

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 ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

## 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 – активная;

КПД передачи при максимальной частоте вращения –  $0.95$ ;

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

### 2.1. Построение тахограммы и нагрузочной диаграммы производственного механизма

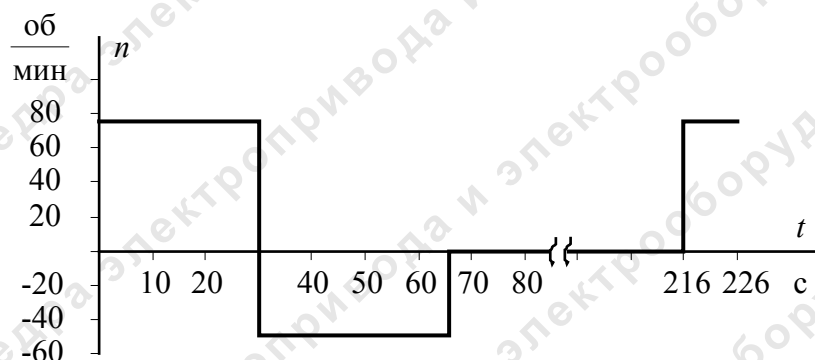


Рис. 2.1. Тахограмма производственного механизма

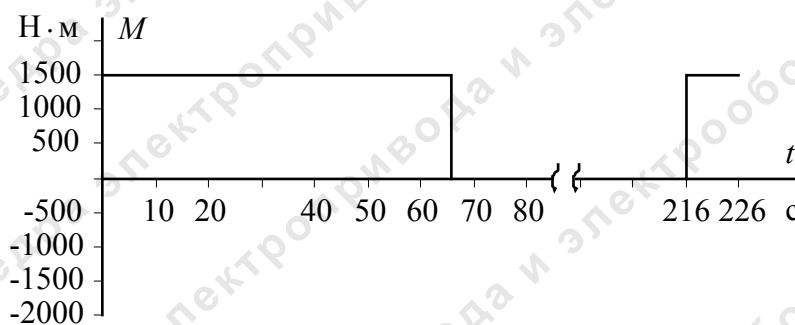


Рис. 2.2. Нагрузочная диаграмма производственного механизма для активного характера нагрузки

## 2.2. Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу. Определение наивыгоднейшего передаточного отношения редуктора

2.2.1. Определяем продолжительность включения:

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

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

$$\text{ПВ}_{\text{кат}} = 40 \%.$$

2.2.2. Определяем диапазон регулирования:

$$D_{\text{рег}} = \frac{n_{m1}}{n_{m2}} = \frac{75}{50} = 1:1.5.$$

2.2.3. Определяем среднеквадратичное значение мощности за время работы на основании тахограммы и нагрузочной диаграммам:

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

где

$m$  – число рабочих участков в цикле;

$P_i$  – мощность на  $i$ -м участке работы;

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

$\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -м участке;

$\omega_i$  – угловая скорость на  $i$ -м участке;

$\omega_{\max}$  – 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  $i$ -м участке работы по выражению

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

где  $\beta_0$  – 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

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

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

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

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  $n_{\text{макс}}$ ,

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

2.2.5. Выбираем двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, имеющий следующие паспортные данные (табл. 7).

Таблица 7

Тип	$U_{\text{н}}$ , В	$P_{\text{н}}$ , кВт	$n_{\text{н}}$ , об/мин	$I_{\text{н}}$ , А	$R_{\text{я}+15^{\circ}\text{C}} + R_{\text{дп}+15^{\circ}\text{C}}$ , Ом	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
П - 91	220	19.0	600	106	0.198	5.9

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

$$i_{\text{р}} = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{мах}}},$$

где

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi}{30} \cdot n_{\text{н}} = \frac{3.14159}{30} \cdot 600 = 62.827 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

номинальная угловая скорость вращения двигателя.

Для нашего примера:

$$i_{\text{расч.}} = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{мах}}} = \frac{62.827}{7.854} = 8.$$

2.2.7. Определенное в п. 2.2.6 передаточное отношение редуктора  $i_{\text{расч}} = 8$  совпадает со стандартным.

Принимаем из табл. 8 стандартное значение передаточного числа

$$i_{\text{ст.р}} = 8.$$

Таблица 8

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 наиболее выгодное 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,  $k = 1.3$ ,

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{\text{мех}}}{k \cdot J_{\text{дв}}}} = \sqrt{\frac{35}{1.2 \cdot 5.9}} = 2.223.$$

Отношение полученного расчетного передаточного отношения к оптимальному передаточному отношению равно

$$\Theta = \frac{i_{\text{ст.р}}}{i_{\text{опт}}} = \frac{8}{2.223} = 3.599.$$

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

2.2.8. Определяем сопротивление якоря горячее:

$$R_{\text{дв.гор}} = (1 + 0.004 \cdot \tau) \cdot R_{\text{дв.}+15^{\circ}\text{C}} = (1 + 0.004 \cdot 75) \cdot 0.198 = 0.257 \text{ Ом},$$

где  $\tau$  – перегрев обмоток двигателя относительно начальной температуры ( $15^{\circ}\text{C}$ ), град. Принимаем  $\tau = 75^{\circ}\text{C}$ .

2.2.9. Определяем коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{1000 \cdot P_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = \frac{1000 \cdot 19}{220 \cdot 106} = 0.815.$$

2.2.10. Определяем коэффициент ЭДС двигателя

$$c = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{дв.гор}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{220 - 106 \cdot 0.257}{62.827} = 3.068 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

2.2.11. Определяем номинальный момент на валу двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{1000 \cdot P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{1000 \cdot 19}{62.827} = 302.418 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.2.12. Определяем электромагнитный момент, соответствующий номинальному току:

$$M_{\text{н}} = c \cdot I_{\text{н}} = 3.068 \cdot 106 = 325.21 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.2.13. Определяем момент трения на валу электродвигателя

$$M_{с.дв} = M_{н} - M_{дв.н} = 325.21 - 302.418 = 22.792 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.2.14. Определяем скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{н}}{с} = \frac{220}{3.068} = 71.708 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

2.2.15. Определяем скорость вращения по ступеням

$$n_{и1} = n_{м1} \cdot i_{ст.р} = 75 \cdot 8 = 600 \frac{\text{об}}{\text{мин}}, \quad n_{и2} = n_{м2} \cdot i_{ст.р} = -50 \cdot 8 = -400 \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

или

$$\omega_{и1} = \frac{\pi}{30} \cdot n_{и1} = \frac{3.14159}{30} \cdot 600 = 62.827 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$\omega_{и2} = \frac{\pi}{30} \cdot n_{и2} = \frac{3.14159}{30} \cdot -400 = -41.885 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

2.2.16. Определяем момент статический по ступеням.

*Активная нагрузка (нагрузочная диаграмма рис. 2.2)*

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

$$M'_{с1} = \frac{M_{\text{макс}}}{i_{ст.р} \cdot \eta_{\text{мех}}} = \frac{1500}{8 \cdot 0.95} = 197.368 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с1} = M'_{с1} + M_{с.дв} = 197.368 + 22.792 = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

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

$$M'_{с2} = \frac{M_{\text{макс}} \cdot \eta_{\text{мех}}}{i_{ст.р}} = \frac{1500 \cdot 0.95}{8} = 178.125 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с2} = M'_{с2} - M_{с.дв} = 178.125 - 22.792 = 155.333 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

*Реактивная нагрузка (нагрузочная диаграмма рис. 2.3) – I, III квадранты работы (двигательный режим)*

$$M'_{с1} = M'_{с2} = \frac{M_{\text{макс}}}{i_{ст.р} \cdot \eta_{\text{мех}}} = \frac{1500}{8 \cdot 0.95} = 197.368 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с1} = M'_{с1} + M_{с.дв} = 197.368 + 22.792 = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{с2} = M'_{с2} + M_{с.дв} = 197.368 + 22.792 = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

*Дальнейший расчет будем вести для активного характера нагрузки (см. 2.2).*

2.2.17. Проведем расчет естественных электромеханической  $\omega = f(I)$  и механической  $\omega = f(M)$  характеристик двигателя (рис. 2.4).

Выражения для расчета электромеханической и механической характеристик имеют вид

$$\omega = \frac{U_H}{c} - \frac{I \cdot R_{\text{дв.гор}}}{c}, \quad \omega = \frac{U_H}{c} - \frac{M \cdot R_{\text{дв.гор}}}{c^2}.$$

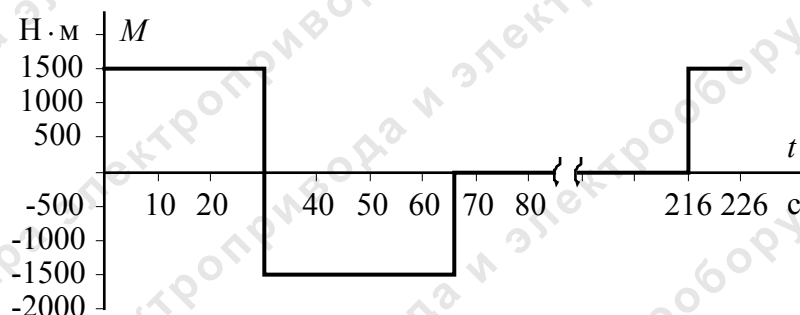


Рис. 2.3. Нагрузочная диаграмма производственного механизма для реактивного характера нагрузки

Так как между током и моментом у двигателей постоянного тока независимого возбуждения имеется линейная зависимость  $M = c \cdot I$ , то для получения механической характеристики достаточно пересчитать по оси  $X$  численные значения токов на значения моментов. Расчетные данные сведем в табл. 9.

Таблица 9

$I, \text{A}$	0	$I_H = 106 \text{ A}$	$2 \cdot I_H = 212 \text{ A}$
$M, \text{H} \cdot \text{м}$	0	325.21	650.416
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	62.827	53.949

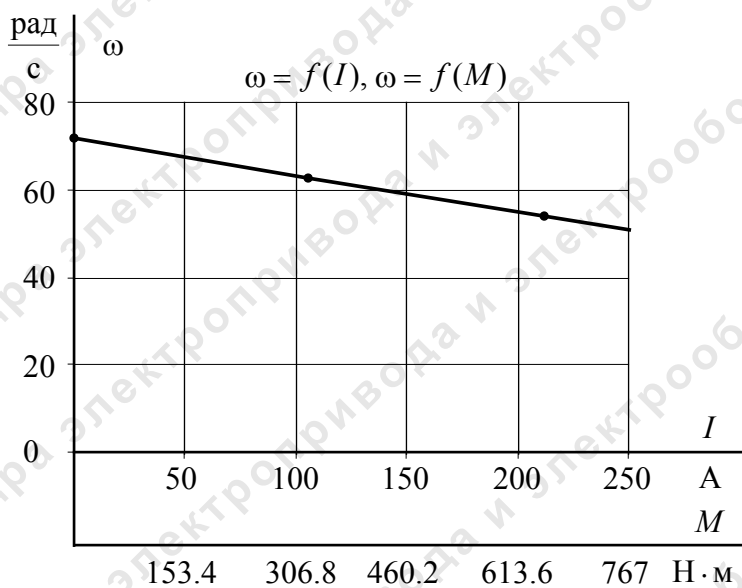


Рис. 2.4. Естественные электромеханическая  $\omega = f(I)$  и механическая  $\omega = f(M)$  характеристики двигателя



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

2.3.1. Определяем наибольшие пусковые ток и момент. Для двигателей обычного исполнения эти величины определяются из условия

$$I_{\text{пуск}} = (1.5 \div 2) \cdot I_{\text{н}} = 2 \cdot 106 = 212 \text{ А},$$

$$M_{\text{пуск}} = c \cdot I_{\text{пуск}} = 3.068 \cdot 212 = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.3.2. Определяем ток и момент переключения из условия

$$I_{\text{пер}} = 1.2 \cdot I_{\text{н}} = 1.2 \cdot 106 = 127.2 \text{ А},$$

$$M_{\text{пер}} = c \cdot I_{\text{пер}} = 3.068 \cdot 127.2 = 390.249 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.3.3. Определяем необходимые сопротивления якорной цепи для:

*Пусковых характеристик* (пуск в две ступени)

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{I_{\text{пуск}} \cdot R_{\text{я.пуск}}}{c}.$$

В момент пуска  $\omega = 0$ , следовательно,

$$R_{\text{я.пуск1}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{пуск}}} = \frac{220}{212} = 1.038 \text{ Ом},$$

а требуемое добавочное сопротивление якорной цепи для первой ступени пусковой характеристики равно

$$R_{\text{доб.пуск1}} = R_{\text{я.пуск1}} - R_{\text{дв.гор}} = 1.038 - 0.257 = 0.781 \text{ Ом}.$$

Сопротивление второй ступени пусковой характеристики выбирается из соображения получения симметричной пусковой диаграммы

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{пуск}} \cdot R_{\text{я.пуск2}}}{c^2}, \quad 28.672 = \frac{220}{3.068} - \frac{650.416 \cdot R_{\text{я.пуск2}}}{3.068^2},$$

$$R_{\text{я.пуск2}} = 0.623 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{доб.пуск2}} = R_{\text{я.пуск2}} - R_{\text{дв.гор}} = 0.623 - 0.257 = 0.366 \text{ Ом}.$$

*Рабочих ступеней*

Для первой ступени при моменте нагрузки  $M_{\text{с1}} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м}$  необходимо обеспечить скорость  $\omega_{\text{и1}} = 62.827 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Добавочное сопротивление ступени определяется из выражения

$$\omega_{\text{и1}} = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{с1}} \cdot R_{\text{я.ст1}}}{c^2}, \quad 62.827 = \frac{220}{3.068} - \frac{220.16 \cdot R_{\text{я.ст1}}}{3.068^2},$$

$$R_{\text{я.ст1}} = 0.379 \text{ Ом}, \quad R_{\text{ст1}} = R_{\text{я.ст1}} - R_{\text{дв.гор}} = 0.379 - 0.257 = 0.122 \text{ Ом}.$$

Для второй ступени при моменте нагрузки  $M_{c2} = 155.333 \text{ Н} \cdot \text{м}$  необходимо обеспечить скорость  $\omega_{и2} = -41.885 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Добавочное сопротивление ступени определяется из выражения

$$\omega_{и2} = \frac{U_{н}}{c} - \frac{M_{ст2} \cdot R_{я.ст2}}{c^2}, \quad -41.885 = \frac{220}{3.068} - \frac{155.333 \cdot R_{я.ст2}}{3.068^2},$$

$$R_{я.ст2} = 6.883 \text{ Ом}, \quad R_{ст2} = R_{я.ст2} - R_{дв.гор} = 6.883 - 0.257 = 6.626 \text{ Ом}.$$

2.3.4. Для полученных значений добавочных сопротивлений построим пусковую и рабочие механические характеристики по ступеням. Расчетные данные сведем в табл. 10.

Таблица 10

Пусковая характеристика 1 ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	$M_{пер} = 390.249 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{пуск} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	28.672	0
Пусковая характеристика 2 ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	$M_{пер} = 390.249 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{пуск} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	45.878	28.672
Первая рабочая ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	$M_{c1} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{пуск} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	62.843	45.519
Вторая рабочая ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	$M_{c2} = 155.333 \text{ Н} \cdot \text{м}$	
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	-41.879	

По данным табл. 10 строим пусковые, первой и второй ступени механические характеристики (см. рис. 2.5).

2.3.5. Определяем токи по ступеням:

- для первой ступени

$$I_{c1} = \frac{M_{c1}}{c} = \frac{220.16}{3.068} = 71.76 \text{ А};$$

- для второй ступени

$$I_{c2} = \frac{M_{c2}}{c} = \frac{155.33}{3.068} = 50.63 \text{ А}.$$

### 2.3.6. Определяем продолжительности включения

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

Сопротивление  $R_{ст1}$  работает постоянно ( $R_{ст1} = 0.122 \text{ Ом}$ ), а сопротивление  $R_{ст2}$  только на второй ступени ( $R_{ст2} = 6.626 \text{ Ом}$ ). Сопротивления включены последовательно (рис. 2.6), следовательно,

$$R'_{ст2} = R_{ст2} - R_{ст1} = 6.626 - 0.122 = 6.504 \text{ Ом}.$$

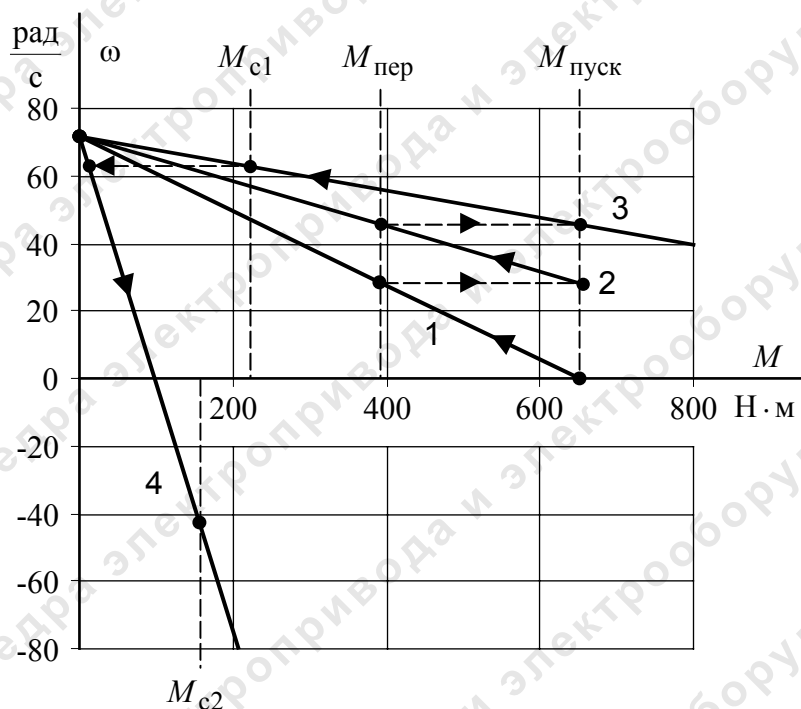


Рис. 2.5. Механические характеристики двигателя: 1 – первая ступень пусковой характеристики; 2 – вторая ступень пусковой характеристики; 3 – рабочая характеристика первой ступени; 4 – рабочая характеристика второй ступени

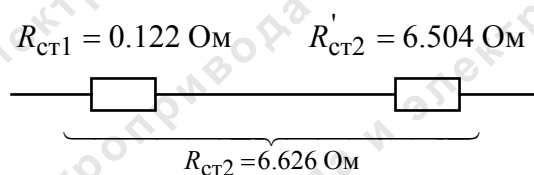


Рис. 2.6

Определяем продолжительность включения для ступеней:

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

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

2.3.7. Определяем расчетные токи, средние за время работы:

$$I_{расч.ст1} = \sqrt{\frac{I_{c1}^2 \cdot t_{p1} + I_{c2}^2 \cdot t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2}}} = \sqrt{\frac{71.76^2 \cdot 30 + 50.63^2 \cdot 36}{30 + 36}} = 66.146 \text{ А};$$

$$I_{расч.ст2} = \sqrt{\frac{I_{c2}^2 \cdot t_{p2}}{t_{p2}}} = \sqrt{\frac{50.63^2 \cdot 36}{36}} = 50.63 \text{ А} .$$

2.3.8. Определяем каталожный ток для каждой ступени:

$$I_{кат1} = I_{расч.ст1} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{расч.ст1}}{ПВ_{кат}}} = 66.146 \cdot \sqrt{\frac{30.56}{40}} = 57.816 \text{ А};$$

$$I_{кат2} = I_{расч.ст2} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{расч.ст2}}{ПВ_{кат}}} = 50.63 \cdot \sqrt{\frac{16.67}{40}} = 32.684 \text{ А} .$$

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

$$R_{ст1} = 0.122 \text{ Ом}, \quad R'_{ст2} = 6.504 \text{ Ом}.$$

- для первой ступени

#### Ящик сопротивлений №55

Продолжительный ток, А	Сопротивление ящика, Ом	Сопротивление элемента, Ом	Число элементов
64	1.15	0.23	5

Параллельно соединяем два элемента

$$R_{ст1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{эл1}} + \frac{1}{R_{эл1}}} = \frac{1}{\frac{1}{0.23} + \frac{1}{0.23}} = 0.115 \text{ Ом}.$$

- для второй ступени

#### Ящик сопротивлений №105

Продолжительный ток, А	Сопротивление ящика, Ом	Сопротивление элемента, Ом	Число элементов
33	4.2	$6 \times 0.63 + 1 \times 0.42$	7

#### Ящик сопротивлений №105

Продолжительный ток, А	Сопротивление ящика, Ом	Сопротивление Элемента, Ом	Число элементов
33	4.2	$6 \times 0.63 + 1 \times 0.42$	7

$$R'_{ст2} = 4.2 + 3 \times 0.63 + 1 \times 0.42 = 6.51 \text{ Ом}.$$

## 2.4. Расчет электромеханических и механических характеристик для двигательного и тормозного режимов

2.4.1. Делаем пересчет механических характеристик двигателя для полученных значений сопротивлений. Полученные значения заносим в табл. 11.

$$R_{ст1} = 0.115 \text{ Ом}, \quad R'_{ст2} = 6.51 \text{ Ом},$$

$$R_{ст2} = R_{ст1} + R'_{ст2} = 0.115 + 6.51 = 6.625 \text{ Ом},$$

$$R_{я.ст1} = R_{ст1} + R_{дв.гор} = 0.11 + 0.257 = 0.372 \text{ Ом (было 0.379 Ом)},$$

$$R_{я.ст2} = R_{ст2} + R_{дв.гор} = 6.62 + 0.257 = 6.882 \text{ Ом (было 6.883 Ом)}.$$

Таблица 11

Пусковая характеристика 1 ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	0	$M_{пер} = 390.249 \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$M_{пуск} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{ м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	28.672	0
Пусковая характеристика 2 ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	0	$M_{пер} = 390.249 \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$M_{пуск} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{ м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	45.878	28.672
Первая рабочая ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	0	$M_{с1} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$M_{пуск} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{ м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	63.1	46.003
Вторая рабочая ступень			
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	0	$M_{с2} = 155.333 \text{ Н} \cdot \text{ м}$	
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	71.708	-41.863	

2.4.2. После работы на двух заданных скоростях ( $\omega_{и1}$  и  $\omega_{и2}$ ) двигатель необходимо затормозить до нулевой скорости.

При *активном характере нагрузки* производственного механизма примем вид торможения – противовключение. Расчет механической характеристики торможения противовключением проводится на основании выражения

$$\omega = \frac{U_{н}}{c} - \frac{M \cdot (R_{дв.гор} + R_{пв})}{c^2}.$$

Определяем необходимое сопротивления якорной цепи для режима торможения противовключением. Для этого режима работы при на-

чальном моменте торможения  $M$ , равному  $M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , необходимо обеспечить скорость  $\omega_{\text{и2}} = -41.863 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Добавочное сопротивление ступени определяется из выражения

$$\omega_{\text{и2}} = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{пуск}} \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{пв}})}{c^2}, \quad -41.863 = \frac{220}{3.068} - \frac{650.416 \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{пв}})}{3.068^2},$$

$$R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{пв}} = 1.644 \text{ Ом}.$$

Данные для построения характеристики торможения противовключением заносим в табл. 12

Таблица 12

$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	410.587 Н·м	$M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	0	-41.863

Механические характеристики полного цикла работы двигателя при активном характере нагрузки производственного механизма представлены на рис. 2.7.

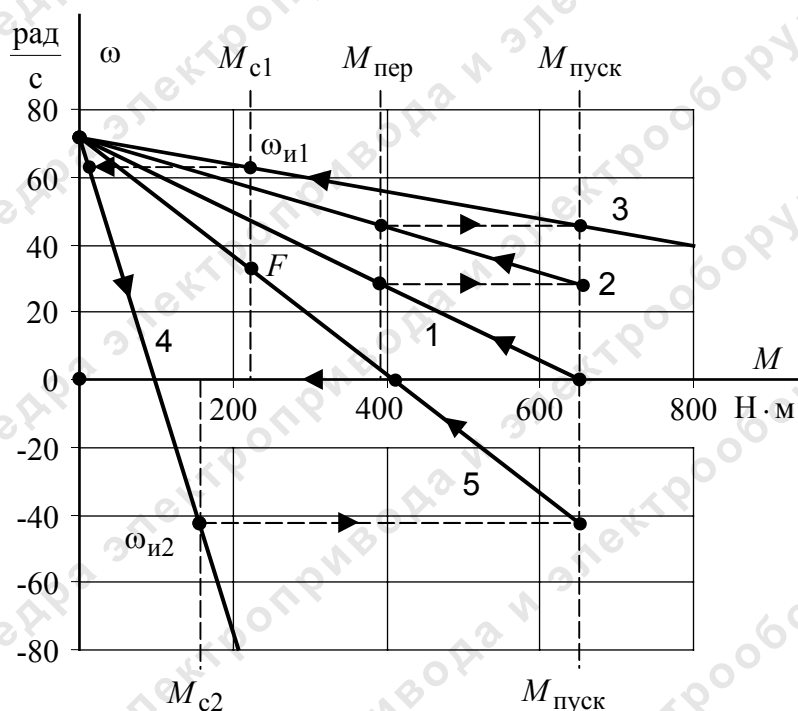


Рис. 2.7. Механические характеристики двигателя: 1 – первая ступень пусковой характеристики; 2 – вторая ступень пусковой характеристики; 3 – рабочая характеристика первой ступени; 4 – рабочая характеристика второй ступени; 5 – характеристика торможения противовключением до нулевой скорости

При *реактивном характере нагрузки* производственного механизма обычно используют вид торможения – динамическое. Расчет механической характеристики динамического торможения проводится на основании выражения

$$\omega = -\frac{M \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}})}{c^2}.$$

Начальные значения для расчета характеристики динамического торможения при реактивном характере нагрузки

$$M = M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad \omega = \omega_{\text{и2}} = -41.863 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Рассчитываем требуемое сопротивление динамического торможения

$$\omega = -\frac{M \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}})}{c^2}, \quad -41.863 = \frac{650.416 \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}})}{3.068^2},$$

$$R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}} = 0.606 \text{ Ом}.$$

Данные для построения характеристики динамического торможения заносим в табл. 13

Таблица 13

$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	$M = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	0	-41.863

Механические характеристики полного цикла работы двигателя при *реактивном характере нагрузки* производственного механизма представлены на рис. 2.8.

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

2.5.1. Расчет переходных процессов проводим по выражениям

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

$$I = I_{\text{кон}} + (I_{\text{нач}} - I_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}},$$

$$\omega = \omega_{\text{кон}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}},$$

где

$M_{нач}, I_{нач}, \omega_{нач}$  – начальные значения соответственно момента, тока и скорости;

$M_{кон}, I_{кон}, \omega_{кон}$  – конечные значения соответственно момента, тока и скорости;

$t$  – текущее время, с;

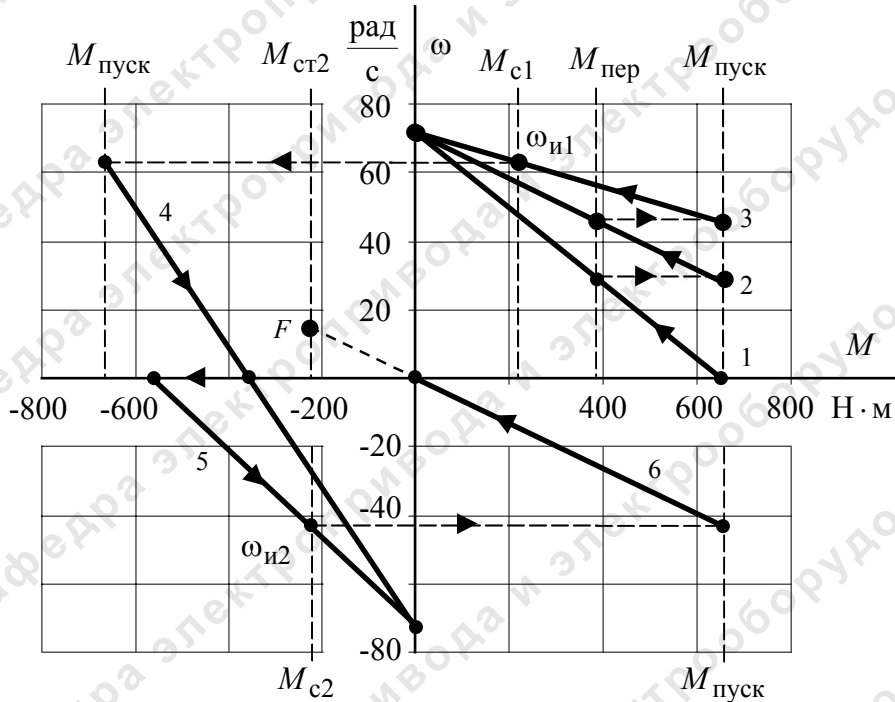


Рис. 2.8. Механические характеристики полного цикла работы двигателя при реактивном характере нагрузки производственного механизма: 1 – первая ступень пусковой характеристики; 2 – вторая ступень пусковой характеристики; 3 – рабочая характеристика первой ступени; 4 – промежуточная характеристика перехода с первой на вторую рабочую ступень; 5 – рабочая характеристика второй ступени; 6 – характеристика динамического торможения

$$T_{mi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_i}{c^2} - \text{электромеханическая постоянная времени, с;}$$

$$J_{\Sigma} - \text{суммарный момент инерции, кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{дв} + J_{мех} \cdot \frac{1}{i_{ст.р}^2};$$

$k = (1.5 \div 1.3)$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

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

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

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



$R_i$  – суммарное сопротивление якорной цепи на соответствующей характеристике, Ом;

$c$  – коэффициент ЭДС двигателя,  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ .

$$J_{\Sigma} = \delta \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} \cdot \frac{1}{i_{\text{ст.р}}^2} = 1.2 \cdot 5.9 + 35 \cdot \frac{1}{8^2} = 7.627 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

2.5.2. Рассчитываем переходные процессы для пуска в две ступени с выходом на рабочую скорость первой ступени (характеристики 1, 2 и 3 рис. 2.8)

▪ *первая ступень пусковой характеристики*

$$R_{\text{я.пуск1}} = 1.038 \text{ Ом}, \quad T_{\text{м.пуск1}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{я.пуск1}}}{c^2} = \frac{7.627 \cdot 1.038}{3.068^2} = 0.841 \text{ с},$$

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{кон.фикт}} = M_{\text{с1}} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При расчете переходного процесса  $M = f(t)$  для первой пусковой характеристики в качестве конечного значения момента берется величина  $M_{\text{кон.фикт}}$ , а расчет ведется до значения момента равному  $M_{\text{пер}} = 390.249 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

$$\omega_{\text{нач}} = 0 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad \omega_{\text{кон.фикт}} = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{с1}} \cdot R_{\text{я.пуск1}}}{c^2} = \frac{220}{3.068} - \frac{220.16 \cdot 1.038}{3.068^2} = 47.429 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

При расчете переходного процесса  $\omega = f(t)$  для первой пусковой характеристики в качестве конечного значения скорости берется величина  $\omega_{\text{кон.фикт}}$ , а расчет ведется до значения скорости, равной:

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{пер}} \cdot R_{\text{я.пуск1}}}{c^2} = \frac{220}{3.068} - \frac{390.249 \cdot 1.038}{3.068^2} = 28.672 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Полученные значения начальных, конечных значений момента и скорости подставляем в выражения для расчета переходных процессов

$$\begin{aligned} M &= M_{\text{кон.фикт}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.пуск1}}}} = \\ &= 220.16 + (650.416 - 220.16) \cdot e^{-\frac{t}{0.841}}, \end{aligned}$$

$$\omega = \omega_{\text{кон.фикт}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.пуск1}}}} =$$

$$= 47.429 + (0 - 47.429) \cdot e^{-\frac{t}{0.841}}.$$

Полученные расчетные значения заносим в табл. 14.

Таблица 14

$t, \text{с}$	0	0.2	0.4	0.6	0.78
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	650.416	559.353	487.563	430.967	390.249
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	0	10.038	17.952	24.191	28.672
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	0	95.866	171.442	231.022	273.818

■ *вторая ступень пусковой характеристики*

$$R_{\text{я.пуск2}} = 0.623 \text{ Ом}, \quad T_{\text{м.пуск2}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{я.пуск2}}}{c^2} = \frac{7.627 \cdot 0.623}{3.068^2} = 0.505 \text{ с},$$

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{кон.фикт}} = M_{\text{с1}} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При расчете переходного процесса  $M = f(t)$  для второй пусковой характеристики в качестве конечного значения момента берется величина  $M_{\text{кон.фикт}}$ , а расчет ведется до значения момента, равному  $M_{\text{пер}} = 390.249 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

$$\omega_{\text{нач}} = 28.67 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$\omega_{\text{кон.фикт}} = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{с1}} \cdot R_{\text{я.пуск2}}}{c^2} = \frac{220}{3.068} - \frac{220.16 \cdot 0.623}{3.068^2} = 57.136 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

При расчете переходного процесса  $\omega = f(t)$  для второй пусковой характеристики в качестве конечного значения скорости берется величина  $\omega_{\text{кон.фикт}}$ , а расчет ведется до значения скорости, равной:

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{пер}} \cdot R_{\text{я.пуск2}}}{c^2} = \frac{220}{3.068} - \frac{390.249 \cdot 0.623}{3.068^2} = 45.878 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Полученные значения начальных, конечных значений момента и скорости подставляем в выражения для расчета переходных процессов

$$M = M_{\text{кон.фикт}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.пуск2}}}}$$

$$= 220.16 + (650.416 - 220.16) \cdot e^{-\frac{t}{0.505}},$$

$$\omega = \omega_{\text{кон.фикт}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.пуск2}}}} =$$

$$= 57.429 + (28.672 - 57.429) \cdot e^{-\frac{t}{0.505}}.$$

Полученные расчетные значения заносим в табл. 15.

Таблица 15

$t, \text{с}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.461
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	650.416	573.122	509.714	457.696	415.024	390.249
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	28.672	33.838	38.076	41.553	44.405	45.878
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	273.818	323.154	363.627	396.829	424.067	438.135

- характеристика первой рабочей ступени

$$R_{\text{я.ст1}} = 0.372 \text{ Ом}, \quad T_{\text{м.ст1}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{я.ст1}}}{c^2} = \frac{7.627 \cdot 0.372}{3.068^2} = 0.301 \text{ с},$$

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{кон}} = M_{\text{с1}} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\omega_{\text{нач}} = 45.878 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$\omega_{\text{кон}} = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{\text{с1}} \cdot R_{\text{я.ст1}}}{c^2} = \frac{220}{3.068} - \frac{220.16 \cdot 0.372}{3.068^2} = 63.007 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Полученные значения начальных, конечных значений момента и скорости подставляем в выражения для расчета переходных процессов

$$M = M_{\text{кон}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.ст1}}}} = 220.16 + (650.416 - 220.16) \cdot e^{-\frac{t}{0.301}},$$

$$\omega = \omega_{\text{кон}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.ст1}}}} = 63.007 + (45.878 - 63.007) \cdot e^{-\frac{t}{0.301}}.$$

Полученные расчетные значения заносим в табл. 16.

Таблица 16

$t, c$	0	0.2	0.4	0.8	1.2	1.5	1.7
$M, Н \cdot м$	650.416	439.578	332.057	249.26	227.728	222.916	220.16
$\omega, \frac{рад}{с}$	45.878	54.19	58.431	61.695	62.545	62.734	62.787
$n, \frac{об}{мин}$	438.135	517.527	558.015	589.192	597.3	599.113	599.62

По данным табл. 14, 15 и 16 строим графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  для режима пуска в две ступени и выхода на рабочую скорость первой ступени (см. рис. 2.9).

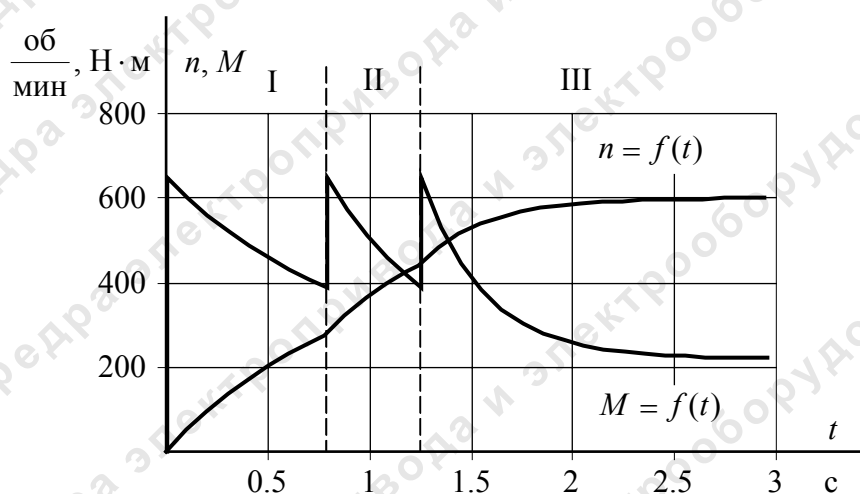


Рис. 2.9. Графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$ : I – первая ступень пусковой характеристики ( $t_{III} = 0.78 c$ ); II – вторая ступень пусковой характеристики ( $t_{III} = 0.46 c$ ); III – выход на рабочую скорость первой ступени ( $t_{III} = 1.7 c$ ); суммарное время переходного процесса 2.941 c

2.5.3. Рассчитываем переходные процессы перехода двигателя с первой рабочей скорости  $\left( n_{и1} = 600 \frac{об}{мин} \right)$  на вторую  $\left( n_{и2} = -400 \frac{об}{мин} \right)$  (характеристика 4 рис. 2.7).

$$R_{я.ст2} = 6.882 \text{ Ом}, \quad T_{м.ст2} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{я.ст2}}{c^2} = \frac{7.627 \cdot 6.882}{3.068^2} = 5.576 \text{ с},$$

$$\omega_{нач} = \omega_{и1} = 62.787 \frac{рад}{с}, \quad \omega_{кон} = \omega_{и2} = -41.885 \frac{рад}{с}.$$

Значения  $M_{нач}$  определим из соотношения

$$\omega_{и1} = \frac{U_H}{c} - \frac{M_{нач} \cdot R_{я.ст2}}{c^2}, \quad 62.787 = \frac{220}{3.068} - \frac{M_{нач} \cdot 6.882}{3.068^2},$$

$$M_{\text{нач}} = 12.201 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{кон}} = M_{\text{с2}} = 155.333 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полученные значения начальных, конечных значений момента и скорости подставляем в выражения для расчета переходных процессов

$$M = M_{\text{кон}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.ст2}}}} = 155.333 + (12.201 - 155.333) \cdot e^{-\frac{t}{5.576}},$$

$$\omega = \omega_{\text{кон}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.ст2}}}} = -41.885 + (62.787 - (-41.885)) \cdot e^{-\frac{t}{5.576}}.$$

Полученные расчетные значения заносим в табл. 17.

Таблица 17

$t, \text{ с}$	0	0.4	1.2	2	4	5.2	10
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	12.21	22.13	39.95	55.39	85.537	99.065	131.564
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	62.878	55.533	42.5	31.21	9.159	-0.734	-24.502
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	599.615	530.347	405.877	298.059	87.474	-7.005	-233.993
$t, \text{ с}$	12	14	16	20	24	28	30
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	138.735	143.74	147.239	151.386	153.41	154.394	155.33
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	-29.745	-33.407	-35.965	-38.998	-40.477	-41.199	-41.885
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	-284.07	-319.05	-343.47	-372.43	-386.56	-393.45	-400

По данным табл. 17 строим графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  для режима перехода с первой рабочей скорости на вторую (рис. 2.10).

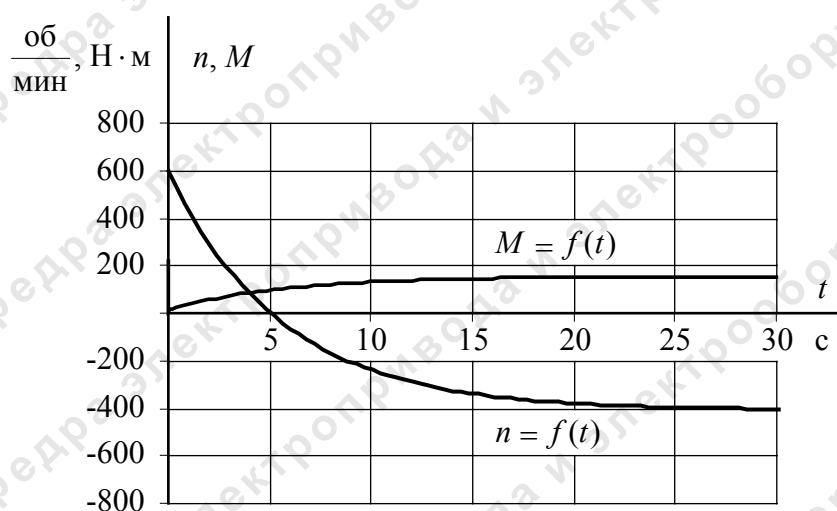


Рис. 2.10. Графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  режима перехода с первой рабочей скорости на вторую ( $t_{\text{III}} = 30 \text{ с}$ )

Проанализировав полученный переходный процесс (рис. 2.10), можно сделать вывод о его неоптимальности. Вследствие большой механической постоянной времени ( $T_M = 5.57$  с) характеристики 4 (рис. 2.7) получается большое время переходного процесса, соизмеримое по величине со временем работы на первой ступени. Для уменьшения времени переходного процесса следовало бы другим способом организовать переход с первой рабочей скорости на вторую, например так, как показано на рис. 2.11.

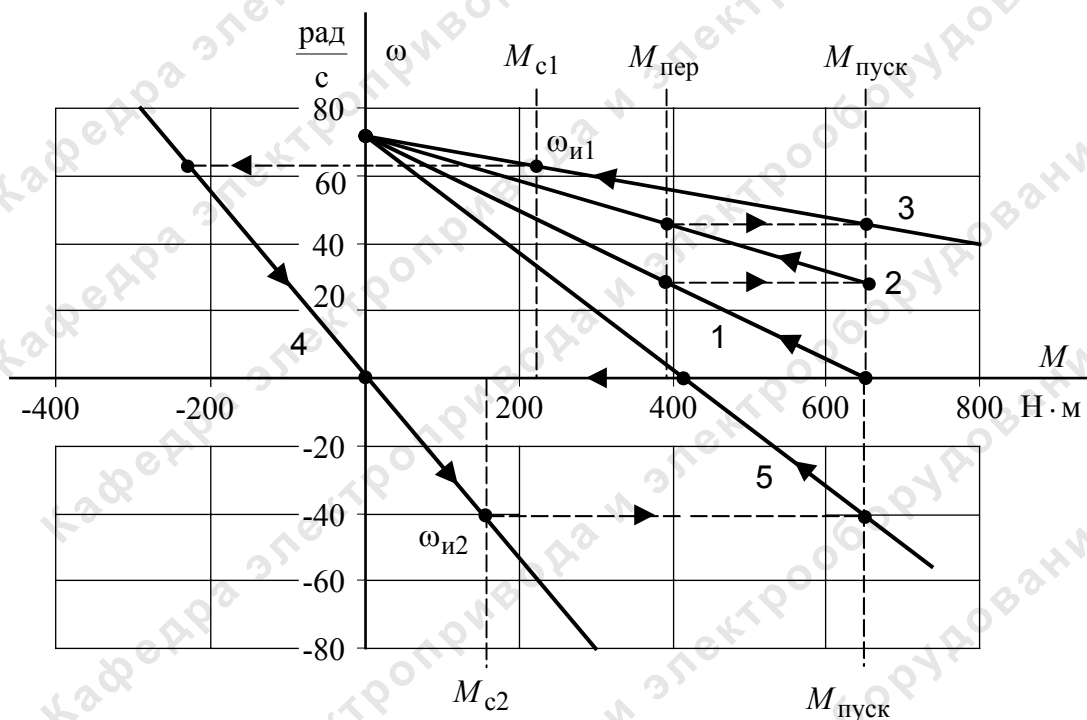


Рис. 2.11. Механические характеристики двигателя: 1 – первая ступень пусковой характеристики; 2 – вторая ступень пусковой характеристики; 3 – рабочая характеристика первой ступени; 4 – рабочая характеристика второй ступени; 5 – характеристика торможения противовключением

В этом случае для второй ступени имеем

$$\omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{и1}} = 62.787 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad \omega_{\text{кон}} = \omega_{\text{и2}} = -41.885 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Величина полного сопротивления цепи якоря двигателя на второй рабочей характеристике определяется из выражения

$$\omega_{\text{и2}} = -\frac{M_{\text{с2}} \cdot R_{\text{я.ст2}}}{c^2}, \quad -41.885 = -\frac{155.333 \cdot R_{\text{я.ст2}}}{3.068^2}.$$

$$R_{\text{я.ст2}} = 2.538 \text{ Ом}, \quad T_{\text{м.ст2}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{я.ст2}}}{c^2} = \frac{7.627 \cdot 2.532}{3.068^2} = 2.057 \text{ с},$$

Значения  $M_{\text{нач}}$  определим из соотношения

$$\omega_{н1} = -\frac{M_{нач} \cdot R_{я.ст2}}{c^2}, \quad 62.787 = -\frac{M_{нач} \cdot 2.538}{3.068^2}, \quad M_{нач} = -232.857 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{кон} = M_{с2} = 155.333 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полученные значения начальных, конечных значений момента и скорости подставляем в выражения для расчета переходных процессов

$$M = M_{кон} + (M_{нач} - M_{кон}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{м.ст2}}} =$$

$$= 155.333 + (-232.557 - 155.333) \cdot e^{-\frac{t}{2.057}},$$

$$\omega = \omega_{кон} + (\omega_{нач} - \omega_{кон}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{м.ст2}}} =$$

$$= -41.885 + (62.787 - (-41.885)) \cdot e^{-\frac{t}{2.057}}.$$

Полученные расчетные значения заносим в табл. 18.

Таблица 18

$t, \text{с}$	0	0.6	1	1.8	3	8	16
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	-232.857	-134.64	-83.401	-6.479	65.039	147.39	155.333
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	62.787	36.305	22.487	1.746	-17.538	-39.743	-41.885
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	600	346.715	214.758	16.675	-167.491	-379.55	-400

По данным табл. 18 строим графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  для режима перехода с первой рабочей скорости на вторую.

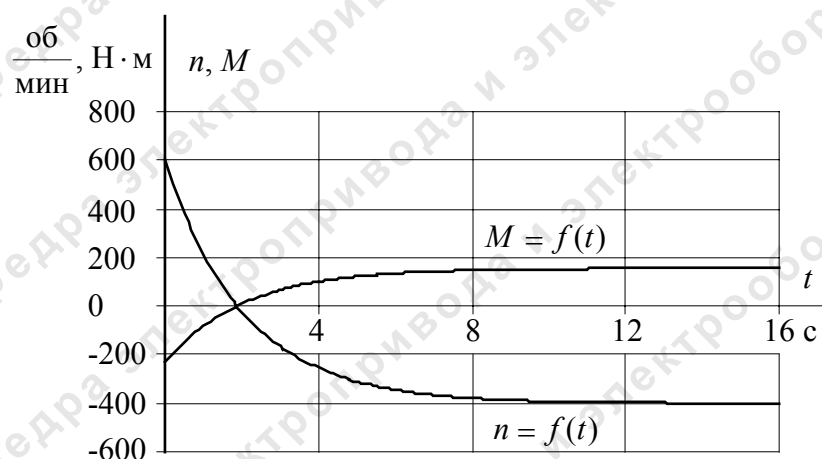


Рис. 2.12. Графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  режима перехода с первой рабочей скорости на вторую ( $t_{III} = 16 \text{ с}$ )

2.5.4. Расчет переходных процессов тормозных режимов работы  
 Режим *торможения противовключением при активном характере нагрузки производственного механизма* (рис. 2.11 характеристика 5) от  $n_{и2} = -400 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$  до нуля.

$$R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{пв}} = 1.644 \text{ Ом}$$

$$T_{\text{м.пв}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{пт}})}{c^2} = \frac{7.627 \cdot 1.644}{3.068^2} = 1.332 \text{ с,}$$

$$\omega_{\text{нач}} = \omega_{и2} = -41.863 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

При расчете переходного процесса  $\omega = f(t)$  для режима торможения противовключением в качестве конечного значения скорости берется величина  $\omega_{\text{кон.фикт}}$  (см. т. F рис. 2.11), которая определяется из выражения

$$\omega_{\text{кон.фикт}} = \frac{U_{\text{н}}}{c} - \frac{M_{с1} \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{пв}})}{c^2} =$$

$$= \frac{220}{3.068} - \frac{220.16 \cdot 1.644}{3.068^2} = 33.255 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

а расчет ведется до значения скорости, равной нулю.

При расчете переходного процесса  $M = f(t)$  для режима торможения противовключением

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{кон.фикт}} = M_{с1} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

а расчет ведется до значения момента, соответствующего значению скорости  $\omega = 0$ , равному  $M = 410.587 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (см. табл. 13). При достижении двигателем нулевой скорости, он отключается от сети, и значение момента мгновенно становится равным нулю.

$$M = M_{\text{кон.фикт}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.пв}}}}$$

$$= 220.16 + (650.416 - 220.16) \cdot e^{-\frac{t}{1.322}},$$

$$\omega = \omega_{\text{кон.фикт}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.пв}}}}$$

$$= 33.255 + (-41.863 - 33.255) \cdot e^{-\frac{t}{1.322}}.$$

Полученные расчетные значения заносим в табл. 19.



Таблица 19

$t, \text{с}$	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.075
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	650.416	576.788	515.759	465.174	423.24	410.587
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	-41.863	-29.008	-18.353	-9.522	-2.202	0
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	-400	-277.029	-175.275	-90.934	-21.025	0

По данным табл. 19 строим графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  для режима торможения противовключением (активный характер нагрузки производственного механизма).

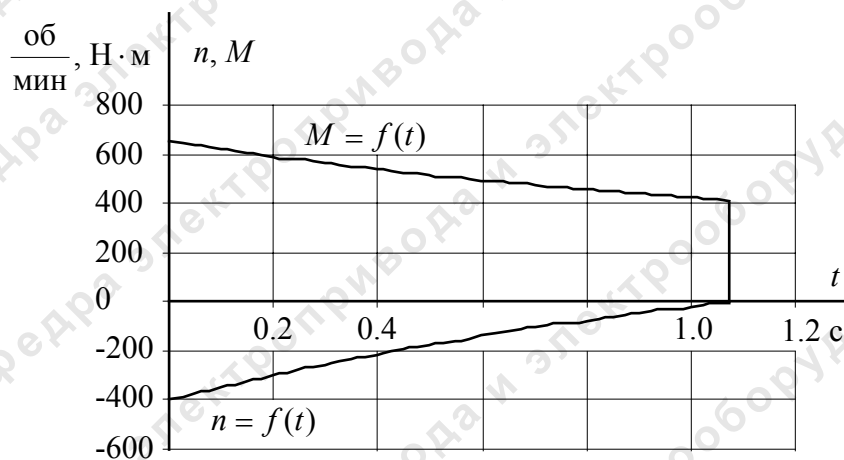


Рис. 2.13. Графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  режима торможения противовключением ( $t_{\text{пп}} = 1.075 \text{ с}$ )

Режим динамического торможения при реактивном характере нагрузки производственного механизма (рис. 2.8 характеристика б) от

$n_{\text{и2}} = -400 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$  до нуля.

$$R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}} = 0.606 \text{ Ом},$$

$$T_{\text{м.дт}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}})}{c^2} = \frac{7.627 \cdot 0.606}{3.068^2} = 0.491 \text{ с},$$

$$\omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{и2}} = -41.863 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

При расчете переходного процесса  $\omega = f(t)$  для режима динамического торможения в качестве конечного значения скорости берется величина  $\omega_{\text{кон.фикт}}$  (см. т. F рис. 2.8), которая определяется из выражения

$$\omega_{\text{кон.фикт}} = \frac{-M_{\text{с2}} \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}})}{c^2} = \frac{-220.16 \cdot 0.606}{3.068^2} = 14.174 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

а расчет ведется до значения скорости, равной нулю.

При расчете переходного процесса  $M = f(t)$  для режима динамического торможения

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{пуск}} = 650.416 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_{\text{кон.фикт}} = M_{\text{с2}} = 220.16 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

а расчет ведется до значения момента, равному нулю.

$$M = M_{\text{кон.фикт}} + (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.дт}}}}$$

$$= -220.16 + (650.416 - (-220.16)) \cdot e^{-\frac{t}{0.491}},$$

$$\omega = \omega_{\text{кон.фикт}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон.фикт}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{м.дт}}}}$$

$$= 14.174 + (-41.863 - 14.174) \cdot e^{-\frac{t}{0.491}}.$$

Полученные расчетные значения заносим в табл. 20.

Таблица 20

$t, \text{с}$	0	0.15	0.3	0.45	0.6	0.675
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	650.416	421.242	252.396	127.99	36.348	0
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	-41.863	-27.111	-16.243	-8.2362	-2.337	0
$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	-400	-258,916	-155.124	-78.656	-22.317	0

По данным табл. 20 строим графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  для режима динамического торможения (*реактивный характер нагрузки производственного механизма*).

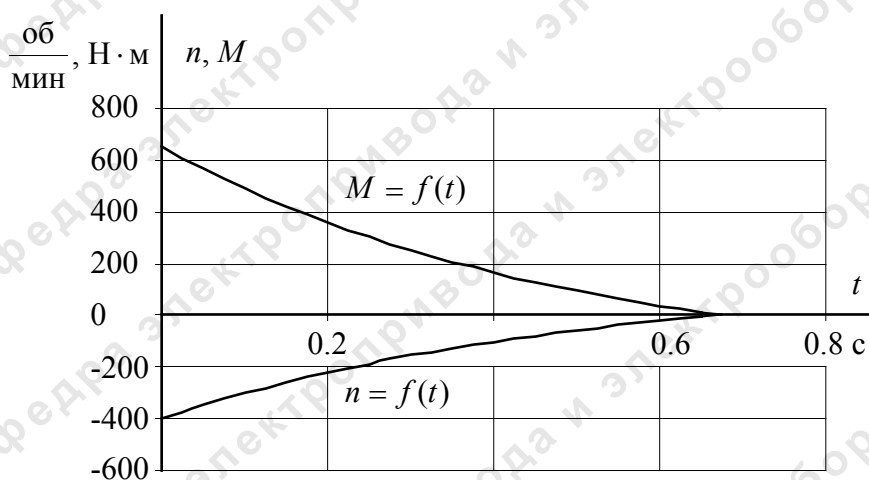


Рис. 2.14. Графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  режима динамического торможения ( $t_{\text{шт}} = 0.675 \text{ с}$ )

По данным таблиц 14–16, 18, 19 строим графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  полного цикла работы.

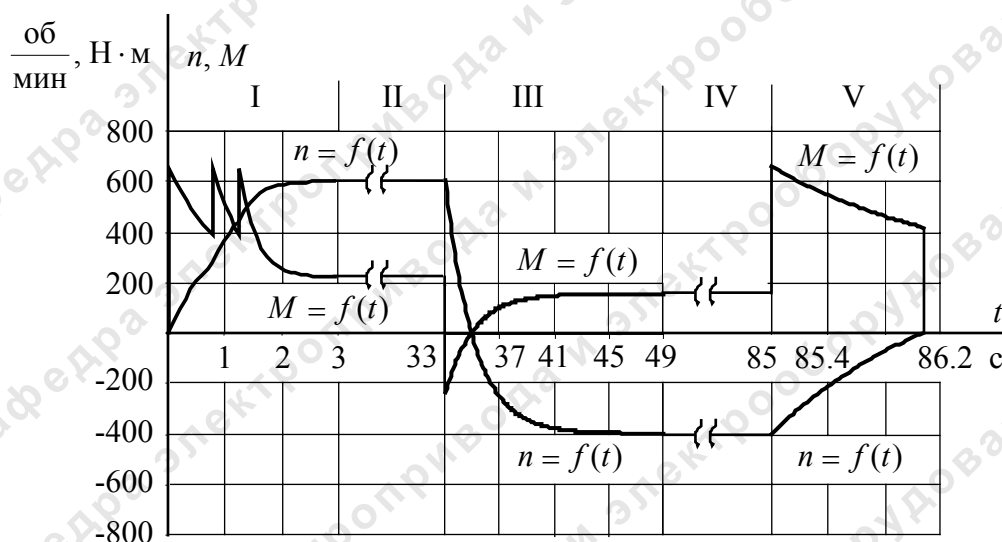


Рис. 2.15. Графики переходных процессов  $M = f(t)$  и  $n = f(t)$  заданного цикла работы: I – пуск двигателя в две ступени с выходом на первую рабочую ступень; II – работа на первой ступени; III – торможение противовключением с переходом на вторую ступень работы; IV – работа на второй ступени; V – торможение противовключением до нулевой скорости

## 2.6. Проверка выбранного электродвигателя на нагрев

### 2.6.1. Проверка двигателя по нагреву (метод эквивалентных величин)

Метод эквивалентного тока

$$I_3 = \sqrt{\frac{\int_0^{t_p+t_{\text{III}}} I^2 dt}{t_p + t_{\text{III}}}},$$

где  $\int_0^{t_p+t_{\text{III}}}$  – определяем через площадь графика  $I^2 = f(t)$  (см. рис.

2.16, 2.17, 2.18);

$t_p$  – суммарное время работы на скоростях  $\omega_{\text{И1}}$  и  $\omega_{\text{И2}}$ ;

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

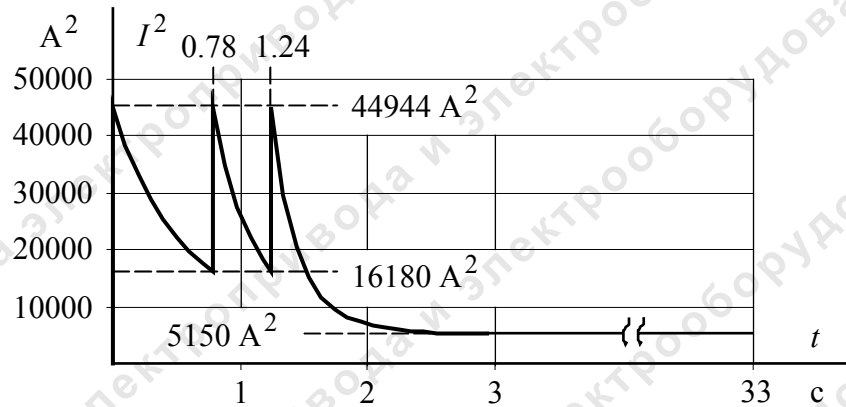


Рис. 2.16. Режим пуска двигателя в две ступени и работа на первой рабочей скорости

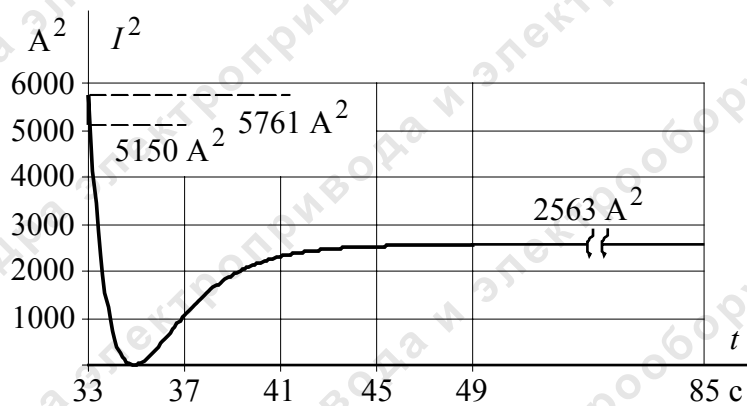


Рис. 2.17. Режим перехода двигателя с первой рабочей скорости на вторую, работа на ней

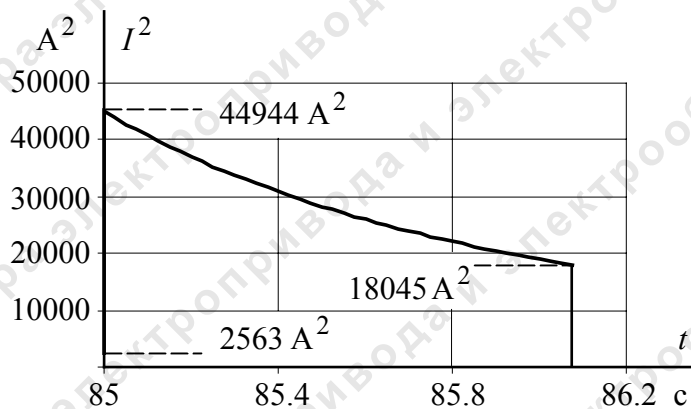


Рис. 2.18. Режим торможения противовключением со второй рабочей ступени до нулевой скорости

Правильность выбора двигателя определяется условием

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_{\text{кат}}}}$$

Имеем

$$\int_0^{t_{\text{p}}+t_{\text{пп}}} i^2 dt \approx 371435.6 \text{ A}^2, \quad I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\text{p}}+t_{\text{пп}}} i^2 dt}{t_{\text{p}} + t_{\text{пп}}}} = \sqrt{\frac{371435.6}{66 + 20.016}} = 65.713 \text{ A}.$$

Условие проверки двигателя по нагреву

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_{\text{кат}}}}, \quad 106 \geq 65.713 \cdot \sqrt{\frac{30.56}{40}}, \quad 106 \geq 57.438 \text{ A}.$$

Условие проверки двигателя по нагреву выполняется.

### Заключение

1. Механические характеристики полного цикла работы двигателя (рис. 2.7, 2.11), обеспечивающие заданный режим работы, не являются окончательным вариантом и могут быть изменены.

2. Расчет переходных процессов можно прекращать в случае, когда регулируемый параметр (обычно  $\omega$ ) достигает 0.95 своего установившегося значения.