4.2.1.5 Індуктивний опір розсіяння двигуна, залежний від насичення

$$X_{\sigma v} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_r \cdot \frac{\lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma r}} = 5{,}13 \cdot \frac{1{,}9}{3{,}74} + 7{,}15 \cdot \frac{2{,}74}{5{,}71} = 6{,}04 \text{ Ом.}$$

4.2.1.6 Індуктивний опір розсіяння двигуна, незалежний від насичення

$$X_{\sigma c} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{\sigma s} - \lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_r \cdot \frac{\lambda_{\sigma r} - \lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma r}} =$$

$$= 5{,}13 \cdot \frac{3{,}74 - 1{,}9}{3{,}74} + 7{,}15 \cdot \frac{5{,}71 - 2{,}74}{5{,}71} = 6{,}23 \text{ Ом.}$$

4.2.1.7 Струм ротора при максимальному моменті

$$I''_{rM\max} = \frac{U_s}{\sqrt{2 \cdot [(R'_s)^2 + \left(X_{\sigma c} + 0{,}0825 \cdot X_{\sigma v}\right)^2 + R'_s \cdot \left(X_{\sigma c} + 0{,}0825 \cdot X_{\sigma v}\right)]}} -$$

$$- \frac{1{,}24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_s \cdot [R'_s + 2 \cdot \left(X_{\sigma c} + 0{,}0825 \cdot X_{\sigma v}\right)] \cdot X_{\sigma v}}{2 \cdot z_{Qs} \cdot [(R'_s)^2 + \left(X_{\sigma c} + 0{,}0825 \cdot X_{\sigma v}\right)^2 + R'_s \cdot \left(X_{\sigma c} + 0{,}0825 \cdot X_{\sigma v}\right)]} =$$

$$I''_{rM\max} = \frac{220}{\sqrt{2 \cdot [(6{,}22)^2 + (6{,}23 + 0{,}0825 \cdot 6{,}04)^2 + 6{,}22 \cdot (6{,}234 + 0{,}0825 \cdot 6{,}04)]}} -$$

$$- \frac{1{,}24 \cdot 10^3 \cdot 0{,}25 \cdot 1 \cdot [6{,}22 + 2 \cdot (6{,}23 + 0{,}0825 \cdot 6{,}04)] \cdot 6{,}042}{2 \cdot 47 \cdot [(6{,}22)^2 + (6{,}23 + 0{,}0825 \cdot 6{,}04)^2 + 6{,}22 \cdot (6{,}23 + 0{,}0825 \cdot 6{,}04)]} = 10{,}75 \text{ А.}$$

4.2.1.8 Повний опір схеми заміщення при максимальному моменті

$$Z_{M\max} = \frac{U_s}{I''_{rM\max}} = \frac{220}{10{,}75} = 20{,}47 \text{ Ом.}$$

4.2.1.9 Повний опір схеми заміщення при нескінченно великому ковзанні

$$Z_{s\infty} = 0{,}5 \cdot \sqrt{(R'_s)^2 + 2 \cdot Z_{M\max}} - R'_s =$$

$$= 0{,}5 \cdot \sqrt{(6{,}22)^2 + 2 \cdot 20{,}47^2} - 6{,}22 = 11{,}7 \text{ Ом.}$$

4.2.1.10 Еквівалентний опір схеми заміщення при максимальному моменті

$$R_{M\max} = Z_{s\infty} + R'_s = 11{,}7 + 6{,}22 = 17{,}92 \text{ Ом.}$$

4.2.1.11 Кратність максимального моменту

$$k_{Mm} = \frac{M_{\max}}{M_N} = \frac{m_s \cdot U_s^2 \cdot (1 - s_N)}{2 \cdot R_{M\max} \cdot P \cdot 10^3}, \quad (4.2)$$

де M_N – номінальний обертальний момент двигуна, Н·м.

Номінальний обертальний момент двигуна, знаходиться за формулою:

$$M_N = 9{,}55 \cdot \frac{P_N \cdot 10^3}{n_N} = 9{,}55 \cdot \frac{1{,}5 \cdot 10^3}{1500} = 10{,}28 \text{ Н·м.}$$

Підставляємо отримане значення M_N у (4.2)

$$k_{Mm} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0{,}071)}{2 \cdot 17{,}92 \cdot 1{,}5 \cdot 10^3} \approx 2{,}5.$$

4.2.1.12 Максимальний момент $M_{\max} = k_{Mm} \cdot M_N = 2{,}5 \cdot 10{,}28 = 25{,}7$ Н·м.

4.2.1.13 Критичне ковзання при максимальному моменті

$$s_{cr} = \frac{R''_r}{Z_{s\infty}} = \frac{5{,}28}{11{,}7} = 0{,}451.$$

4.3 **Розрахунок початкових пускових струму і обертального моменту**

4.3.1 **Активні і індуктивні опори двигуна в режимі пуску**

4.3.1.1 Висота стрижня клітки ротора $h_{rc} = h_r - h_{r1} = 14 - 0{,}7 = 13{,}3$ мм.

4.3.1.2 Зведена висота стрижня ротора для литої алюмінієвої клітки

$$h'_{rc} = 2 \cdot \pi \cdot h_{rc} \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{0{,}1 \cdot s \cdot h_s}{k_{\theta Al} \cdot \rho_{Al20°C}}}, \quad (4.3)$$

де s − ковзання у момент пуску двигуна, $s = 1$.

Підставляємо отримане значення s у (4.3)

$$h'_{rc} = 2 \cdot \pi \cdot 13{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{0{,}1 \cdot 1 \cdot 50}{1{,}41 \cdot 0{,}037}} = 0{,}817.$$

4.3.1.3 Розрахункова глибина проникнення струму в стрижні

$$h_{rc\delta} = \frac{h_{rc}}{1 + k_{Ra}}, \quad (4.4)$$

де k_{Ra} − коефіцієнт активного опору, визначається по [7], k_{Ra} = 0,05.

Підставляємо отримане значення k_{Ra} у (4.4)

$$h_{rc\delta} = \frac{h_{rc}}{1+k_{Ra}} = \frac{13,3}{1+0,05} = 12,67 \text{ мм.}$$

4.3.1.4 Ширина стрижня на розрахунковій глибині проникнення струму

$$b_{rc\delta} = 2 \cdot r_{r1} - \frac{2 \cdot (r_{r1} - r_{r2})}{h_{r2}} \cdot (h_{rc\delta} - r_{r1}) =$$

$$= 2 \cdot 2 - \frac{2 \cdot (2 - 1,05)}{10,3} \cdot (12,67 - 2) = 2,03 \text{ мм.}$$

4.3.1.5 Площа поперечного перерізу стрижня при розрахунковій глибині проникнення

$$S_{rc\delta} = \frac{\pi}{2} \cdot r_{r1}^2 + \left(r_{r1} + \frac{b_{rc\delta}}{2} \right) \cdot (h_{rc\delta} - r_{r1}) = \frac{\pi}{2} \cdot 2^2 + \left(2 + \frac{2,03}{2} \right) \cdot (12,67 - 2) = 38,45 \text{ мм}^2.$$

4.3.1.6 Коефіцієнт витіснення струму

$$k_{c\delta} = \frac{S_{rc}}{S_{rc\delta}} = \frac{39,4}{38,45} = 1,02 .$$

4.3.1.7 Активний опір стрижня при 20°С для пускового режиму

$$R_{r\theta a1f} = R_{r\theta a1} \cdot k_{c\delta} = 11,28 \cdot 10^{-5} \cdot 1,02 = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

4.3.1.8 Активний опір обмотки ротора при 20°С, зведений до обмотки статора, для пускового режиму

$$R'_{r\theta a\,f} = K_{sr} \cdot \left(R_{r\theta a1\,f} + R_{r\theta a2} \right) = 24715 \cdot \left(1,16 \cdot 10^{-4} + 2,9 \cdot 10^{-5} \right) = 3,57 \text{ Ом.}$$

4.3.1.9 Коефіцієнт провідності розсіяння пазу ротора при пуску для овального напівзакритого пазу

$$\lambda_{rnf} = \frac{h_{r1}}{b_{r1}} + \left[\frac{h_{r2} + 0,8 \cdot r_{r2}}{6 \cdot r_{r1}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{r1}^2}{2 \cdot S_{rc}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{r1}}{4 r_{r1}} \right] \cdot k_{Lr} , \qquad (4.5)$$

де k_{Lr} − коефіцієнт індуктивного опору, визначається по [7], k_{Lr} = 0,98.

Підставляємо отримане значення k_{Lr} у (4.5)

$$\lambda_{rnf} = \frac{0,7}{1} + \left[\frac{10,3 + 0,8 \cdot 1,05}{6 \cdot 2} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 2^2}{2 \cdot 39,4} \right)^2 + 0,66 - \frac{1}{4 \cdot 2} \right] \cdot 0,98 = 1,87 .$$

4.3.1.10 Коефіцієнт провідності розсіяння обмотки ротора при пуску

$$\lambda_{\sigma rf} = \lambda_{rnf} + \lambda_{rd} + \lambda_{rfn} + \lambda_{rsq} = 1,87 + 2,04 + 0,29 + 1,49 = 5,69 .$$

4.3.1.11 Індуктивний опір розсіяння двигуна при пуску, залежний і не залежний від насичення:

$$X_{\sigma vf} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_{\sigma r} \cdot \frac{\lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma rf}} = 5,13 \cdot \frac{1,9}{3,74} + 7,15 \cdot \frac{2,74}{5,69} = 6,06 \text{ Ом};$$

$$X_{\sigma cf} = X'_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{\sigma s} - \lambda_{sv}}{\lambda_{\sigma s}} + X''_{\sigma r} \cdot \frac{\lambda_{\sigma rf} - \lambda_{rv}}{\lambda_{\sigma rf}} =$$

$$= 5,13 \cdot \frac{3,74 - 1,9}{3,74} + 7,15 \cdot \frac{5,69 - 2,74}{5,69} = 6,22 \text{ Ом}.$$

4.3.1.12 Активний опір двигуна при пуску

$$R_{kf} = R'_s + R'_{r\theta a\, f} \cdot k_{\theta\, Al} \cdot \left(1 + k_{\sigma s}\right)^2 \cdot \left(1 + C_s^2\right) =$$

$$= 6,22 + 3,57 \cdot 1,41 \cdot \left(1 + 0,033\right)^2 \cdot \left(1 + 0,043^2\right) = 11,6 \text{ Ом}.$$

4.3.2 **Початкові пускові струм і момент двигуна**

4.3.2.1 Струм ротора при пуску

$$I''_{rf} = \frac{U_s}{\sqrt{R_{kf}^2 + \left(X_{\sigma cf} + 0,0825 \cdot X_{\sigma vf}\right)^2}} -$$

$$- \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot a_s \cdot \delta \cdot X_{\sigma vf} \cdot \left(X_{\sigma cf} + 0,0825 \cdot X_{\sigma vf}\right)}{z_{Qs} \cdot [R_{kf}^2 + \left(X_{\sigma cf} + 0,0825 \cdot X_{\sigma vf}\right)^2]} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{11,604^2 + \left(6,22 + 0,0825 \cdot 6,06\right)^2}} -$$

$$- \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0,25 \cdot 6,06 \cdot \left(6,22 + 0,0825 \cdot 6,06\right)}{47 \cdot [11,6^2 + \left(6,22 + 0,0825 \cdot 6,06\right)^2]} = 14,9 \text{ А}.$$

4.3.2.2 Повний опір схеми заміщення при пуску

$$Z_{kf} = \frac{U_s}{I''_{rf}} = \frac{220}{14,9} = 14,76 \text{ Ом}.$$

4.3.2.3 Індуктивний опір схеми заміщення при пуску

$$X_{kf} = \sqrt{Z_{kf}^2 - R_{kf}^2} = \sqrt{14,76^2 - 11,6^2} = 9,11\,\text{Ом}.$$

4.3.2.4 Активна складова струму статора при пуску

$$I_{saf} = I_{sas} + I''_{rf} \cdot \left(\frac{R_{kf}}{Z_{kf}} + \frac{X_{kf}}{Z_{kf}} \cdot 2 \cdot C_s \right) =$$

$$= 0,168 + 14,9 \cdot \left(\frac{11,6}{14,76} + \frac{9,11}{14,6} \cdot 2 \cdot 0,043 \right) = 12,69\ \text{А}.$$

4.3.2.5 Реактивна складова струму статора при пуску

$$I_{s\mu f} = I_{s\mu s} + I''_{rf} \cdot \left(\frac{X_{kf}}{Z_{kf}} - \frac{R_{kf}}{Z_{kf}} \cdot 2 \cdot C_s \right) =$$

$$= 1,51 + 14,9 \cdot \left(\frac{9,11}{14,76} - \frac{11,6}{14,76} \cdot 2 \cdot 0,043 \right) = 9,7\ \text{А}.$$

4.3.2.6 Фазний струм статора при пуску

$$I_{sf} = \sqrt{I_{saf}^2 - I_{s\mu f}^2} = \sqrt{12,69^2 - 9,7^2} \approx 16\,\text{А}.$$

4.3.2.7 Кратність початкового пускового струму

$$k_{I1} = \frac{I_{sf}}{I_s} = \frac{16}{3,33} = 4,8.$$

4.3.2.8 Активний опір ротора при пуску, зведений до статора, при розрахунковій робочій температурі

$$R''_{rf} = R'_{r\theta a\ f} \cdot k_{\theta\ Al} \cdot \left(1 + k_{\sigma\ s}\right)^2 \cdot \left(1 + C_s^2\right) =$$

$$= 3,57 \cdot 1,41 \cdot \left(1 + 0,033\right)^2 \cdot \left(1 + 0,043^2\right) = 5,38\ \text{Ом}.$$

4.3.2.9 Кратність початкового пускового обертального моменту

$$k_{M1} = \frac{M_1}{M_N} = m_s \cdot \left(I''_{rf}\right)^2 \cdot \frac{R''_{rf} \cdot \left(1 - s_N\right)}{P \cdot 10^3} = 3 \cdot \left(14,9\right)^2 \cdot \frac{5,38 \cdot \left(1 - 0,071\right)}{1,5 \cdot 10^3} = 2,24.$$

4.3.2.10 Початковий пусковий момент

$$M_1 = k_{M1} \cdot M_N = 2,24 \cdot 10,28 \approx 23\,\text{Н·м}.$$

4.4 **Побудова механічної характеристики двигуна**

4.4.1 В таблиці 4.2 наведені числові значення величин необхідних для побудови характеристики. На рис.4.2 побудовано внутрішню механічну характеристику трифазного асинхронного двигуна, а на рис. 4.3 – звичайну механічну характеристику.

Таблиця 4.2 – Розрахункові дані для робочої ділянки механічної характеристики асинхронного двигуна

Найменування параметра	Значення параметра					
Ковзання s, в.о.	0	0,071	0,2	0,3	0,451	1
Швидкість обертання валу n, об/хв.	1500	1394	1200	1050	824	0
Момент на валу M, Н·м	0	10,28	19,05	23,7	25,7	23