

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н.В. Кояин

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРИВОДОВ**

Учебно – методическое пособие

Томск 2005

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Частота вращения механизма на первой ступени $n_{M1} = 75 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$;

Время работы на первой ступени $t_1 = 30$ с;

Частота вращения механизма на второй ступени $n_{M2} = -50 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$;

Время работы на второй ступени $t_2 = 0.6$ мин;

Время паузы $t_{\text{п}} = 150$ с;

Момент механизма – $1500 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

Характер нагрузки – реактивная;

КПД передачи при максимальной частоте вращения – 0.95 ;

Момент инерции механизма – $35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

3.1. Построение тахограммы и нагрузочной диаграммы производственного механизма

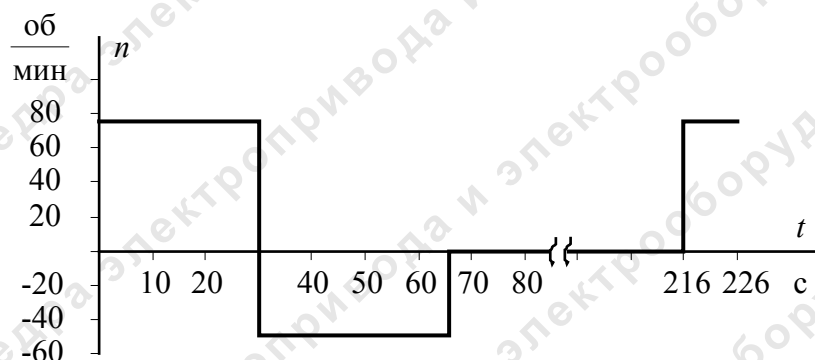


Рис. 3.1. Тахограмма производственного механизма

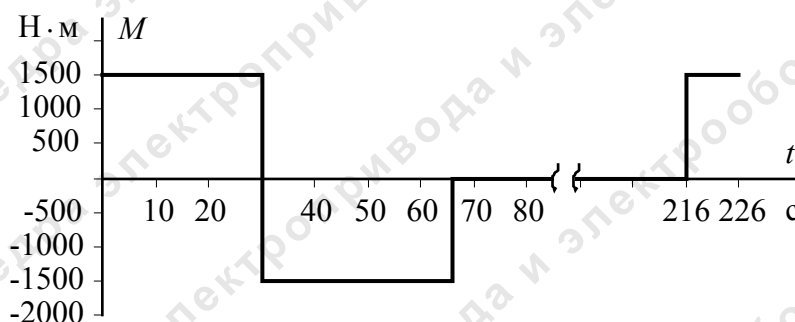


Рис. 3.2. Нагрузочная диаграмма производственного механизма для реактивного характера нагрузки

3.2. Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу. Определение наиболее выгодного передаточного отношения редуктора

3.2.1. Определяем продолжительность включения

$$\begin{aligned} \text{ПВ}_{\text{расч}} &= \frac{t_p}{t_c} \cdot 100\% = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2} + t_{\Pi}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{30 + 0.6 \cdot 60}{30 + 0.6 \cdot 60 + 150} \cdot 100 = 30.56 \%. \end{aligned}$$

Выбираем стандартное (15%, 25%, 40%, 60%), близнее по величине, значение продолжительности включения.

$$\text{ПВ}_{\text{кат}} = 40 \%.$$

3.2.2. Определяем диапазон регулирования

$$D_{\text{рег}} = \frac{n_{M1}}{n_{M2}} = \frac{75}{50} = 1:1.5.$$

3.2.3. Определяем среднеквадратичное значение мощности за время работы на основании тахограммы и нагрузочной диаграмм

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{P_i \cdot \omega_{\max}}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{pi}}},$$

где

m – число рабочих участков в цикле;

P_i – мощность на i -м участке работы;

t_{pi} – продолжительность i -м участка работы;

β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м участке работы;

ω_i – угловая скорость на i -м участке;

ω_{\max} – максимальная скорость механизма.

Определяем значения угловой скорости по ступеням:

первая ступень

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{M1}}{60} = \frac{2 \cdot 3.14159 \cdot 75}{60} = 7.854 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

вторая ступень

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{M2}}{60} = \frac{2 \cdot 3.14159 \cdot 50}{60} = 5.236 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Определяем мощность на i -м участке работы:

первая ступень

$$P_1 = M_{\text{мех}} \cdot \omega_1 \cdot 10^{-3} = 1500 \cdot 7.854 \cdot 10^{-3} = 11.781 \text{ кВт};$$

вторая ступень

$$P_2 = M_{\text{мех}} \cdot \omega_2 \cdot 10^{-3} = 1500 \cdot 5.236 \cdot 10^{-3} = 7.854 \text{ кВт}.$$

Определяем коэффициент ухудшения теплоотдачи на i участке работы по выражению

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{\text{max}}},$$

где β_0 – коэффициент ухудшения теплоотдачи при подвижном роторе. Принимаем для закрытого исполнения двигателя без принудительного охлаждения $\beta_0 = 0.95$.

Для первого участка

$$\beta_1 = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{\text{max}}} = 0.95 + (1 - 0.95) \cdot \frac{7.854}{7.854} = 1.$$

Для второго участка

$$\beta_2 = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_2}{\omega_{\text{max}}} = 0.95 + (1 - 0.95) \cdot \frac{5.236}{7.854} = 0.983.$$

Среднеквадратичное значение мощности равно

$$P_3 = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_1 \cdot \omega_{\text{max}}}{\omega_1}\right)^2 \cdot t_{p1} + \left(\frac{P_2 \cdot \omega_{\text{max}}}{\omega_2}\right)^2 \cdot t_{p2}}{\beta_1 \cdot t_{p1} + \beta_2 \cdot t_{p2}}} =$$
$$= \sqrt{\frac{\left(11.781 \cdot \frac{7.854}{7.854}\right)^2 \cdot 30 + \left(7.854 \cdot \frac{7.854}{5.236}\right)^2 \cdot 0.6 \cdot 60}{1 \cdot 30 + 0.983 \cdot 0.6 \cdot 60}} = 11.835 \text{ кВт}.$$

3.2.4. Делаем пересчет среднеквадратичной мощности двигателя на выбранное стандартное значение ПВ=40%

$$P_{\text{к}} = P_3 \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч.э}}}{\text{ПВ}_{\text{кат}}}} = 11.835 \cdot \sqrt{\frac{30.56}{40}} = 10.345 \text{ кВт}.$$

Определяем расчетную мощность электрического двигателя

$$P_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{к}} \cdot k_3}{\eta_{\text{мех}}},$$

где

$k_3 = (1.1 \div 1.3)$ – коэффициент запаса;

$\eta_{\text{мех}}$ – КПД передачи при $n_{\text{макс}}$,

$$P_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{к}} \cdot k_3}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{10.345 \cdot 1.15}{0.95} = 12.522 \text{ кВт}.$$

3.2.5. Выбираем по [8] асинхронный двигатель с фазным ротором типа МТМ–412–8 со следующими паспортными данными.

Таблица 21

ПВ	$P_{\text{н}}$	$n_{\text{дв.н}}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}$	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$\cos \varphi_{\text{хх}}$	$I_{\text{с.н}}$	I_0	R_1
%	кВт	об/мин	-	-	-	А	А	Ом
40	16	715	2.8	0.7	0.08	42.5	30	0.316
$x_{1\sigma}$	$E_{2\text{н}}$	$I_{2\text{н}}$	R_2	$x_{2\sigma}$	$U_{1\text{лн}}$	k_e	$J_{\text{дв}}$	
Ом	В	А	Ом	Ом	В	-	кг·м ²	
0.371	200	52	0.098	0.195	380	1.82	0.75	

3.2.6. По полученной расчетной мощности можно предварительно выбрать несколько двигателей с учетом номинальной скорости. После этого следует определить передаточное отношение редуктора

$$i_{\text{р}} = \frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{макс}}}.$$

Для нашего примера

$$i_{\text{расч}} = \frac{n_{\text{дв.н}}}{n_{\text{макс}}} = \frac{715}{75} = 9.53.$$

Определенное в п. 3.2.6 передаточное отношение редуктора $i_{\text{расч}} = 9.53$ не совпадает со стандартным.

Принимаем из табл. 22 стандартное значение передаточного числа

$$i_{\text{ст.р}} = 9.$$

Таблица 22

Стандартные ряды передаточных чисел

Ряд	Передаточные числа $i_{\text{ст}}$									
I	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8
II	1.12	1.4	1.8	2.24	2.8	3.55	4.5	5.6	7.1	9.0

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора можно найти следующим образом :

$$i_{\text{ст.р}} = i_{\text{ст}} \cdot 10^x,$$

где $i_{\text{ст.р}}$ – стандартное передаточное число редуктора; x – целое число.

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается из условия

$$i_{\text{ст.р}} \leq i_{\text{расч}}.$$

Если двигателей несколько, то необходимо определить наивыгоднейшее передаточное отношение для каждого двигателя по выражению

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{\text{мех}}}{k \cdot J_{\text{дв}}}},$$

где

$J_{\text{мех}}, J_{\text{дв}}$ – соответственно моменты инерции механизма и электрического двигателя;

k – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи, $k = 1.3$,

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{\text{мех}}}{k \cdot J_{\text{дв}}}} = \sqrt{\frac{35}{1.2 \cdot 0.75}} = 6.236.$$

Отношение полученного расчетного передаточного отношения к оптимальному передаточному отношению равно

$$\Theta = \frac{i_p}{i_{\text{опт}}} = \frac{9.533}{6.236} = 1.529.$$

В случае нескольких двигателей следует выбрать тот, у которого величина Θ ближе к единице. Дальнейшие расчеты проводим для одного двигателя.

3.2.7. Определяем скорость вращения по ступеням:

$$n_{\text{ст1}} = n_{\text{м1}} \cdot i_{\text{ст.р}} = 75 \cdot 9 = 675 \frac{\text{об}}{\text{мин}}, \quad n_{\text{ст2}} = n_{\text{м2}} \cdot i_{\text{ст.р}} = -50 \cdot 9 = -450 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

3.2.8. Определяем момент нагрузки по ступеням

Реактивная нагрузка (нагрузочная диаграмма рис. 3.2) – I, III квадранты работы (двигательный режим)

$$M_{\text{ст1}} = M_{\text{ст2}} = \frac{M_{\text{макс}}}{i_{\text{ст}} \cdot \eta_{\text{мех}}} = \frac{1500}{9 \cdot 0.95} = 175.4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Активная нагрузка (нагрузочная диаграмма рис. 3.3)

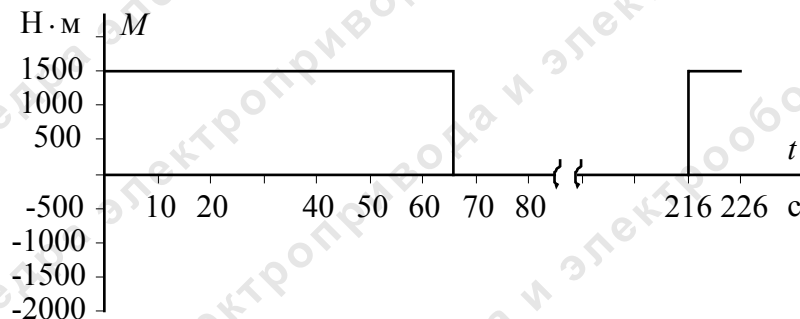


Рис. 3.3. Нагрузочная диаграмма производственного механизма для активного характера нагрузки

В I квадранте (двигательный режим работы) момент ступени определяется по выражению

$$M_{c1} = \frac{M_{\text{макс}}}{i_{\text{ст.р}} \cdot \eta_{\text{мех}}} = \frac{1500}{9 \cdot 0.95} = 175.4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В IV квадранте (генераторный режим работы – рекуперация, противовключение) момент ступени определяется по выражению

$$M_{c2} = \frac{M_{\text{макс}} \cdot \eta_{\text{мех}}}{i_{\text{ст.р}}} = \frac{1500 \cdot 0.95}{9} = 158.33 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Дальнейший расчет будем вести для реактивного характера нагрузки (см. рис. 3.2).

3.2.9. Определяем параметры двигателя и строим естественную механическую и электромеханическую характеристики.

3.2.9.1. Приведенные сопротивления:

$$\begin{aligned} R_2' &= R_2 \cdot k_e^2 = 0.098 \cdot 1.82^2 = 0.325 \text{ Ом}, \\ x_{2\sigma}' &= x_{2\sigma} \cdot k_e^2 = 0.195 \cdot 1.82^2 = 0.646 \text{ Ом}, \\ x_k &= x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' = 0.371 + 0.646 = 1.017 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Определяем синхронную частоту вращения n_0 и синхронную скорость ω_0 :

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_{1H}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}, \quad \omega_0 = \frac{n_0}{9.55} = \frac{750}{9.55} = 78.534 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

3.2.9.2. Определяем критический момент двигателя в двигательном режиме:

$$\begin{aligned} M_{\text{кр}} &= \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right)} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 78.534 \cdot \left(0.316 + \sqrt{0.316^2 + 1.017^2} \right)} = 669.455 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

3.2.9.3. Определяем номинальный момент двигателя

$$\frac{M_{\text{кр}}}{M_H} = 2.8, \quad M_H = \frac{M_{\text{кр}}}{2.8} = \frac{669.455}{2.8} = 239.091 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.2.9.4. Определяем наибольший пусковой момент двигателя

$$M_1 = 0.85 \cdot M_{\text{кр}} = 0.85 \cdot 669.455 = 569.037 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.2.9.5. Определяем момент переключения

$$M_2 = 1.2 \cdot M_H = 1.2 \cdot 239.091 = 286.909 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.2.9.6. Определяем критическое скольжение в двигательном режиме

$$S_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} = \frac{0.325}{\sqrt{0.316^2 + 1.017^2}} = 0.305.$$

3.2.9.7. Определяем номинальное скольжение

$$S_H = \frac{n_0 - n_{дв.н}}{n_0} = \frac{750 - 715}{750} = 0.0467.$$

3.2.9.8. Определяем скольжение по ступеням

$$S_{ст1} = \frac{n_0 - n_{ст1}}{n_0} = \frac{750 - 675}{750} = 0.1.$$

При *реактивном* характере нагрузки для расчета скольжения второй ступени значение скорости, если она имеет отрицательное значение, берется по модулю

$$S_{ст2} = \frac{n_0 - |-n_{ст2}|}{n_0} = \frac{750 - |-450|}{750} = 0.4.$$

При *активном* характере нагрузки значение скорости на второй ступени берется по своему абсолютному значению, следовательно, скольжение на второй ступени равно:

$$S_{ст2} = \frac{n_0 - (-n_{ст2})}{n_0} = \frac{750 + 450}{750} = 1.6.$$

3.2.9.9. Рассчитываем естественную механическую характеристику $M=f(S)$ по выражению

$$M = M_{кр} \cdot \frac{2 + q}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + q},$$

где $q = \frac{R_1'}{R_2'} \cdot 2 \cdot S_{кр} = \frac{0.316}{0.325} \cdot 2 \cdot 0.305 = 0.593.$

Задаемся скольжением от 0 до 1 и строим естественную характеристику $M = f(S)$ (см. рис. 3.4).

3.2.9.10. Рассчитываем естественные электромеханические характеристики $I_2' = f(S)$ и $I_1 = f(S)$

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + x_k^2}},$$

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2} \cdot (1 + 2 \cdot \alpha),$$

где $\alpha = (0.11 \div 0.13).$

Задаемся скольжением от 0 до 1 и строим естественные электромеханические характеристики $I_2' = f(S)$ и $I_1 = f(S)$ (см. рис. 3.5)

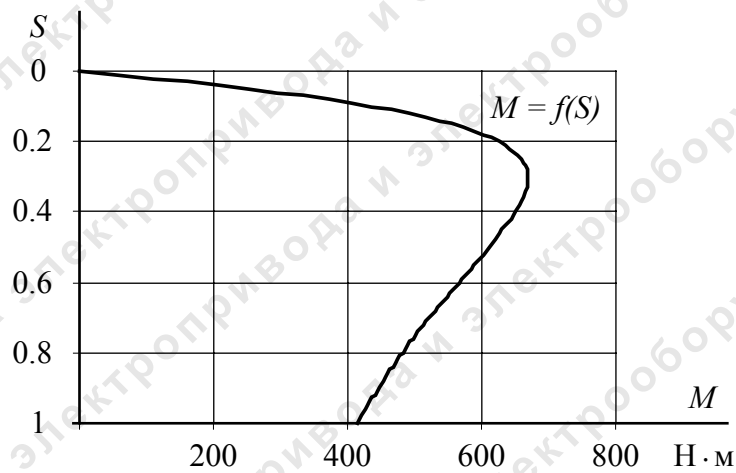


Рис. 3.4. Естественная механическая характеристика электродвигателя

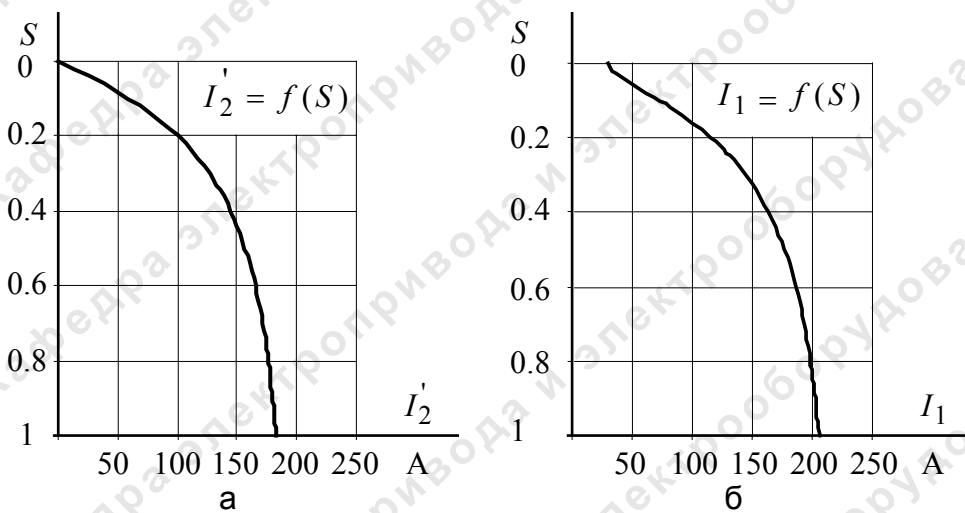


Рис. 3.5. Естественные электромеханические характеристики электродвигателя: а – $I_2' = f(S)$; б – $I_1 = f(S)$

3.3. Расчет и выбор по каталогу преобразовательных устройств или пусковых и регулировочных реостатов

3.3.1. Определяем добавочное сопротивление для пусковой характеристики

$$M_1 = \frac{M_{кр} \cdot (2 + q)}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + q} = \frac{M_{кр} \cdot (2 + q)}{S^2 + S_{кр}^2 + q \cdot S \cdot S_{кр}} = \frac{M_{кр} \cdot S \cdot S_{кр} \cdot (2 + q)}{S^2 + S_{кр}^2 + q \cdot S \cdot S_{кр}}$$

$$M_1 \cdot (S^2 + S_{кр}^2 + q \cdot S \cdot S_{кр}) = M_{кр} \cdot S \cdot S_{кр} \cdot (2 + q),$$

$$S^2 + S_{кр}^2 + q \cdot S \cdot S_{кр} = \frac{M_{кр} \cdot S \cdot S_{кр} \cdot (2 + q)}{M_1}.$$

Так как значение скольжения S при пуске равно 1 получаем

$$1 + S_{кр}^2 + q \cdot S_{кр} = \frac{M_{кр} \cdot S_{кр} \cdot (2 + q)}{M_1},$$

$$S_{кр}^2 + S_{кр} \cdot \left(q - \frac{M_{кр} \cdot (2 + q)}{M_1} \right) + 1 = 0.$$

В результате решения квадратного уравнения получаем два корня

$$S_{кр1} = 1.943, \quad S_{кр2} = 0.514.$$

Принимаем $S_{кр1} = 1.943$.

$$S_{кр1} = \frac{R_2' + R_{2\text{п.доб}}'}{\sqrt{R_1'^2 + x_k^2}},$$

$$R_2' + R_{2\text{п.доб}}' = S_{кр1} \cdot \sqrt{R_1'^2 + x_k^2}, \quad R_{2\text{п.доб}}' = S_{кр1} \cdot \sqrt{R_1'^2 + x_k^2} - R_2',$$

$$R_{2\text{п.доб}}' = 1.741 \text{ Ом}, \quad R_{2\text{п.доб}} = \frac{R_{2\text{п.доб}}'}{k_e^2} = \frac{1.741}{1.82^2} = 0.526 \text{ Ом}.$$

3.3.2. Определяем добавочные сопротивления для регулировочных характеристик:

– 1 ступень

$$M_{ст1} = \frac{M_{кр} \cdot (2 + q)}{\frac{S_{ст1}}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_{ст1}} + q},$$

$$S_{ст1}^2 + S_{кр}^2 + q \cdot S_{ст1} \cdot S_{кр} = \frac{M_{кр} \cdot S_{ст1} \cdot S_{кр} \cdot (2 + q)}{M_{ст1}}.$$

Так как значение скольжения $S_{ст1}$ равно 0.1, получаем

$$0.01 + S_{кр}^2 + q \cdot 0.1 \cdot S_{кр} = \frac{M_{кр} \cdot 0.1 \cdot S_{кр} \cdot (2 + q)}{M_{ст1}},$$

$$S_{кр}^2 + S_{кр} \cdot \left(0.1 \cdot q - \frac{M_{кр} \cdot 0.1 \cdot (2 + q)}{M_{ст1}} \right) + 0.01 = 0.$$

В результате решения квадратного уравнения получаем два корня

$$S_{кр1} = 0.919, \quad S_{кр2} = 0.0108.$$

Принимаем $S_{кр1} = 0.919$.

Определяем добавочное сопротивление для 1 ступени

$$S_{кр1} = \frac{R_2' + R_{2ст1.доб}'}{\sqrt{R_1'^2 + x_k^2}},$$

$$R_2' + R_{2ст1.доб}' = S_{кр1} \cdot \sqrt{R_1'^2 + x_k^2}, \quad R_{2ст1.доб}' = S_{кр1} \cdot \sqrt{R_1'^2 + x_k^2} - R_2',$$

$$R_{2ст1.доб}' = 0.654 \text{ Ом}, \quad R_{2ст1.доб}' = \frac{R_{2ст1.доб}'}{k_e^2} = \frac{0.654}{1.82^2} = 0.197 \text{ Ом}.$$

– 2 ступень

$$M_{ст2} = \frac{M_{кр} \cdot (2 + q)}{\frac{S_{ст2}}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_{ст2}} + q},$$

$$S_{ст2}^2 + S_{кр}^2 + q \cdot S_{ст2} \cdot S_{кр} = \frac{M_{кр} \cdot S_{ст2} \cdot S_{кр} \cdot (2 + q)}{M_{ст2}}.$$

Так как значение скольжения $S_{ст2}$ равно 0.4, получаем

$$0.16 + S_{кр}^2 + q \cdot 0.4 \cdot S_{кр} = \frac{M_{кр} \cdot 0.4 \cdot S_{кр} \cdot (2 + q)}{M_{ст2}},$$

$$S_{кр}^2 + S_{кр} \cdot \left(0.4 \cdot q - \frac{M_{кр} \cdot 0.4 \cdot (2 + q)}{M_{ст2}} \right) + 0.16 = 0.$$

В результате решения квадратного уравнения получаем два корня

$$S_{кр1} = 3.678, \quad S_{кр2} = 0.044.$$

Принимаем $S_{кр1} = 3.678$.

Определяем добавочное сопротивление для 2 ступени

$$S_{кр1} = \frac{R_2' + R_{2ст2.доб}'}{\sqrt{R_1'^2 + x_k^2}},$$

$$R_2' + R_{2ст2.доб}' = S_{кр1} \cdot \sqrt{R_1'^2 + x_k^2}, \quad R_{2ст2.доб}' = S_{кр1} \cdot \sqrt{R_1'^2 + x_k^2} - R_2',$$

$$R_{2ст2.доб}' = 3.592 \text{ Ом}, \quad R_{2ст2.доб}' = \frac{R_{2ст1.доб}'}{k_e^2} = \frac{3.592}{1.82^2} = 1.084 \text{ Ом}.$$

3.3.3. Определяем токи ротора на соответствующей ступени по выражению

$$I_{2сти}' = \frac{U_{1ф}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_{2сти}'}}{S_{сти}} \right)^2 + x_k^2}}:$$

– для первой ступени

$$I'_{2ст1} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2 + R'_{2ст1}}{S_{ст1}}\right)^2 + x_k^2}} =$$
$$= \frac{220}{\sqrt{\left(0.316 + \frac{0.325 + 0.654}{0.1}\right)^2 + 1.017^2}} = 21.668 \text{ A};$$

– для второй ступени

$$I'_{2ст2} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2 + R'_{2ст2}}{S_{ст2}}\right)^2 + x_k^2}} =$$
$$= \frac{220}{\sqrt{\left(0.316 + \frac{0.325 + 3.592}{0.4}\right)^2 + 1.017^2}} = 21.656 \text{ A}.$$

Действительные токи по ступеням:

– для первой ступени

$$I_{2ст1} = I'_{2ст1} \cdot k_e = 21.668 \cdot 1.82 = 39.435 \text{ A};$$

– для второй ступени

$$I_{2ст2} = I'_{2ст2} \cdot k_e = 21.656 \cdot 1.82 = 39.415 \text{ A}.$$

3.3.4. Определяем продолжительность включения

$$ПВ_i = \frac{t_i}{t_{ц}} \cdot 100\%.$$

Сопротивление $R_{2ст1.доб}$ работает постоянно, т.е.

$R_{доб1} = R_{2ст1.доб}$, а сопротивление $R_{2ст2.доб}$ только на второй ступени.

Следовательно, $R_{доб2} = R_{2ст1.доб} + R_{2ст2.доб}$.

Определяем продолжительность включения для ступеней:

$$ПВ_{расч.ст1} = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2} + t_{ц}} \cdot 100\% = \frac{30 + 0.6 \cdot 60}{30 + 0.6 \cdot 60 + 150} \cdot 100 = 30.56\%;$$

$$ПВ_{расч.ст2} = \frac{t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2} + t_{ц}} \cdot 100\% = \frac{0.6 \cdot 60}{30 + 0.6 \cdot 60 + 150} \cdot 100 = 16.67\%.$$

3.3.5. Определяем расчетные токи, средние за время работы:

$$I_{\text{расч.ст1}} = \sqrt{\frac{I_{2\text{ст1}}^2 \cdot t_{\text{p1}} + I_{2\text{ст2}}^2 \cdot t_{\text{p2}}}{t_{\text{p1}} + t_{\text{p2}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{39.435^2 \cdot 30 + 39.415^2 \cdot 36}{30 + 36}} = 39.424 \text{ А};$$

$$I_{\text{расч.ст2}} = \sqrt{\frac{I_{2\text{ст2}}^2 \cdot t_{\text{p2}}}{t_{\text{p2}}}} = \sqrt{\frac{39.415^2 \cdot 36}{36}} = 39.415 \text{ А}.$$

3.3.6. Определяем каталожный ток для каждой ступени:

$$I_{\text{кат1}} = I_{\text{расч.ст1}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{расч.ст1}}}{ПВ_{\text{кат}}}} = 39.424 \cdot \sqrt{\frac{30.56}{40}} = 34.457 \text{ А};$$

$$I_{\text{кат2}} = I_{\text{расч.ст2}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{расч.ст2}}}{ПВ_{\text{кат}}}} = 39.415 \cdot \sqrt{\frac{16.67}{40}} = 25.442 \text{ А}.$$

3.3.7. Выбираем ящики сопротивлений [8] по наибольшему току, удовлетворяющему условию $I_{\text{доп}} > I_{\text{кат.расч}}$.

$$R_{\text{доб1}} = R_{2\text{ст1.доб}} = 0.197 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{доб2}} = R_{2\text{ст2.доб}} - R_{2\text{ст1.доб}} = 1.084 - 0.197 = 0.887 \text{ Ом}.$$

Ящик сопротивлений №54

Продолжительный ток, А	Сопротивление ящика, Ом	Сопротивление элемента, Ом	Число элементов
46	2.16	0.054	40

Для первой ступени выбираем 4 элемента

$$R_{\text{доб1}} = 0.197 \text{ Ом}, \quad \Sigma R_{\text{доб1}} = 4 \cdot 0.054 = 0.216 \text{ Ом}.$$

Для второй ступени выбираем 17 элементов

$$R_{\text{доб2}} = 0.887 \text{ Ом}, \quad \Sigma R_{\text{доб2}} = 17 \cdot 0.054 = 0.918 \text{ Ом}.$$

3.4. Расчет электромеханических и механических характеристик для двигательного и тормозного режимов

3.4.1. Делаем пересчет значений критического скольжения по ступеням:

Первая ступень регулирования

$$\Sigma R_{\text{доб1}} = 0.216 \text{ Ом}, \quad R'_{\text{доб1}} = \Sigma R_{\text{доб1}} \cdot k_e^2 = 0.216 \cdot 1.82^2 = 0.715 \text{ Ом},$$

$$S_{\text{кр.ст.1}} = \frac{R_2' + R_{\text{доб1}}'}{\sqrt{R_1'^2 + x_{\text{к}}^2}} = \frac{0.325 + 0.715}{\sqrt{0.316^2 + 1.017^2}} = 0.977.$$

Вторая ступень регулирования

$$\Sigma R_{\text{доб2}} = 0.216 + 0.918 = 1.134 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{доб2}}' = \Sigma R_{\text{доб2}} \cdot k_e^2 = 1.134 \cdot 1.82^2 = 3.756 \text{ Ом},$$

$$S_{\text{кр.ст.2}} = \frac{R_2' + R_{\text{доб2}}'}{\sqrt{R_1'^2 + x_{\text{к}}^2}} = \frac{0.325 + 3.756}{\sqrt{0.316^2 + 1.017^2}} = 3.832.$$

3.4.2. Для полученных значений скольжения по выражению

$$M = M_{\text{кр}} \cdot \frac{2 + q}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S} + q}$$

строим механические характеристики для ступеней регулирования (рис. 3.6).

3.4.3. Для пересчитанных значений добавочных сопротивлений регулировочных характеристик по выражениям

$$I_{2\text{ст}i}' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1' + \frac{R_2' + R_{2\text{ст}i}'}{S_{\text{ст}i}} \right)^2 + x_{\text{к}}^2}},$$

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2} \cdot (1 + 2 \cdot \alpha)$$

строим электромеханические характеристики $I_2' = f(S)$ и $I_1 = f(S)$ (рис. 3.7 и рис. 3.8 соответственно).

3.4.4. Расчет тормозных режимов. Приближенный расчет характеристики динамического торможения.

После выполнения двух рабочих циклов двигатель необходимо затормозить до нулевой скорости. Принимаем вид торможения – динамическое. Проведем приближенный (без учета кривой намагничивания) расчет характеристики динамического торможения.

3.4.4.1 Определяем эквивалентный ток статора

$$I_{1\text{э}} = 0.816 \cdot I_{\text{п}},$$

где $I_{\text{п}}$ – постоянный ток статора при динамическом торможении, величина которого выбирается из условия:

$$I_{\text{п}} = (2 \div 3) \cdot I_0 = 2 \cdot 30 = 60 \text{ А},$$

$$I_{1\text{э}} = 0.816 \cdot I_{\text{п}} = 0.816 \cdot 60 = 48.96 \text{ А}.$$

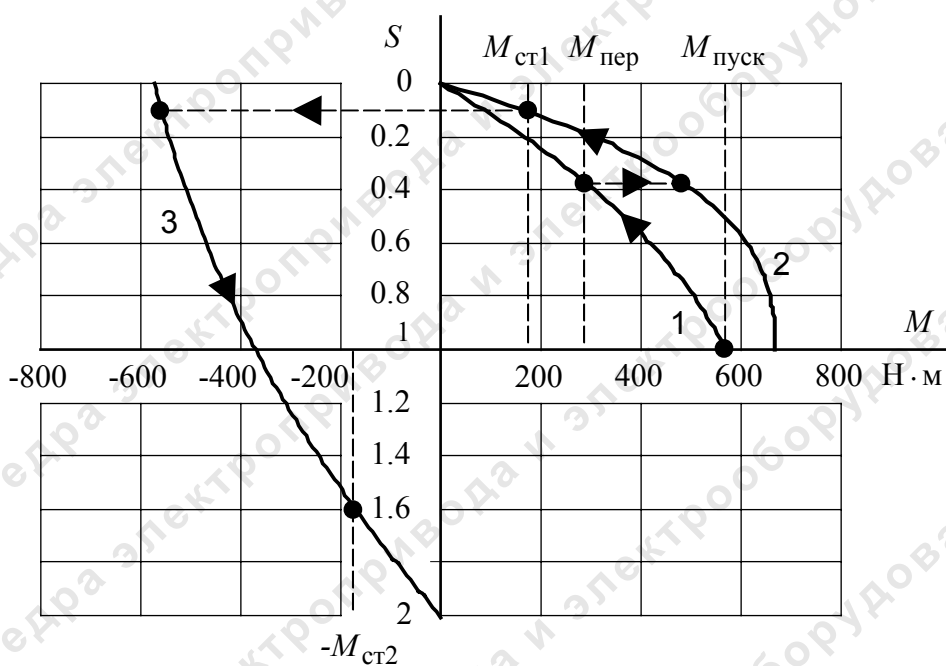


Рис. 3.6. Механические характеристики $M = f(S)$: 1 – пусковая; 2 – регулировочная первой ступени; 2 – регулировочная второй ступени

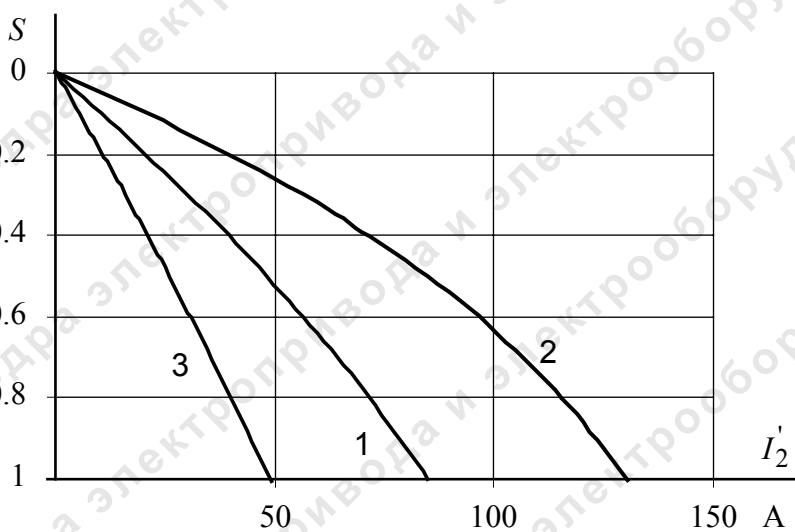


Рис. 3.7. Электромеханические характеристики $I'_2 = f(S)$: 1 – пусковая; 2 – регулировочная первой ступени; 2 – регулировочная второй ступени

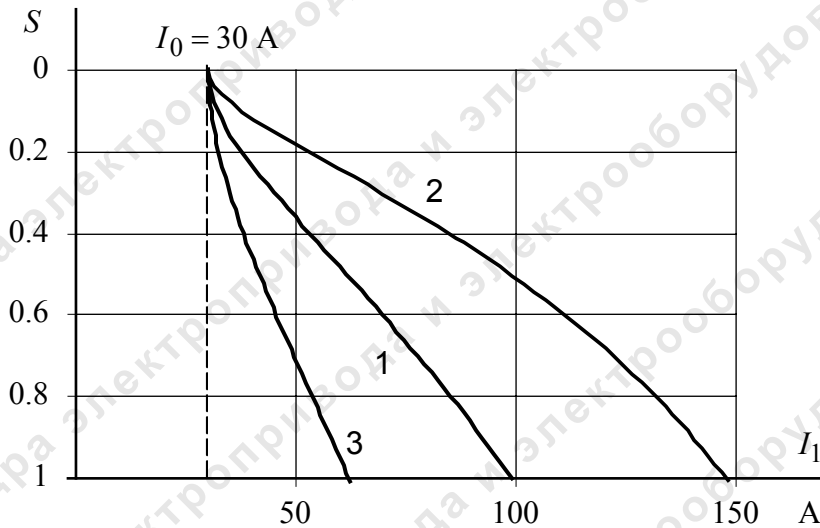


Рис. 3.8. Электромеханические характеристики $I_1 = f(S)$:

1 – пусковая; 2 – регулировочная первой ступени; 2 – регулировочная второй ступени

3.4.4.2. Определяем значение критического момента для динамического торможения

$$M_{\text{кр.дт}} = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot x_m^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (x_2' + x_m)}$$

где значение x_m определяется по кривой намагничивания и при номинальном токе определяется по следующему выражению:

$$x_m = \frac{E_{1\text{н}}}{I_0} = \frac{210.155}{30} = 7.005 \text{ Ом, где}$$

$$E_{1\text{н}} = \frac{E_{2\text{н}}}{\sqrt{3}} \cdot k_e = \frac{200}{\sqrt{3}} \cdot 1.82 = 210.155 \text{ В,}$$

$$M_{\text{кр.дт}} = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot x_m^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (x_2' + x_m)} = \frac{3 \cdot 48.96^2 \cdot 7.005^2}{2 \cdot 78.534 \cdot (0.646 + 7.005)} = 293.651 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3.4.4.3. Определяем значение критического скольжения для режима динамического торможения

$$S_{\text{кр.дт}} = \frac{R_2' + R_{\text{доб.дт}}'}{(x_{2\sigma}' + x_m)} = \frac{R_{\text{дт}}'}{(x_{2\sigma}' + x_m)}$$

Величина $R_{\text{дт}}$ определяется из соотношения

$$R_{\text{дт}} = (0.2 \div 0.5) \cdot R_{\text{н}},$$

$$\text{где } R_{\text{н}} = \frac{E_{2\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_{2\text{н}}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 52} = 2.221 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{дт}} = 0.2 \cdot R_{\text{н}} = 0.2 \cdot 2.221 = 0.444 \text{ Ом},$$

$$R'_{\text{дт}} = R_{\text{дт}} \cdot k_e^2 = 0.444 \cdot 1.82^2 = 1.471 \text{ Ом},$$

$$S_{\text{кр.дт}} = \frac{R'_{\text{дт}}}{(x'_{2\sigma} + x_m)} = \frac{1.471}{0.646 + 7.005} = 0.192.$$

3.4.4.4. Приближенный расчет механической характеристики динамического торможения ведем по выражению

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кр.дт}}}{\frac{S}{S_{\text{кр.дт}}} + \frac{S_{\text{кр.дт}}}{S}},$$

задаваясь значением скольжения от 0 до 1 (рис. 3.9). Необходимо помнить, что для режима динамического торможения нулевое значение скольжения соответствует нулевой скорости, а значение скольжения, равное единице – синхронной скорости двигателя.

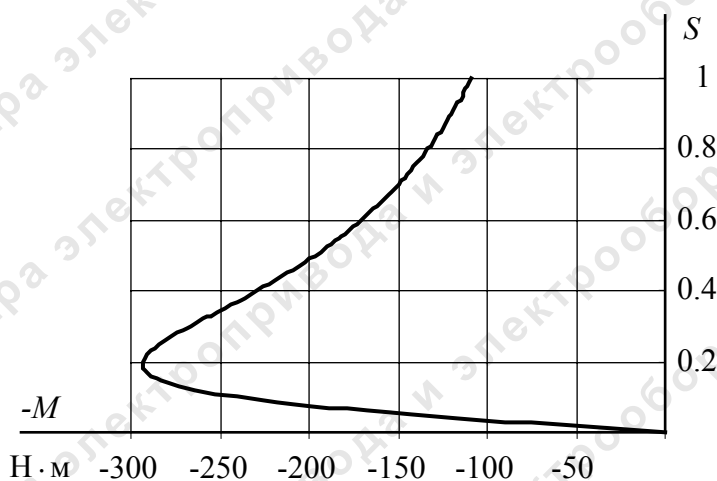


Рис. 3.9. Механическая характеристика динамического торможения при приближенном расчете

3.4.5. Расчет тормозных режимов. Точный расчет характеристики динамического торможения.

Универсальная кривая намагничивания для асинхронных двигателей с фазным ротором типа МТ и с короткозамкнутым ротором типа МТК представлена в табл. 23.

Таблица 23

$i_0 = \frac{I_0}{I_{1н}}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$e_1 = \frac{E_1}{E_{1н}}$	0.132	0.27	0.4	0.52	0.64	0.75	0.83	0.895	0.96	1

Окончание табл. 23

$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}}$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
$e_1 = \frac{E_1}{E_{1H}}$	1.03	1.07	1.1	1.12	1.14	1.16	1.19	1.2	1.21	1.22

3.4.5.1. Определяем эквивалентный ток статора

$$I_{1\sigma} = 0.816 \cdot I_{\Pi},$$

где I_{Π} – постоянный ток статора при динамическом торможении, величина которого выбирается из условия:

$$I_{\Pi} = (2 \div 3) \cdot I_0 = 2 \cdot 30 = 60 \text{ A},$$

$$I_{1\sigma} = 0.816 \cdot I_{\Pi} = 0.816 \cdot 60 = 48.96 \text{ A}.$$

3.4.5.2. Определяем величину сопротивления намагничивания x_m для различных значений тока намагничивания i_0 . Полученные значения сведем в табл. 24

$$E_1 = E_2' = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3}} \cdot k_e = \frac{200}{\sqrt{3}} \cdot 1.82 = 210.155 \text{ В},$$

$$x_m = \frac{E_2'}{I_0} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{e_1 \cdot E_1}{i_0 \cdot I_0}, \quad x_m = \frac{e_1 \cdot 210.155}{i_0 \cdot 30} = 7.005 \cdot \frac{e_1}{i_0}.$$

Таблица 24

$i_0, \text{ A}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$x_m, \text{ Ом}$	9.247	9.457	9.34	9.107	8.967	8.756	8.306	7.837	7.472	7.005
$i_0, \text{ A}$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
$x_m, \text{ Ом}$	6.598	6.246	5.927	5.604	5.338	5.118	4.904	4.67	4.461	4.284

Величина $R_{\text{дт}}$ определяется из соотношения

$$R_{\text{дт}} = (0.2 \div 0.5) \cdot R_{\text{H}},$$

где $R_{\text{H}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 52} = 2.221 \text{ Ом}.$

$$R_{\text{дт}} = 0.2 \cdot R_{\text{H}} = 0.2 \cdot 2.221 = 0.444 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{дт}}' = R_{\text{дт}} \cdot k_e^2 = 0.444 \cdot 1.82^2 = 1.471 \text{ Ом}.$$

3.4.5.3. Определяем значения скольжения S , соответствующее значению тока намагничивания i_0 по выражению:

$$S = R'_{дт} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{I_1}{i_0 \cdot I_0}\right)^2 - 1}}{\sqrt{\left(x'_{2\sigma} + x_0\right)^2 - \left(\frac{I_1}{i_0 \cdot I_0}\right)^2 \cdot \left(x'_2\right)^2}} =$$

$$= 1.471 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{48.96}{i_0 \cdot 30}\right)^2 - 1}}{\sqrt{\left(0.646 + x_0\right)^2 - \left(\frac{48.96}{i_0 \cdot 30}\right)^2 \cdot 0.646^2}}$$

Значения S , полученные при отрицательном значении подкоренного выражения, отбрасываются и в дальнейших расчетах не участвуют. Найденные значения заносим в табл. 25.

Таблица 25

$i_0 \cdot I_0, A$	6	9	12	15	18	21	24	27	30
S	1.382	0.842	0.62	0.487	0.403	0.351	0.312	0.277	0.25
$i_0 \cdot I_0, A$	33	36	39	42	46	49			
S	0.225	0.198	0.171	0.142	0.106	0.052			

3.4.5.4. Определяем приведенный ток ротора I'_2 , соответствующий найденным значениям скольжения:

$$I'_2 = \frac{I_1 \cdot x_m}{\sqrt{\left(\frac{R'_{дт}}{S}\right)^2 + \left(x'_2 + x_m\right)^2}} = \frac{48.96 \cdot x_m}{\sqrt{\left(\frac{1.471}{S}\right)^2 + \left(0.646 + x_m\right)^2}}$$

Полученные значения заносим в табл. 26.

Таблица 26

S	1.382	0.842	0.62	0.487	0.403	0.351	0.312	0.277	0.25
I'_2, A	45.578	45.107	44.42	43.572	42.504	41.144	39.54	37.712	35.553
S	0.225	0.198	0.171	0.142	0.106	0.052	0		
I'_2, A	33.074	30.206	26.82	22.682	17.308	8.621	0		

3.4.5.5. Рассчитываем механическую характеристику двигателя $M = f(S)$ в режиме динамического торможения для соответствующих значений S и I_2'

$$M = \frac{3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_{\text{дт}}'}{\omega_0 \cdot S} = \frac{3 \cdot (I_2')^2 \cdot 1.471}{78.534 \cdot S}.$$

Полученные значения заносим в табл. 27.

Таблица 27

S	1.382	0.842	0.62	0.487	0.403	0.351	0.312	0.277
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	84.454	135.869	178.929	218.913	252	270.947	281.46	288.514
S	0.25	0.225	0.198	0.171	0.142	0.106	0.052	0
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	283.704	273.747	258.485	236.174	203.547	158.648	80.885	0

По данным табл. 27 строим механическую характеристику двигателя $M = f(S)$ для режима динамического торможения (рис. 3.10)

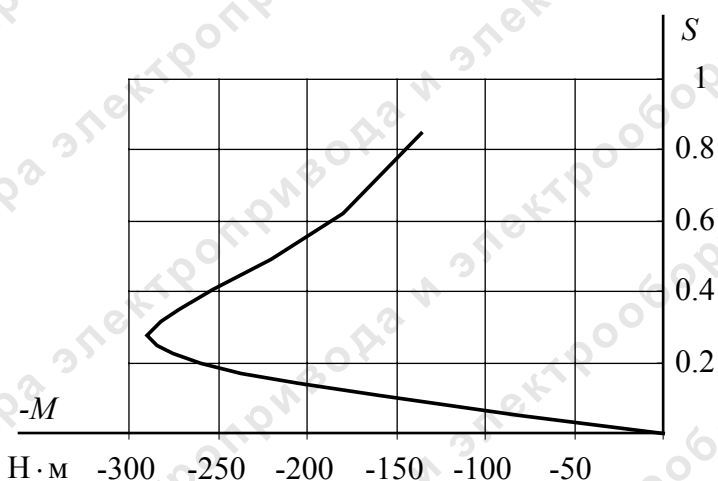


Рис. 3.10. Механическая характеристика динамического торможения при точном расчете

Для сравнения приведем характеристики режима динамического торможения при приближенном и точном их расчете (рис. 3.11).

3.4.6. Механические характеристики полного цикла работы представлены на рис. 3.12.

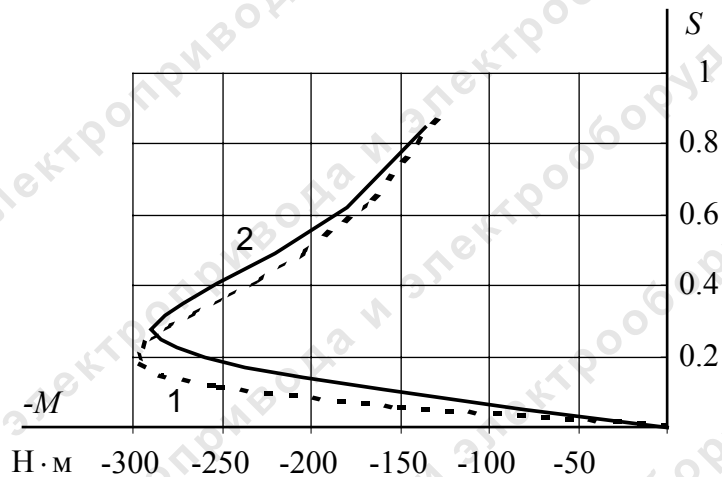


Рис. 3.11. Механическая характеристика динамического торможения: 1 – приближенный расчет; 2 – точный расчет

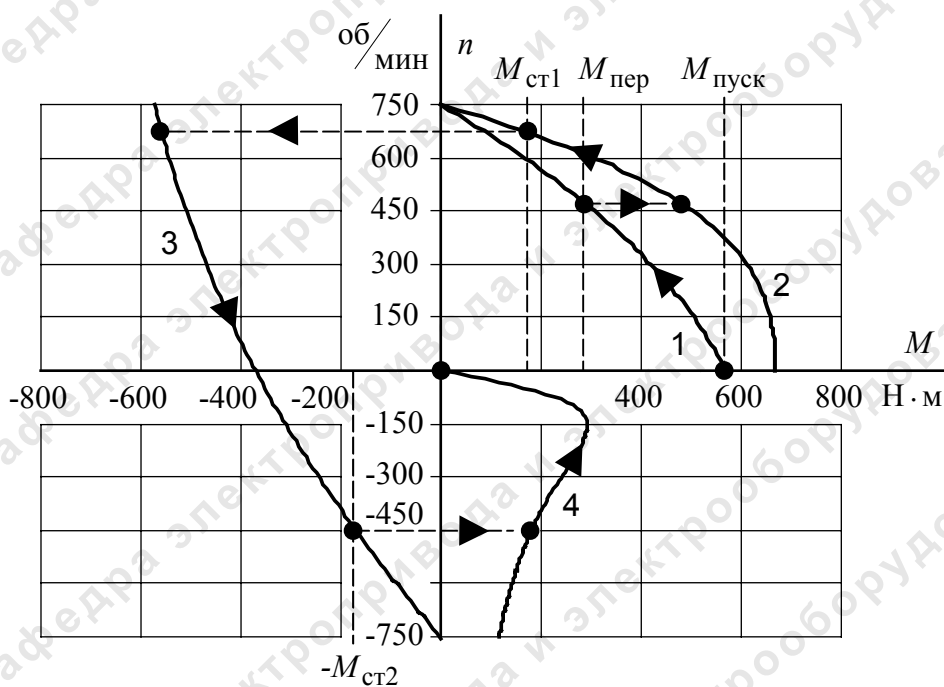


Рис. 3.12. Механические характеристики полного цикла работы: 1 – пусковая характеристика; 2 – регулировочная характеристика первой ступени; 3 – регулировочная характеристика второй ступени; 4 – характеристика динамического торможения

3.5. Расчет переходных процессов за цикл работы и построение нагрузочной диаграммы электропривода

3.5.1. Уравнение движения электропривода имеет вид

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad \text{или} \quad M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

Суммарный момент инерции J_{Σ} равен

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} \cdot \frac{1}{i_{\text{ст.р}}^2} = 1.2 \cdot 0.75 + 35 \cdot \frac{1}{9^2} = 1.332 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $k = (0.5 \div 1.3)$ – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

$J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{\text{мех}}$ – момент инерции механизма, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$i_{\text{ст.р}}$ – передаточное число редуктора.

Расчет переходных процессов ведется в следующей последовательности (рис. 4.9):

- строятся механические характеристики электродвигателя $M_{\text{дв}} = f(\omega)$ и производственного механизма $M_{\text{с}} = f(\omega)$;

- графически находят разность $M_{\text{дв}}(\omega) - M_{\text{с}}(\omega) = M_{\text{дин}}(\omega)$;

- механическую характеристику заменяют ступенчатой с участками

$$M_{\text{дин.ср.}i} = \frac{M_{\text{дин.макс.}i} + M_{\text{дин.мин.}i}}{2} = \text{const},$$

где $M_{\text{дин.макс.}i}$ и $M_{\text{дин.мин.}i}$ соответственно максимальное и минимальное значение динамического момента на i -м участке. Точность расчетов тем выше, чем больше участков разбиения;

- определяется время переходного процесса, которое требуется для достижения скорости $n_i = n_{\text{нач.}i} + \Delta n_i$ на каждом участке

$$\Delta t_i = J_{\Sigma} \cdot \frac{\Delta n_i}{9.55 \cdot M_{\text{дин.ср.}i}};$$

- полученные на отдельных участках значения времени суммируются для определения полного времени переходного процесса

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i,$$

где n – число участков;

- по графику электромеханической характеристики $I_1 = f(\omega)$ определяется значение тока I_1 , соответствующее значению скорости каждого участка;

- результаты представляются в виде таблиц.

По итогам расчетов строятся кривые $M_{\text{дв}} = f(t)$, $\omega = f(t)$, $I_1^2 = f(t)$ за цикл работы. Эти данные используются далее для проверки двигателя и основных элементов силовой цепи по нагреву и кратковременной перегрузке.

Используя вышеуказанную методику расчета переходных процессов, строим их для полученного цикла работы (рис. 3.13).

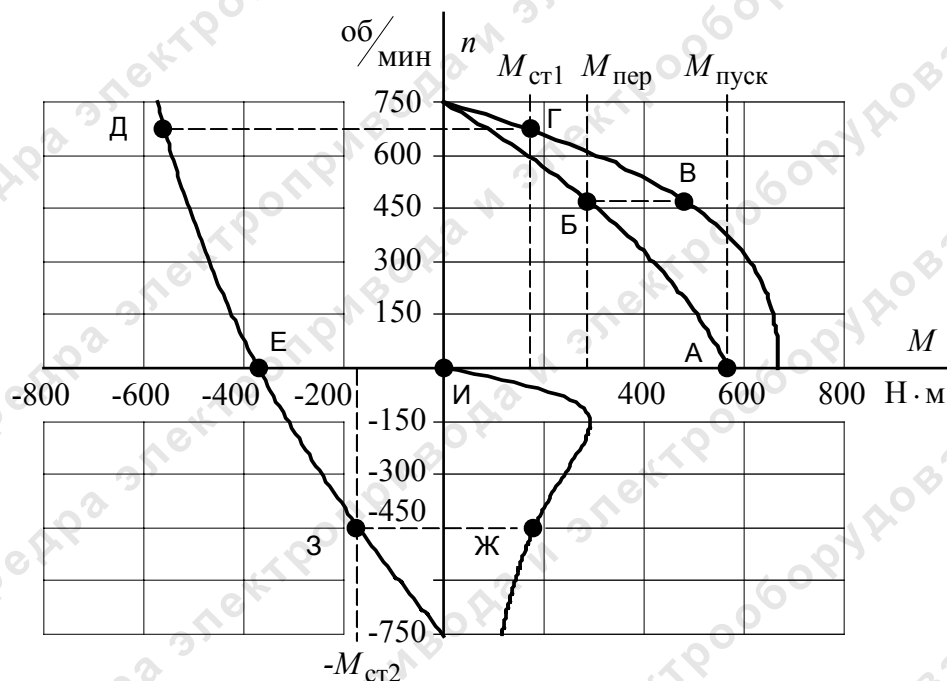


Рис. 3.13

Таблица 28

Участок А – Б							
$\Delta n = \frac{n}{k}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	67.6	67.6	67.6	67.6	67.6	67.6	67.6
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	67.6	135.2	202.8	270.4	338	405.6	473
$M_{\text{дв}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	543.5	513.4	478.6	438.6	393.7	343.4	286.9
$M_{\text{дин}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{с}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	380.8	353	320.6	283.2	240.7	193.1	140
$\Delta t, \text{с}$	0.025	0.027	0.029	0.033	0.039	0.049	0.067
Δt с накоплением, с		0.052	0.081	0.114	0.153	0.202	0.269
$t, \text{с}$				0.269			
S	0.91	0.82	0.73	0.639	0.549	0.459	0.369
$I_2', \text{А}$	79.17	73.04	66.5	59.6	52.3	44.7	36.66
$I_1, \text{А}$	93.12	86.69	79.9	72.8	65.5	58.1	50.66

Примечание: ток короткого замыкания $I_{1\text{кз}} = 99.24 \text{ А}$,
 $M_{\text{п}} = 569.037 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Таблица 29

Участок В – Г							
$\Delta n = \frac{n}{k}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	28.82	28.82	28.82	28.82	28.82	28.82	28.82
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	502.1	530.89	559.7	588.5	617.36	646.2	675
$M_{\text{дв}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	448.9	409.7	369.5	324.1	275.9	222.2	175.4
$M_{\text{дин}} =$ $= M_{\text{дв}} - M_{\text{с}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	288.05	253.9	214.2	171.4	124.6	73.67	23.42
$\Delta t, \text{с}$	0.014	0.016	0.019	0.023	0.032	0.055	0.172
Δt с накоплением, с		0.03	0.049	0.072	0.104	0.159	0.331
$t, \text{с}$	0.331						
S	0.333	0.292	0.254	0.215	0.177	0.138	0.1
$I_2', \text{А}$	61.34	54.88	48.6	41.88	35.06	27.78	20.44
$I_1, \text{А}$	74.6	68.07	61.88	55.45	49.24	43.1	37.66

Примечание: переключение с пусковой характеристики при $S = 0.369, I_1 = 80.163 \text{ А}$.

Таблица 30

Участок Д – Е										
$\Delta n = \frac{n}{k}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	607.5	540	472.5	405	337.5	270	202.5	135	67.5	0
$M_{\text{дв}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	545.5	530.9	515.2	498.4	480.3	461	440.4	418.5	395.2	370.5
$M_{\text{дин}} = M_{\text{дв}} -$ $- M_{\text{с}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	730.6	713.6	698.5	682.2	664.7	646.1	626.1	604.8	582.2	558.5
$\Delta t, \text{с}$	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.016	0.017
Δt с накоплением, с		0.026	0.039	0.053	0.067	0.082	0.097	0.113	0.129	0.146
$t, \text{с}$	0.146									
S	1.81	1.72	1.63	1.54	1.45	1.36	1.27	1.18	1.09	1
$I_2', \text{А}$	79.6	76.5	73.4	70.2	66.8	63.4	59.9	56.3	52.6	48.7
$I_1, \text{А}$	93.6	90.4	87	83.7	80.2	76.7	73.1	69.5	65.8	62

Примечание: ток при переключении $I_1 = 96.683 \text{ А}$.

Таблица 31

Участок Е – 3									
$\Delta n = \frac{n}{k}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	50	100	150	200	250	300	350	400	450
$M_{\text{дв}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	351.2	331.4	310.5	288.8	266.6	243.3	219.2	194.6	175.4
$M_{\text{дин}} =$ $= M_{\text{дв}} - M_{\text{с}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	185.2	165.7	145.5	124.2	102.3	79.5	55.8	31.5	9.61
$\Delta t, \text{с}$	0.038	0.042	0.048	0.056	0.068	0.088	0.125	0.221	0.726
Δt с накоплением, с		0.08	0.128	0.184	0.252	0.34	0.465	0.686	1.41
$t, \text{с}$	1.41								
S	0.933	0.867	0.8	0.733	0.667	0.6	0.533	0.467	0.4
$I_2', \text{А}$	45.8	42.9	39.9	36.8	33.8	30.6	27.4	24.1	20.8
$I_1, \text{А}$	59.2	56.4	53.6	50.8	48.1	45.4	42.7	40.3	37.9

Таблица 32

Участок Ж – И									
$\Delta n = \frac{n}{k}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	400	350	300	250	200	150	100	50	0
$M_{\text{дв}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	187.4	206.8	229.3	254.3	278.5	293.4	274.8	182.5	0
$M_{\text{дин}} =$ $= M_{\text{дв}} - M_{\text{с}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	356.8	372.5	393.4	417.2	441.8	461.4	459.5	404	266.6
$\Delta t, \text{с}$	0.02	0.019	0.018	0.017	0.016	0.015	0.015	0.017	0.026
Δt с накоплением, с		0.039	0.037	0.074	0.09	0.105	0.12	0.137	0.163
$t, \text{с}$	0.163								
S	1.533	1.467	1.4	1.333	1.267	1.2	1.133	1.067	1

Примечание: эквивалентный постоянный ток статора в режиме динамического торможения $I_{\text{э пост}} = 48.96 \text{ А}$.

По данным таблиц 28–32 строим графики переходных процессов $M = f(t)$ и $n = f(t)$ (рис. 3.14).

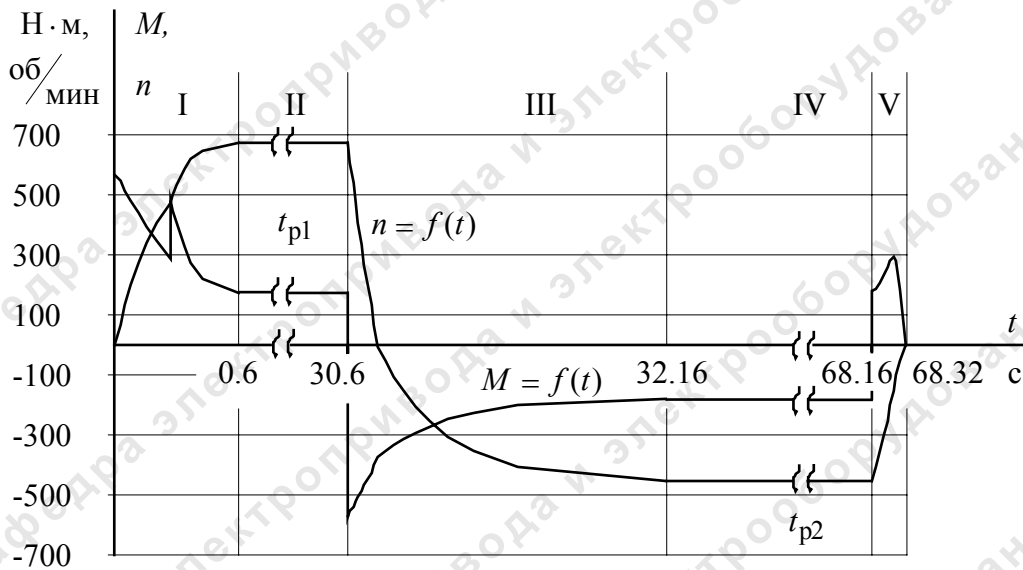


Рис. 3.14. Графики переходных процессов $M = f(t)$ и $n = f(t)$ заданного цикла работы: I – пуск двигателя; II – работа на первой ступени; III – торможение с переходом на вторую ступень работы; IV – работа на второй ступени; V – динамическое торможение до нулевой скорости

3.6. Проверка выбранного электродвигателя по нагреву

Метод эквивалентного тока

$$I_{1\text{экв}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_p + t_{\text{пн}}} i^2 dt}{t_p + t_{\text{пн}}}},$$

где $\int_0^{t_p + t_{\text{пн}}} i^2 dt$ – определяем через площадь графика $I_1^2 = f(t)$;

t_p – суммарное время работы;

$t_{\text{пн}}$ – суммарное время переходных процессов.

График $I_1^2 = f(t)$ представлен на рис. 3.15.

Правильность выбора двигателя определяется условием

$$I_{1н} \geq I_{\text{экв}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_{\text{кат}}}}.$$

Имеем

$$\int_0^{t_p + t_{\text{пн}}} i^2 dt = 100501.163 \text{ A}^2,$$

$$I_{1\text{экв}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_p+t_{\text{III}}} i^2 dt}{t_p + t_{\text{III}}}} = \sqrt{\frac{100501.163}{66 + 2.32}} = 38.35 \text{ A.}$$

Условия проверки двигателя по нагреву

$$I_{1\text{н}} \geq I_{1\text{экв}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_{\text{кат}}}}, \quad 42.5 \geq 38.35 \cdot \sqrt{\frac{30.56}{40}}, \quad 42.5 \geq 33.52 \text{ A.}$$

Условие проверки двигателя по нагреву выполняется.

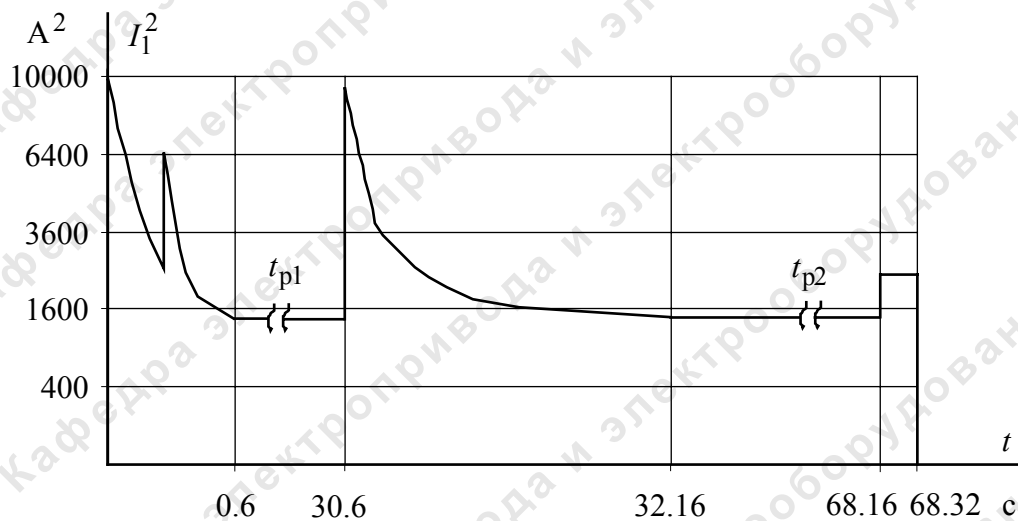


Рис. 3.15