

### Задача 1

Для электропривода механизма подъема, кинематическая схема которого приведена на рисунке 3, а значения параметров элементов кинематической схемы и технические данные в таблице 1 :

1. Определить момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя.
2. Определить момент сопротивления, приведенный к валу двигателя
  - а) при подъеме груза;
  - б) при опускании груза.
3. Пояснить, в каких режимах работает двигатель при подъеме и опускании груза.

Таблица 1

Вариант	$J_d$ кгм <sup>2</sup>	$J_m$ кгм <sup>2</sup>	$J_p^*$ кгм <sup>2</sup>	$u_{p1}$	$u_{p2}$	$m$ кг	$v$ м/с	$D_6$ м	$\omega$ рад/с	$\eta_p$	$\eta_6$	$J_6$ кгм <sup>2</sup>
1	0,27	0,01	0,027	-	-	500	1,0	0,5	78,5	0,80	0,91	3,0

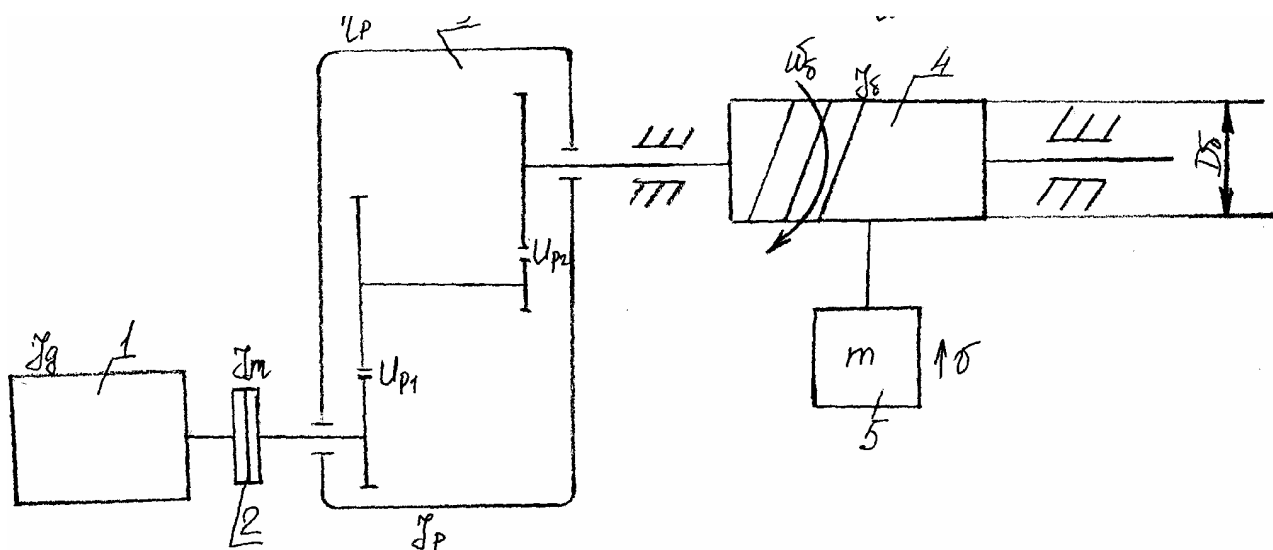


Рисунок 3 – Кинематическая схема электропривода

1–двигатель, 2–соединительная муфта, 3–редуктор, 4–барабан, 5–груз,  
 $J$ -момент инерции,  $U_p$ -передаточное число редуктора,  $\omega$ -угловая скорость,  $D_6$ -внешний диаметр барабана,  $\eta$  - КПД

## Решение

Приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции системы представляет собой сумму моментов инерции вращающихся масс и эквивалентных моментов инерции масс, движущихся поступательно. Для представленного механизма справедливо:

$$J_{\text{эkv}} = J_{\text{д}} + J_{\text{м}} + \frac{J_{\text{п}} + J_{\text{б}} + J_{\text{м}}}{u_{\text{п}}^2},$$

где:

$$J_{\text{м}} = m \cdot \left( \frac{v}{\omega_{\text{б}}} \right)^2 = m \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{2} \right)^2 = 500 \cdot 0,25^2 = 31,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad - \text{ эквивалентный момент инерции}$$

массы опускаемого(поднимаемого) груза;

$$u_{\text{п}} = \frac{\omega}{\omega_{\text{б}}} = \frac{D_{\text{б}} \omega}{2v} = \frac{0,5 \cdot 78,5}{2 \cdot 0,1} = 19,625 \quad - \text{ передаточный коэффициент редуктора.}$$

Таким образом, получаем:

$$J_{\text{эkv}} = 0,27 + 0,01 + \frac{0,027 + 3 + 31,25}{19,625^2} = 0,369 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Статический момент нагрузки, приведенный к валу двигателя при подъеме груза может быть определен из уравнения баланса мощностей:

$$M_{\text{с.уп}} \cdot \omega \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{б}} = m \cdot g \cdot v,$$

откуда:

$$M_{\text{с.уп}} = \frac{m \cdot g \cdot v}{\omega \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{б}}} = \frac{500 \cdot 9,81 \cdot 0,1}{78,5 \cdot 0,8 \cdot 0,91} = 85,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Соответственно, при опускании груза поток мощности направлен от нагрузки к двигателю, поэтому баланс мощностей запишется в виде:

$$M_{\text{с.down}} \cdot \omega = m \cdot g \cdot v \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{б}},$$

а эквивалентный статический момент нагрузки будет равен:

$$M_{\text{с.down}} = \frac{m \cdot g \cdot v \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{б}}}{\omega} = \frac{500 \cdot 9,81 \cdot 0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,91}{78,5} = 45,47 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При подъеме груза двигатель вырабатывает вращающий момент и расходует энергию на преодоление силы тяжести, действующей на подвешенный груз.

При контролируемом спуске груза со скоростью  $v$  двигатель работает в тормозном режиме и вырабатывает тормозной момент  $M_{\text{с.down}}$ .

## Задача 2

Для соответствующего заданному варианту графика нагрузки в таблице 2.

Таблица 2

Вариант	График нагрузки	Значение параметров графика (P, кВт; t <sub>в</sub> , с; M, Н*м; I, А; t <sub>0</sub> , с)	Частота вращения двигателя n, об/мин
1		P <sub>1</sub> =25 P <sub>4</sub> =15 P <sub>2</sub> =P <sub>5</sub> =8 t <sub>1</sub> =t <sub>4</sub> =5 t <sub>2</sub> =t <sub>5</sub> =20 t <sub>01</sub> =t <sub>02</sub> =15	800

1. Определить, к какому из 8 режимов работы двигателя в соответствии с ГОСТ 183-74 можно отнести данный график.
2. Определить требуемую номинальную мощность двигателя по условия нагрева с проверкой по перегрузочной способности.
3. Выбрать наиболее подходящий двигатель, используя справочную литературу. Привести его технические данные, расшифровать марку.

## Решение

Расчетная продолжительность включения двигателя определяется выражением:

$$ПВ_p \% = \frac{t_{p,\Sigma}}{t_u} \cdot 100\% = \frac{t_1 + t_2 + t_4 + t_5}{t_1 + t_2 + t_4 + t_5 + t_{01} + t_{02}} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot 25}{2 \cdot 25 + 30} \cdot 100 = 62,5\%$$

Стандартизированное по указанному ГОСТ значение продолжительности включения, ближайшее к расчетному равно 60%, нормируемому для режима S3, а следующее большее – 100%, нормируемое для S1. Таким образом, представленную нагрузочную диаграмму можно отнести к кратковременному режиму работы S2.

Требуемую номинальную мощность двигателя определим с приведением к стандартной продолжительности включения 60% для режима S3 согласно выражению:

$$P_{э.н} = P_{э} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_p}{60}},$$

где:

$$P_{э} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_4^2 t_4 + P_5^2 t_5}{t_{p,\Sigma}}} = \sqrt{\frac{25^2 \cdot 5 + 8^2 \cdot 20 + 15^2 \cdot 5 + 8^2 \cdot 20}{50}} = 11,67 \text{ кВт} - \text{эквивалентная}$$

мощность нагружения двигателя за цикл.

Тогда получим:

$$P_{э.н} = 11,67 \cdot \sqrt{\frac{62,6}{60}} = 11,91 \text{ кВт}.$$

На рассчитанную эквивалентную мощность нагрузки с учетом нагрева и перегрузочной способности можно выбрать двигатель постоянного тока со следующими техническими характеристиками:

Тип: **2ПН160МУХЛ4**.

Номинальная мощность на валу: **13 кВт**.

Номинальное напряжение питания: **220 В**.

Номинальная частота вращения: **2120 об/мин**.

Максимальная частота вращения: **4000 об/мин**.

КПД: **85,5%**.

Сопротивления обмоток при 15<sup>0</sup>С:

- якоря: **0,081 Ом**;

- добавочных полюсов: **0,056 Ом**;

- возбуждения: **61,5 Ом**.

Тип двигателя расшифровывается следующим образом:

«2П» – название серии машин;

«Н» - исполнение по способу защиты и вентиляции (Н - защищенное с самовентиляцией);

«160» - высота оси вращения, мм;

«М» - условное обозначение длины сердечника якоря (М - средняя);

«УХЛ4» - климатическое исполнение двигателя по ГОСТ 15150-69.

### Задача 3

Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, данные которого приведены в таблице 3, :

1. Построить естественную электромеханическую и механическую характеристики.
2. Определить сопротивления ступеней пускового реостата при условии, что наибольшее значение пускового момента не должно превышать значения  $M_1$ , число ступеней реостата –  $m$  ( значения  $M_1$ ,  $M_c$  и  $m$ , необходимые для расчета, заданы в таблице 3.). Построить диаграмму пуска.
3. Определить необходимое добавочное сопротивление в цепи якоря двигателя при переходе его из двигательного режима работы с номинальными параметрами в режим противовключения – для нечетных вариантов или в режим динамического торможения – для четных вариантов при условии, что начальный тормозной ток равен  $I_T$ .
4. Построить искусственную, механическую характеристику при снижении напряжения питания на 20 %; при введении в цепь якоря добавочного сопротивления  $R_{доб*} = 0,4$ .

Таблица 3

вар	Технические данные двигателя типа П, 220 В с регулированием скорости 1:2( продолжительный режим работы )									Данные расчетов			
	Тип	$P_n$ кВт	$n_n$ об/мин	$I_n$ А	$\Gamma_a + \Gamma_{дп}$ Ом	$\Gamma_{пар}$ Ом	Номинальный ток возбуждения параллельн. обмотки, А	Макс. допустимая частота вращения об/мин	Момент инерции якоря I, кгм <sup>2</sup>	Кратность статического момента $M_c / M_n$	Число ступеней $m$ .	Кратность пускового момента $M_n / M_n$	Кратность начального тормозного тока $I_T / I_n$
1	П-61	6,0	1000	32,6	0,494	158	1,05	2000	0,56	0,9	4	1,9	2,4

### Решение

Уравнение естественных электромеханической и механической характеристик двигателя имеет вид:

$$n(I_a) = \frac{U - I_a R_{a.\Sigma}}{c_e \Phi};$$

$$n(M) = \frac{U - \frac{M}{c_m \Phi} R_{a.\Sigma}}{c_e \Phi},$$

где:

$U$  - напряжение питания двигателя;

$I_a = I - I_b$  - то якоря двигателя;

$c_e \Phi$  – коэффициент ЭДС двигателя.

Для номинального режима работы имеем:

$$U = 220 \text{ В};$$

$$I_{a.n} = I_n - I_{б.n} = 32,6 - 1,05 = 31,55 \text{ А};$$

$$c_e \Phi = \frac{U - I_{a.n} R_{a.\Sigma}}{n_n} = \frac{220 - 31,55 \cdot 0,494}{1000} = 0,204;$$

$$c_m \Phi = \frac{30}{\pi} c_e \Phi = \frac{30}{\pi} \cdot 0,204 = 1,952.$$

Номинальный электромагнитный момент:

$$M_n = c_m \Phi I_{a.n} = 1,952 \cdot 31,55 = 61,59 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Воспользовавшись выражениями  $n(I_a)$  и  $n(M)$ , построим электромеханическую и механическую характеристик двигателя по двум точкам:

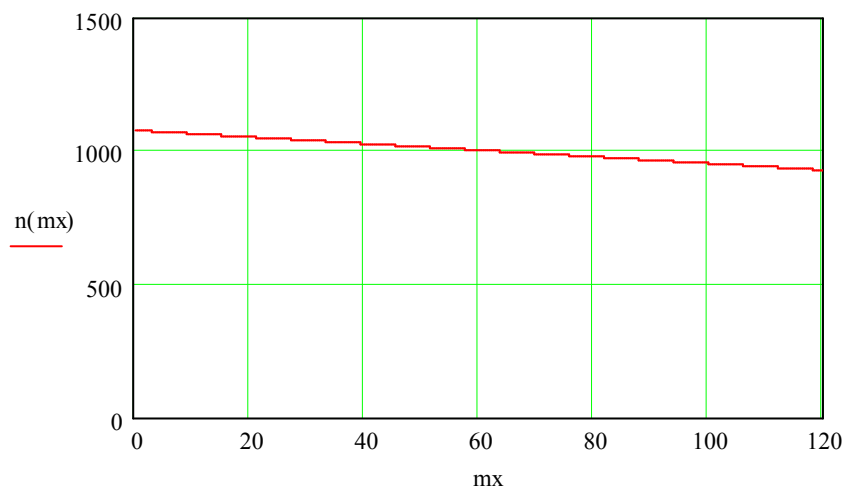
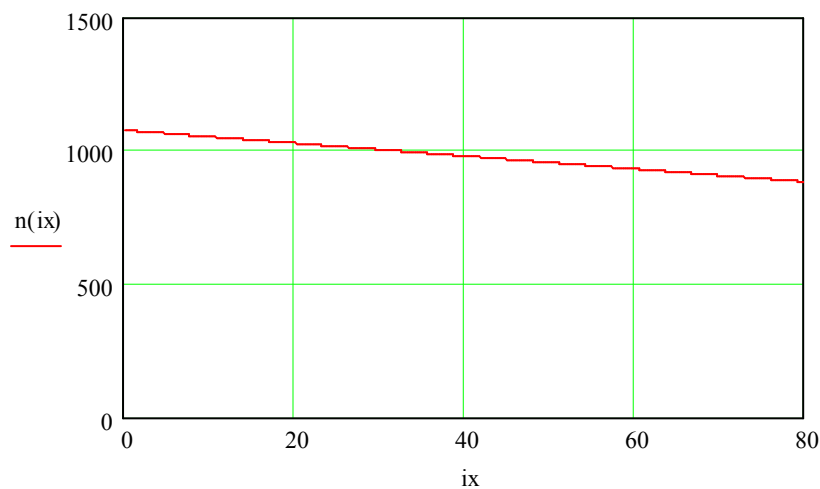
$$I_a = I_n = 1,9 \cdot 31,55 = 59,95 \text{ А}; n = 0;$$

$$I_a = 0; n = n_0 = \frac{U}{c_e \Phi} = \frac{220}{0,204} = 1076,25 \text{ об/мин};$$

$$M = M_n = 1,9 \cdot 61,59 = 117,01 \text{ Н} \cdot \text{м}; n = 0;$$

$$M = 0; n = n_0 = \frac{U}{c_e \Phi} = \frac{220}{0,204} = 1076,25 \text{ об/мин}.$$

Графики функций  $n(I_a)$  и  $n(M)$ :



Выражение для расчета сопротивления якорной цепи в пусковых режимах имеет вид:

$$r(n) = \frac{(U - n \cdot c_e \Phi) \cdot c_m \Phi}{M_n}, \quad (1)$$

где  $n$  – текущая скорость двигателя.

Значение скорости двигателя в момент переключения ступеней может быть определено выражением:

$$n_k = \frac{U - M_c \cdot r_k / c_m \Phi}{c_e \Phi}, \quad (2)$$

где  $k$  – номер пусковой ступени.

Воспользовавшись выражениями (1) и (2), рассчитаем значения  $n$  и  $r$  для каждой ступени пуска и сведем их в таблицу:

$n_k, \text{об/мин}$	0	566,4	834,76	961,86
$r_k, \text{Ом}$	3,67	1,738	0,812	$R_{a\Sigma}$

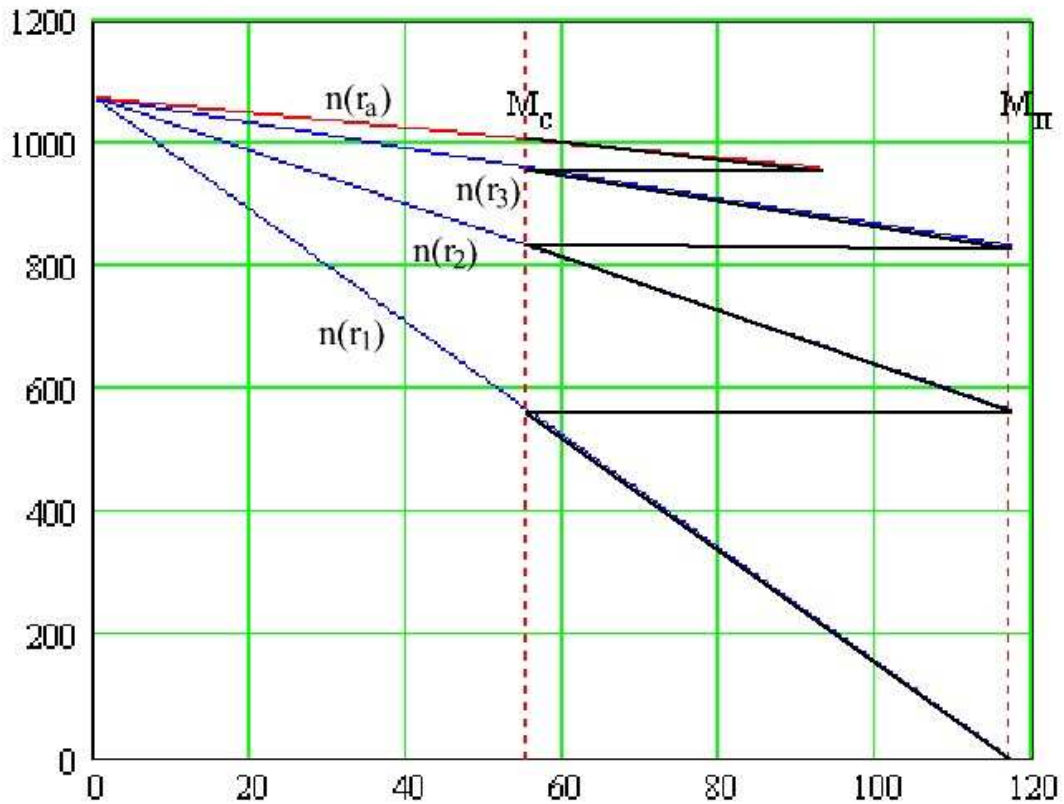
Добавочные сопротивления на пусковых ступенях будут равны:

$$r_{\partial.1} = r_1 - R_{a\Sigma} = 3,176 \text{ Ом};$$

$$r_{\partial.2} = r_2 - R_{a\Sigma} = 1,244 \text{ Ом};$$

$$r_{\partial.3} = r_3 - R_{a\Sigma} = 0,329 \text{ Ом}.$$

График пусковой диаграммы в 4 ступени изображен на рисунке:



Необходимое добавочное сопротивление в цепи якоря в режиме торможения противовключением может быть определено из выражения:

$$n_n = \frac{I_m r_m - U}{c_e \Phi} \Rightarrow r_m = \frac{n_n c_e \Phi + U}{I_m} = \frac{1000 \cdot 0,204 + 220}{78,24} = 5,4245 \text{ Ом}.$$

Откуда:

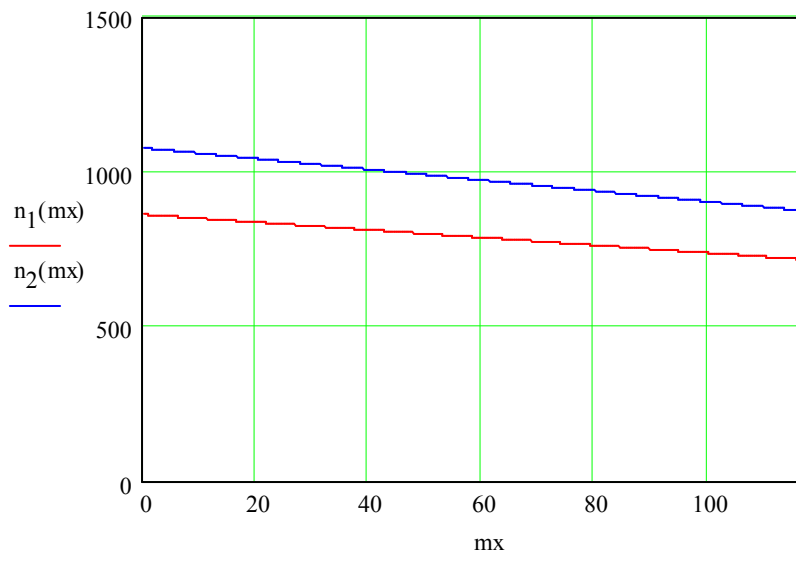
$$r_{\partial.m} = r_m - R_{a\Sigma} = 5,4245 - 0,494 = 4,931 \text{ Ом}.$$

Искусственные механические характеристики двигателя при пониженном на 20% напряжении питания и при введении в цепь якоря добавочного сопротивления могут быть построены согласно выражений:

$$n_1(M) = \frac{0,8U - M \cdot R_{a\Sigma} / c_m \Phi}{c_e \Phi};$$

$$n_2(M) = \frac{U - M \cdot 1,4R_{a\Sigma} / c_m \Phi}{c_e \Phi}.$$

Графики этих функции изображены на рисунке:





#### Задача 4

Для асинхронного двигателя с фазным ротором, данные которого приведены в таблице 4 :

- 1) Рассчитать и построить естественную механическую характеристику, указать на ней характерные точки.
- 2) Построить диаграмму пуска и определить сопротивления добавочных резисторов в цепи ротора при условии, что наибольшее значение момента двигателя при его разгоне не должно превышать значения  $M_1$ , а значение момента  $M_2$ , при котором происходит переключение ступеней резисторов, не должно быть меньше  $1,2M_c$ , где  $M_c$  – момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя. Данные для расчета взять из таблицы 5.
- 3) Составить схему торможения противовключением ( для четных вариантов) и динамического торможения (для нечетных вариантов).
- 4) Построить механические характеристики для заданного способа торможения ( без расчета).

Таблица 4 Технические данные асинхронного двигателя с фазным ротором

Вар	Тип электродвигателя	Р <sub>2</sub> , кВт	n, об/мин	I <sub>1</sub> при U=380	cosφ	η %	I <sub>2</sub> А	U <sub>2</sub> В	M <sub>max</sub> /M <sub>ном</sub>	I кгм <sup>2</sup>	m, кг	n <sub>max</sub> об/мин
		при ПВ, %										
1	МТФ 011-6	2	800	7,1	0,78	55	16,5	116	2,0	0,08	51	2500

Таблица 5

Вариант	M <sub>c</sub> /M <sub>н</sub>	M <sub>1</sub> /M <sub>н</sub>
1	0,8	0,8

#### Решение

Естественную характеристику двигателя можно построить по упрощенной формуле Клосса:

$$M(s) = \frac{2M_{\max}}{s + s_k} = \frac{2 \cdot 47,75}{0,746 + s}$$

где:

$$M_{\max} = \lambda M_n = 2 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_2}{n} = 47,75 \text{ Н} \cdot \text{м} - \text{максимальный (критический) момент двигателя при}$$

$$\text{номинальном вращающем моменте } M_n = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_2}{n} = 23,87 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

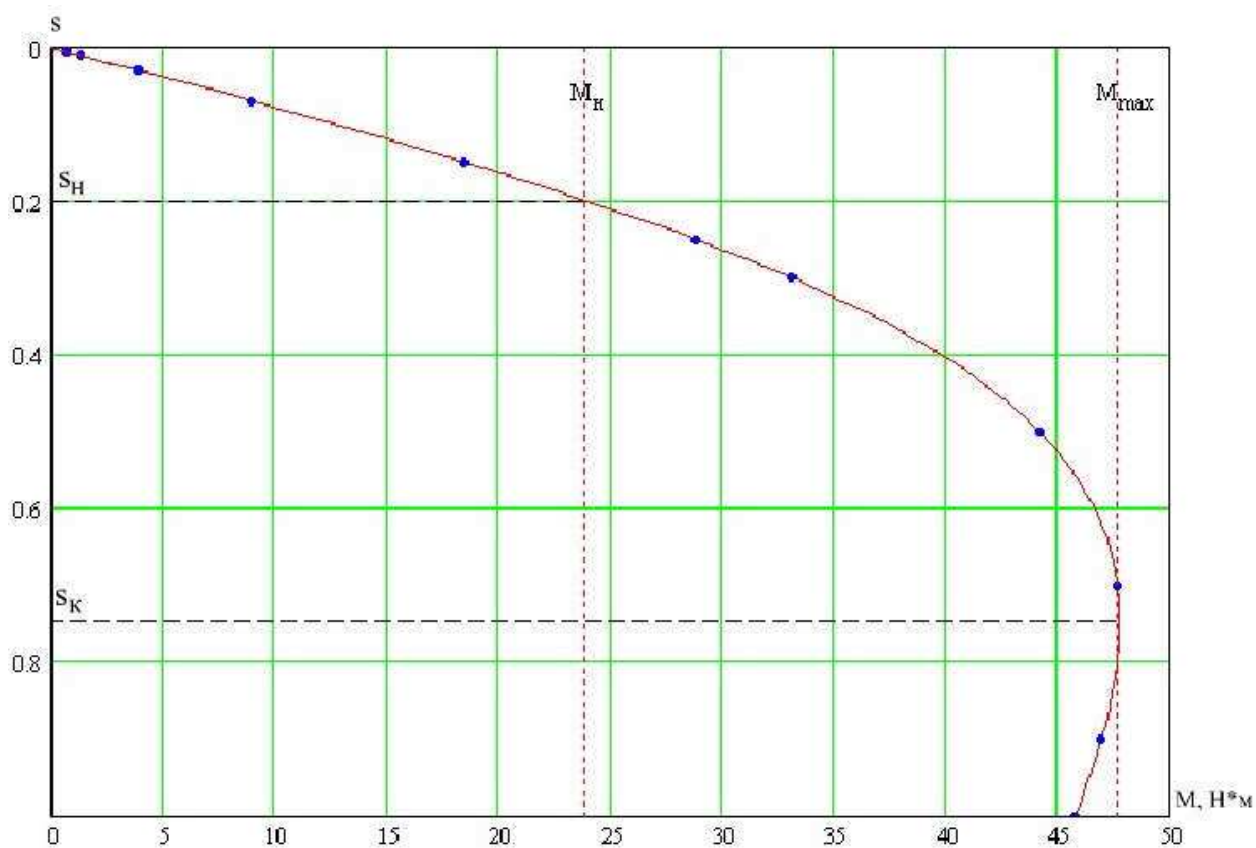
$$s_k = s_n \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot (2 - \sqrt{3}) = 0,746 - \text{критическое скольжение двигателя при}$$

$$\text{номинальном } s_n = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 800}{1000} = 0,2.$$

Расчетные значения моментов для фиксированных значений скольжения на естественной характеристике сведены в таблицу:

s	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,25	0,15	0,07	0,03	0,01	0,005
M, Н·м	45,78	46,92	47,65	44,16	33,04	28,76	18,45	8,88	3,83	1,279	0,64

График естественной характеристики двигателя изображен на рисунке:



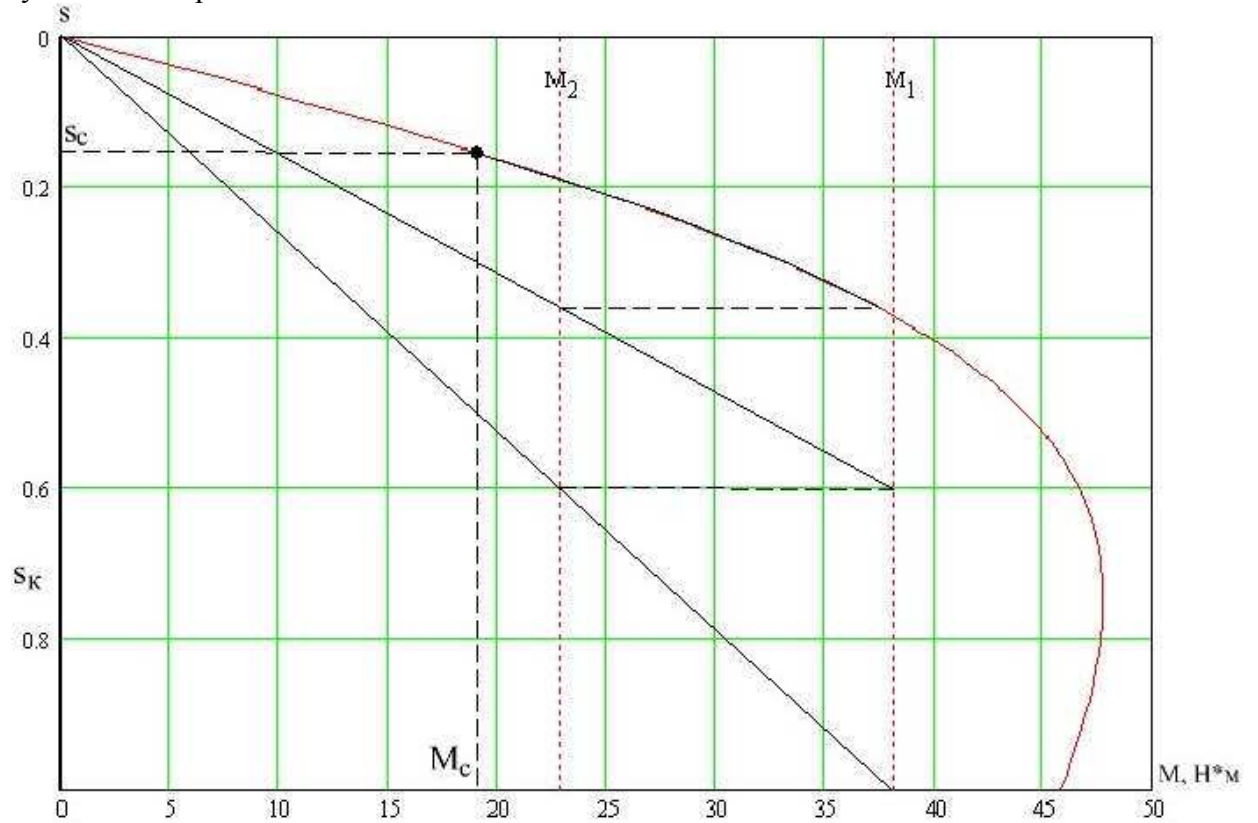
Момент статической нагрузки:  $M_c = 0,8 \cdot M_n = 0,8 \cdot 23,87 = 19,1 \text{ H} \cdot \text{м}$ .

Граничные пусковые моменты при многоступенчатом пуске будут равны:

$$M_1 = 0,8M_{max} = 0,8 \cdot 47,75 = 38,2 \text{ H} \cdot \text{м};$$

$$M_2 = 1,2M_c = 1,2 \cdot 19,1 = 22,92 \text{ H} \cdot \text{м}.$$

Пусковая диаграмма двигателя имеет вид:



Значения скольжений при шунтировании ступеней пуска при моменте  $M_2$  равны:

$$s_{n1} = 0,6; s_{n2} = 0,37.$$

Скольжение при моменте  $M_2$  на естественной характеристике:  $s_e = 0,191$ .

Активное сопротивление фазы ротора, соответствующее номинальному режиму работы, определяется выражением:

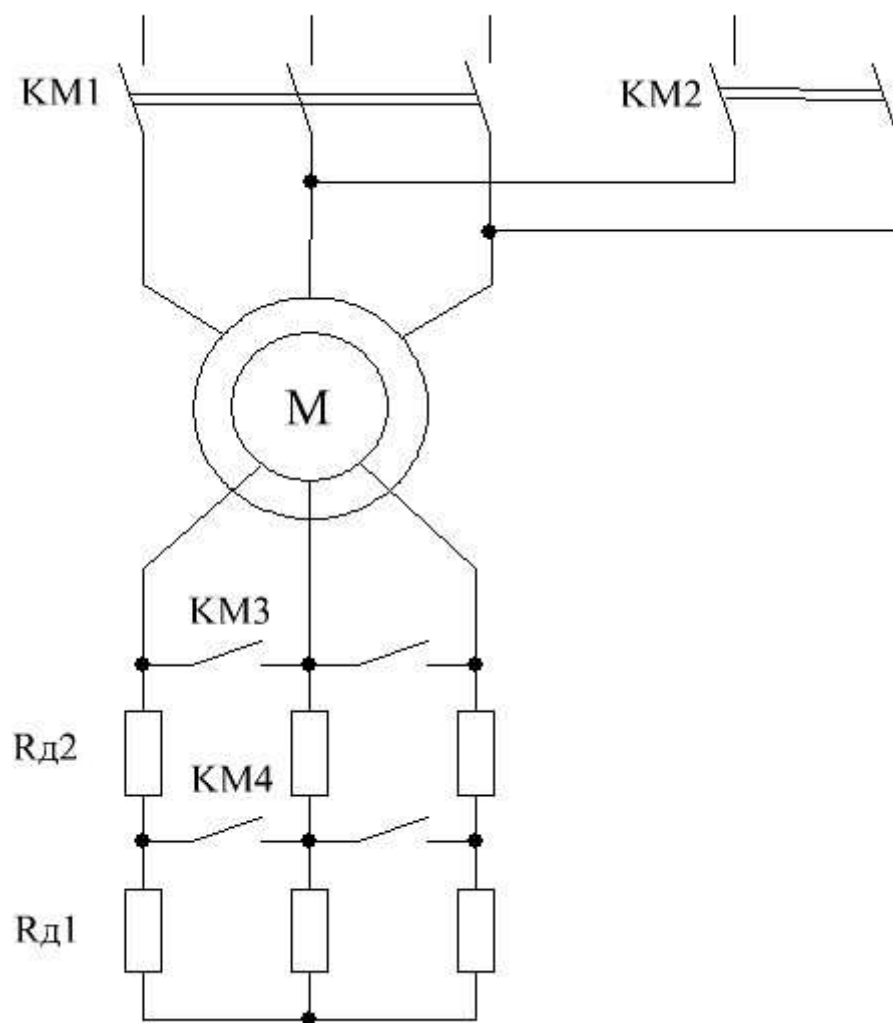
$$R_{2н} = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} \cdot s_n = \frac{116}{\sqrt{3} \cdot 16,5} \cdot 0,2 = 0,812 \text{ Ом.}$$

Сопротивления добавочных реостатов цепи ротора при пуске будут определяться выражениями:

$$R_{дон.1} = R_{2н} \cdot \left( \frac{s_{n1}}{s_e} - 1 \right) = 0,812 \cdot \left( \frac{0,6}{0,191} - 1 \right) = 1,738 \text{ Ом;}$$

$$R_{дон.2} = R_{2н} \cdot \left( \frac{s_{n2}}{s_e} - 1 \right) = 0,812 \cdot \left( \frac{0,37}{0,191} - 1 \right) = 0,761 \text{ Ом.}$$

Схема динамического торможения двигателя:



Механические характеристики двухступенчатого динамического торможения изображены на рисунке:

