линиями показаны искусственные механические характеристики при изменении магнитного потока.

4. Построение естественной скоростной и механической характеристики ДПТ с НВ по паспортным данным.

В паспорте двигателей постоянного тока приводятся основные номинальные величины: мощность— P_n , напряжение— U_n , ток— I_n , частота вращения— n_n , к.п.д.— η_n . Ввиду линейности характеристик двигателей (ДПТ) для их построения достаточно иметь координаты двух точек, которые вычисляются по паспортным данным.

Координатами для построения естественных характеристик по паспортным данным являются: M_n, ω_n и $M=0, \omega_0$.

Координаты первой точки вычисляются из соотношений:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} \quad \text{и} \quad M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (2.10)$$

Для построения второй точки скорость идеального холостого хода можно найти, воспользовавшись выражением: $\omega_0 = \frac{U_n}{c\Phi}$ (2.10)

Значение $c\Phi$ вычисляется из уравнения скоростной характеристики ($I_a = \frac{U}{r_a + R_o} - \frac{c\Phi}{r_a + R_o} \omega$ (2.10), если принять входящие в него величины номинальными, а добавочные сопротивления, равными нулю:

$$c\Phi = \frac{U_n - I_n r_a}{\omega_n} \quad (2.10)$$

r_a — сопротивление обмотки якоря, которое вычисляется, исходя из предположения, что при номинальной нагрузке потери в обмотке якоря (потери в меди) приблизительно равны половине общих потерь в двигателе, т.е

$$r_a = 0,5 \cdot \frac{U_n}{I_n} \cdot (1 - \eta_n) \quad (2.10).$$

8. Тормозные режимы ДПТ с НВ. Механические характеристики тормозных режимов.

Роль электродвигателей далеко не исчерпывается их способностью к преобразованию электрической энергии в механическую с целью приведения в движение исполнительных органов рабочих машин. Электрические машины обладают свойством обратимости, т.е. могут работать в двигательном, генераторном или тормозном режимах. *Производство нуждается в средствах торможения не меньше, чем в средствах для осуществления движения. Возможность быстрой и плавной остановки рабочей машины, удержание частоты вращения в определенных пределах, нагрузочное устройство при испытаниях двигателей внутреннего сгорания, остановка механизма в заданном месте или в заданное время – вот далеко не полный перечень направлений, в которых электродвигатель выступает в качестве средства торможения. Электрифицированный транспорт применяет тормозные режимы тяговых электродвигателей для ограничения скорости на спусках и для остановок.* Возможность использования приводных электродвигателей для торможения освобождает от необходимости применять какие-либо специальные средства. Это значительно упрощает конструкцию приводов, повышает их надежность и производительность, безопасность и экономичность, улучшает качество выпускаемой продукции.

Известны следующие режимы торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения: 1- генераторный тормозной режим с отдачей электрической энергии в сеть (рекуперативный тормозной режим), 2- генераторный тормозной режим с отдачей энергии сопротивлению, включенному последовательно с сетью (торможение противовключением), 3 – генераторный тормозной режим с отдачей электрической энергии автономному потребителю (динамический тормозной режим). Рассмотрим более подробно каждый из этих тормозных режимов:

Двигательный режим характеризуют соотношения:

$$\omega_0 > \omega > 0; \quad E < U; \quad I = \frac{U - E}{R} > 0; \quad M > 0; \quad P = UI > 0 \quad (2.11)$$

Когда скорость двигателя положительна и меньше скорости идеального холостого хода, (E) э.д.с. будет меньше приложенного напряжения, ток якоря и вращающий момент на валу двигателя также положительны.



Рис. 2.16 Режим идеального холостого хода

В двигательном режиме развиваемый момент совпадает с направлением скорости. (Рис 2.12)

Режим идеального холостого хода

Если к валу двигателя, включенного для работы в двигательном режиме, будет приложен положительный момент со стороны исполнительного механизма, то под действием эти двух моментов

скорость двигателя станет увеличиваться. С увеличением скорости увеличивается э.д.с. и снижается ток якоря. По достижении двигателем скорости идеального холостого хода э.д.с. станет равной приложенному напряжению, а ток, момент и мощность двигателя будут равны нулю.

$$E = c\Phi\omega_0 = U; I = 0; M = 0; P = 0 \quad (2.13)$$

Генераторный тормозной режим (рекуперативный) с отдачей электрической энергии в сеть

Под действием момента со стороны исполнительного механизма скорость двигателя становится больше скорости идеального холостого хода, а э.д.с. больше приложенного напряжения. Ток в цепи якоря изменяет свое направление, а следовательно, направление момента двигателя и мощности изменятся на противоположное, т.е. переходит в **генераторный (рекуперативный) режим**:

$$\omega > \omega_0; E > U; I = \frac{U - E}{R} < 0; M < 0, P = UI < 0 \quad (2.13)$$

Отрицательный знак момента при положительной скорости говорит о его тормозном характере, а смена знака у мощности – о том, что двигатель отдает электрическую энергию в сеть, т.е. о его генераторном режиме. Увеличение скорости происходит до наступления равенства тормозного момента двигателя и момента исполнительного механизма.

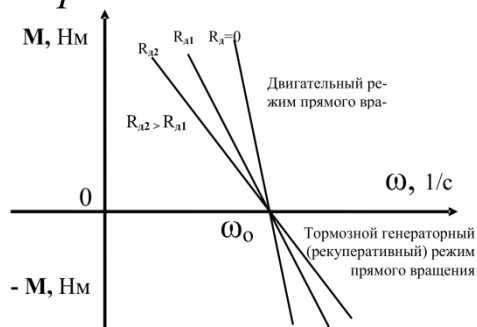
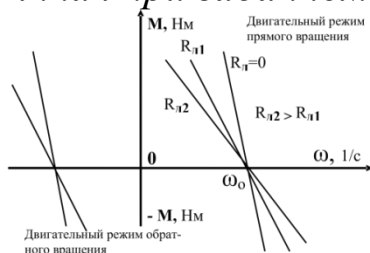


Рис. 2.14 Механическая характеристика рекуперативного тормозного режима ДПТ НВ

Механических и скоростных характеристик при этом не меняются, их графики, как и в двигательном режиме, остаются линейными и при положительном знаке скорости идеального холостого хода переходят из первого в четвертый квадрант (рис. 2.14).

В этом тормозном режиме двигатели могут работать как на естественных, так и на искусственных характеристиках, то есть характеристики тормозного режима являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима. ($\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{r_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{(c\Phi)^2} M$) (на доске...) Наклон (жесткость) механических характеристик определяется множителем второго члена уравнения $(r_{\text{я}} + R_{\text{д}})/(c\Phi)^2$, жесткость постоянная при заданном сопротивлении $R_{\text{д}}$.



(2.15)

Поскольку электрические машины являются реверсивными, при обратном вращении, как показано на рис. 2.15, характеристики двигательного режима располагаются в третьем, а рекуперативного тормозного во втором квадрантах.

Такой способ торможения возможен: в приводах транспортных и подъемных механизмов при спуске груза, при некоторых способах регулирования скорости. Так при понижении напряжения пока двигатель, переходит от высшей скорости ω_{o1} к низшей ω_{o2} , он работает в тормозном режиме пока $\omega > \omega_{o2}$. Этот тормозной режим является весьма экономичным, поскольку он не связан с возникновением дополнительных потерь (за вычетом обычных потерь в двигателе) и сопровождается отдачей электрической энергии в сеть.

Для получения динамического режима, необходимо обмотку якоря отключить от источника питания (сети) и замкнуть ее на внешнее сопротивление.

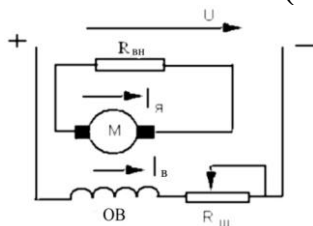


Рис. 2.16 Схема динамического тормозного режима

2.17

При работе в двигательном режиме на естественной характеристике с нагрузкой M_c в точке статического равновесия точке 1. Ток в якоре и развиваемый двигателем момент имеют положительные знаки.

Если обмотку якоря отсоединить от источника питания и замкнуть на внешнее сопротивление $R_{вн}$ (рис 2.16), образуется схема генератора с независимым возбуждением. При вращении якоря под действием э.д.с. ток в якоре изменит свое направление. Момент, развиваемый двигателем, становится отрицательным, т.е. тормозным, а его начальное значение в зависимости от величины внешнего сопротивления $R_{вн}$ будет соответствовать точкам 2, 3 и т.д. Под действием этого тормозного момента скорость двигателя уменьшается до нуля.

Механическая энергия, подводимая к валу двигателя, преобразуется вначале в электрическую, затем в тепловую на сопротивлениях якорной цепи. Параметры, определяющие работу двигателя в этом режиме:

$$I_{я} = \frac{0 - c\Phi\omega}{r_{я} + R_{вн}} < 0; \quad M = c\Phi I_{я} < 0 \quad P = UI < 0 \quad (2.18)$$

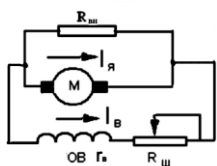
Подставляя значение тока в выражения момента и мощности получаем уравнения скоростной и механической характеристик для динамического тормозного режима:

$$I = -\frac{c\Phi\omega}{r_{я} + R_{вн}} \quad M = -\frac{(c\Phi)^2\omega}{r_{я} + R_{вн}} \quad (2.18.1 \text{ и } 2.18.2)$$

Уравнения (2.18.1 и 2.18.2) являются линейными и графики проходят через начало координат. Наклон характеристик при постоянном магнитном потоке зависит от величины внешнего сопротивления: при $R_{вн} = \infty$ (обмотка якоря разомкнута) ток в якоре и тормозной момент отсутствуют, при $R_{вн} = 0$ (обмотка якоря замкнута накоротко) харак-

теристики тормозного режима параллельны естественным характеристикам двигательного режима.

На рисунке сплошными линиями показаны характеристики динамического торможения для двигателей с независимым возбуждением при некоторых промежуточных значениях внешних сопротивлений.



2.19

Динамический тормозной режим возможен также по схеме с самовозбуждением, когда обмотка возбуждения также отключается от независимого источника и включается параллельно с обмоткой якоря. При этом ток в обмотке возбуждения и магнитный поток определяются величиной Э.Д.С., которая в свою очередь зависит от скорости:

$$I_a = -\frac{c\Phi}{r_a + \frac{r_g R_{вн}}{r_g + R_{вн}}} \omega \quad M = -\frac{(c\Phi)^2}{r_a + \frac{r_g R_{вн}}{r_g + R_{вн}}} \omega \quad (2.20)$$

Здесь r_g – сопротивление обмотки возбуждения.

Умножая обе части выражения для тока на $c\Phi$, получим уравнение механической характеристики для тормозного режима.

Эти характеристики, представляют собою сложные зависимости токов и тормозных моментов от скорости из-за нелинейной зависимости насыщения стали сердечников.

Динамическое торможение обеспечивает надежное и плавное торможение механизмов. Применяется на металлорежущих станках, транспортных средствах, лифтах. Оно достаточно экономично, хотя и уступает в этом отношении генераторному торможению с отдачей энергии в сеть.

Режим торможения противовключением возможен двумя способами: реверсом двигателя и тормозным спуском. Оба способа по физическим процессам, протекающим в двигателе, не отличаются друг от друга. При реверсировании меняют полярность напряжения якоря или обмотки

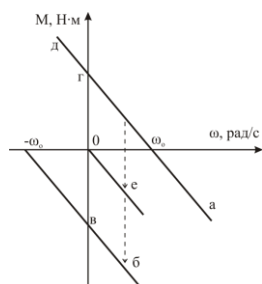


Рис.2.2.1 Механические характеристики ДПТ НВ

возбуждения. Обладавший определенным моментом инерции, двигатель продолжает вращаться в прежнем направлении и ЭДС E сохраняет свое направление. При этом ЭДС E и напряжение U направлены в одну сторону, а ток под их действием изменяет знак на противоположный, что вызывает изменение направления момента, который в данном случае будет тормозным (рис. 2.21 участок характеристики - б, в).

Режим торможения будет продолжаться до момента остановки электродвигателя точка характеристики - в), после чего, если электродвигатель остается включенным, он переходит в двигательный режим обратного включения участок характеристики - в, - ω_0).

При втором способе, со стороны рабочей машины прикладывается

сила противоположная по направлению, которая притормаживает двигатель. По мере уменьшения оборотов двигателя уменьшается ЭДС E до 0 в момент остановки вращения двигателя, при это напряжение U приложенное к якорю остается неизменным. Режим торможения начнется с момента остановки электродвигателя, после того как обороты двигателя станут отрицательными (рис. 2.21 участок характеристики - г, д).. При этом ЭДС E и напряжение U становятся направлены в одну сторону, а ток под их действием изменяет знак на противоположный, что вызывает изменение направления момента, который в данном случае будет тормозным.

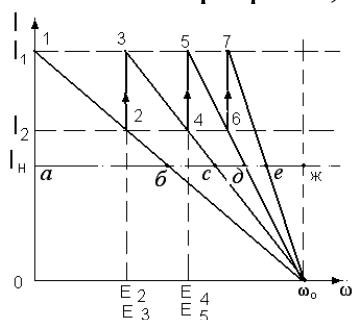
Торможение противовключением обычно применяется в приводах подъемно-транспортных машин для спуска грузов и торможения на уклонах. Для реверсивных приводов, где торможение и пуск двигателя в обратном направлении представляют собой единый процесс, целесообразно применять торможение реверсированием, которое дает выигрыш во времени.

6. Расчет пусковых сопротивлений ДПТ с НВ.

Естественные механические и скоростные характеристики ДПТ с независимым и параллельным возбуждением в двигательном и тормозных режимах, благодаря малым сопротивлениям якорных обмоток, обладают высокой жесткостью, поэтому при скорости, равной и близкой к нулю, токи и моменты достигают больших величин, во много раз превосходящих их номинальные значения. Чрезмерные величины токов и моментов губительно сказываются на работе двигателей и могут привести к выходу из строя (*повышенному искрению щеток, вплоть до появления кругового огня, разрушению обмоток двигателя, срезанию шпонок и шлицев, скручиванию валов и т.д.*).

Для ограничения величины пусковых токов и моментов - при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимым и с параллельным возбуждением осуществляются при введении в цепь якоря добавочных (пусковых) сопротивлений.

По мере разбега двигателя ток якоря уменьшается вследствие увеличения **противо-э.д.с.** и пусковые сопротивления постепенно отключаются. После отключения последней ступени двигатель выходит на естественную характеристику. Изменение тока в процессе пуска двигателя показано на графике, который называется **пусковой диаграммой**.



Пусковая диаграмма ДПТ НВ (2.26)

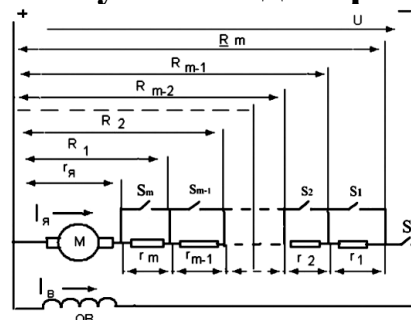


Схема пуска ДПТ НВ (2.27)

Количество ступеней сопротивлений, а также пределы изменения тока в процессе пуска зависят от требований, **предъявляемых рабочей машиной к двигателю**. Если **рабочая машина** допускает большие ускорения и существенное их изменение при пуске, то пределы изменения тока могут быть значительными, а количество ступеней пускового сопротивления будет невелико. И наоборот, для рабочих машин, требующих плавного нарастания скорости, диапазон колебания пусковых токов и моментов должен быть небольшим, что ведет к увеличению числа ступеней пусковых резисторов.

Расчет сопротивлений предусматривает: определение полного добавочного сопротивления (R_m), числа ступеней (m) и сопротивления каждой ступени пускового резистора (r).

При отсутствии особых условий, значения токов I_1 и I_2 обычно принимаются:

$$I_1 = (2,0...2,5)I_n, \quad I_2 = (1,1...1,3)I_n$$

I_1 - максимальное допустимое значение тока для данного двигателя при пуске.

I_2 - переменное значение тока и подбирается так чтобы обеспечить целое кратное количество пусковых ступеней.

Необходимо соблюдать условия, чтобы токи в процессе пуска изменялись в пределах от I_1 до I_2 и после отключения последней ступени обеспечивался выход на естественную характеристику при токе I_1 .

Как видно из пусковой диаграммы (рис. 2.22) при скорости, равной нулю, пусковой ток якоря равен максимальному I_1 . Когда при разбеге ток достигнет значения I_2 (ток переключения), происходит отключение ступени пускового резистора, в результате чего ток скачком увеличивается до значения I_1 , и так до выхода на естественную характеристику в точке 7.

На (рис 2.23) приведенной схеме пуска двигателя изображены ступени пускового резистора, отключаемые контактами $S1, S2$ и т.д. Сопротивления ступеней обозначены малыми буквами латинского алфавита $r_1, r_2...r_m$, а сопротивления обмотки якоря со ступенями пускового резистора большими буквами $R_m, R_{m-1}...R_1$. Здесь m —число ступеней пускового резистора.

Расчет пусковых сопротивлений для двигателя постоянного тока производится в следующем порядке:

1. Определяются пусковые токи I_1 и I_2 и их кратность $\lambda = I_1/I_2$. (2.24)
2. По паспортным данным двигателя вычисляется сопротивление обмотки якоря и добавочных полюсов

$$r_a = 0,5 \frac{U_n}{I_n} (1 - \eta_n). \quad (2.24)$$

Здесь η_n —номинальный к.п.д. двигателя.

3. Определяется полное сопротивление якорной цепи при пуске

$$R_m = U_n / I_1 \quad (2.24)$$

4. Определяется число ступеней пускового резистора, которое необходимо

округлить до целого числа m_1 : $(m = \frac{\ln \frac{R_m}{r_a}}{\ln \lambda})$ (2.25) Если m окажется не целым, его необходимо округлить до целого числа – m_1 .

5. Определяется новая кратность пусковых токов, соответствующая целому числу ступеней m_1 . $(\lambda_1 = m_1 \sqrt{\frac{R_m}{r_a}})$ (2.25)

6. Определяем определяется фактическое значение тока переключения I_2 .

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda_1} \quad (2.26)$$

7. По соотношениям (2.26) рассчитываются сопротивления ступеней пускового резистора.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = r_{\text{я}} \lambda_1^{m_1-1} (\lambda_1 - 1), \\ r_2 = r_{\text{я}} \lambda_1^{m_1-2} (\lambda_1 - 1), \\ \dots \\ r_{m-1} = r_{\text{я}} \lambda_1 (\lambda_1 - 1), \\ r_m = r_{\text{я}} (\lambda_1 - 1). \end{array} \right.$$

В тормозных режимах, обычно, применяются сопротивления с одной ступенью.

Для их расчета задаются параметры торможения: режим торможения, тормозной ток (или момент) и скорость.

При генераторном (рекуперативном) торможении добавочное сопротивление определяется из выражения:

$$R_{\text{рек}} = \frac{U - c\Phi\omega_{\text{рек}}}{I_{\text{рек}}} - r_{\text{я}} \quad (2.27)$$

Здесь $I_{\text{рек}}$ — ток при торможении, задается с отрицательным знаком;
 $\omega_{\text{рек}}$ — угловая скорость при торможении.

При динамическом торможении сопротивление торможения определяется из при напряжении в числителе, равном нулю

$$R_{\text{д}} = \frac{|-c\Phi\omega_{\text{д}}|}{I_{\text{д}}} - r_{\text{я}}. \quad (2.27)$$

Здесь при определении полного сопротивления якорной цепи принимается абсолютное значение дроби.

Сопротивление торможения противовключением определяется из с учетом отрицательного знака скорости

$$R_{\text{np}} = \frac{U - c\Phi(-\omega_{\text{np}})}{I_{\text{np}}} - r_{\text{я}}. \quad (2.27)$$