

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Т.Х. МУХАМЕТГАЛЕЕВ, Н.А. МАЛЁВ, Т.Н. ЛЬВОВА.

Построение механических и
электромеханических
характеристик двигателей постоянного тока
и асинхронных двигателей.

Методические указания
к выполнению курсовой работы
по дисциплине
«Автоматизированный электропривод»

Казань 2015

Введение

Двигатели постоянного тока обладают большой глубиной регулирования частоты вращения и сохраняют во всём диапазоне регулирования высокий коэффициент полезного действия. Несмотря на то, что при традиционной конструкции они в 2 – 3 раза дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором их применяют во всех тех случаях, когда их свойства имеют решающее значение. Двигатели постоянного тока широко используются в электрической тяге, например, на магистральных электровозах, в качестве рабочих двигателей на тепловозах, в метрополитенах, на трамваях, троллейбусах и т.д.

Курсовая работа включает в себя расчет основных параметров двигателя на основе паспортных данных, построение естественной механической характеристики, приведение моментов к валу двигателя, построение пусковой диаграммы двигателя, расчет переходных процессов при пуске двигателя, расчет характеристики при ослаблении магнитного потока, проверка двигателя по нагреву, составление силовой электрической схемы пуска двигателя.

Исходные данные

Дан двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением, имеющий следующие параметры:

Таблица 1. Паспортные данные двигателя

Номер варианта	P_n , кВт	U_p , В	Частота вращения, об/мин		η_n , %	R_b , Ом	J_d , кг·м ²
			n_n	n_{max}			
1	50	200	1000	1400	87	25	2,60

Таблица 2. Параметры нагрузки и кинематической схемы

Номер варианта	i_1	i_2	η_1	η_2	J_1 , кг·м ²	J_2 , кг·м ²	M_{cm} , Н·м
1	6	14	0,93	0,93	21,5	240,0	48,0

В работе требуется:

- осуществить приведение элементов кинематической цепи к валу двигателя, рассчитать приведенный момент инерции;
- определить основные параметры двигателя;
- построить пусковую диаграмму двигателя;
- рассчитать величину сопротивления пускового реостата и его ступеней;
- произвести расчет переходного процесса при пуске двигателя, построить кривые изменения момента и частоты вращения, определить время разгона двигателя;
- построить механическую характеристику для повышенной скорости и определить величину реостата в цепи возбуждения;
- определить величину сопротивления тормозного реостата для режима динамического торможения;
- построить характеристику динамического торможения;
- произвести расчет переходного процесса при торможении двигателя;

– составить силовую электрическую схему пуска двигателя и описать ее работу.

1. Приведение моментов к валу двигателя

Кинематическая схема привода представлена на рисунке 1. Здесь J_d – момент инерции двигателя и шестерни 1, J_1 – момент инерции шестерен 2 и 3, J_2 – момент инерции шестерни 4 и механизма.

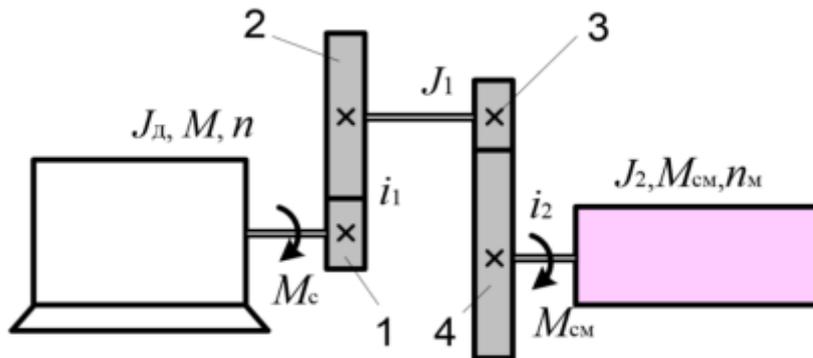


Рисунок 1. Кинематическая схема привода

На рисунке 2 представлена кривая намагничивания машины в относительных единицах.

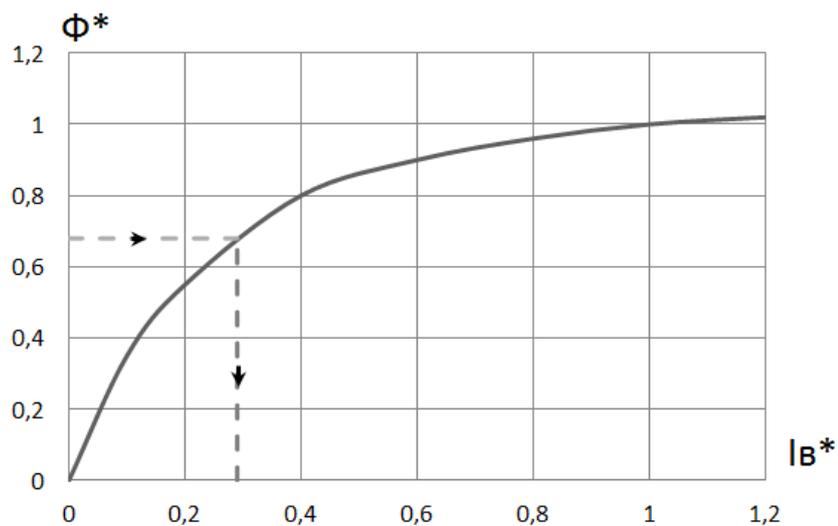


Рисунок 2. Кривая намагничивания двигателя

Приведение момента сопротивления механизма $M_{см}$ к валу двигателя осуществляют на основании энергетического баланса системы:

$$M_c = \frac{M_{см}}{i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}, \quad (1)$$

где i_1, i_2 – передаточные отношения;

η_1, η_2 – КПД зубчатых передач.

$$M_c = \frac{48 \cdot 10^3}{6 \cdot 14 \cdot 0,93 \cdot 0,93} = \frac{48 \cdot 10^3}{72,6516} = 0,660687 \cdot 10^3 = 660,687 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведенный момент инерции системы определяет интенсивность разгона, торможения и реверса двигателя и определяется по формуле:

$$J = J_d + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2}, \quad (2)$$

$$J = 2,6 + \frac{21,5}{6^2} + \frac{240}{6^2 \cdot 14^2} = 2,6 + \frac{21,5}{36} + \frac{240}{7056} = 3,231 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

где J_1 – момент инерции первого звена;

J_2 – момент инерции второго звена и рабочей машины;

J_d – момент инерции двигателя.

2. Расчет основных параметров двигателя и построение естественной механической характеристики

Мощность, потребляемая двигателем из сети при работе в номинальном режиме:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n}, \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{50}{0,87} = 57,471 \text{ кВт}$$

Номинальный ток двигателя:

$$I_H = \frac{P_1}{U_H}, \quad (4)$$

$$I_H = \frac{57,471 \cdot 10^3}{200} = 287,355 \text{ А}$$

Номинальный ток якоря:

$$I_{ян} = I_H - I_{вн} = I_H - \frac{U_H}{R_b}, \quad (5)$$

$$I_{ян} = 287,355 - \frac{200}{25} = 279,355 \text{ А}$$

где R_b – сопротивление обмотки возбуждения.

Сопротивление якорной цепи, включающее сопротивление дополнительных полюсов, компенсационной обмотки и щеток, находится из условия, что потери мощности в якорной цепи составляют половину общих потерь в двигателе:

$$R_я = \frac{0,5(1-\eta_H)P_1}{I_{ян}^2}, \quad (6)$$

$$R_я = \frac{0,5(1 - 0,87)57,471 \cdot 10^3}{279,355^2} = 0,048 \text{ Ом}$$

Противо-ЭДС якоря при номинальной частоте вращения:

$$E_H = U_H - R_я \cdot I_{ян}, \quad (7)$$

$$E_H = 200 - 0,048 \cdot 279,355 = 186,591 \text{ В}$$

Номинальный момент на валу двигателя (мощность P_H в кВт):

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H}, \quad (8)$$

$$M_H = 9550 \cdot \frac{50}{1000} = 447,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Частота вращения в режиме идеального холостого хода:

$$n_0 = \frac{U_H}{E_H} n_H, \quad (9)$$

$$n_0 = \frac{200}{186,591} \cdot 1000 = 1072 \text{ об/мин}$$

Коэффициент магнитного потока $C_M \Phi$ [В·мин/об]:

$$C_M \Phi = 9,55 \cdot \frac{E_H}{n_H}, \quad (10)$$

$$C_M \Phi = 9,55 \cdot \frac{186,591}{1000} = 1,782 \text{ В} \cdot \text{мин/об}$$

Здесь C_M – конструктивный коэффициент момента.

Коэффициент C_M связывает между собой момент и ток двигателя:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_A, \quad (11)$$

Важной характеристикой двигателя является электромеханическая (она же скоростная характеристика) $n = f(I)$:

$$n = \frac{U - R_{яц} \cdot I_A}{C_M \Phi}, \quad (12)$$

Подставив значение тока из предыдущего уравнения, получим выражение механической характеристики двигателя $n = f(M)$:

$$n = \frac{U}{C_M \Phi} - M \cdot \frac{R_{я} \cdot I_{я}}{C_M^2 \Phi^2}, \quad (13)$$

где $R_{яц}$ – общее сопротивление якорной цепи, включающее сопротивления дополнительно включенных в цепь пусковых или регулировочных реостатов.

Пусковой ток двигателя устанавливаем из условия, что он в 2,5 раза превышает номинальный ток (предельно-допустимое значение для двигателя постоянного тока):

$$I_{я.пуск} = 2,5 I_{ян}, \quad (14)$$

$$I_{я.пуск} = 2,5 \cdot 279,355 = 698,388 \text{ А}$$

Сопротивление пускового реостата:

$$R_{п} = \frac{U_{н}}{I_{я.пуск}} - R_{я}, \quad (15)$$

$$R_{п} = \frac{200}{698,388} - 0,048 = 0,238 \text{ Ом}$$

3. Построение пусковой диаграммы двигателя

Максимальное значение момента при пуске ограничивается требованиями безыскровой коммутации и принимается равным M_1 , а минимальное значение момента (момент переключения ступеней пускового реостата) определяется величиной статической нагрузки двигателя и принимается равным M_2 :

$$M_1 = (1,5 \div 2,5) M_{н},$$

$$M_2 = (1,1 \div 1,3) M_{н}.$$

Принимаем следующие значения:

$$M_1 = 2,2M_H$$

$$M_2 = 1,2M_H$$

Построение начинается с пусковой характеристики (прямая e), которая проводится через точку и точку n_0 номинального режима (M_H, n_H). Затем строится характеристика K через точку n_0 и ($M_1, 0$).

Дальнейшие построения характеристик указаны стрелками (рисунок 3). Критерием правильности расчетов и построений является совпадение точки с естественной характеристикой.

Для расчета сопротивлений секций пускового реостата необходимо измерить отрезки ab, bc, cd, ad. Сопротивления секций определяются соотношениями:

$$R_1 = R_{\Pi} (ab/ad); R_2 = R_{\Pi} (bc/ad); R_3 = R_{\Pi} (cd/ad) \quad (16)$$

$$R_1 = 0,238 \cdot 3260 = 0,127 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 0,238 \cdot 1860 = 0,071 \text{ Ом};$$

$$R_3 = 0,238 \cdot 1060 = 0,04 \text{ Ом}.$$

Проверка: сумма сопротивлений всех секций должна быть равна R_{Π} :

$$R_{\Pi} = R_1 + R_2 + R_3 = 0,127 + 0,071 + 0,04 = 0,238 \text{ Ом}.$$

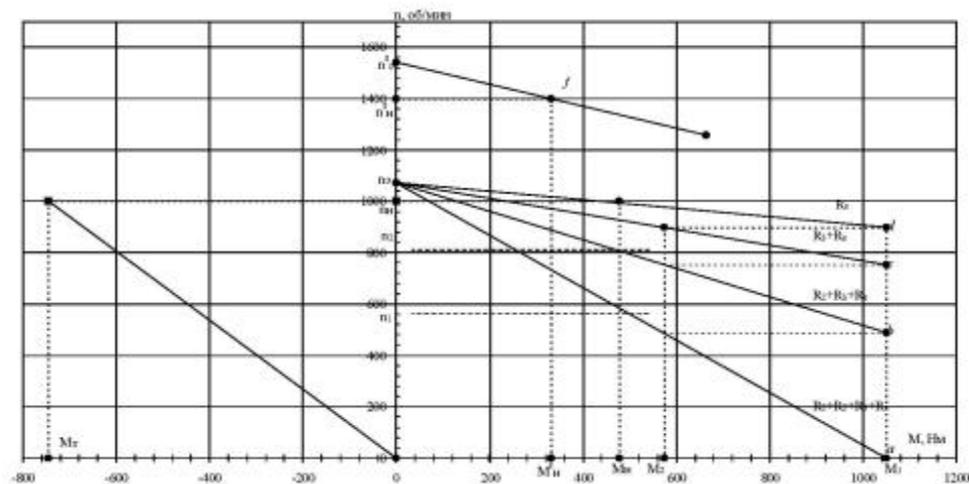


Рисунок 3. Механические характеристики двигателя

4. Расчет переходных процессов при пуске двигателя

Значение электромеханической постоянной времени двигателя на естественной (T_M) и на реостатных характеристиках (T_{M1} , T_{M2} , T_{M3}) при номинальном потоке определяется сопротивлением якорной цепи:

$$T_M = j \cdot \frac{R_{\text{я}}}{(C_M \Phi)^2} \quad (17)$$

$$T_{MЭ} = 3,231 \cdot \frac{0,048}{(1,782)^2} = 0,049 \text{ с}$$

$$T_{M1} = j \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}{(C_M \Phi)^2} \quad (18)$$

$$T_{M1} = 3,231 \cdot \frac{0,048 + 0,238}{(1,782)^2} = 0,291 \text{ с}$$

$$T_{M2} = j \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_2 + R_3}{(C_M \Phi)^2} \quad (19)$$

$$T_{M2} = 3,231 \cdot \frac{0,048 + 0,071 + 0,04}{(1,782)^2} = 0,162 \text{ с}$$

$$T_{M3} = j \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_3}{(C_M \Phi)^2} \quad (20)$$

$$T_{M3} = 3,231 \cdot \frac{0,048 + 0,04}{(1,782)^2} = 0,09 \text{ с}$$

Переходные процессы скорости вращения и момента двигателя рассчитываются по следующим формулам:

$$n = n_{\text{кон}} + (n_{\text{нач}} - n_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (21)$$

$$M = M_{\text{кон}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (22)$$

где $M_{\text{нач}} = M_1$ и $M_{\text{кон}} = M_H$ – начальное и конечное значения момента;
 $n_{\text{нач}}$ и $n_{\text{кон}}$ – начальное и конечное значение скорости на пусковой ступени.

На первой ступени $n_{\text{нач}} = 0$. Так как двигатель разгоняется при номинальном моменте сопротивления, координаты точек $M_{\text{кон}}$ и $n_{\text{кон}}$ находятся на ординате M_H . Конечное значение скорости на одной из ступеней соответствует начальному значению скорости на последующей ступени. Время разгона на i -й реостатной характеристике:

$$t_i = T_{M_i} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_H}{M_2 - M_H} \right) \quad (23)$$

Эти периоды времени следует разбить на 4–5 отрезков и для каждого рассчитать соответствующие значения скоростей и моментов.

Для естественной характеристики время разгона следует принять равным $t_E = 4T_M$ – при этом переходный процесс заканчивается на 98%.

$$t_1 = T_{M_1} \ln \frac{M_1 - M_H}{M_2 - M_H} = 0,291 \cdot \ln \frac{2,2 \cdot 477,5 - 477,5}{1,2 \cdot 477,5 - 477,5} = 0,524 \text{ с};$$

$$t_2 = T_{M_2} \ln \frac{M_1 - M_H}{M_2 - M_H} = 0,162 \cdot \ln \frac{2,2 \cdot 477,5 - 477,5}{1,2 \cdot 477,5 - 477,5} = 0,292 \text{ с};$$

$$t_3 = T_{M_3} \ln \frac{M_1 - M_H}{M_2 - M_H} = 0,09 \cdot \ln \frac{2,2 \cdot 477,5 - 477,5}{1,2 \cdot 477,5 - 477,5} = 0,162 \text{ с};$$

$$t_E = 4 \cdot T_M = 4 \cdot 0,049 = 0,196 \text{ с}.$$

Находим установившуюся частоту вращения на каждой ступени:

$$n = \frac{U - R_{яц} \cdot I_{я}}{C_M \Phi}, \quad (24)$$

$$n_1 = 1000 \cdot \frac{200 - 0,286 \cdot 279,355}{1,782} = 644 \text{ об/мин}$$

$$n_2 = 1000 \cdot \frac{200 - 0,159 \cdot 279,355}{1,782} = 834 \text{ об/мин}$$

$$n_3 = 1000 \cdot \frac{200 - 0,088 \cdot 279,355}{1,782} = 940 \text{ об/мин}$$

$$n_4 = 1000 \cdot \frac{200 - 0,048 \cdot 279,355}{1,782} = 1000 \text{ об/мин}$$

Расчет первой реостатной характеристики:

При $t = 0$

$$M(0) = M_1 = 2,2 \cdot M_H = 2,2 \cdot 477,5 = 1050,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0) = 0 \text{ об/мин.}$$

При $t = 1/3 t_1 = 1/3 \cdot 0,524 = 0,175 \text{ с};$

$$M(0,175) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,175}{0,291}} = 797,97 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,175) = 644 + (0 - 644) \cdot e^{-\frac{0,175}{0,291}} = 290,57 \text{ об/мин.}$$

При $t = 2/3 t_1 = 2/3 \cdot 0,524 = 0,349 \text{ с};$

$$M(0,349) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,349}{0,291}} = 650,08 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,349) = 644 + (0 - 644) \cdot e^{-\frac{0,349}{0,291}} = 450,03 \text{ об/мин.}$$

При $t = t_1 = 0,524 \text{ с};$

$$M(0,524) = M_2 = 1,2 \cdot M_H = 1,2 \cdot 477,5 = 572,22 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,524) = 644 + (0 - 644) \cdot e^{-\frac{0,524}{0,291}} = 537,55 \text{ об/мин.}$$

Таблица 3. Изменение скорости вращения и момента двигателя на первой реостатной характеристике

t, с	0	1/3t ₁	2/3t ₁	t ₁
	0	0,175	0,349	0,524
n, об/мин	0	290,57	450,03	537,55
M, Н·м	1050,5	791,97	650,08	572,22

Расчет второй реостатной характеристики:

При t = 0

$$M(0) = M_1 = 2,2 \cdot M_H = 2,2 \cdot 477,5 = 1050,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0) = n_1 = 537,55 \text{ об/мин.}$$

При t = 1/3t₂ = 1/3 · 0,292 = 0,097 с;

$$M(0,097) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,097}{0,162}} = 791,97 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,097) = 834 + (537,55 - 834) \cdot e^{-\frac{0,097}{0,162}} = 671,3 \text{ об/мин.}$$

При t = 2/3t₂ = 2/3 · 0,292 = 0,194 с;

$$M(0,194) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,194}{0,162}} = 650,08 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,194) = 834 + (537,55 - 834) \cdot e^{-\frac{0,194}{0,162}} = 744,71 \text{ об/мин.}$$

При t = t₂ = 0,292 с;

$$M(0,292) = M_2 = 1,2 \cdot M_H = 1,2 \cdot 477,5 = 572,22 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,292) = 834 + (537,55 - 834) \cdot e^{-\frac{0,292}{0,162}} = 785 \text{ об/мин.}$$

Таблица 4. Изменение скорости вращения и момента двигателя на второй реостатной характеристике

t, с	0	1/3t ₁	2/3t ₁	t ₁
	0	0,097	0,194	0,292
n, об/мин	537,55	671,3	744,71	785
M, Н·м	1050,5	791,97	650,08	572,22

Расчет третьей реостатной характеристики:

При t = 0

$$M(0) = M_1 = 2,2 \cdot M_H = 2,2 \cdot 477,5 = 1050,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0) = n_2 = 785 \text{ об/мин.}$$

При t = 1/3t₃ = 1/3·0,162 = 0,054 с;

$$M(0,054) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,054}{0,09}} = 791,97 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,054) = 940 + (785 - 940) \cdot e^{-\frac{0,054}{0,09}} = 854,93 \text{ об/мин.}$$

При t = 2/3t₃ = 2/3·0,162 = 0,108 с;

$$M(0,108) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,108}{0,09}} = 650,08 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,108) = 940 + (785 - 940) \cdot e^{-\frac{0,108}{0,09}} = 893,31 \text{ об/мин.}$$

При t = t₃ = 0,162 с;

$$M(0,162) = M_2 = 1,2 \cdot M_H = 1,2 \cdot 477,5 = 572,22 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,162) = 940 + (785 - 940) \cdot e^{-\frac{0,162}{0,09}} = 914,38 \text{ об/мин.}$$

Таблица 5. Изменение скорости вращения и момента двигателя на третьей реостатной характеристике

t, с	0	1/3t ₃	2/3t ₃	t ₃
	0	0,054	0,108	0,162
n, об/мин	785	854,93	893,31	914,38
M, Н·м	1050,5	791,97	650,08	572,22

Расчет естественной реостатной характеристики:

При t = 0

$$M(0) = M_1 = 2,2 \cdot M_H = 2,2 \cdot 477,5 = 1050,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0) = n_3 = 914,38 \text{ об/мин.}$$

При t = t₃ = 0,196 с;

$$M(0,196) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,196}{0,049}} = 489 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,196) = 1000 + (914,38 - 1000) \cdot e^{-\frac{0,196}{0,049}} = 998,43 \text{ об/мин.}$$

При t = 2t₃ = 2·0,196 = 0,392 с;

$$M(0,392) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,392}{0,049}} = 477,69 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,392) = 1000 + (914,38 - 1000) \cdot e^{-\frac{0,392}{0,049}} = 999,97 \text{ об/мин.}$$

При t = 4t₃ = 4·0,196 = 0,784 с;

$$M(0,784) = 477,5 + (2,2 \cdot 477,5 - 477,5) \cdot e^{-\frac{0,784}{0,049}} = 477,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$n(0,784) = 1000 + (914,38 - 1000) \cdot e^{-\frac{0,784}{0,049}} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Таблица 6. Изменение скорости вращения и момента двигателя на естественной реостатной характеристике

t, с	0	t ₄	2t ₄	4t ₄
	0	0,196	0,392	0,784
n, об/мин	914,38	998,43	999,97	1000
M, Н·м	1050,5	489	477,69	477,50

На основе полученных данных строим графики зависимости тока и частоты от времени разгона

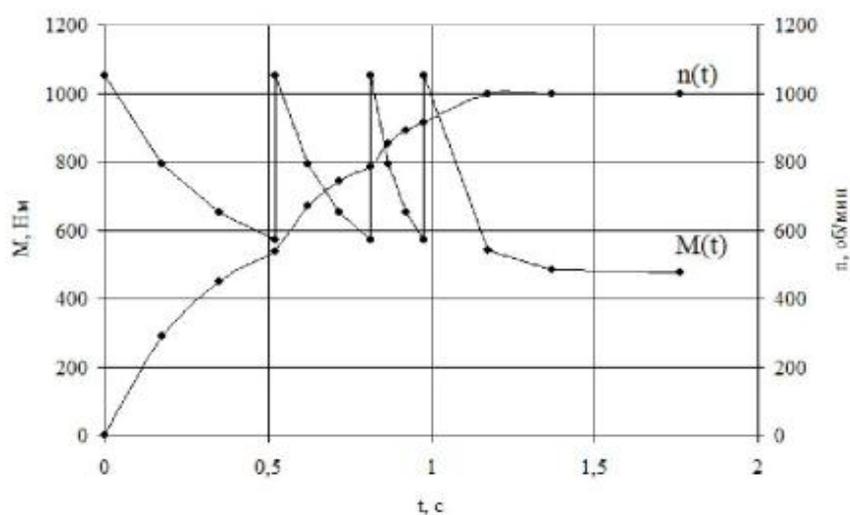


Рисунок 4. Кривые переходных процессов n(t) и M(t)

Время разгона двигателя до номинальной скорости вращения:

$$t_p = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (25)$$

$$t_p = 0,524 + 0,292 + 0,162 + 0,196 = 1,174 \text{ с}$$

5. Расчет характеристики при ослаблении магнитного потока

Регулирование скорости двигателя изменением тока возбуждения является наиболее простым и экономичным способом, т.к. мощность, потребляемая обмоткой возбуждения составляет 2...4% от мощности

двигателя. При таком регулировании возможно только увеличение скорости двигателя, т.к. машина работает в режиме насыщения и магнитный поток двигателя невозможно увеличить. Ослабление магнитного потока двигателя осуществляется, в частности, введением регулировочного реостата R_B в цепь возбуждения. В результате, согласно формуле:

$$n_0 = \frac{U}{C_M \Phi} \quad (26)$$

возрастает скорость идеального холостого хода n_0 .

Расчет ведется для одного значения магнитного потока, при котором получается повышенная скорость двигателя n_{\max} .

Относительный магнитный поток при ослаблении поля:

$$\Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_H} = \frac{n_H}{n_{\max}} \quad (27)$$

где n_{\max} – заданная повышенная скорость двигателя

$$\Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_H} = \frac{n_H}{n_{\max}} = \frac{100}{1400} = 0,714 \text{ Вб}$$

Магнитный поток нелинейно зависит от тока возбуждения I_B . Поэтому, чтобы определить степень уменьшения I_B при определенном ослаблении потока Φ^* , необходимо воспользоваться кривой намагничивания.

При $\Phi^* = 0,714$ относительный ток возбуждения $I_B^* = 0,3$, т.е. должен составлять 30% от номинального значения тока возбуждения.

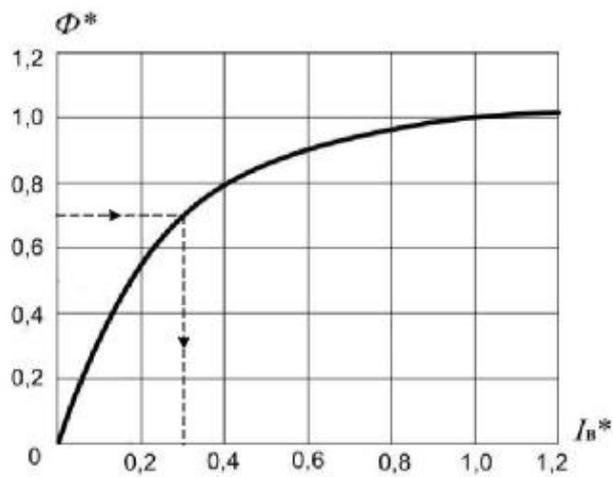


Рисунок 5. Кривая намагничивания двигателя

Сопротивление, включаемое в цепь возбуждения для перехода на повышенную скорость:

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{H}}}{I_{\text{BH}} \cdot I_{\text{B}}^*} - R_{\text{B}} \quad (28)$$

$$R_{\text{доб}} = \frac{200}{8 \cdot 0,3} - 25 = 58,333 \text{ Ом}$$

Коэффициент магнитного потока при ослабленном поле машины [В·мин/об]:

$$C_{\text{M}} \Phi^{\text{I}} = 9,55 \frac{E_{\text{H}}}{n_{\text{max}}} \quad (29)$$

$$C_{\text{M}} \Phi^{\text{I}} = 9,55 \cdot \frac{186,591}{1400} = 1,273 \text{ В} \cdot \text{мин/об}$$

Наклон естественной характеристики и характеристики при ослаблении потока:

$$\Delta n = n_0 - n_{\text{H}} \quad (30)$$

$$\Delta n = 1072 - 1000 = 72 \text{ об/мин}$$

$$\Delta n^I = \Delta n \cdot \left(\frac{n_{\max}}{n_H}\right)^2 \quad (31)$$

$$\Delta n^I = 72 \cdot \left(\frac{1,782}{1,273}\right)^2 = 141 \text{ об/мин}$$

Скорость идеального холостого хода при ослабленном магнитном потоке:

$$n_0^I = n_H^I + \Delta n^I \quad (32)$$

$$n_0^I = 1400 + 141 = 1541 \text{ об/мин}$$

Номинальный электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{эН}} = C_M \Phi \cdot I_H \quad (33)$$

$$M_{\text{эН}} = 1,782 \cdot 287,355 = 512,067 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент механических потерь двигателя:

$$M_x = M_{\text{эН}} - M_H \quad (34)$$

$$M_x = 512,067 - 477,5 = 34,567 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Электромагнитный момент двигателя при ослабленном потоке:

$$M_{\text{эН}}^I = C_M \Phi^I \cdot I_H \quad (35)$$

$$M_{\text{эН}}^I = 1,273 \cdot 287,355 = 365,803 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Допустимый момент сопротивления на валу двигателя при ослабленном потоке:

$$M_H^I = M_{эH}^I - M_x \quad (36)$$

$$M_H^I = 365,803 - 34,567 = 331,236 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Характеристику при ослабленном потоке строим по двум точкам: $[M = 0, n = n_0^I]$ и $[M = M_H^I, n = n_H^I]$.

На графике механической характеристики эти точки обозначены как n_{10} и f .

Получившаяся характеристика имеет больший наклон (меньшую жесткость), чем естественная характеристика двигателя. Это говорит о том, что двигатель работает менее стабильно: при колебаниях момента сопротивления его скорость будет изменяться в больших пределах.

6. Расчет режима динамического торможения

При динамическом торможении якорь двигателя отключается от питающей сети и включается на тормозной резистор R_T . Для обеспечения тормозного эффекта по обмотке возбуждения должен протекать номинальный ток $I_{вн}$. Момент и ток двигателя меняют направление на противоположное, двигатель переходит в генераторный режим, преобразуя кинетическую энергию вращающихся масс в тепло, выделяющееся в якоре и на тормозном резисторе.

Считаем, что двигатель включают на торможение в некоторый момент t_x , когда он работал с номинальной скоростью n_H , поэтому в начальный момент на якоре будет номинальная ЭДС E_H . Для определения сопротивления тормозного резистора, который ограничивает начальный тормозной ток, необходимо знать значение этого тока. Считаем, что для четных вариантов курсовой работы начальный тормозной ток:

$$I_T = 1.5 \cdot I_{ян} \quad (37)$$

$$I_T = -1.5 \cdot 279,355 = -419,033 \text{ A}$$

Сопротивление тормозного резистора определим по формуле:

$$R_T = \frac{E_H}{I_T} - R_{\text{я}} \quad (38)$$

$$R_T = \frac{186,591}{419,033} - 0,048 = 0,397 \text{ Ом}$$

При этом начальный тормозной момент определяется из выражения:

$$M_T = C_M \Phi \cdot I_T \quad (39)$$

и имеет отрицательное значение

$$M_T = 1,782 \cdot (-419,033) = -747 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Т.к. в якорной цепи включены сопротивления $R_{\text{я}}$ и R_T , электромеханическую постоянная времени при динамическом торможении определяем по формуле:

$$T_{\text{MT}} = J \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_T}{(C_M \Phi)^2} \quad (40)$$

$$T_{\text{MT}} = 3,231 \cdot \frac{0,048 + 0,397}{1,782^2} = 0,807 \text{ с}$$

Сделаем расчет при $t = 1/3 T_{\text{MT}} = 1/3 \cdot 0,807 = 0,269 \text{ с}$:

$$n = n_H \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{MT}}}} \quad (41)$$

$$n = 1000 \cdot e^{-\frac{0,269}{0,807}} = 716,53 \text{ об/мин}$$

$$M = M_T \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{MT}}}} \quad (42)$$

$$M = -747 \cdot e^{-\frac{0,269}{0,807}} = -535,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

t, с	0	1/3T _{мт}	2/3T _{мт}	T _{мт}	1,5T _{мт}	2T _{мт}	∞
	0	0,269	0,538	0,807	1,211	1,614	∞
n, об/мин	1000	716,53	513,42	367,88	223,13	135,34	0
M, Н·м	-747	-535,2	-383,5	-274,8	-166,7	-101,1	0

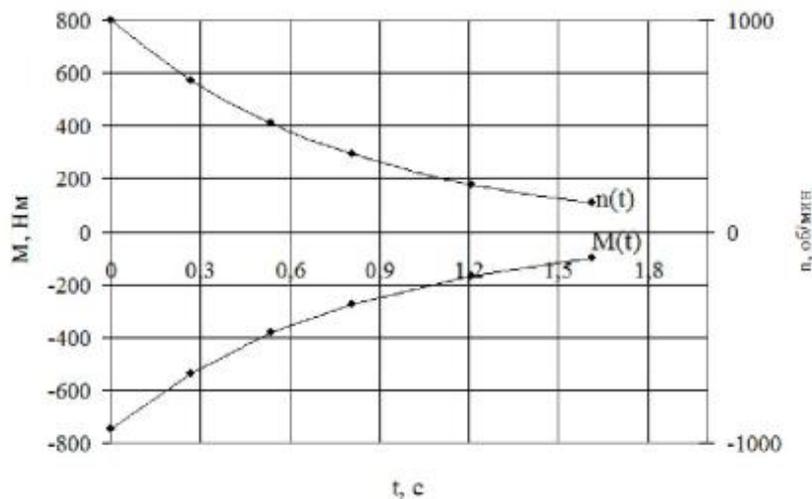


Рисунок 6. Кривые изменения тока и частоты вращения при торможении

При данном виде торможения двигатель тормозится до полной остановки длительное время, поэтому переходный процесс считаем до момента, когда время достигнет значения $2T_{мт}$. При этом скорость двигателя снизится приблизительно на 90%, после чего можно применить механическое торможение, например, с использованием тормозных колодок.

7. Проверка двигателя по нагреву

По рассчитанной и построенной на графике кривой $M = f(t)$ (рисунок 4) проверяем двигатель по нагреву. Для проверки используем метод эквивалентного момента. При этом выбираем наиболее тяжелый случай работы двигателя, считая, что непосредственно после разгона двигателя

следует его торможение, т.е. участок установившейся работы не учитывается. Криволинейный график $M(t)$ заменяется ломаной линией, возможно ближе совпадающей с реальной кривой. В результате график окажется разбитым на отдельные участки. Для каждого участка определяем эквивалентное значение момента. Так, для первого участка, площадь которого представляет собой трапецию, имеем:

$$M_{э1} = \sqrt{(M_1 + M_1 \cdot M_2 + M_2)/3} \quad (43)$$

$$M_{э1} = M_{э2} = M_{э3} = \sqrt{1050,5 + 1050,5 \cdot 573 + 573/3} = 448,538 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{э4} = \sqrt{1050,5 + 1050,5 \cdot 477,59 + 477,59/3} = 409,567 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для участка динамического торможения (пятый участок), площадь которого ограничена прямоугольным треугольником:

$$M_{э5} = \sqrt{M_T^2/3} \quad (44)$$

$$M_{э5} = \sqrt{747/3} = 431,281 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Вычисленные по (43), (44) значения эквивалентных моментов отдельных участков и соответствующих времен подставляем в выражение эквивалентного (среднеквадратичного) момента для данного режима работы двигателя:

$$M_э = \sqrt{(M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots M_n^2 \cdot \frac{t_n}{t_1}) + t_2 + \dots \cdot t_n} \quad (45)$$

$$M_э = (448,538^2 \cdot 0,524 + 448,538^2 \cdot 0,292 + 448,538^2 \cdot 0,162 + 409,567^2 \cdot 0,196 + 431,281^2 \cdot 0,807) / (0,524 + 0,292 + 0,162 + 0,196 + 0,807) = 437,83 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для обеспечения надежной работы двигателя в длительном режиме с переменной нагрузкой и отсутствия перегрева двигателя необходимо

выполнение условия $I_{\Delta} \leq I_n$. Поскольку ток пропорционален мощности, а значит моменту то получаем: $M_{\Delta} \leq M_n = 437,83 \leq 477,5$

Проверка двигателя по нагреву выполняется.

8. Составление силовой электрической схемы пуска двигателя

На рисунке 7 представлена схема двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением и трехступенчатым пусковым реостатом.

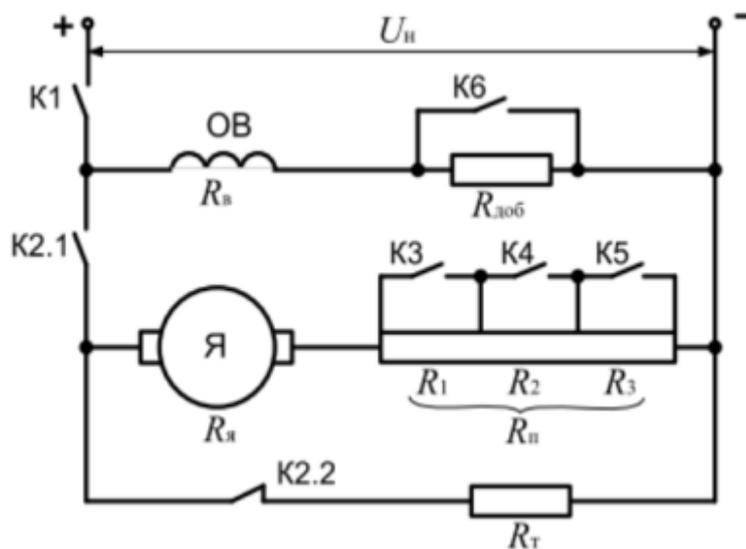


Рисунок 7. Электрическая схема пуска двигателя

Схема работает следующим образом:

Замыкают контакт $K1$, обмотка возбуждения подключается на номинальное напряжение, в машине создается номинальный магнитный поток. Замыкают контакт $K2.1$ (при этом контакты $K2.2$, $K3$ и $K4$ разомкнуты, контакт $K6$ замкнут), якорь двигателя подключается к сети через пусковой реостат, ток якоря ограничен до предельно-допустимого значения, двигатель начинает разгон при максимальном моменте M_1 . При достижении скорости n_1 замыкается контакт $K3$.

Замыкание контакта автоматически осуществляет схема управления, которая может работать по одному из трех принципов регулирования: тока,

скорости или времени. При реализации принципа тока в цепь якоря включают токовое реле, которое при снижении пускового тока до значения I_2 (соответствует моменту M_2 в расчетах) последовательно размыкает контакты К3-К4. Принцип скорости предполагает установку на валу двигателя тахогенератора или подключение к якорю реле напряжения, к которому приложена ЭДС, пропорциональная скорости двигателя. Контакт К3 размыкается при достижении скорости значения двигателя n_1 , контакт К4 – значения n_2 . Для реализации принципа времени в схему управления включают реле времени (их число равно числу ступеней пускового реостата), которые размыкают контакты К3-К4 по истечении определенных в работе периодов $t_1 - t_3$. Двигатель выходит на естественную характеристику и разгоняется до номинальной скорости n_n .

При необходимости увеличения скорости двигателя до значения n_n^I размыкают контакт К6, ток возбуждения уменьшается, магнитный поток машины ослабляется, а скорость двигателя возрастает. Из-за ослабленного потока характеристика двигателя имеет больший наклон, т.е. становится мягче.

Для останова двигателя размыкают контакт К2.1 и замыкают контакт К2.2, якорь отключается от сети и замыкается на тормозной резистор R_t , ток в якоре меняет направление, двигатель переходит в режим динамического торможения. После останова двигателя необходимо разомкнуть контакт К1, иначе при отсутствии вентиляции обмотка возбуждения выйдет из строя. Обычно такое размыкание осуществляется с помощью дополнительного реле времени в схеме управления, период срабатывания которого должен несколько превышать рассчитанное время t_t .

Заключение

В данной курсовой работе произведен расчет разгона двигателя постоянного тока до основной скорости и при ослаблении магнитного потока, расчет тормозного режима, переходных процессов в данных режимах, а также произведена проверка двигателя по нагреву.

Так как угловая скорость механизма и момент его сопротивления отличаются от скорости двигателя и развиваемого им момента, а суммарный запас кинетической энергии движущихся частей системы электропривода остается неизменным, осуществляют приведение моментов сопротивления и инерции механизма к валу двигателя. Приведенный момент инерции системы определяет интенсивность разгона, торможения и реверса двигателя.

Важной характеристикой двигателя является механическая характеристика, которая показывает, с какой скоростью будет работать двигатель при определенном моменте сопротивления на его валу.

Естественная механическая характеристика получается при номинальных значениях питающего напряжения и потока и отсутствии внешних сопротивлений в цепи якоря. Чем мощнее двигатель, тем больше его пусковой момент и тем более пологой будет естественная характеристика двигателя.

При пуске двигателя необходимо обеспечить надлежащее значение пускового момента и условия для достижения необходимой частоты вращения и предотвратить возникновение чрезмерного пускового тока, опасного для двигателя.

Наиболее распространенный способ регулирования частоты вращения – это изменение потока возбуждения путем регулирования тока в обмотке возбуждения. Наиболее простой способ регулирования тока возбуждения – варьирование сопротивления регулировочного резистора в контуре возбуждения.

Изменением тока возбуждения можно регулировать частоту вращения в пределах 1:1,5, 1:2. Глубокое уменьшение потока недопустимо, так как приводит к неустойчивой работе двигателя. Увеличение магнитного потока в обычных двигателях параллельного возбуждения нецелесообразно, так как магнитная система двигателей насыщена. Хотя этот способ обеспечивает сравнительно небольшие пределы регулирования частоты вращения, он является экономичным и находит широкое применение, когда пределы изменения частоты вращения небольшие.

Список использованных источников

1. Плотников С.М. Электрические машины: «Расчет пуска двигателя постоянного тока»: Методическое пособие к выполнению курсовой работы для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов». – Красноярск: КриЖТ ИрГУПС, 2018. – 19 с.
2. Семенов И.В. Электрические машины и электропривод: Методические указания по выполнению расчетно-графических работ. – Красноярск. КриЖТ ИрГУПС, 2008. – 57 с.
3. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высш. школа, 2012. – 697 с.
4. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины: Введение в электромеханику: Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер Пресс, 2008. – 320 с.