

где номинальная угловая скорость  $\omega_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157,08 \text{ } 1/\text{с}$

$$\text{Коэффициент ЭДС } \kappa\phi = \frac{U_H - I_H \cdot R'_{я\Sigma}}{\omega_H} = \frac{220 - 58,48 \cdot 0,371}{157,08} = 1,262 \text{ В} \cdot \text{с}$$

$$\text{Конструктивный коэффициент: } \kappa = \frac{p_{\Pi} \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} = \frac{2 \cdot 834}{2 \cdot \pi \cdot 1} = 268,3$$

Номинальный магнитный поток:

$$\Phi_H = \frac{\kappa\phi}{\kappa} = \frac{1,262}{268,3} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Номинальный ток возбуждения:

$$I_{BH} = \frac{U}{R_B} = \frac{220}{65,3} = 3,36 \text{ А}$$

Электромагнитная постоянная якорной цепи:

$$T_J = \frac{L_{я\Sigma}}{R'_{я\Sigma}} = \frac{0,72 \cdot 10^{-2}}{0,371} = 0,019 \text{ с}$$

Индуктивность обмотки возбуждения:

$$L_B = \frac{2 \cdot W \cdot p_{\Pi} \cdot K_{\text{нас}} \cdot \Phi_H}{I_{BH}} = \frac{2 \cdot 1600 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3}}{3,36} = 13,41 \text{ Гн}$$

Электромагнитная постоянная цепи возбуждения:

$$T_B = \frac{L_B}{R_B} = \frac{13,41}{65,3} = 0,205 \text{ с}$$

Номинальный ЭДС двигателя:

$$E_H = U_H - I_H \cdot R'_{я\Sigma} = 220 - 58,48 \cdot 0,371 = 198,3 \text{ В}$$

Модуль жесткости естественной механической характеристики:

$$\beta = \frac{(\kappa\phi)^2}{R'_{я\Sigma}} = \frac{(1,262)^2}{0,371} = 4,296 \frac{\text{В}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{Ом}}$$

Номинальный электромагнитный момент двигателя:

$$M_H = \kappa\phi \cdot I_H = 1,262 \cdot 58,48 = 73,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Угловая скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{\kappa\phi} = \frac{220}{1,262} = 174,3 \text{ 1/с}$$

2.1. Естественные электромеханическая  $\omega = f(I_J)$  и механическая  $\omega = f(M)$ . Характеристики рассчитываются и строятся по 2-ум точкам с координатами:

для механической характеристики

$$\omega = \omega_0 = 174,3 \text{ 1/с}; M = 0; \omega = \omega_H; M = M_H = 73,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

для электромеханической характеристики

$$\omega = \omega_0 = 174,3 \text{ 1/с}, I_J = 0; \omega = \omega_H; I_J = I_H = 58,48 \text{ А}$$

Характеристики изображены на графиках рис.1, рис. 2.

3.1. Искусственные реостатные электромеханические и механические характеристики при введении в цепь якоря добавочного сопротивления рассчитываются и строятся аналогично по 2-ум точкам с координатами (рис.1, рис. 2):

для механической характеристики:

$$\omega = \omega_0 = 174,3 \text{ 1/с}, M = 0;$$

$$\omega = \omega_H = a \cdot \omega_0 = 0,5 \cdot 174,3 = 87,15 \text{ 1/с}; M_H = \sigma \cdot M_H = 1,5 \cdot 73,8 = 110,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

для электромеханической характеристики:

$$\omega = \omega_0 = 174,3 \text{ } 1/\text{с}, I_{\text{я}} = 0;$$

$$\omega = \omega_{\text{и}} = a \cdot \omega_{\text{н}} = 0,5 \cdot 157,08 = 78,54 \text{ } 1/\text{с}; I_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и}}}{k\phi} = \frac{110,74}{1,262} = 87,72 \text{ А}.$$

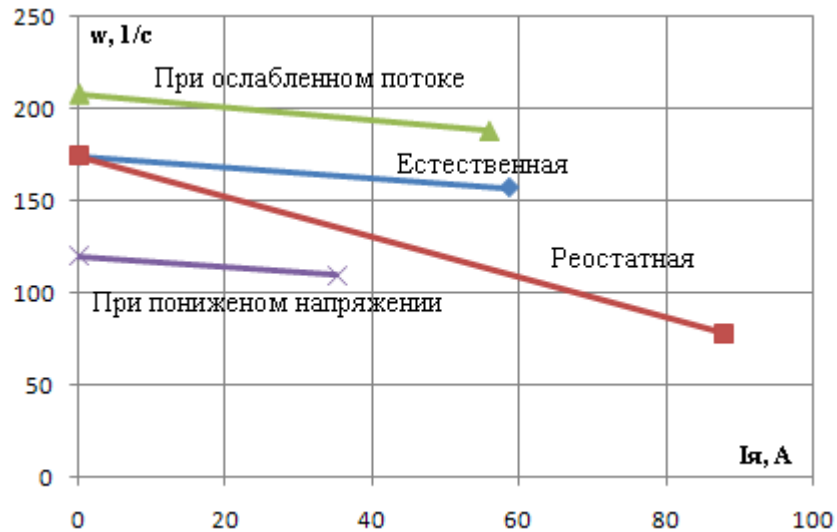


Рис. 1. Естественная и искусственные электромеханические характеристики ДНВ

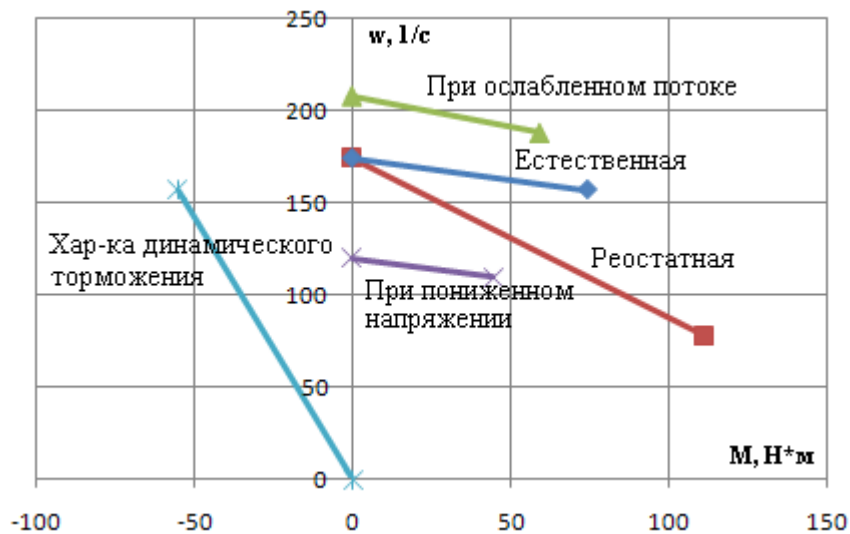


Рис. 2. Естественная и искусственные механические характеристики ДНВ

3.2. Величина сопротивления, которое нужно ввести в цепь якоря для обеспечения работы двигателя в заданной точке, определяется из уравнения механической характеристики при подстановке в него значений  $\omega_{\text{и}}, \omega_0, M_{\text{и}}, k\phi$ .

$$\omega_{\text{и}} = \omega_0 - \frac{R'_{\text{я}\Sigma} + R_{\text{доб}}}{(k \cdot \phi)^2} \cdot M_{\text{и}}.$$

$$R_{\text{доб}} = \frac{(\omega_0 - \omega_{\text{и}}) \cdot (k \cdot \phi)^2}{M_{\text{и}}} - R'_{\text{я}\Sigma} = \frac{(174,3 - 78,54) \cdot 1,262^2}{110,74} - 0,371 = 1,007 \text{ Ом}$$

4.1. Для расчета и построения характеристик при ослабленном магнитном потоке находится величина  $k\phi_{\text{осл}}$  из уравнения механической характеристики.

$$\omega_{\text{и}} = \frac{U}{k\phi_{\text{осл}}} - \frac{R'_{\text{я}\Sigma}}{(k\phi_{\text{осл}})^2} \cdot M_{\text{и}} \text{ где}$$

$$\omega_{\text{и}} = a_1 \cdot \omega_{\text{н}} = 1,2 \cdot 157,08 = 188,5 \text{ } 1/\text{с}$$

$$M_{\text{и}} = e_1 \cdot M_{\text{н}} = 0,8 \cdot 73,86 = 59,06 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Подставив в уравнения значения  $\omega_{\text{и}}$  и  $M_{\text{и}}$ , получим квадратное уравнение.

$$\omega_{\text{и}} \cdot (k\phi_{\text{осл}})^2 - U \cdot k\phi_{\text{осл}} + M_{\text{и}} \cdot R'_{\text{я}\Sigma} = 0$$

$$188,5 \cdot (k\phi_{\text{осл}})^2 - 220 \cdot k\phi_{\text{осл}} + 59,06 \cdot 0,371 = 0. \text{ Отсюда}$$

$$(k\phi_{\text{осл}})_1 = 0,110 \text{ В} \cdot \text{с}, (k\phi_{\text{осл}})_2 = 1,06 \text{ В} \cdot \text{с}$$

Реальной является величина  $(k\phi_{\text{осл}})_2 = 1,06 \text{ В} \cdot \text{с}$ .

Скорость идеального холостого хода при  $(k \cdot \phi_{\text{осл}})_2$ :  $\omega'_0 = \frac{U}{(\hat{e}\hat{\delta}_{\text{ин}})_2} = \frac{220}{1,06} = 208,1 \text{ } 1/\text{с}$ .

Координаты точек для построения механической характеристики:

$$\omega = \omega'_0 = 208,1 \text{ } 1/\text{с}; M = 0$$

$$\omega = \omega_{\text{и}} = 188,5 \text{ } 1/\text{с}; M = M_{\text{и}} = 59,09 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Координаты точек для построения электромеханической характеристики:

$$\omega = \omega'_0 = 207,5 \text{ } 1/\text{с}; I_{\text{я}} = 0$$

$$\omega = \omega_{\text{и}} = 188,5 \text{ } 1/\text{с}; I_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и}}}{k\phi_{\text{осл}}} = \frac{59,01}{1,06} = 55,87 \text{ А}$$

Характеристики изображены на рис.1, рис. 2.

5.1. Для расчета и построения характеристик при изменении напряжения на якоре, сначала определяется напряжение на якоре, обеспечивающее получение заданных характеристик. Из уравнения механической характеристики требуется напряжение:

$$U' = \frac{\omega_{\text{и}} \cdot (k\phi)^2 + R'_{\text{я}\Sigma} \cdot M_{\text{и}}}{k\phi} = \frac{109,95 \cdot 1,262^2 + 0,371 \cdot 44,3}{1,262} = 151,8 \text{ В, где}$$

$$\omega_{\text{и}} = a_2 \cdot \omega_{\text{н}} = 0,7 \cdot 157,08 = 109,95 \text{ } 1/\text{с}$$

$$M_{\text{и}} = e_2 \cdot M_{\text{н}} = 0,6 \cdot 73,86 = 44,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Скорость идеального холостого хода:

$$\omega''_0 = \frac{U'}{k\phi} = \frac{151,8}{1,262} = 120,28 \text{ } 1/\text{с}$$

Координаты точек для построения характеристик:

$$\omega = \omega''_0 = 120,27 \text{ } 1/\text{с}; M = 0$$

$$\omega = \omega_{\text{и}} = 109,95 \text{ } 1/\text{с}; M = M_{\text{и}} = 44,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\omega = \omega''_0 = 120,27 \text{ } 1/\text{с}; I_{\text{я}} = 0$$

$$\omega = \omega_{\text{и}} = 109,95; I_{\text{и}} = \frac{M_{\text{и}}}{k\phi} = \frac{44,3}{1,262} = 35,1 \text{ А}$$

Характеристики изображены на рис.1, рис. 2

6.1. Механическая характеристика в режиме динамического торможения проходит через начало координат и точку с заданными координатами (рис. 2):

$$\omega = \omega_{\text{н}} = a_3 \cdot \omega_{\text{н}} = 1 \cdot 157,08 = 157,08 \text{ 1/c};$$

$$M = M_{\text{н}} = e_3 \cdot M_{\text{н}} = -0,75 \cdot 73,86 = -55,37 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тормозное сопротивление определяется из уравнения механической характеристики.

$$\omega_{\text{н}} = -\frac{R'_{\text{я}\Sigma} + R_{\text{т}}}{(\kappa\phi)^2} \cdot M_{\text{н}};$$

$$R_{\text{т}} = -\frac{(\kappa\phi)^2 \omega_{\text{н}} + R'_{\text{я}\Sigma} \cdot M_{\text{н}}}{M_{\text{н}}} = -\frac{(1,262)^2 \cdot 157,08 + 0,371 \cdot 55,37}{-55,37} = 4,15 \text{ Ом}$$

7.1. Тормозное сопротивление для режима противовключения:

$$R_{\text{т}} = \frac{U_{\text{н}} + \kappa\phi \cdot \omega_{\text{нач}}}{I_{\text{нач}}} - R'_{\text{я}\Sigma} = \frac{220 + 1,262 \cdot 0,95 \cdot 157,08}{2 \cdot 58,48} - 0,371 = 3,12 \text{ Ом}$$

8.1. Скорость двигателя при тормозном спуске груза

$$\omega = \omega_{\text{т}} = \omega_0 - \frac{R'_{\text{я}\Sigma}}{(\kappa\phi)} \cdot (-M_{\text{т}}) = \omega_0 + \frac{R'_{\text{я}\Sigma}}{(\kappa\phi)^2} \cdot 1,5 \cdot M_{\text{н}} = 174,3 + \frac{0,371}{(1,262)^2} \cdot 1,5 \cdot 73,86 = 200,04 \text{ 1/c}$$

9.1. Для расчета пусковой диаграммы и определения пускового сопротивления и сопротивление ступеней пусковой ток или момент принимают равными:  $I_{\text{п}} = I_1 = (2 \div 2,5) \cdot I_{\text{н}}$ ,  $M_{\text{п}} = M_1 = (2 \div 2,5) \cdot M_{\text{н}}$ . Причем  $M_1 = 2,3 \cdot M_{\text{н}} = 2,3 \cdot 73,86 = 169,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$  или соответственно  $I_1 = 2,3 \cdot I_{\text{н}} = 2,3 \cdot 58,48 = 134,5 \text{ А}$ .

В дальнейшем расчет выполним используя значения тока (аналогично можно использовать значение момента). Пуск выполним в три ступени. Пусковая диаграмма изображена на рис.3

Полное сопротивление якорной цепи при пуске:

$$R_1 = R_{\text{п}} = \frac{U}{I_1} = \frac{220}{134,5} = 1,63 \text{ Ом}$$

Кратность пускового тока:

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt[m]{\frac{R_1}{R'_{\text{я}\Sigma}}} = \sqrt[3]{\frac{1,63}{0,371}} \cong 1,64$$

Ток переключения:

$$I_2 = \frac{I_1}{\lambda} = \frac{134,5}{1,64} \cong 82 \text{ А}$$

Полные сопротивления ступеней:

$$R_1 = \lambda^m \cdot R_{\text{я}} = 1,643 \cdot 0,371 = 1,63 \text{ Ом}$$

$$R_2 = \lambda^{m-1} \cdot R_{\text{я}} = \lambda^2 \cdot R_{\text{я}} = 1,64^2 \cdot 0,371 \cong 0,99 \text{ Ом}$$

$$R_3 = \lambda^{m-2} \cdot R_{\text{я}} = \lambda \cdot R_{\text{я}} = 1,64 \cdot 0,371 \cong 0,6 \text{ Ом}$$

Отключаемые сопротивления:

$$r_3 = R_3 - R_{\text{я}} = R_{\text{я}} \cdot (\lambda - 1) = 0,371 \cdot (1,64 - 1) \cong 0,24 \text{ Ом}$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = R_{\text{я}} \cdot \lambda^2 - R_{\text{я}} \cdot \lambda = R_{\text{я}} \cdot \lambda \cdot (\lambda - 1) = 0,371 \cdot 1,64 \cdot (1,64 - 1) \cong 0,39 \text{ Ом}$$

$$r_1 = R_1 - R_2 = R_{\text{я}} \cdot \lambda^2 (\lambda - 1) = 0,371 \cdot 1,64^2 \cdot (1,64 - 1) \cong 0,64 \text{ Ом}$$

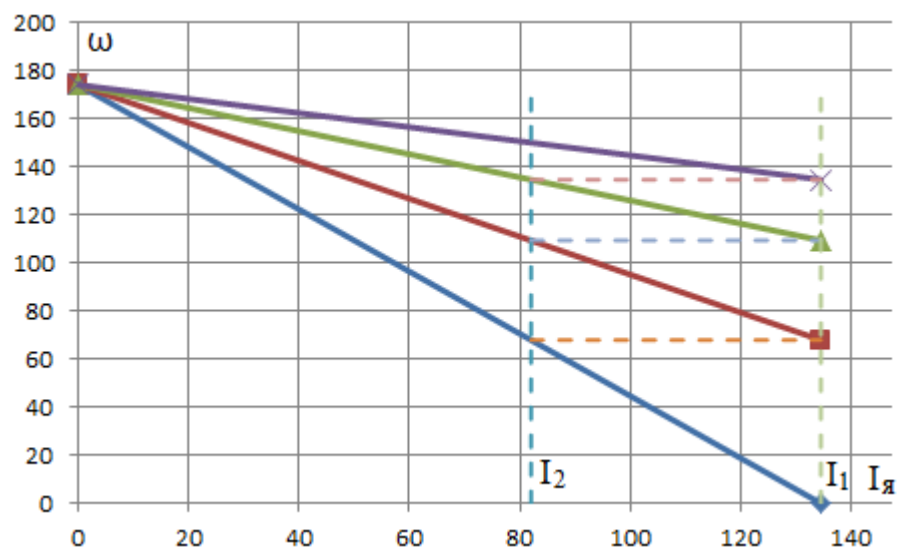


Рис. 3. Пусковая диаграмма двигателя независимого возбуждения.

## Пример выполнения контрольного задания №2

В примере использованы данные асинхронного двигателя с фазным ротором 4АК-160-S4У3:

$P_H = 11 \text{ кВт}$ ;  $n_H = 716 \text{ об/мин}$ ;  $I_{1H} = 22,5 \text{ А}$ ;  $I_{2H} = 22 \text{ А}$ ;  $E_{2H} = 305 \text{ В}$ ;  $\cos \varphi_H = 0,86$ ;  $\eta_H = 0,865$ ;

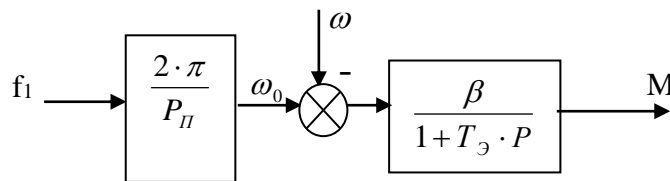
$r_1 = 0,37 \text{ Ом}$ ;  $x_1 = 0,665 \text{ Ом}$ ;  $r_2 = 0,32 \text{ Ом}$ ;  $x_2 = 0,54 \text{ Ом}$ ;  $k_r = 1,42$ ;  $\sigma \approx 1,0$ ;  $p_n = 4$ ;

$J = 0,14 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; Коэффициенты:  $a = 0$ ;  $b = 0,5$ ;  $a_2 = 0,25$ .

Ток возбуждения в долях от  $I_\mu = I_e = 2 \cdot I_0 = 28 \text{ А}$

Ток холостого хода  $I_0 = 14 \text{ А}$ ;  $\cos \varphi_0 = 0,11$

1.1. Структурная схема для области рабочих скольжений имеет вид:



1.2. Параметры двигателя и структурной схемы т.к. число пар полюсов  $p_n = 4$ , то скорость синхронная

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}{p_n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{4} = 78,5 \text{ 1/с}$$

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 716}{60} = 75 \text{ 1/с}$$

Номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{78,5 - 75}{78,5} = 0,044$$

Сопротивления:

$$R_1 = r_1 \cdot \sigma_1 = 0,37 \cdot 1 = 0,37 \text{ Ом}$$

$$X_1 = x_1 \cdot \sigma_1 = 0,665 \cdot 1 = 0,665 \text{ Ом}$$

$$R'_2 = r_2 \cdot k_r \cdot \sigma_1^2 = 0,32 \cdot 1,42 \cdot 1^2 = 0,454 \text{ Ом}$$

$$X'_2 = x_2 \cdot k_r \cdot \sigma_1^2 = 0,54 \cdot 1,42 \cdot 1^2 = 0,766 \text{ Ом}$$

$$X_K = X_1 + X'_2 = 0,665 + 0,766 = 1,43 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение:

$$S_{KP} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} = \frac{0,454}{\sqrt{0,37^2 + 1,43^2}} = 0,308$$

Электромагнитная постоянная:

$$T_Y = \frac{1}{S_{ED} \cdot \omega_0 \gamma_E \cdot \delta_Y} = \frac{1}{0,308 \cdot 78,5 \cdot 4} = 0,0103 \text{ с}$$

Критический момент:

$$M_{KP} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot [R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2}]} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 78,5 \cdot [0,37 + \sqrt{0,37^2 + 1,43^2}]} = 499,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{Номинальный момент на валу } M_{HB} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_H} = \frac{11000}{75} = 146,7 \text{ 1/с}$$

Жесткость линейной части механической характеристики:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{S_{KP} \cdot \omega_{\dot{\gamma}\dot{\epsilon}}} = \frac{2 \cdot 499,9}{0,308 \cdot 78,54} = 41,44$$

2.1. Естественная электромеханическая характеристика (рис. 4) рассчитывается по выражению:

$$I'_2 = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(r_1^2 + \frac{r_2^2}{S}\right) + X_K^2}} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,37 + \frac{0,454}{S}\right)^2 + 1,43^2}}$$

т.к. при  $\sigma = 1$ ;  $r_1 = R_1$ ;  $r'_2 = R'_2$ ;  $x_k = X_K$ .

Задаваясь скольжением  $S$  от 0 до  $\infty$ , можно рассчитать и построить зависимость  $I'_2 = f(S)$ .

$$\text{Предельное значение тока ротора: } I'_{2PP} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,37^2 + 1,43^2}} = 148,7 \text{ A}$$

Максимальное значение тока ротора в генераторном режиме:

$$I'_{2MAX} = \frac{U_{1\phi}}{X_K} = \frac{220}{1,43} = 153,6 \text{ A}$$

Двигательный режим работы:

S	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,00
$I'_2$	133,16	131,11	128,53	125,18	120,72	114,60	105,87	92,95	73,21	42,98	0,00

S	1,50	1,40	1,30	1,20	1,10
$I'_2$	139,06	138,25	137,29	136,16	134,81

Генераторный режим работы:

S	-1,00	-0,90	-0,80	-0,70	-0,60	-0,50	-0,40	-0,30	-0,20	-0,10	0,00
$I'_2$	153,39	152,98	152,20	150,81	148,32	143,81	135,48	120,01	92,41	49,86	0,00

S	-1,50	-1,40	-1,30	-1,20	-1,10
$I'_2$	153,48	153,58	153,64	153,65	153,58

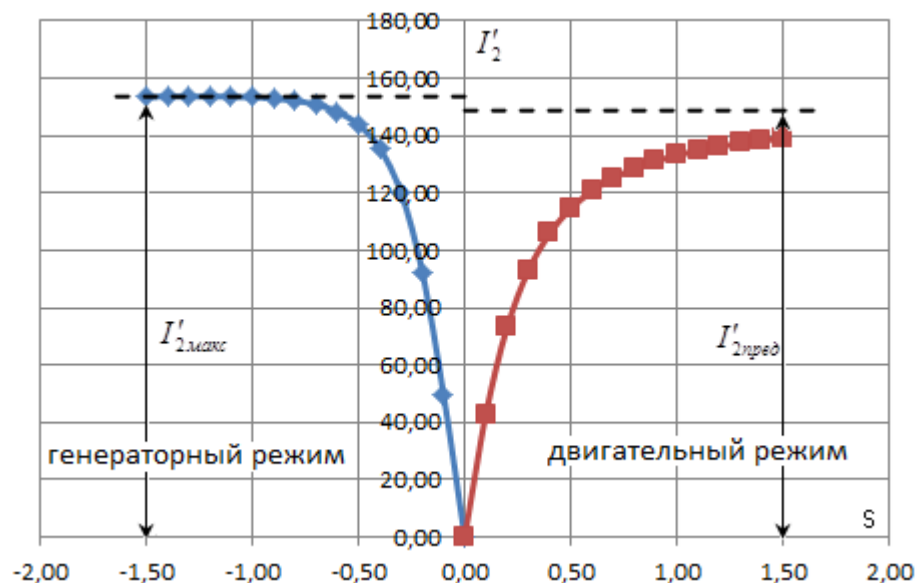


Рис. 4. Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя



2.2. Естественная механическая характеристика рассчитывается по уточненной формуле Клосса, которая при определенных выше параметрах имеет вид:

$$M = \frac{2 \cdot M_{KP} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \cdot S_{KP}\right)}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S} + 2 \cdot \frac{R_1}{R'_2} \cdot S_{KP}} = \frac{2 \cdot 499,9 \cdot \left(1 + \frac{0,37}{0,454} \cdot 0,308\right)}{\frac{S}{0,308} + \frac{0,308}{S} + 2 \cdot \frac{0,37}{0,454} \cdot 0,308} = \frac{1257}{\frac{S}{0,308} + \frac{0,308}{S} + 0,502}$$

Задаваясь скольжением  $S$  в пределах от 0 до  $\infty$  определяется момент  $M$  и угловая скорость  $\omega$ , все расчеты сводятся в таблицу и строится зависимость  $M = f(\omega)$ . Естественная механическая характеристика представлена на рис. 5.

$\omega, 1/c$	-15,7	-7,9	0,0	7,9	15,7	23,6	31,4	39,3	47,1	55,0	62,8	70,7	78,5
$S, o.e$	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
$M, H \cdot m$	268,2	286,8	307,8	331,5	358,4	388,5	421,6	455,9	486,4	499,9	465,1	320,7	0,0

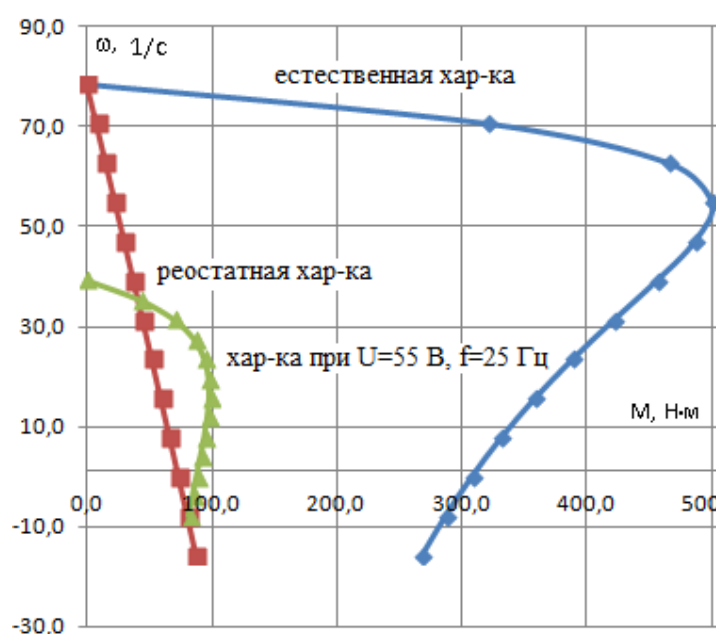


Рис. 5. Естественная и искусственные механические характеристики АД

3.1. Для расчета реостатной характеристики сначала определяются координаты точек, через которые должна проходить характеристика, и номинальный электромагнитный момент  $\omega = \omega_0$

$$M = 0; \quad \omega_H = a \cdot \omega_0 = 0 \cdot 75 = 0; \quad M_H = b \cdot M_{HB} = 0,5 \cdot 146,6 = 73,3 H \cdot m$$

$$M_H = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot \frac{R'_2}{S_H}}{\omega_0 \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{S_H} \right)^2 + X_K^2 \right]} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,454 / 0,044}{78,5 \cdot \left[ \left( 0,37 + \frac{0,454}{0,044} \right)^2 + 1,43^2 \right]} = 168,34 H \cdot m$$

По графику естественной характеристики находится скольжение  $S'_e$  при  $M_E = \hat{a} \cdot \hat{i}_{\hat{A}} = 73,3 \hat{I} \cdot \hat{i}$ . Оно равно  $S'_e = 0,022$ .

Скольжение на реостатной характеристике при заданных координатах:

$$S_p = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{78,5 - 0}{78,5} = 1$$

Требуемое добавочное сопротивление:

$$R_{2ДОБ} = R'_2 \cdot \left( \frac{S_p}{S'_e} - 1 \right) = 0,454 \cdot \left( \frac{1}{0,022} - 1 \right) = 20,06 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение, соответствующее реостатной характеристике:

$$S'_{KP} = \frac{R'_2 + R_{2ДОБ}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} = \frac{0,454 + 20,06}{\sqrt{0,37^2 + 1,43^2}} = \frac{20,51}{1,47} = 13,87$$

Реостатная характеристика рассчитывается по формуле Клосса. Скорость определяется по следующей формуле:  $\omega = \omega_0 \cdot (1 - S)$ , где  $S$  – скольжение, которым задаются от 0 до 1,2. Далее по точкам строится характеристика.

$$M = \frac{2 \cdot M_{KP} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R_{2ДОБ}} \cdot S'_{KP} \right)}{\frac{S}{S'_{KP}} + \frac{S'_{\dot{E}D}}{S} + 2 \cdot \frac{R_1}{R'_2 + R_{2ДОБ}} \cdot S'_{\dot{E}D}} = \frac{2 \cdot 499,9 \cdot \left( 1 + \frac{0,37}{0,454 + 20,06} \cdot 13,87 \right)}{\frac{S}{13,87} + \frac{13,87}{S} + 2 \cdot \frac{0,37}{0,454 + 20,06} \cdot 13,87}$$

$\omega, 1/c$	-15,71	-7,85	0,00	7,85	15,71	23,56	31,42	39,27	47,12	54,98	62,83	70,69	78,54
$S, o.e$	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,00
$M, H \cdot m$	87,36	80,38	73,34	66,25	59,10	51,89	44,63	37,32	29,95	22,54	15,07	7,56	0,00

Реостатная характеристика изображена на рис. 5.

#### 4.1. Расчет искусственной характеристики при заданных параметрах питающей сети

$$U_H = a_2 \cdot U_{1\phi} = 0,25 \cdot 220 = 55 \text{ В}$$

$$f_{1H} = \nu \cdot f_{1H} = 0,5 \cdot 50 = 25 \text{ Гц}$$

Параметры двигателя:

$$\omega'_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}{p_H} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 25}{4} = 39,2 \text{ } 1/c$$

$$X'_K = X_K \cdot \frac{f_{1H}}{f_{1H}} = 1,43 \cdot \frac{25}{50} = 0,715$$

$$S''_{KP} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K'^2}} = \frac{0,454}{\sqrt{0,37^2 + 0,715^2}} = 0,564$$

$$M'_{KP} = \frac{3 \cdot U_H^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K'^2} \right]} = \frac{3 \cdot 55^2}{2 \cdot 39,2 \cdot \left[ 0,37 + \sqrt{0,37^2 + 0,715^2} \right]} = 98,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Механическая характеристика рассчитывается по формуле Клосса при подстановке в нее значений  $M'_{KP}$  и  $S''_{KP}$ .

$$M = \frac{2 \cdot M'_{KP} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \cdot S''_{KP} \right)}{\frac{S}{S''_{KP}} + \frac{S''_{KP}}{S} + 2 \cdot \frac{R_1}{R'_2} \cdot S''_{KP}} = \frac{2 \cdot 98,3 \cdot \left( 1 + \frac{0,37}{0,454} \cdot 0,564 \right)}{\frac{S}{0,564} + \frac{0,564}{S} + 2 \cdot \frac{0,37}{0,454} \cdot 0,564}$$

$\omega, 1/c$	-7,85	-3,93	0,00	3,93	7,85	11,78	15,71	19,63	23,56	27,49	31,42	35,34	39,27
$S, o.e$	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,00
$M, H \cdot m$	81,55	84,80	88,08	91,30	94,27	96,71	98,14	97,78	94,41	86,12	70,07	42,58	0,00

Скорость определяется по следующей формуле:  $\omega = \omega_0 \cdot (1 - S)$ , где  $S$  – скольжение, которым задаются от 0 до 1.2. Далее определяется момент  $M$  и по точкам строится искусственная характеристика. Она изображена на рис.5.

5.1. Для расчёта механической характеристики в режиме динамического торможения необходимо определить следующие параметры:

Номинальное сопротивление двигателя:

$$R_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} = \frac{305}{\sqrt{3} \cdot 22} = 8,01 \text{ Ом}$$

Добавочное сопротивление:

$$R_{2ДОВ} = 0,5 \cdot R_{2H} = 0,5 \cdot 8,01 \cong 4 \text{ Ом}$$

$$R'_{2ДОВ} = R_{2ДОВ} \cdot \kappa_r \cdot \sigma_1^2 = 4 \cdot 1,42 \cdot 1^2 = 5,68 \text{ Ом}$$

Ток возбуждения  $I_\mu = 2 \cdot I_0 = 2 \cdot 14 = 28 \text{ А}$

Индуктивное сопротивление  $X_0$ :

$$X_0 = \frac{E_{1H\Phi}}{I_0} = \frac{0,95 \cdot U_{1H\Phi}}{14} = \frac{0,95 \cdot 220}{14} = 14,9 \text{ Ом}$$

ЭДС фазы статора:

$$E_{1\Phi} = U_{1H\Phi} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{S_H}\right)^2 + X_2'^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2 + X_K^2}} = 220 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{0,454}{0,044}\right)^2 + 0,766^2}}{\sqrt{\left(0,37 + \frac{0,454}{0,044}\right)^2 + 0,715^2}} = 212,5 \text{ В}$$

Номинальный ток намагничивания:

$$I_{\mu H} = I_{1H} \left( \sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{\sqrt{\lambda_M^2 - 1} + \lambda_M} \right) = 22,5 \left( 0,51 - \frac{0,86}{\sqrt{3,06^2 - 1} + 3,06} \right) = 8,23 \text{ А},$$

где  $\lambda_M = \frac{M_{KP}}{M_H} = \frac{502,4}{164,13} = 3,06$ .

Порядок расчета характеристики динамического торможения следующий:

а) Задаются током намагничивания в относительных единицах:  $I_\mu^* = \frac{I_\mu}{I_{\mu H}}$  в пределах от 0 до 1.

б) По универсальной кривой намагничивания (см. методические указания к заданию) по заданным значениям тока  $I_\mu^*$  определяются соответствующие значения относительной

$$\text{ЭДС } E_1^* = \frac{E_{1\Phi}}{E_{1H\Phi}}$$

в) Определяются значения  $X_{\mu H}^* = \frac{E_1^*}{I_\mu^*}$  и  $X_{\mu H} = X_{\mu H}^* \cdot X_0$ .

д) Определяется эквивалентный переменный ток статора:

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_\mu = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 28 = 22,8 \text{ А}$$

е) Для каждого значения  $X_{\mu H}$  определяется величина:

$$\left( \frac{R'_2 + R'_{2ДОБ}}{S} \right)^2 = \frac{(X_{\mu H} + X'_2)^2 - \left( \frac{I_{ЭКВ}}{I_0} \right)^2 \cdot X'_2}{\left( \frac{I_{ЭКВ}}{I_0} \right)^2 - 1}.$$

ф) Для каждого значения этой величины определяется ток ротора

$$I'_2 = \frac{I_{ЭКВ} \cdot X_{\mu H}}{\sqrt{\left( \frac{R'_2 + R'_{2ДОБ}}{S} \right)^2 + (X_{\mu H} + X'_2)^2}}$$

г) Определяются соответствующие угловые скорости ротора:  $\omega = \omega_0 \cdot \frac{R'_2 + R'_{2доб}}{\left( \frac{R'_2 + R'_{2доб}}{S} \right)}$

h) Определяются значения электромагнитного момента:  $M = -\frac{3 \cdot I'^2_2}{\omega_0} \cdot \left( \frac{R'_2 + R'_{2ДОБ}}{S} \right)$

Все расчеты сводятся в таблицу:

$I^*_\mu$	$E^*_1$	$X^*_{\mu H}$	$\left( \frac{R'_2 + R'_{2ДОБ}}{S} \right)^2$	$I_{ЭКВ} \cdot X_{\mu H}$	$I'_2$	$\omega$	$M$
1							
0,9							
0,8							

и т.д.

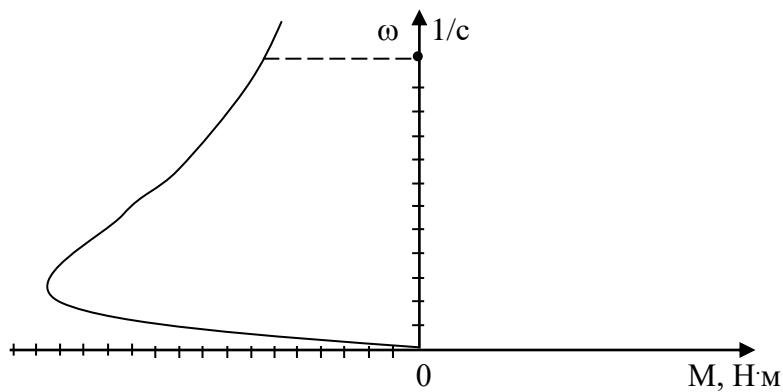


Рис 6. Примерный вид характеристики динамического торможения АД

і) По данным этой таблицы строится зависимость  $\omega = f(M)$ . Примерный вид этой зависимости изображен на рисунке 6.

6.1 Расчет пусковой диаграммы и соответствующих ей сопротивлений выполняется графоаналитическим методом (см. методические указания к заданию). Порядок расчета следующий:

- Задаются пусковым моментом:  $M_1 = 0,85 \cdot M_{kp} = 0,85 \cdot 499,9 = 425 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- Задаются моментом переключения:  $M_2 = 1,6 \cdot M_c = 1,6 \cdot M_i = 1,7 \cdot 168,3 = 286,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- Полные активные сопротивления линии ротора на отдельных ступенях пуска будут равны:

$$R_{21} = r_2 \cdot \frac{fe}{fb} = 0,32 \cdot \frac{78,5}{12,5} = 2,004 \hat{\text{н}} ;$$

$$R_{22} = r_2 \cdot \frac{fd}{fb} = 0,32 \cdot \frac{42,5}{12,5} = 1,086 \hat{\text{н}} ;$$

$$R_{23} = r_2 \cdot \frac{fc}{fb} = 0,32 \cdot \frac{23,0}{12,5} = 0,588 \hat{\text{н}} ;$$

- Добавочные сопротивления пусковых ступеней:

$$r_{\text{дд}1} = r_2 \cdot \frac{de}{fb} = 0,32 \cdot \frac{36}{12,6} = 0,919 \hat{\text{н}} ;$$

$$r_{\text{дд}2} = r_2 \cdot \frac{\tilde{n}d}{fb} = 0,32 \cdot \frac{19,5}{12,6} = 0,498 \hat{\text{н}} ;$$

$$r_{\text{дд}3} = r_2 \cdot \frac{bc}{fb} = 0,32 \cdot \frac{13}{12,6} = 0,268 \hat{\text{н}} .$$

Лучевая диаграмма для расчёта пусковых сопротивлений изображена на рис.7.

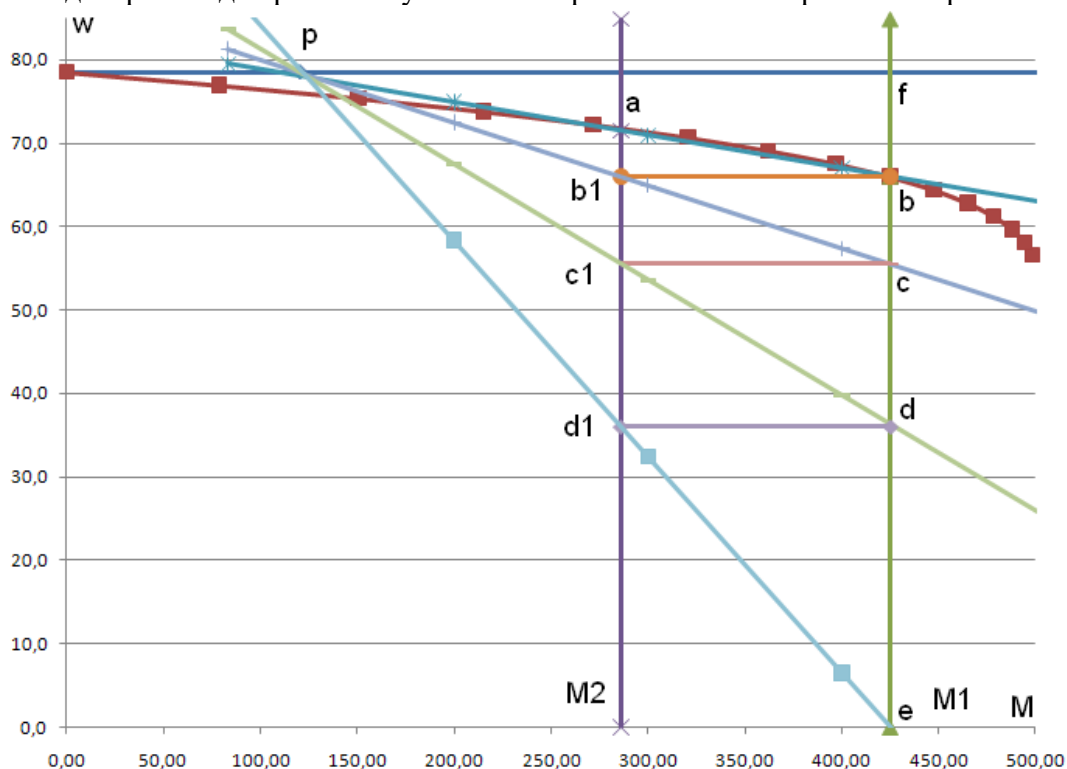


Рис. 7. Лучевая диаграмма расчёта пусковых ступеней АДФР

Проверить возможность пуска двигателя при:

$$\dot{I}_{\tilde{n}} = 0,8 \cdot \dot{I}_i = 134 \hat{\text{а}} ; \dot{I}_{\tilde{n}} = \dot{I}_i = 168 \hat{\text{а}} ; M_c = 1,5 \cdot \dot{I}_i = 252 .$$

Вывод: Во всех трех случаях двигатель запустится т.к.  $M_c < M_1$ , и во всех случаях он выйдет на естественную характеристику, т. к.  $M_c < M_2$