

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Введение.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) широко используются в электроприводе. Они обладают рядом особенностей по сравнению с другими электрическими машинами. При выполнении данной домашней контрольной работы студенты знакомятся, практически, со всеми основными вопросами, связанными с анализом работы двигателей постоянного тока. Студенты рассчитывают естественную механическую характеристику, рассматривают пуск, торможение и регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока (ДПТ).

Домашнее задание по расчету основных характеристик ДПТ включает следующие пункты:

1. Расчет естественной механической характеристики $n=f(M)$ и электромеханической характеристики $n=f(I_a)$.
2. Расчет искусственных механических характеристик $n=f(M)$ ДПТ при различных способах регулирования n :
 - при изменении напряжения источника питания U ;
 - при введении в цепь ротора ДПТ добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$;
 - при изменении потока возбуждения Φ .
3. Расчет искусственных механических характеристик $n=f(M)$ ДПТ при различных способах электрического торможения:
 - при генераторном торможении;
 - при динамическом торможении;
 - при торможении противовключением.

Методика расчета всех пунктов домашнего задания рассмотрена ниже.

1. Содержание домашнего задания.

Для ДПТ выполнить следующие расчеты и построения:

1. Нарисовать электрическую схему включения двигателя постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением.
2. Рассчитать и построить на одном графике естественные механическую $n=f(M)$ и электромеханическую $n=f(I_a)$ характеристики. Определить скорость вращения n_D при заданном моменте сопротивления $M_D = M_H \cdot k$ на валу двигателя.

3. Рассчитать и построить на одном графике естественную и искусственные характеристики $n=f(M)$ при различных способах регулирования частоты вращения n двигателя постоянного тока. Определить для каждого случая скорость вращения n_D при заданном моменте сопротивления $M_D = M_H \cdot k$ на валу двигателя:
- при регулировании изменением напряжения сети ($U' = U \cdot q1$);
 - при реостатном регулировании ($R_{я\text{ доб}} = R_{я} \cdot q2$);
 - при изменении потока возбуждения ($\Phi' = \Phi \cdot q1$).
4. Рассчитать и построить на одном графике естественную и искусственные характеристики $n=f(M)$ при различных способах торможения ДПТ:
- при генераторном торможении, начиная с режима $n_T = n_H \cdot h1$ и $M_T = M_H \cdot k$.
 - при динамическом торможении, начиная с режима $n_T = n_D$ и $M_T = M_H \cdot k$;
 - при торможении противовключением, начиная с режима: $n_T = n_H \cdot h2$ и $M_T = M_H \cdot k$ при реостатном торможении; $n_T = n_D$ и $M_T = M_H \cdot k$ при торможении с изменением полярности напряжения на обмотке якоря

2. Расчет номинальных данных и построение естественной механической характеристики $n=f(M)$.

Рассмотрим основные теоретические положения, необходимые для успешного выполнения данного домашнего задания.

В качестве исходных данных приводятся следующие величины:

U_H – номинальное напряжение двигателя, В;

P_H – номинальная мощность двигателя, кВт;

n_H – номинальная скорость вращения ротора, об/мин;

η_H – к.п.д., коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке, %;

$R_{я}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{доп пол}}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

$R_{\text{возб}}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

Полезной мощностью P_2 двигателя постоянного тока является механическая мощность, которая определяется через механические параметры так

$$P_2 = M \cdot \Omega = M \cdot (2\pi / 60) \cdot n = 0.1047 \cdot M \cdot n .$$

Используя номинальные данные P_{2H} и n_H , вычисляем номинальный вращающий момент двигателя

$$M_H = 9.55 \cdot P_{2H} / n_H .$$

Здесь $P_{2н}$ – в [Вт], n_n – в [об/мин], M_n – в [Н·м] .

Номинальная электрическая мощность, потребляемая из сети двигателем

$$P_{1н} = P_{2н} / \eta_n.$$

Номинальный ток двигателя $I_n = P_{1н} / U_n$.

Номинальный ток возбуждения $I_{вн} = U_n / R_{возб}$.

Номинальный ток обмотки якоря $I_{ян} = I_n - I_{вн} = P_{1н} / U_n - U_n / R_{возбн}$.

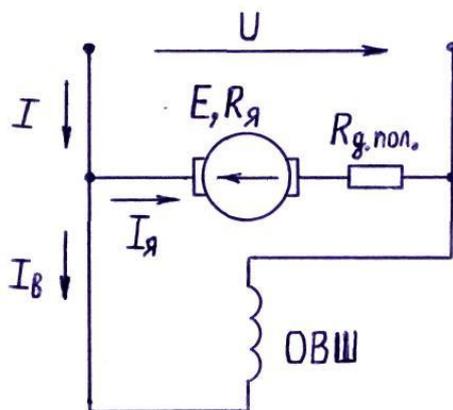


Рис.2.1.

Уравнение электрического состояния силовой цепи двигателя (см. рис.2.1.)

$$U = E + I_я \cdot (R_я + R_{доп пол}),$$

где $E = C_E \Phi \cdot n$.

Уравнение электромеханической характеристики $n=f(I_я)$

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) - I_я \cdot (R_я + R_{доп пол}) / (C_E \cdot \Phi) = n_0 - \Delta n.$$

Учитывая, что $M = C_M \Phi I_я$, получаем уравнение механической характеристики $n=f(M)$

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_я + R_{доп пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n.$$

Полученные выражения для характеристик $n=f(I_я)$ и $n=f(M)$ имеют линейный характер при допущении, что магнитная цепь двигателя не насыщена.

При проведении расчетов часто требуется знать постоянные коэффициенты $C_E \cdot \Phi$ и $C_M \cdot \Phi$. Определяем их из номинального режима:

$$C_E \cdot \Phi = E_n / n_n \text{ и } C_M \cdot \Phi = M_n / I_{ян}.$$

Для построения естественной механической характеристики $n=f(M)$ и электромеханической характеристики $n=f(I_я)$ необходимо знать координаты двух точек:

- 1) $n = n_0$ при $M = 0$ и $I_я = 0$ (режим холостого хода, Х.Х.);
- 2) $n = n_n$ при $M = M_n$ и $I_я = I_{ян}$ (номинальный режим).

Частота вращения в режиме холостого хода равна $n_0 = U / (C_E \cdot \Phi)$.

Далее на одном графике в общей системе координат строим обе зависимости $n=f(M)$ и $n=f(I_я)$ (см. рис.2.2.).

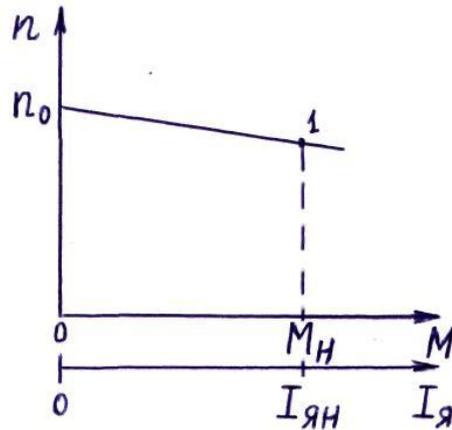


Рис.2.2.

По заданию требуется определить скорость вращения ДПТ, соответствующую заданному моменту нагрузки на валу двигателя $M_D = M_H \cdot k$. Воспользуемся уравнением

$$n_D = U / (C_E \cdot \Phi) - M_D \cdot (R_{я} + R_{доп пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) .$$

3. Расчет искусственных механических характеристик $n(M)$ при различных способах регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока.

3.1. Расчет характеристики $n=f(M)$ при уменьшении напряжения источника питания в цепи якоря.

Влияние U на вид характеристики $n=f(M)$.

Выражения для электромеханической характеристики $n=f(I_я)$ и механической характеристики $n=f(M)$ имеют вид:

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) - I_я \cdot (R_{я} + R_{доп пол}) / (C_E \cdot \Phi) = n_0 - \Delta n,$$

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_{я} + R_{доп пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n.$$

Как следует из приведенных выражений, при уменьшении напряжения на якорной обмотке U и неизменном магнитном потоке ($\Phi = \text{const}$) n_0 уменьшается пропорционально U , а Δn остается неизменным при одинаковых значениях момента M . Значит наклон характеристики $n=f(M)$ не меняется.

При уменьшении напряжения ($U' = U \cdot q1$), приложенного к обмотке якоря, получаем искусственную характеристику $n'=f(M)$, смещенную вниз относительно естественной характеристики $n=f(M)$ (см. рис.3.1.).

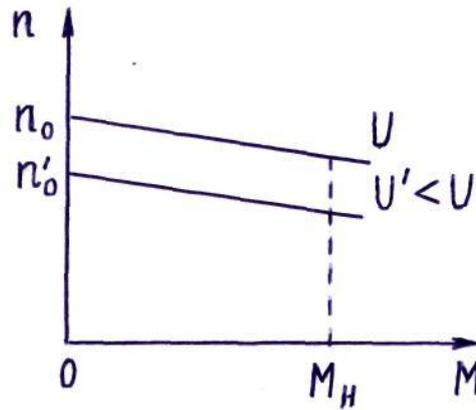


Рис.3.1.

Расчет искусственной характеристики $n'=f(M)$ (при $U'=U \cdot q1$).

Для построения искусственной характеристики $n'=f(M)$ в силу ее линейности достаточно рассчитать координаты двух точек, например:

1) для режима холостого хода:

$$M = 0; n'_0 = U' / (C_E \cdot \Phi) = U \cdot q1 / (C_E \cdot \Phi) = n_0 \cdot q1;$$

2) при номинальной нагрузке:

$$M = M_H; n'_H = U' / (C_E \cdot \Phi) - M_H \cdot (R_{я} + R_{доб пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

На общем графике строим естественную $n=f(M)$ и искусственную $n'=f(M)$ характеристики (см. рис.3.1.).

Коэффициент регулирования κ_D при заданном M_D .

Вычисляем коэффициент регулирования κ_D скорости вращения n при изменении напряжения источника питания $U' = U \cdot q1$ и при моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot k$:

$$\kappa_D = n_D' / n_D.$$

Здесь n_D – скорость вращения, соответствующая моменту M_D , при работе ДПТ на естественной характеристике $n=f(M)$. n_D уже вычислили раньше при рассмотрении естественной характеристики (см. стр. 8).

n_D' – скорость вращения, соответствующая моменту M_D , при работе ДПТ на искусственной характеристике $n'=f(M)$ при том же моменте нагрузки M_D и при пониженном напряжении $U_1' = U_1 \cdot q1$.

Далее необходимо отметить преимущества и недостатки данного метода регулирования n и сделать выводы о целесообразности его применения.

3.2. Расчет характеристики $n=f(M)$ при введении добавочного сопротивления $R_{я доб}$ в цепь якоря.

Влияние $R_{я доб}$ на вид характеристики $n=f(M)$.

Электрическая схема, соответствующая реостатному регулированию n ДПТ, приведена на рис.3.2.

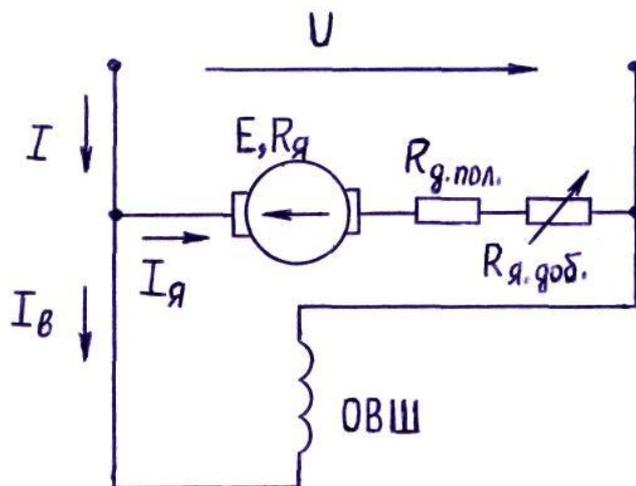


Рис.3.2.

Уравнение механической характеристики $n' = f(M)$ при использовании реостатного регулирования выглядит следующим образом

$$n' = U / (C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_{я} + R_{доп\ пол} + R_{я\ доб}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n.$$

При введении $R_{я\ доб}$ возрастает Δn и увеличивается наклон характеристики $n = f(M)$. При этом $n_0 = U / (C_E \cdot \Phi)$ не меняется, значит естественная и реостатная характеристики $U / (C_E \cdot \Phi)$ выходят из одной точки (режим Х.Х., $M = 0$, см. рис.3.3).

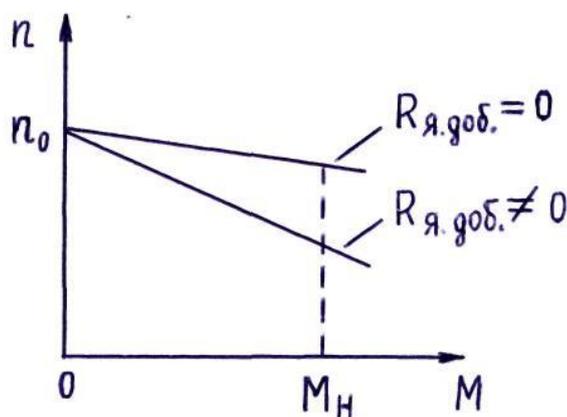


Рис.3.3

Расчет реостатной характеристики $n' = f(M)$.

Для построения реостатной характеристики $n' = f(M)$ необходимо знать координаты двух точек:

- 1) режим холостого хода - $n_0 = U / (C_E \cdot \Phi)$ при $M = 0$;
- 2) номинальный режим - при $M = M_H$

$$n'_H = U / (C_E \cdot \Phi) - M_H \cdot (R_{я} + R_{доп\ пол} + R_{я\ доб}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

На общем графике строим естественную $n = f(M)$ и искусственную $n' = f(M)$ характеристики (см. рис.3.3).

Коэффициент регулирования k_D при заданном M_D .

Определим изменение скорости вращения ДПТ при регулировании n с помощью $R_{я\text{ доб}}$ при моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot k$.

Значение n_D , соответствующее работе ДПТ на естественной характеристике и моменту нагрузки $M_D = M_H \cdot k$, определено раньше (см. стр. 8).

Вычислим скорость вращения n_D' при работе ДПТ на искусственной реостатной характеристике с добавочным сопротивлением в цепи якоря $R_{я\text{ доб}} = R_{я} \cdot q_2$.

При моменте нагрузки $M_D = M_H \cdot k$ определяем $n_D' = U / (C_E \cdot \Phi) - M_D \cdot (R_{я} + R_{\text{доп пол}} + R_{я\text{ доб}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2)$.

Коэффициент регулирования скорости вращения k_D составляет $k_D = n_D' / n_D$.

Далее необходимо отметить преимущества и недостатки данного метода регулирования n и сделать выводы о целесообразности его применения.

3.3. Расчет характеристики $n=f(M)$ при уменьшении потока возбуждения.

Влияния потока возбуждения Φ на вид характеристики $n=f(M)$.

На рис.3.4 приведена электрическая схема, соответствующая регулированию скорости вращения n двигателя постоянного тока при уменьшении магнитного потока возбуждения ($\Phi' = \Phi \cdot q_1$).

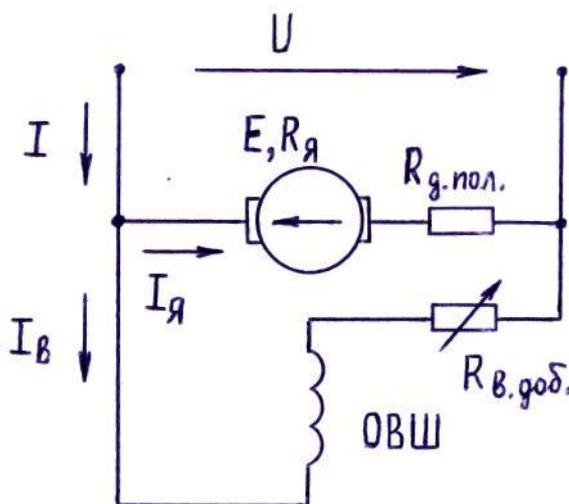


Рис.3.4

При введении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения $R_{в\text{ доб}}$ уменьшается ток возбуждения $I_{в}$, уменьшается магнитный поток ($\Phi' < \Phi$), создаваемый обмоткой возбуждения.

В соответствии с уравнением механической характеристики

$$n' = U / (C_E \cdot \Phi') - M \cdot (R_{я} + R_{доп пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot (\Phi')^2) = n'_0 - \Delta n'$$

с уменьшением магнитного потока Φ скорость вращения n двигателя на рабочем участке характеристики $n=f(M)$ возрастает (см. рис.3.5.). При этом по сравнению с естественной характеристикой у искусственной меняются и n_0 и Δn .

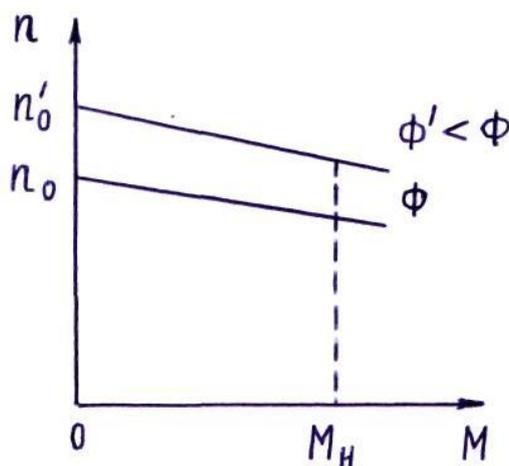


Рис.3.5

Для построения искусственной характеристики $n'=f(M)$ при $\Phi'=\Phi \cdot q1$ необходимо определить координаты двух точек:

а) режим Х.Х.: $n'_0 = U / (C_E \cdot \Phi')$ при $M = 0$;

б) при номинальной нагрузке: $M = M_n$

$$n' = U / (C_E \cdot \Phi') - M_n \cdot (R_{я} + R_{доп пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot (\Phi')^2) = n'_0 - \Delta n'.$$

Коэффициент регулирования k_D при заданном M_D .

Определим изменение скорости вращения ДПТ при регулировании с уменьшением потока возбуждения ($\Phi'=\Phi \cdot q1$).

Значение скорости вращения ротора ДПТ на естественной характеристике n_D при заданном моменте нагрузки $M_D = M_n \cdot k$ уже определили раньше (см. стр. 8).

Значение скорости вращения n_D' ДПТ при работе на искусственной характеристике при уменьшении потока возбуждения ($\Phi'=\Phi \cdot q1$) и моменте нагрузки $M_D = M_n \cdot k$ определяется как

$$n_D' = U / (C_E \cdot \Phi') - M_D \cdot (R_{я} + R_{доп пол}) / (C_E \cdot C_M \cdot (\Phi')^2).$$

Коэффициент регулирования частоты вращения n равен

$$k_D = n_D' / n_D.$$

Далее необходимо указать преимущества и недостатки рассмотренного метода регулирования и сделать выводы о целесообразности его применения.

Затем следует провести сопоставление трех рассмотренных методов регулирования n .

4. **Расчет искусственных механических характеристик $n=f(M)$ при различных способах торможения ДПТ.**

Далее рассматриваются три основных способа электрического торможения ДПТ:

- генераторное торможение;
- динамическое торможение;
- торможение противовключением.

4.1. Генераторное торможение

Условие перехода ДПТ в режим генераторного торможения

Электрическая схема двигателя постоянного тока приведена на рис.4.1. Направление тока $I_{я}$ на схеме соответствует работе машины в режиме двигателя ($E \uparrow \downarrow I_{я}$; $P < 0$), электрическая энергия потребляется из сети.

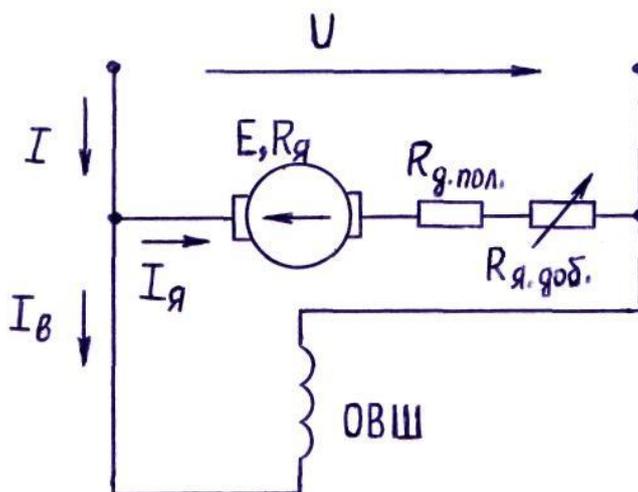


Рис.4.1

На графике механической характеристики $n=f(M)$ (см. рис.4.2.) этому соответствует точка 1, в которой $n < n_0$ и $E < U$. Здесь n_0 – скорость вращения ротора ДПТ в режиме холостого хода ($M_c = 0$).

Уравнение механической характеристики $n=f(M)$

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) - M \cdot (R_{я} + R_{доппол}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2) = n_0 - \Delta n.$$

Здесь $M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я}$ – момент, развиваемый двигателем;

$I_{я} = (U - E) / R_{я}$ – ток в цепи якоря;

$E = C_E \cdot \Phi \cdot n$ – э.д.с. в обмотке якоря.

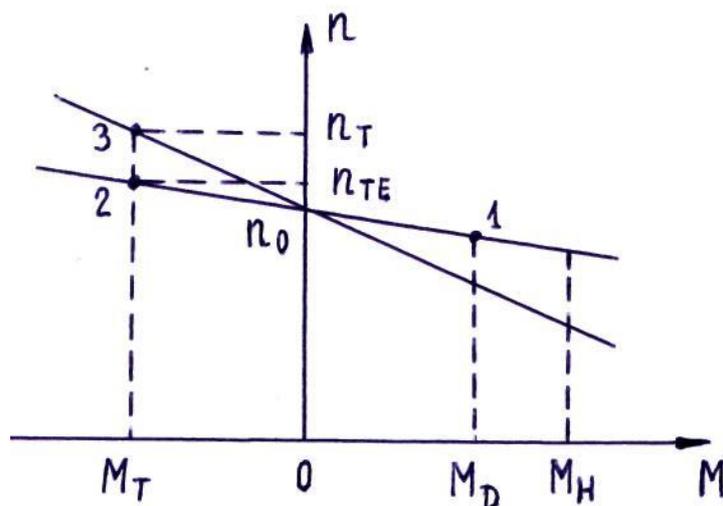


Рис.4.2

Режим генераторного (рекуперативного) торможения наступает, когда скорость вращения ротора n оказывается больше скорости вращения ротора в режиме холостого хода n_0 (см. рис.4.2, точка 2).

При $n > n_0$ $E > U$ и ток якоря I_a становится отрицательным, т.е. меняет направление. Ток якоря и э.д.с. оказываются направленными в одну сторону ($E \uparrow I_a$, $P > 0$), машина постоянного тока работает в режиме генератора, электрическая энергия отдается в сеть.

Рабочая точка машины постоянного тока находится во втором квадранте (точка 2, рис.4.2).

Так как ток якоря I_a поменял направление и стал отрицательным, соответственно меняет направление и момент, тоже становится отрицательным, т.е. тормозит вращение ротора ($M = M_T < 0$).

По условию задания требуется рассчитать тормозную реостатную характеристику, соответствующую генераторному торможению и обеспечивающую при заданном моменте торможения M_T частоту вращения n_T (точка 3, рис.4.2).

Решение этой задачи проводим в два этапа.

На первом этапе определяем скорость вращения n_{TE} при работе ДПТ на естественной характеристике ($R_{я\text{доб}} = 0$) и при заданном тормозном моменте M_T

$$n_{TE} = U / (C_E \cdot \Phi) + M_T \cdot (R_{я} + R_{\text{доппол}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

На втором этапе определяем величину добавочного сопротивления $R_{я\text{доб}}$, вводимого в цепь якоря и обеспечивающего прохождение реостатной характеристики $n' = f(M)$ через точку 3 с координатами M_T и n_T ($M_T = M_H \cdot k$, $n_T = n_H \cdot h_1$). Воспользуемся выражением

$$n_T = U / (C_E \cdot \Phi) + M_T \cdot (R_{я} + R_{\text{доппол}} + R_{я\text{доб}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Задавая числовые значения M_T и n_T , определяем $R_{я\text{ доб}}$.

Затем необходимо рассчитать и построить на одном графике естественную $n_{TE} = f(M)$ и реостатную $n_T = f(M)$ механические характеристики, соответствующие генераторному торможению (см. рис.4.2).

На построенных характеристиках $n = f(M)$ показываем расчетные точки, соответствующие тормозному моменту M_T .

Далее необходимо указать преимущества и недостатки рассмотренного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения.

4.2. Динамическое торможение

Описание процесса торможения

При выполнении динамического торможения ДПТ цепь якоря двигателя отключается от сети постоянного напряжения и замыкается на реостат с сопротивлением $R_{доб}$ (см. рис.4.3).

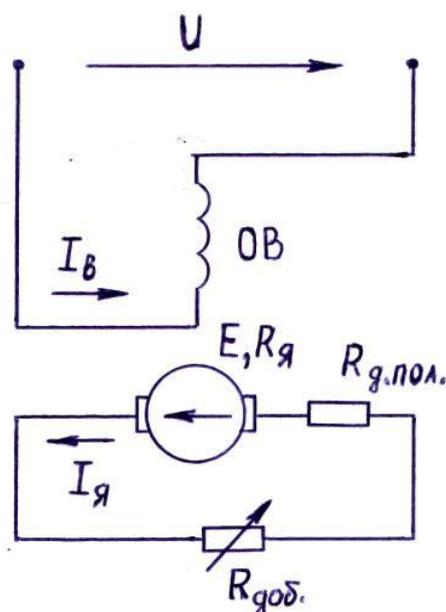


Рис.4.3

Ротор по инерции продолжает вращаться, в обмотке якоря (на роторе) наводится э.д.с. E . Так как напряжение внешнего источника на обмотке якоря отсутствует, ток в цепи определяется выражением

$$I_{\text{я}} = (-E) / (R_{\text{я}} + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{я доб}}) < 0.$$

Ток $I_{\text{я}}$ и момент $M = C_M \Phi \cdot I_{\text{я}}$ становятся отрицательными, момент действует против направления вращения ротора, т.е. становится тормозящим. Наклон характеристики динамического торможения определяется величиной суммарного сопротивления в цепи якоря ($R_{\text{я}} + R_{\text{доп пол}} + R_{\text{я доб}}$).

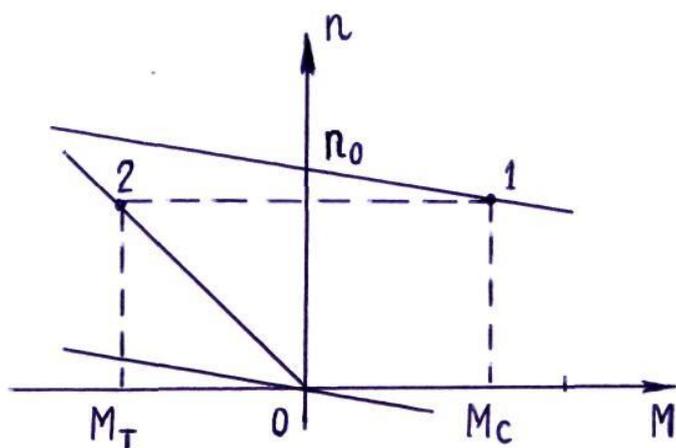


Рис.4.4

На рис.4.4 точка 1 соответствует работе машины в двигательном режиме на естественной характеристике (первый квадрант). При выполнении динамического торможения рабочая точка ДПТ попадает в точку 2 на характеристике динамического торможения (второй квадрант). Далее частота вращения n ДПТ начнет уменьшаться, рабочая точка будет двигаться по характеристике из точки 2 к точке 0. Этим способом возможно торможение ДПТ до $n = 0$.

Чтобы представить вид характеристики $n=f(M)$ двигателя постоянного тока при динамическом торможении (2 квадрант, рис. 4.4) достаточно характеристику $n=f(M)$ при генераторном торможении, рассмотренную ранее (рис. 4.2), сместить вниз на величину n_0 . Полученная характеристика будет проходить через начало координат графика $n=f(M)$.

Расчет характеристики $n=f(M)$ при динамическом торможении

Требуется рассчитать и построить реостатную характеристику $n_T=f(M)$, соответствующую динамическому торможению и проходящую через точку с координатами M_T и n_T .

Расчет проводим в два этапа:

- а) расчет характеристики $n_{TE}=f(M)$ при $R_{доб} = 0$;
- б) расчет реостатной характеристики $n_T=f(M)$ (при $R_{доб} \neq 0$), проходящей через расчетную точку с заданными координатами M_T и n_T .

Расчет характеристики $n_m=f(M_T)$ при $R_{доб} = 0$

Первый этап - расчет характеристики при $R_{доб} = 0$.

Уравнение механической характеристики $n_{TE}=f(M)$, соответствующее динамическому торможению (при $R_{доб} = 0$), принимает вид

$$n_{TE} = M_T \cdot (R_a + R_{допол}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Полученное выражение соответствует прямой линии, проходящей через начало координат. Угол наклона ее к оси абсцисс равен углу наклона естественной характеристики $n=f(M)$ ДПТ.

При динамическом торможении ДПТ, работающего, например, в номинальном режиме ($n = n_n$) без добавочного сопротивления в цепи якоря ($R_{доб} = 0$), возникнут ток якоря $I_{я}$ и тормозной момент M_T многократно превышающие их номинальные значения.

$$I_{яТ} = - E / (R_{я} + R_{доппол}) \gg I_{я ном},$$

$$\text{и } M_T = C_M \cdot \Phi \cdot I_{яТ} \gg M_{ном}.$$

Второй этап – расчет реостатной характеристики $n_T = f(M)$ при $R_{доб} \neq 0$.

Чтобы избежать аварии ДПТ, в цепь якоря вводят ограничивающее сопротивление $R_{доб} \neq 0$ (см. рис.4.3). При этом получаем

$$I_{яТ} = - E / (R_{я} + R_{доппол} + R_{доб}) < 2 \cdot I_{я ном};$$

$$n_T = M_T \cdot (R_{я} + R_{доппол} + R_{доб}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Подставляя в полученное выражение $n_T = f(M_T)$ числовые значения координат заданной точки (M_T и n_T), через которую должна проходить реостатная характеристика, определяем величину соответствующего $R_{доб}$.

На общем графике строим естественную характеристику $n = f(M)$, соответствующую работе машины в двигательном режиме, и две тормозных характеристики: $n_{тЕ} = f(M)$ при $R_{доб} = 0$ и реостатную $n_T = f(M)$ (см. рис.4.4). На них показываем частоты вращения, соответствующие заданному M_T .

Далее необходимо указать преимущества и недостатки рассмотренного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения.

4.3 Торможение противовключением

Применяются две модификации торможения противовключением:

- а) с использованием реостатной характеристики $n = f(M)$;
- б) с изменением полярности напряжения в цепи якоря.

Торможение противовключением происходит, когда обмотки ДПТ включены для одного направления вращения, а якорь (ротор) под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположном направлении.

4.3.1 Торможение противовключением с использованием $R_{доб}$

Описание процесса торможения

Рассмотрим первый вариант торможения противовключением с использованием реостатной характеристики $n = f(M)$. Схема включения ДПТ приведена на рисунке 4.1.

Рассмотрим, как происходит процесс торможения с помощью графика (см. рис.4.5).

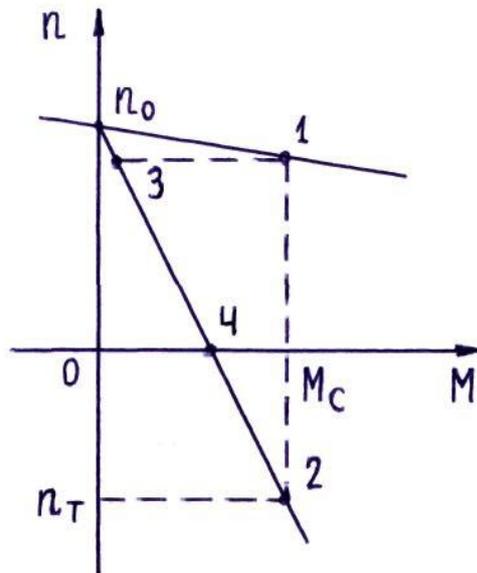


Рис.4.5

Допустим лебедка поднимает груз, который создает на валу двигателя активный момент сопротивления M_c . Этому режиму на естественной характеристике $n=f(M)$ соответствует точка 1. Теперь потребовалось этот груз опустить. При этом момент сопротивления остается тем же и действует в том же направлении, а изменяются величина и направление скорости вращения ($n_T < 0$). На графике (рис.4.5) этому соответствует на реостатной характеристике точка 2 с координатами $n = n_T$ и $M = M_c$. Для получения необходимой реостатной характеристики в цепь якоря вводим добавочное сопротивление $R_{я\text{доб}}$, обеспечивающее необходимый наклон зависимости $n=f(M)$:

$$n = U / (C_E \cdot \Phi) + M_T \cdot (R_{я} + R_{\text{доппол}} + R_{я\text{доб}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Изменяя величину $R_{я\text{доб}}$, можно влиять на скорость опускания груза.

Для выполнения торможения включаем в цепь якоря добавочное сопротивление $R_{я\text{доб}}$ (см. рис.4.1). В первый момент в силу инерции скорость вращения ротора n остается неизменной, соответствующей точке 1, а двигатель уже начинает работать на реостатной характеристике в точке 3. Момент, создаваемый двигателем в точке 3, оказывается значительно меньше момента сопротивления M_c и двигатель начинает тормозиться, частота вращения n уменьшается, рабочая точка движется по реостатной характеристике вниз от точки 3 к точке 4.

Если требуется прекратить подъем груза, т.е. остановить двигатель, то необходимо в точке 4 отключить двигатель от сети.

Если ДПТ не отключать от сети, движение рабочей точки продолжится по реостатной характеристике вниз до точки 2. В точке 2 вращающий момент двигателя M станет равным моменту сопротивления M_c , создаваемого

грузом, двигатель будет вращаться с постоянной отрицательной скоростью $n = n_T < 0$, груз будет равномерно опускаться.

Работе ДПТ в режиме торможения противовключением с введением добавочного сопротивления $R_{\text{я доб}}$ в цепь якоря соответствует уравнение $n_T = U / (C_E \cdot \Phi) + M_T \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{доппол}} + R_{\text{я доб}}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2)$.

Подставляя в уравнение числовые значения координат рассматриваемой точки 2 ($n_T < 0$; M_T), определяем величину $R_{\text{я доб}}$, обеспечивающего необходимый наклон реостатной характеристики $n = f(M)$.

На одном графике для сопоставления строим две характеристики $n = f(M)$ при изменении момента в диапазоне от 0 до $1.5 \cdot M_n$ (см. рис.4.5):

- естественную характеристику $n = f(M)$ ДПТ (при $R_{\text{я доб}} = 0$);
- реостатную тормозную характеристику $n_T = f(M)$ при $R_{\text{я доб}} \neq 0$.

На построенных характеристиках $n = f(M)$ следует показать расчетные точки, соответствующие заданному тормозному моменту M_T .

Далее следует отметить преимущества и недостатки данного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения.

4.3.2 Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря

Описание процесса торможения

Второй вариант торможения противовключением заключается в изменении во время работы двигателя направления вращающего момента M на противоположное путем изменения полярности источника напряжения в цепи якоря.

По закону Ампера сила F , действующая на проводник с током I , вычисляется по формуле

$$\vec{F} = [\vec{I} \times \vec{B}] \cdot L.$$

Здесь \vec{B} – индукция магнитного поля;

L – активная длина проводника с током I .

Как следует из формулы, изменить направление действующей силы F на противоположное можно либо изменив направление тока I , либо изменив направление магнитного поля B .

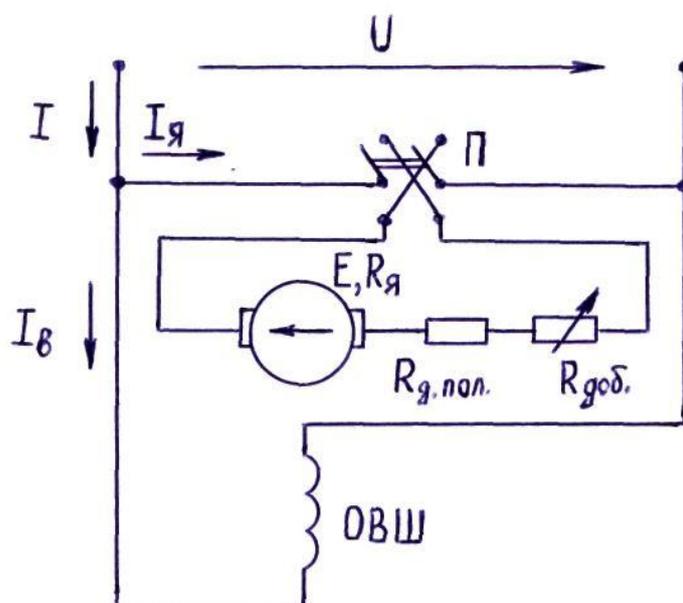


Рис.4.6

На рис.4.6 приведена электрическая схема, позволяющая с помощью переключателя П изменять полярность источника напряжения U в цепи якоря ДПТ. При этом в обмотке якоря изменяется направление тока $I_{я}$.

Предположим, первоначально двигатель работал на естественной характеристике $n=f(M)$ в первом квадранте в точке 1 (рис. 4.7) ($R_{я\text{ доб}}=0$). Необходимо выполнить электрическое торможение ДПТ.

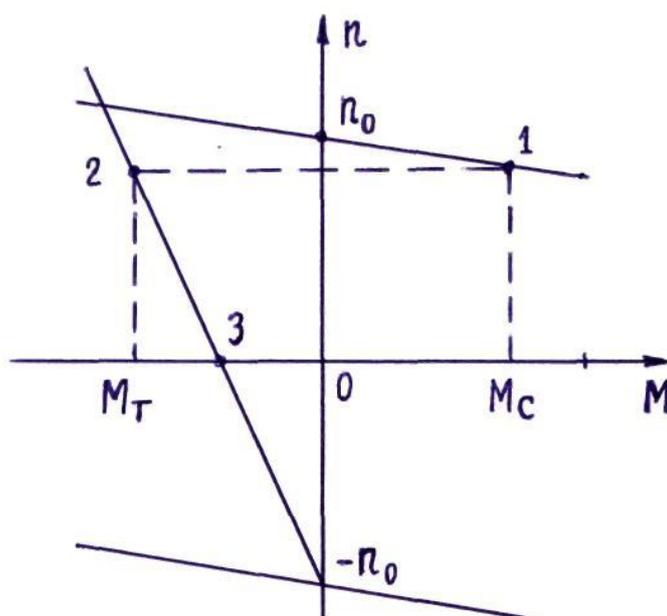


Рис.4.7.

С помощью переключателя П (см. рис. 4.6) меняем направление тока $I_{я}$ в обмотке якоря. При этом меняется на противоположное направление силы, действующей на обмотку якоря, и направление вращающего момента двигателя. Этому соответствует нижняя ветвь механической характеристики

$n=f(M)$ (см. рис.4.7), проходящая через точку с координатами $n = -n_0$ и $M = 0$ и параллельная исходной естественной характеристике с точкой 1. Если при этом не принять дополнительных мер, произойдет большой бросок тока $I_{я} = (-U-E)/(R_{я}+R_{доп пол})$ и двигатель может выйти из строя. Для ограничения тока $I_{я}$ в цепь якоря вводят добавочное сопротивление $R_{я доб}$.

Вместе с током якоря ($I_{я} < 0$) меняет направление и вращающий момент $M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я}$ (точка 2, рис. 4.7). Он становится тормозным ($M = M_T < 0$), т.к. теперь действует против направления вращения ротора двигателя. Подбором $R_{я доб}$ можно регулировать величину $I_{я}$ и, соответственно, тормозной момент M_T .

Рассмотрим с помощью механической характеристики $n=f(M)$ (рис.4.7), как осуществляется процесс торможения.

Сначала двигатель работал в точке 1 с некоторой постоянной скоростью n . При изменении полярности напряжения U на обмотке якоря двигатель переходит в точку 2 на реостатной характеристике $n=f(M)$, соответствующей измененной полярности U .

Так как момент, развиваемый двигателем, становится тормозным, скорость вращения ротора уменьшается, рабочая точка перемещается по реостатной характеристике из точки 2 к точке 3, при которой $n = 0$. Если в это время двигатель не отключить от сети, то ротор начнет разгоняться в противоположную сторону в соответствии с направлением действующего вращающего момента.

Рассмотрим, как рассчитать реостатную характеристику, соответствующую торможению противовключением рассматриваемым методом и проходящую через заданную точку с параметрами

$$M_T = (-M_H \cdot k) \quad \text{и} \quad n_T = n_D.$$

Уравнение механической характеристики $n=f(M)$, соответствующей работе ДПТ на реостатной характеристике при измененной полярности U в цепи якоря

$$n = -U / (C_E \cdot \Phi) + M \cdot (R_{я} + R_{доп пол} + R_{я доб}) / (C_E \cdot C_M \cdot \Phi^2).$$

Подставляя в уравнение числовые значения координат точки (n_T и M_T), через которую должна проходить реостатная характеристика, определяем величину добавочного сопротивления $R_{я доб}$.

На одном графике строим три характеристики $n=f(M)$ при изменении момента в диапазоне от $-1.5 \cdot M$ до $+1.5 \cdot M$ (см. рис.4.7):

- естественную характеристику $n=f(M)$;
- тормозную характеристику $n_{TE}=f(M)$ ДПТ при $R_{я доб} = 0$;
- реостатную тормозную характеристику $n_T=f(M)$ (при $R_{я доб} \neq 0$).

На построенных характеристиках $n=f(M)$ следует показать расчетные точки, соответствующие тормозному моменту M_T .

Далее следует отметить преимущества и недостатки данного метода торможения и сделать выводы о целесообразности его применения.

5. Контрольные вопросы.

1. Устройство двигателя постоянного тока (ДПТ).
2. Способы возбуждения магнитного поля в ДПТ.
3. Электрическая схема замещения ДПТ с параллельным возбуждением.
4. Механическая характеристика ДПТ с параллельным возбуждением.
Уравнение. График.
5. Способы регулирования частоты вращения n . Их сравнение.
6. Реостатное регулирование n . Электрическая схема. Уравнение.
График.
7. Якорное регулирование n . Электрическая схема. Уравнение. График.
8. Полюсное регулирование n . Электрическая схема. Уравнение. График.
9. Как осуществить реверс ДПТ? Закон Ампера.
10. Основные способы торможения ДПТ. Их сравнение.
11. Генераторное торможение. Электрическая схема. Уравнение.
Преимущества и недостатки метода.
12. Динамическое торможение. Электрическая схема. Уравнение.
Преимущества и недостатки метода.
13. Торможение противовключением с использованием $R_{доб}$.
Электрическая схема. Уравнение. Преимущества и недостатки метода.
14. Торможение противовключением при изменении полярности напряжения в цепи якоря. Электрическая схема. Уравнение. Преимущества и недостатки метода.