

10. Как составляется характеристическое уравнение цепи?
11. Что такое постоянная времени переходного процесса?
12. В чем заключается методика определения постоянных интегрирования?
13. При каких условиях в цепи с резистивным, индуктивным и емкостным элементами возникает апериодический, критический, колебательный процесс?
14. Как возникает явление перенапряжения в электрической цепи?
15. Как возникает явление сверхтока в электрической цепи?
16. Приведите примеры использования переходных процессов в электротехнике.

ТЕМА 5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

5. 1. Характеристики двигателей постоянного тока

5.1.1. Назначение и области применения двигателей постоянного тока

Машины постоянного тока используются в промышленности так же широко, как и машины переменного тока. Несмотря на то, что стоимость их выше, чем машин переменного тока, они обладают лучшими эксплуатационными характеристиками в отношении регулирования частоты вращения, пуска и допускают более высокие перегрузки. В основном машины постоянного тока используются в качестве двигателей. В связи с широким применением автоматизированного электропривода и применением тиристорных преобразователей, позволяющих питать электродвигатели постоянного тока регулируемым напряжением от сети переменного тока, эти двигатели наиболее удобны в эксплуатации. Номинальные мощности машин постоянного тока составляют от долей ватт до 12 Мвт, а номинальные напряжения не превышают 1500 В. Частота вращения таких машин колеб-

лется в широких пределах – от нескольких оборотов до нескольких тысяч оборотов в минуту. Эти устройства используются для привода различных механизмов на транспорте (электровозы, тепловозы, поезда, электромобили, на морских и речных судах), в черной металлургии (прокатные станы, транспортеры), станкостроении, в системах автоматического регулирования и т. д. Основной конструктивной особенностью, отличающей машины постоянного тока, является наличие щеточно-коллекторного аппарата, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надежность работы машины.

Основные серии машин постоянного тока общего назначения — 2П и 4П. Помимо этих серий выпускаются серии краново-металлургических двигателей и серии специального назначения. Серия 2П включает двигатели мощностью от 0,13 до 200 кВт с высотой оси вращения 90-135 мм. Для замены серии П габаритов 12-26 выпускается серия П2. Двигатели серий 2П и 4П выпускаются на напряжение 110, 220, 340 и 440 В, на номинальные частоты вращения 750, 1000, 1500, 2200 и 3000 об/мин. Машины выполняются в защищенном исполнении с самовентиляцией и независимой вентиляцией от постороннего вентилятора; в закрытом исполнении – с естественным охлаждением и наружным обдувом от постороннего вентилятора.

Двигатели серии 2П имеют независимое возбуждение и компенсационную обмотку, обеспечивающую большие кратковременные перегрузки и широкий диапазон изменения частоты вращения. А общее число модификаций двигателей постоянного тока с каждым годом возрастает. Перечислим лишь некоторые из них. Для металлургических, крановых, экскаваторных и других приводов выпускаются двигатели серии Д. Они имеют мощности от 2,5 до 185 кВт, напряжением 220 и 440 В, номинальные частоты вращения 400–1440 об/мин. Эти двигатели обладают малым моментом инерции и обеспечивают регулирование частоты вращения в широких пределах. Для электроприводов шагающих экскаваторов выпускаются

двигатели типа МПВЭ-450-29; для привода механизма подъема и тяги – двигатель типа МПЭ-1000-630 УХЛЗ; для буровых установок – двигатель типа ДЭВ-808; для морских буровых установок в морском взрывозащищенном исполнении – двигатель типа ММП-1000-1000МЗ; серия ПЛ включает двигатели независимого возбуждения мощностью от 30 до 600 Вт, напряжением 110 и 220 В и частотой вращения 1400 и 2700 об/мин; микродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами имеют серию ДПМ от долей ватта до десятков ватт, напряжением 12,14 и 27 В; малоинерционные исполнительные микродвигатели постоянного тока имеют якорь, выполненный в виде полого цилиндра или диска, и относятся к серии ДПР [6].

5.1.2. Классификация двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока классифицируются по способу включения обмотки возбуждения: независимого возбуждения, параллельного (шунтового) возбуждения, последовательного (сериесного) возбуждения и смешанного (компаундного) возбуждения [5, 6]. Принципиальные схемы этих двигателей представлены на рис. 5.1.

В машинах с параллельным возбуждением обмотка возбуждения присоединяется параллельно к зажимам якоря. Ток возбуждения I_e при нормальных условиях работы составляет по отношению к току якоря от 5 % у машин малой мощности, до 1 % у машин большой мощности. Так как обмотка возбуждения включается непосредственно под напряжение U , а ее ток во много раз меньше тока якоря, то сопротивление обмотки возбуждения $R_b = U / I_b$ должно быть относительно велико. Для регулирования тока в обмотке возбуждения последовательно с ней включается реостат – так называемый шунтовой регулятор. Для машин параллельного возбуждения характерным является относительное постоянство основного магнитного потока и его малая зависимость от нагрузки машины.

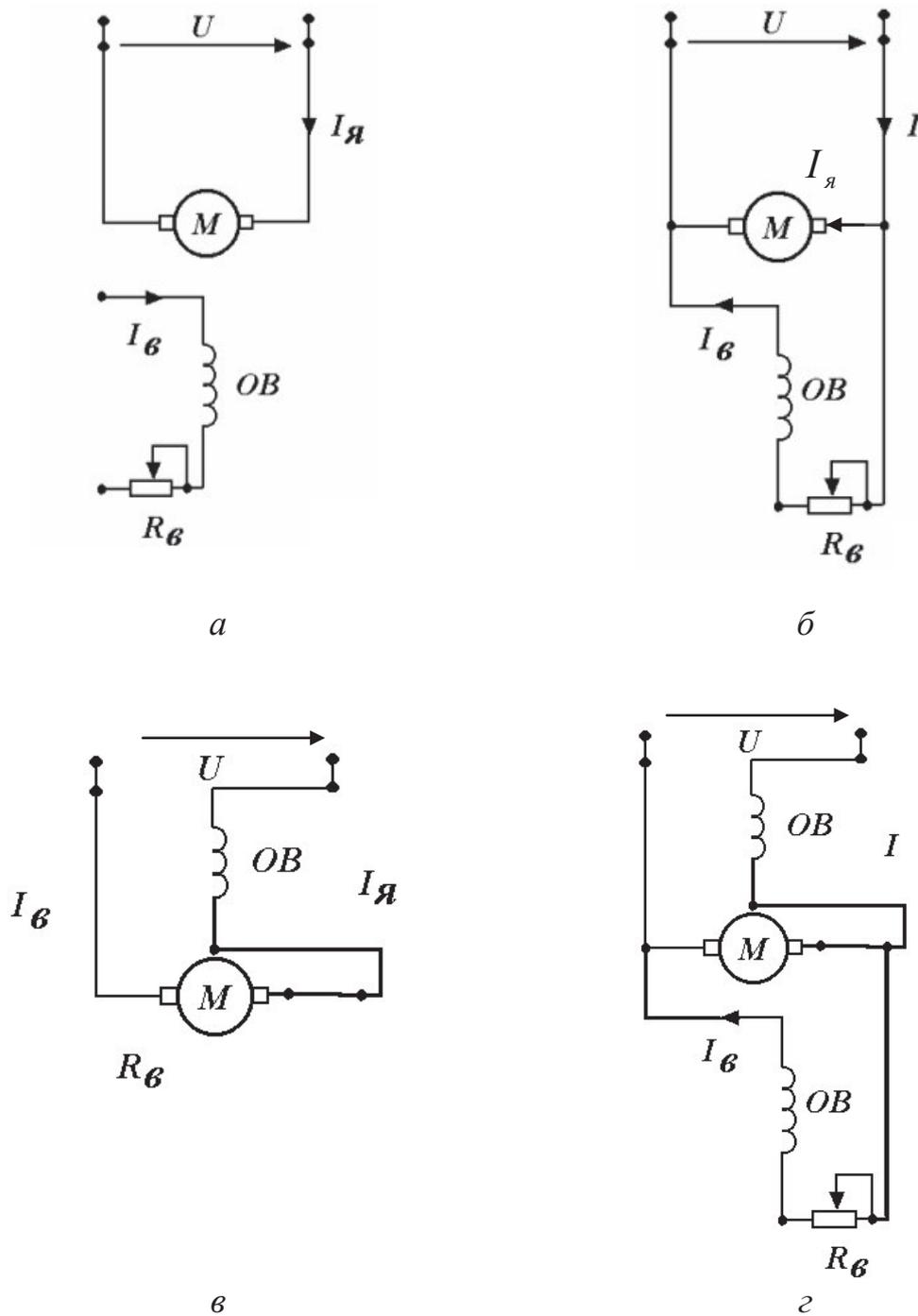


Рис. 5.1. Схемы замещения двигателей постоянного тока с различным способом возбуждения: а – с независимым; б – с параллельным; в – последовательным; г – смешанным

В машинах последовательного возбуждения весь ток якоря проходит через обмотку возбуждения. Поэтому она выполняется проводом относительно большого сечения и имеет небольшое сопротивление. В этих ма-

шинах магнитный поток изменяется в широких пределах в зависимости от изменения нагрузки.

Машины смешанного возбуждения имеют две обмотки последовательно соединенную с якорем и параллельную. В зависимости от назначения такой машины одна из обмоток является основной, имеющей относительно большой полный ток, а вторая служит лишь для относительно слабого дополнительного воздействия на главное поле машины. Таким образом, машина смешанного возбуждения может быть по своим характеристикам в основном машиной параллельного возбуждения с небольшой последовательной обмоткой или же машиной последовательного возбуждения с небольшой параллельной обмоткой (например, двигатель смешанного возбуждения с мягкой механической характеристикой). В случае смешанного возбуждения обмотки машины могут иметь согласное соединение, если оба магнитных потока от двух обмоток складываются, или встречное соединение, если их магнитные потоки вычитаются.

В машинах независимого возбуждения ток возбуждения не зависит от напряжения на зажимах якоря машины, поскольку обмотка возбуждения получает ток от независимого источника возбуждения.

По ряду свойств машины с независимым возбуждением весьма мало отличаются от машин с параллельным возбуждением. К преимуществам машин с независимым возбуждением относится возможность регулирования частоты вращения изменением питающего напряжения при фиксированном токе возбуждения.

Ток якоря $I_{я}$ в двигателях независимого и последовательного возбуждения равен току I , потребляемому двигателем из сети, а в двигателях параллельного и смешанного возбуждения $I_{я} = I - I_{\sigma}$ (I_{σ} – ток, протекающий в обмотке возбуждения).

5.1.3. Паспортные данные двигателей постоянного тока

Номинальными данными для двигателей постоянного тока являются следующие:

1. За номинальную мощность двигателя принимают механическую мощность на валу $P_{\text{ном}} = P_2$, [кВт]. Эта мощность обычно указывается на щитке, закрепленном на корпусе машины.

2. Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, [В].

3. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, [об/мин].

4. Номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}}$.

В справочнике по электрическим машинам также указываются:

5. Кратность пускового тока (отношение пускового тока к номинальному) $K_I = I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$. У серийных двигателей малой мощности кратность пускового тока допускается в пределах 4–6 при прямом пуске. У двигателей большой мощности она ограничена до 1,4–2,5. В последнем случае для ограничения пускового тока используется пусковой реостат.

6. Кратность пускового момента (отношение пускового момента к номинальному) $K_M = M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$.

5.1.4. Механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

У двигателей постоянного тока приложенное к якорю напряжение уравнивается наведенной в обмотке якоря электродвижущей силой ($E_{\text{пр}}$) и падением напряжения в цепи якоря

$$U = E_{\text{пр}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}} .$$

Это соотношение называют уравнением электрического состояния обмотки якоря двигателя постоянного тока. Падение напряжения в цепи якоря $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ относительно мало. В номинальном режиме, при $I_{\text{я}} = I_{\text{я,ном}}$,

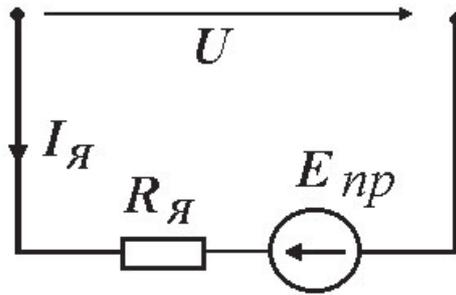


Рис. 5.2. Схема замещения электрической цепи двигателя постоянного тока

оно составляет 2–5 % номинального напряжения. Характерным условием работы машины постоянного тока в двигательном режиме является неравенство $U > E_{пр}$. В связи с этим соотношение, определяющее ток в якоре, выглядит следующим образом

$$I_{я} = \frac{U - E_{пр}}{R_{я}}.$$

Для последующего анализа данные факты удобно представить на схеме замещения электрической цепи двигателя постоянного тока (рис. 5.2).

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, определяется взаимодействием тока обмотки якоря и магнитного поля главных полюсов. Количественное соотношение зависит от конструкции конкретного двигателя и определяется как [5, 6, 7]

$$M_{эм} = C_m I_{я} \Phi,$$

где C_m – конструктивная постоянная момента, $I_{я}$ – ток якоря, Φ – основной магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, расположенной на главных полюсах. ЭДС, создаваемая в обмотке якоря и уравновешивающая приложенное напряжение, зависит от скорости изменения магнитного поля через обмотку якоря, амплитуды магнитного потока и конструкции двигателя, в частности

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n,$$

где C_E – конструктивная постоянная ЭДС, Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, расположенной на главных полюсах, n – частота вращения якоря, измеряемая в оборотах в минуту.

Важнейшей характеристикой двигателя постоянного тока является механическая – зависимость частоты вращения n от момента сопротивления на валу M_C при $U = const, I_B = const$. Момент сопротивления создается исполнительным механизмом, для привода которого и выбирается двигатель постоянного тока. Устойчивая работа двигателя возможна только в том случае, если выполняется равенство $M_{эм} = M_C$. Механическая характеристика показывает влияние механической нагрузки на валу двигателя на частоту вращения, что особенно важно знать при выборе и эксплуатации двигателя.

Уравнение механической характеристики можно получить, используя выражение для ЭДС обмотки якоря, уравнение электрического состояния обмотки якоря и уравнение момента. Оно выглядит следующим образом

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{C_e \cdot \Phi},$$

или

$$n = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{R_{я}}{C_e \cdot C_m \Phi^2} M.$$

Механическая характеристика двигателя постоянного тока представляет собой прямую (рис. 5.3.). В отсутствии нагрузки (при холостом ходе), когда момент сопротивления со стороны исполнительного механизма равен нулю ($M_C = 0$), частота вращения якоря зависит от уровня приложенного напряжения, магнитного потока и конструкции двигателя. Эта частота называется частотой вращения идеального холостого хода:

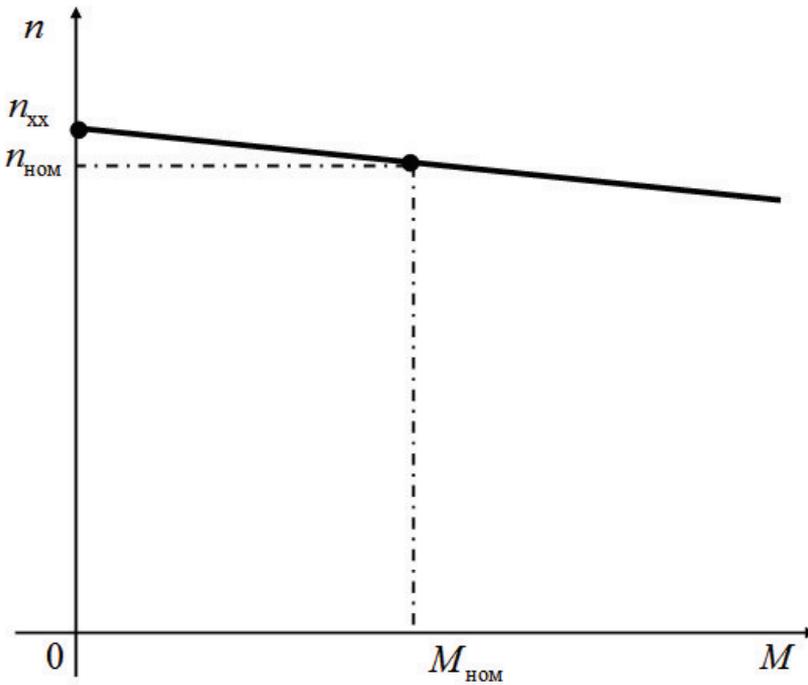


Рис. 5.3. Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

$$n_{\text{хх}} = \frac{U}{C_e \cdot \Phi}.$$

При заданных номинальных параметрах двигателя $U_{\text{НОМ}}$, $I_{\text{НОМ}}$, $n_{\text{НОМ}}$ и неизменном магнитном потоке (токе возбуждения) частота холостого хода может быть определена как

$$n_{\text{хх}} = n_{\text{НОМ}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я,НОМ}} R_{\text{я}}}.$$

Механическая характеристика имеет вид прямой в соответствии с уравнением $n = n_{\text{хх}} - v \cdot M$, где $v = R_{\text{я}} / C_e \Phi$. Так как у двигателей постоянного тока сопротивление цепи якоря мало (обычно оно составляет от 0,02 до 1,1 Ом), то с увеличением нагрузки на валу частота вращения n изменяется незначительно, то есть является “жесткой”. Механическая характеристика, снятая при номинальных данных двигателя, называется *естественной* механической характеристикой. Она представлена на рис. 5.3.

Механическую характеристику можно построить по двум точкам, в частности ($n = n_{\text{хх}}; M = 0$) и ($n = n_{\text{ном}}; M = M_{\text{ном}}$). Любые другие механические характеристики, построенные для тех режимов, в которых один из параметров, входящих в уравнение естественной механической характеристики не соответствует номинальному режиму, называются *искусственными*.

Ток, потребляемый двигателем из сети, растет прямо пропорционально моменту сопротивления со стороны нагрузки при $\Phi = \text{const}$. То есть, $I_{\text{я}} \sim M$. Изменение нагрузки со стороны исполнительного механизма ведет к изменению тока якоря в пропорции

$$\frac{M_{\text{ном}}}{M} = \frac{I_{\text{я,ном}}}{I_{\text{я}}}$$

5.1.5. Проблема пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Увеличение тока, потребляемого двигателем, возможно не только при увеличении нагрузки. Одной из главных проблем при эксплуатации двигателей постоянного тока является проблема пуска [5, 6]. При прямом пуске цепь якоря включается сразу на полное напряжение. Так как в момент пуска якорь неподвижен ($n = 0$), то противо-ЭДС отсутствует и пусковой ток резко возрастает

$$I_{\text{я,п}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$$

а при малых значениях $R_{\text{я}}$ пусковой ток превышает номинальный в 50-100 раз, что недопустимо как для сети, так и для самого двигателя. Такой способ пуска применяется только для двигателей малой мощности, где $I_{\text{я,п}} \leq (4-6)I_{\text{ном}}$. Двигатели средней и большой мощности запускают при включении добавочного сопротивления (пускового реостата) в цепь обмотки якоря. Пусковой ток в этом случае равен:

$$I_{я,п} = \frac{U}{R_я + R_п}.$$

Сопротивление $R_п = \frac{U}{I_{я,п}} - R_я$ выбирают таким, чтобы в момент пуска,

когда противо-ЭДС равна нулю, ток якоря не превосходил значений 1,4–2,5 $I_{ном}$. По мере разгона якоря возрастает противо-ЭДС ($E_{пр} = C_e n \Phi$), а сопротивление реостата выводится.

К пуску двигателя предъявляются два основных требования:

- обеспечить необходимый для трогания с места и разгона якоря вращающий момент;
- не допустить при пуске протекания через обмотку якоря чрезмерно большого тока, опасного для двигателя.

Практически возможны три способа пуска: прямой пуск, пуск при включении реостата в цепь якоря и пуск при пониженном напряжении в цепи якоря. Последний способ пуска возможен при питании двигателя от отдельного источника (генератора, выпрямителя) с регулируемым напряжением, то есть лишь для двигателей с независимым возбуждением. Ограничение пускового тока и плавный разгон двигателя обеспечивается постепенным повышением напряжения от нуля до требуемого значения. Это находит применение в системах управления и регулирования мощных двигателей постоянного тока.

5.1.6. Способы регулирования частоты вращения якоря двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

В соответствии с уравнением механической характеристики регулирование частоты вращения можно осуществлять тремя способами [5, 6]:

- изменением магнитного потока (полюсное регулирование);
- введением добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря (реостатное регулирование);

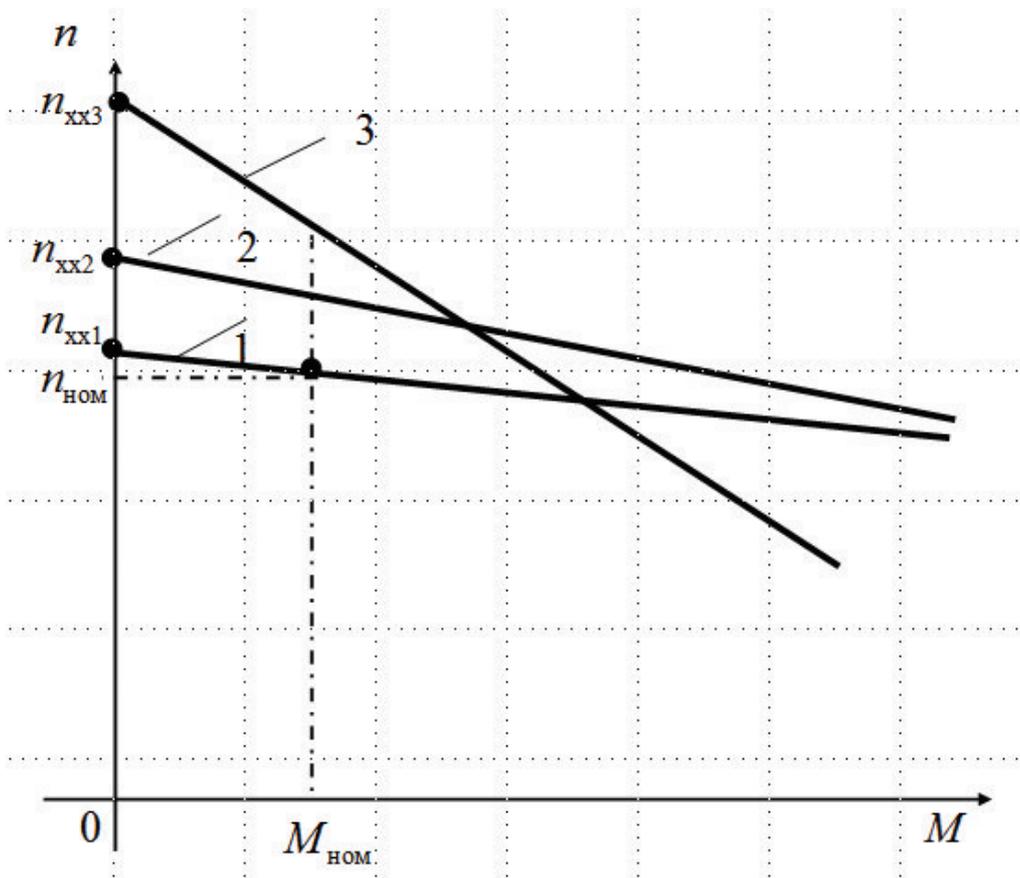


Рис. 5.4. Механические характеристики при полюсном регулировании ($\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$)

– изменением напряжения питания (якорное регулирование).

Первый способ регулирования наиболее распространен и осуществляется посредством регулирования тока в обмотке возбуждения. Это происходит при варьировании сопротивления регулировочного резистора в контуре возбуждения. При этом механические характеристики имеют вид, представленных на рис. 5.4.

Таким способом можно регулировать частоту вращения в пределах 1:1,5; 1:2. Глубокое уменьшение потока недопустимо, так как при нагрузке поле, создаваемое обмоткой якоря (так называемая реакция якоря), будет “опрокидывать” поле возбуждения, что приведет к неустойчивой работе двигателя. Увеличение потока в обычных двигателях параллельного возбуждения нецелесообразно, так как магнитная система двигателей насы-

щена (рис. 5.5.). Частота холостого хода и частота вращения якоря в этом случае определяются следующим образом:

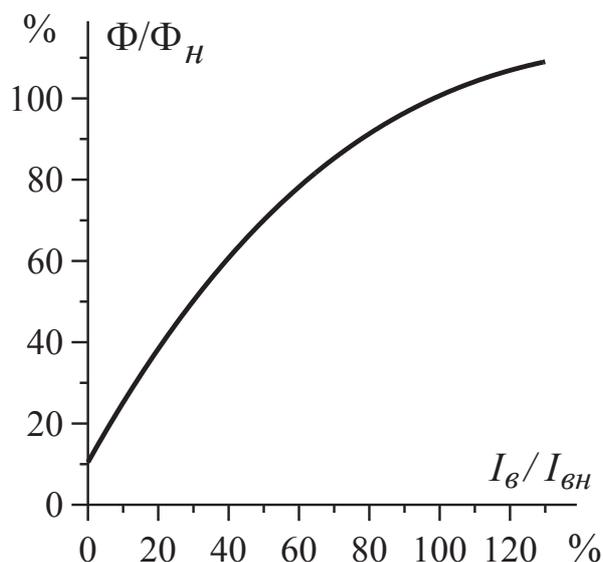


Рис. 5.5. Зависимость магнитного потока от тока возбуждения в машинах постоянного тока

$$n'_{xx} = n_{xx,ном} \cdot \frac{\Phi_{ном}}{\Phi'} ; \quad n' = n_{ном} \cdot \frac{U - I_{я} R_{я}}{U_{ном} - I_{я,ном} R_{я}} \cdot \frac{\Phi_{ном}}{\Phi'}$$

При этом увеличение тока возбуждения будет приводить к увеличению потерь, а значит, и к уменьшению коэффициента полезного действия. При увеличении массы двигателя и принятия специальных мер можно увеличить пределы частоты вращения в ненасыщенных двигателях до 1:5. Хотя этот способ обеспечивает сравнительно небольшие пределы регулирования частоты вращения, он является экономичным и находит широкое применение, когда пределы изменения частоты вращения небольшие.

Второй способ – использование регулировочного реостата в цепи якоря – позволяет изменять частоту вращения в широких пределах, но этот способ неэкономичен, так как регулировочный реостат включается в силовую цепь и на нем выделяется тепло, пропорциональное квадрату тока нагрузки. Частота холостого хода при изменении сопротивления в цепи якоря не меняется, как и магнитный поток. Выражение для определения час-

тоты вращения (уравнение механической характеристики) выглядит следующим образом:

$$n' = n_{xx} - \frac{(R_y + R_p)}{C_e C_M \Phi^2} \cdot M, \text{ или } n' = n_{ном} \cdot \frac{U_{ном} - (R_y + R_p) I_y}{U_{ном} - R_y I_{y,ном}}.$$

Семейство механических характеристик при различных значениях сопротивления регулировочного реостата приведено на рис. 5.6.

Третий способ регулирования частоты вращения – якорное – применяется в основном для двигателей с независимым возбуждением. С одной стороны, необходимо обеспечить наличие регулируемого источника напряжения. С другой – к двигателям с параллельным возбуждением он неприменим, так как одновременно с током якоря будет изменяться и ток возбуждения, а следовательно, и магнитный поток. Каким образом изменится частота вращения в этом случае, заранее предсказать трудно.

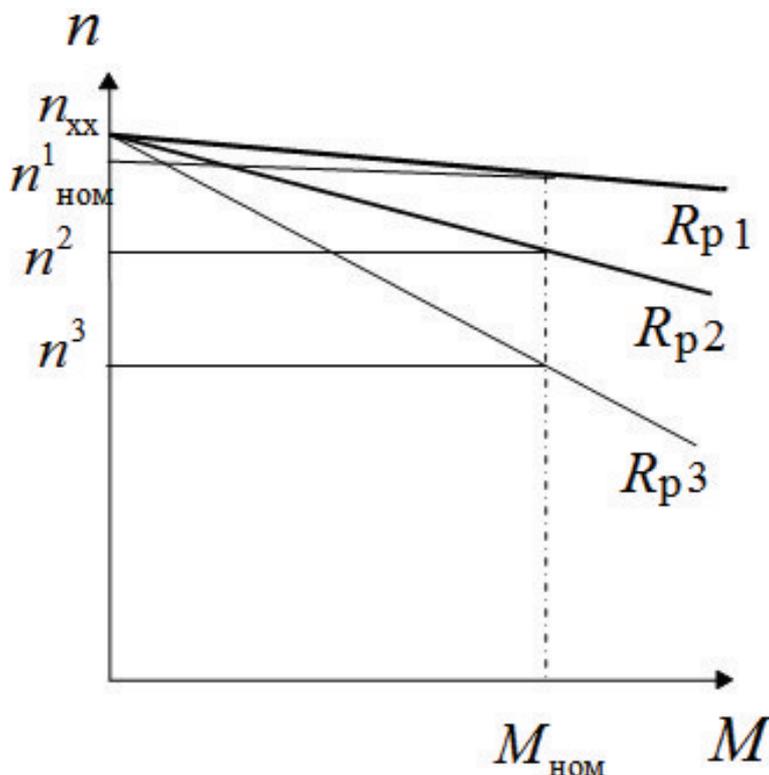


Рис. 5.6. Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при реостатном регулировании

5.1.7. Потери мощности и КПД двигателя постоянного тока

Для определения энергетических характеристик двигателей необходимо определить потребляемую, отдаваемую мощности, а также суммарные потери. Мощность, подводимая к двигателю, – электрическая, определяемая подводимым к двигателю напряжением U и током внешней цепи I :

$$P_1 = U \cdot I .$$

Электромагнитная мощность – $P_{эм} = E_{пр} \cdot I_{я}$.

Механическая мощность, вырабатываемая двигателем, обозначается P_2 (при обозначении номинальной мощности индекс «2» опускают). Вращающий момент двигателя на валу определяется как

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n} ,$$

где коэффициент 9,55 означает, что мощность вычисляется в ваттах, а коэффициент 9550 используется в уравнении, если мощность измеряется в киловаттах.

Разницу между электрической и механической мощностями определяют как суммарные потери мощности – ΔP . Для двигателей коэффициент полезного действия определяют как

$$\eta = \frac{(P_1 - \Delta P)}{P_1} .$$

Исходя из устройства и принципа работы, суммарные потери можно разделить на следующие группы: электрические ($\Delta P_{эл}$), магнитные ($\Delta P_{магн}$), механические ($\Delta P_{мех}$) и добавочные ($\Delta P_{доб}$).

Электрические потери зависят от режима работы двигателя и определяются параметрами обмоток якоря и возбуждения

$$\Delta P_{эл} = R_{я} I_{я}^2 + R_{в} I_{в}^2 .$$

Эти потери идут на нагрев обмоток.

Механические потери – это потери на трение на валу машины и трение о вращающегося якоря о воздух. Магнитные потери – это потери в сердечнике якоря на вихревые токи и гистерезис. В насыщенном сердечнике эти потери не зависят от режима работы. Добавочные потери связаны с наличием в машинах постоянного тока щеточно-коллекторного аппарата и определяются равными одному проценту от номинальной мощности ($\Delta P_{\text{доб}} \approx 0,01P_{\text{ном}}$). Зависимость КПД двигателя от нагрузки представлена на рис. 5.7.

5.2. ЗАДАНИЕ НА СЕМЕСТРОВУЮ РАБОТУ

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}}$; напряжение питания $U_{\text{ном}}$; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$; сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}}$; сопротивление цепи возбуждения $R_{\text{в}}$; коэффициент полезного действия для номинального режима $\eta_{\text{ном}}$. Значения перечисленных параметров приве-

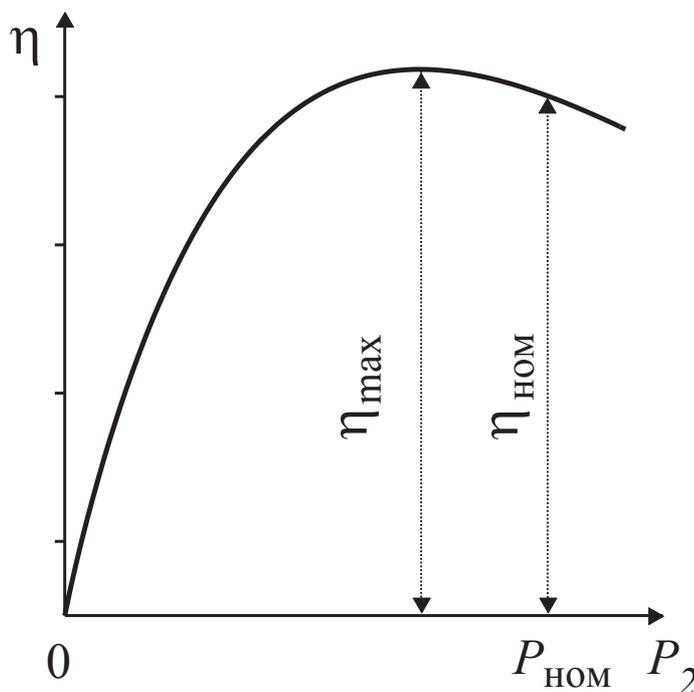


Рис. 5.7. Зависимость КПД двигателя постоянного тока от нагрузки

дены в соответствии с номером варианта в таблицах 5.1. и 5.2. Требуется определить:

а) номинальный ток, потребляемый двигателем, номинальный ток якоря и ток возбуждения;

б) сопротивление пускового реостата R_{π} , при котором начальный пусковой ток в цепи якоря составлял $2,5 I_{я,ном}$;

в) начальный пусковой момент двигателя при заданной кратности пускового тока;

г) номинальный вращающий момент двигателя.

Построить в одной системе координат естественную механическую характеристику и искусственную (при введении пускового реостата R_{π}) механическую характеристику. Определить диапазон изменения частоты вращения при номинальной нагрузке.

Определить частоту вращения двигателя при холостом ходе и номинальной нагрузке, если регулирование частоты вращения происходило за счет изменения сопротивления цепи возбуждения и магнитный поток имел три значения: $\Phi_{ном}$; $0,5 \Phi_{ном}$; $0,8 \Phi_{ном}$. Построить соответствующие этим значениям механические характеристики в одной системе координат.

Таблица 5.1

№ вар	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$R_{я}$, Ом	$R_{в}$, Ом
1	2	3	4	5	6	7
1	22	220	500	78	0,122	33,4
2	26,5	440	600	81,5	0,38	34,7
3	28	220	600	82,2	0,082	33,4
4	30	220	750	84,3	0,05	33,4
5	37	220	750	83,2	0,051	33,4
6	45	220	1000	86	0,03	25,1
7	71	440	1500	88,5	0,065	31,2
8	75	220	1500	89,5	0,0128	23,5
9	45	220	500	86,9	0,032	28,6

10	55	220	600	88	0,022	27,9
11	75	220	750	88	0,013	21,1
12	118	440	1000	89	0,032	21
13	132	220	1060	90	0,0064	21,1
14	37	220	500	83,2	0,05	26,7
15	45	220	600	85,5	0,037	25,2
16	55	220	750	87,5	0,025	25,2
17	85	440	1000	88,7	0,05	19,7
18	13,2	220	1500	91	0,006	25,2
19	30	220	500	84,5	0,062	29
20	37	220	600	84,5	0,046	29
21	45	220	750	87	0,034	28
22	75	220	1000	88,5	0,016	22,8
23	110	220	1500	89	0,0075	22,8
24	45	440	500	86	0,162	25
25	55	220	600	87	0,029	34
26	75	220	750	88,5	0,014	18,8
27	100	440	1000	88	0,04	25,6
28	110	220	1500	89	0,0082	18,8
29	160	220	1900	90	0,004	25,6
30	55	220	500	86	0,016	28,6

Таблица 5.2

№ вар	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$R_{\text{я}}$, Ом	$R_{\text{в}}$, Ом
1	2	3	4	5	6	7
1	8,5	110	800	81	0,047	61,6
2	13	110	1120	84	0,026	61,6
3	22	220	1500	87,5	0,047	53
4	36	220	2200	89,5	0,026	46
5	60	440	3150	90,5	0,047	35
6	15	110	750	82	0,031	42
7	20	440	1000	85,5	0,286	155
8	30	220	1500	88,5	0,031	31
9	42	440	2360	90,5	0,055	31,7
10	55	440	3150	91	0,031	31,7
11	45	440	500	86	0,162	125
12	55	220	600	87	0,029	34
13	75	220	750	88,5	0,014	18,8
14	100	440	1000	88	0,04	25,6
15	110	220	1000	89	0,0082	18,8
16	160	440	1900	90	0,012	25,6

17	8,5	220	800	82	0,188	171
18	22	220	530	83	0,062	39,6
19	30	440	600	84,5	0,185	30
20	45	220	750	86	0,034	28
21	75	220	1000	88,5	0,016	22,8
22	90	440	1500	89	0,046	25
23	110	440	1500	89,5	0,034	30
24	71	440	1500	88,5	0,65	31,2
25	45	220	1000	86	0,03	25,1
26	37	220	750	83,2	0,051	33,4
27	30	440	750	84,3	0,261	33,4
28	20,8	220	600	82,2	0,082	33,4
29	26,5	440	600	81,5	0,38	34,7
30	10	110	750	77,5	0,065	72

5.3. Пример решения задания

Рассмотрим двигатель постоянного с параллельным возбуждением, для которого $P_{\text{ном}}=110$ кВт, $U_{\text{ном}}=440$ В, $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин, $\eta_{\text{ном}}=90\%$, $R_{\text{я}}=0,034$ Ом, $R_{\text{в}}=30$ Ом. Рассчитаем параметры в соответствии с заданием.

Определяем *номинальный ток, потребляемый двигателем, номинальный ток якоря и ток возбуждения.*

Определим электрическую мощность, потребляемую из сети

$$P_{1,\text{ном}} = \frac{P_{2,\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{110 \cdot 10^3}{90} \cdot 100 = 122,2 \text{ кВт.}$$

Тогда номинальный ток двигателя

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1,\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{122,2 \cdot 10^3}{440} = 277,7 \text{ А,}$$

а ток возбуждения в номинальном режиме

$$I_{\text{в,ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{г}}} = \frac{440}{30} = 14,7 \text{ А.}$$

В соответствии со схемой замещения номинальный ток якоря

$$I_{\text{я,ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в,ном}} = 277,7 - 14,7 = 263,0 \text{ А.}$$

Определим *сопротивление пускового реостата* R_{Π} , при котором пусковой ток в цепи якоря составлял бы $2,5 I_{я,ном}$. Заданная кратность пускового тока ($K_I = \frac{I_{\Pi}}{I_{я,ном}}$) составляет 2,5. Воспользуемся соотношением:

$$2,5 I_{я,ном} = \frac{U_{ном}}{R_{я,ном} + R_{\Pi}}$$

Откуда получим:

$$R_{\Pi} = \frac{U_{ном}}{2,5 I_{я,ном}} - R_{я} = \frac{440}{2,5 \cdot 263} - 0,034 = 0,635 \text{ Ом.}$$

Определим *номинальный вращающий момент двигателя*:

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9550 \cdot \frac{110}{1500} = 700 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Определим начальный пусковой момент двигателя при заданной кратности пускового тока. Поскольку вращающий момент двигателя связан с током якоря соотношением:

$$M_{ном} = C_M I_{я,ном} \Phi_{ном}$$

то при неизменном магнитном потоке:

$$M_{\Pi} = C_M 2,5 I_{я,ном} \Phi_{ном} = 2,5 M_{ном} = 2,5 \cdot 700 = 1750 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Построим в одной системе координат естественную механическую характеристику и искусственную (при введении пускового реостата R_{Π}) механическую характеристику. Естественную механическую характеристику построим по двум точкам: $(n_{xx}; M = 0)$; $(n_{ном}; M_{ном})$. Определим частоту холостого хода при номинальном магнитном потоке. Воспользуемся соотношением для частоты холостого хода и вычислим:

$$n_{xx} = n_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{я,ном} R_{я}} = 1500 \cdot \frac{440}{440 - 263 \cdot 0,036} = 1533 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, *естественную механическую характеристику* строим по двум точкам: $(n = n_{xx} = 1533 \text{ об/мин}; M = 0)$; $(n = n_{ном} = 1500 \text{ об/мин};$

$M = M_{\text{ном}} = 700 \text{ Н} \cdot \text{м}$). Искусственную механическую характеристику (при включении пускового реостата) строим также по двум точкам: ($n = n_{\text{хх}} = 1533 \text{ об/мин}$; $M = 0$); ($n = 0 \text{ об/мин}$; $M = M_{\text{п}} = 1750 \text{ Н} \cdot \text{м}$). Следует обратить внимание, что частота холостого хода при неизменном магнитном потоке остается такой же, как и для естественной механической характеристики.

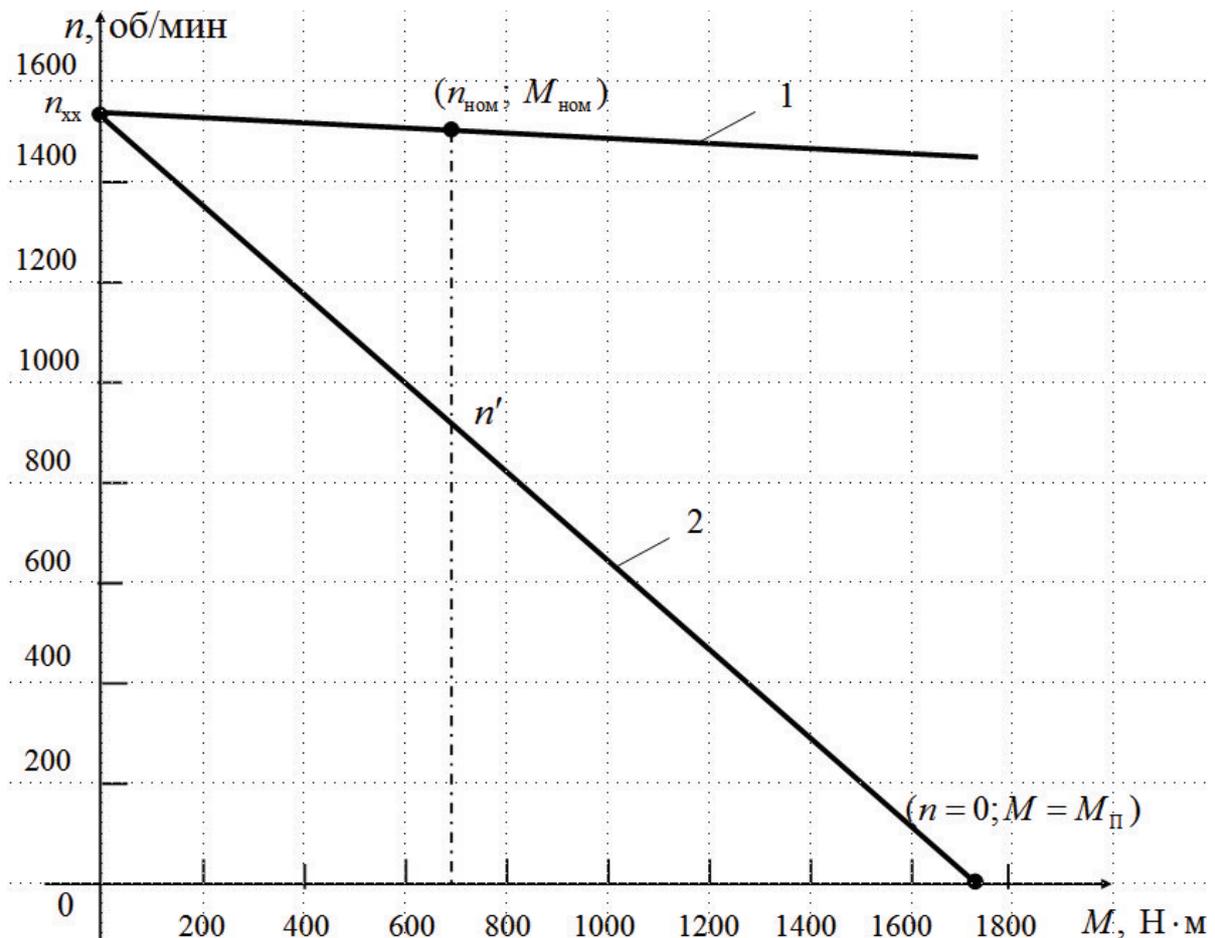


Рис. 5.8. Механические характеристики двигателя: 1 – естественная, 2 – искусственная (пусковая)

Диапазон изменения частоты вращения можно определить по графику: $\Delta n = n_{\text{ном}} - n' = 1500 - 900 = 600 \text{ об/мин}$.

Рассмотрим работу двигателя при регулировании частоты вращения изменением магнитного потока (при полюсном регулировании). При этом важно учесть, что момент сопротивления исполнительного механизма не изменяется, а, следовательно, изменение магнитного потока приведет к

изменению тока якоря. Введем коэффициент пропорциональности магнитного потока:

$$\Phi = \alpha \cdot \Phi_{\text{НОМ}},$$

где $\alpha = 1; 0,8; 0,5$. Тогда, сравнивая соотношения $M_{\text{НОМ}} = C_M I_{\text{я,НОМ}} \Phi_{\text{НОМ}}$ и

$M_{\text{НОМ}} = C_M I'_{\text{я}} \Phi'$, можно видеть:

$$M_{\text{НОМ}} = C_M I'_{\text{я}} \Phi' = C_M \frac{I_{\text{я,НОМ}}}{\alpha} \cdot \alpha \cdot \Phi_{\text{НОМ}}.$$

При этом получаем, что изменяющийся ток якоря будет связан с номинальным соотношением:

$$I'_{\text{я}} = I_{\text{я,НОМ}} \cdot \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi} = \frac{I_{\text{я,НОМ}}}{\alpha}.$$

Каждая из трех механических характеристик может быть построена по двум точкам. Для естественной механической характеристики ($\alpha = 1$) данные получены ранее. Для двух других характеристик (при $\alpha = 0,8$ и $\alpha = 0,5$) будем использовать соотношения

$$n'_{\text{ХХ}} = n_{\text{ХХ}} \cdot \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi} = \frac{n_{\text{ХХ}}}{\alpha};$$

$$n' = n_{\text{НОМ}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}} - I'_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я,НОМ}} R_{\text{я}}} \cdot \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{\Phi} = n_{\text{НОМ}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}} - I'_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я,НОМ}} R_{\text{я}}} \cdot \frac{1}{\alpha}.$$

Результаты расчетов сведем в таблицу.

Таблица 5.3.

α	1	0,8	0,5
$n_{\text{ХХ}}$, об/мин; $M = 0$	1533	1916	3000
n , об/мин; $M = M_{\text{НОМ}}$	1500	1865	2937

Построим семейство механических характеристик.

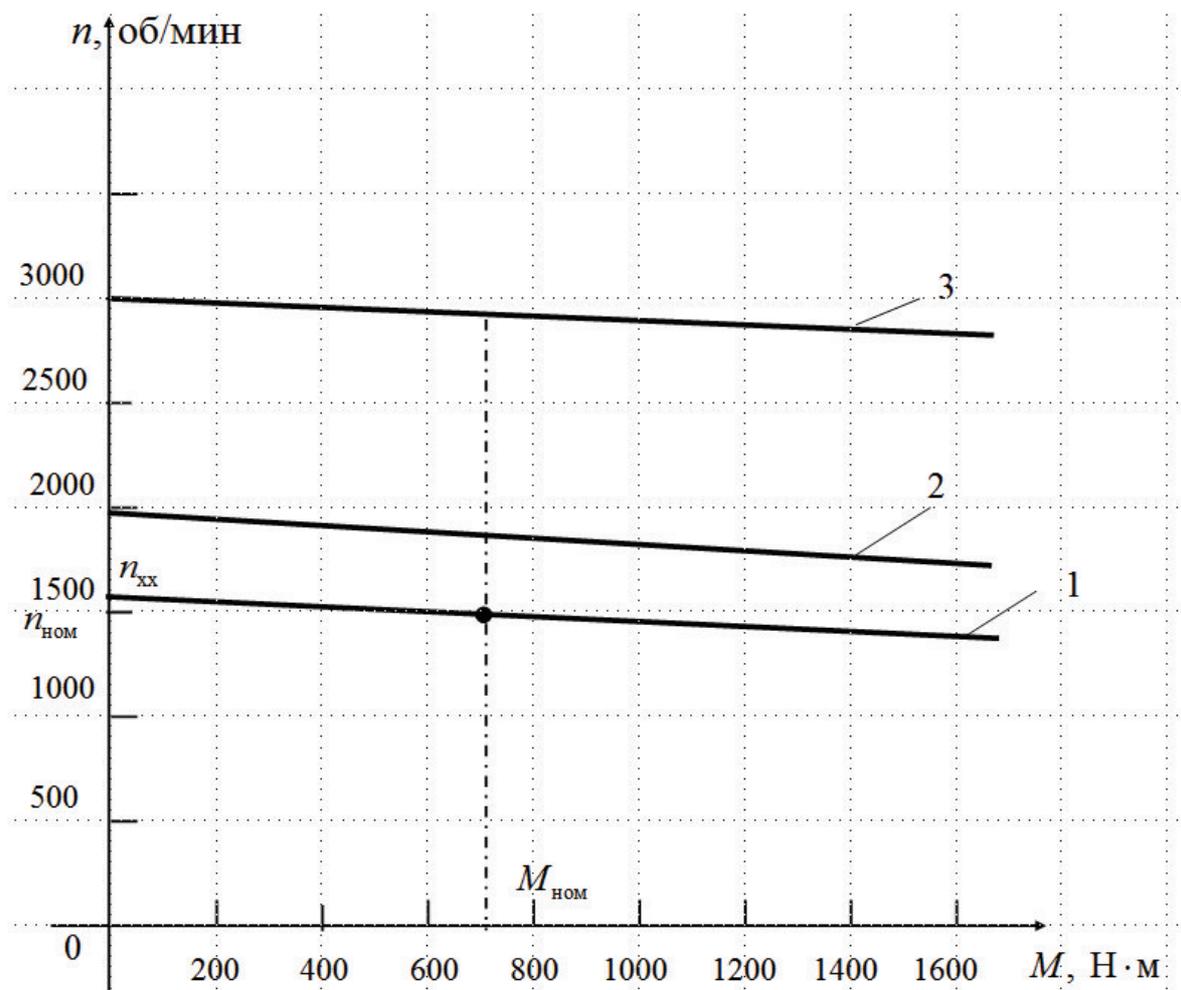


Рис. 5.9. Семейство механических характеристик при полюсном регулировании частоты вращения якоря: 1 – естественная механическая характеристика; 2-3 – искусственные (при $\alpha=0,8$ и $\alpha=0,5$ соответственно)

5.3. Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены машины постоянного тока (МПТ)?
2. Для чего предназначен коллектор машины?
3. Какой обмоткой создается магнитное поле МПТ?
4. Какой физический закон лежит в основе принципа работы генератора постоянного тока?
5. Как создается магнитный момент в машине?
6. Запишите выражение ЭДС МПТ и поясните, какие величины в него входят.

7. Запишите выражение электромагнитного вращающего момента МПТ и поясните, какие величины в него входят.
8. Виды потерь в машине постоянного тока.
9. Определение коэффициента полезного действия машины. Зависимость КПД от нагрузки.
10. Способы возбуждения в МПТ. Схемы и определения.
11. Запишите основные уравнения, определяющие работу двигателя постоянного тока.
12. Определение, аналитическое выражение и вид механической характеристики ДПТ НВ.
13. Условия пуска двигателя постоянного тока.
14. Проблемы пуска двигателя постоянного тока (ДПТ).
15. Как ограничивают пусковой ток в ДПТ?
16. Перечислите способы регулирования скорости вращения ДПТ НВ.
17. Как регулируется скорость вращения ДПТ НВ изменением напряжения, подводимого к двигателю?
18. Как регулируется скорость вращения ДПТ НВ за счет изменения магнитного потока?
19. Как регулируется скорость вращения ДПТ НВ изменением сопротивления цепи якоря?

ТЕМА 6. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

6.1. ЗАДАНИЕ НА СЕМЕСТРОВУЮ РАБОТУ

Ответить письменно на вопросы согласно варианту задания. Номера вопросов в соответствии с вариантом приведены в Таблице 6.1. Источники указаны в списке рекомендуемой литературы в конце данного пособия – [8, 9, 10].