

3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК

3.1 Визначення головних розмірів двигуна

3.1.1 Головними розмірами АД є зовнішній діаметр статора d_{se} , і довжина осердя статора l_s [7], [8]. Компоновку електромагнітної системи АД, у поперечному перерізі, наведено на рис. 3.1.

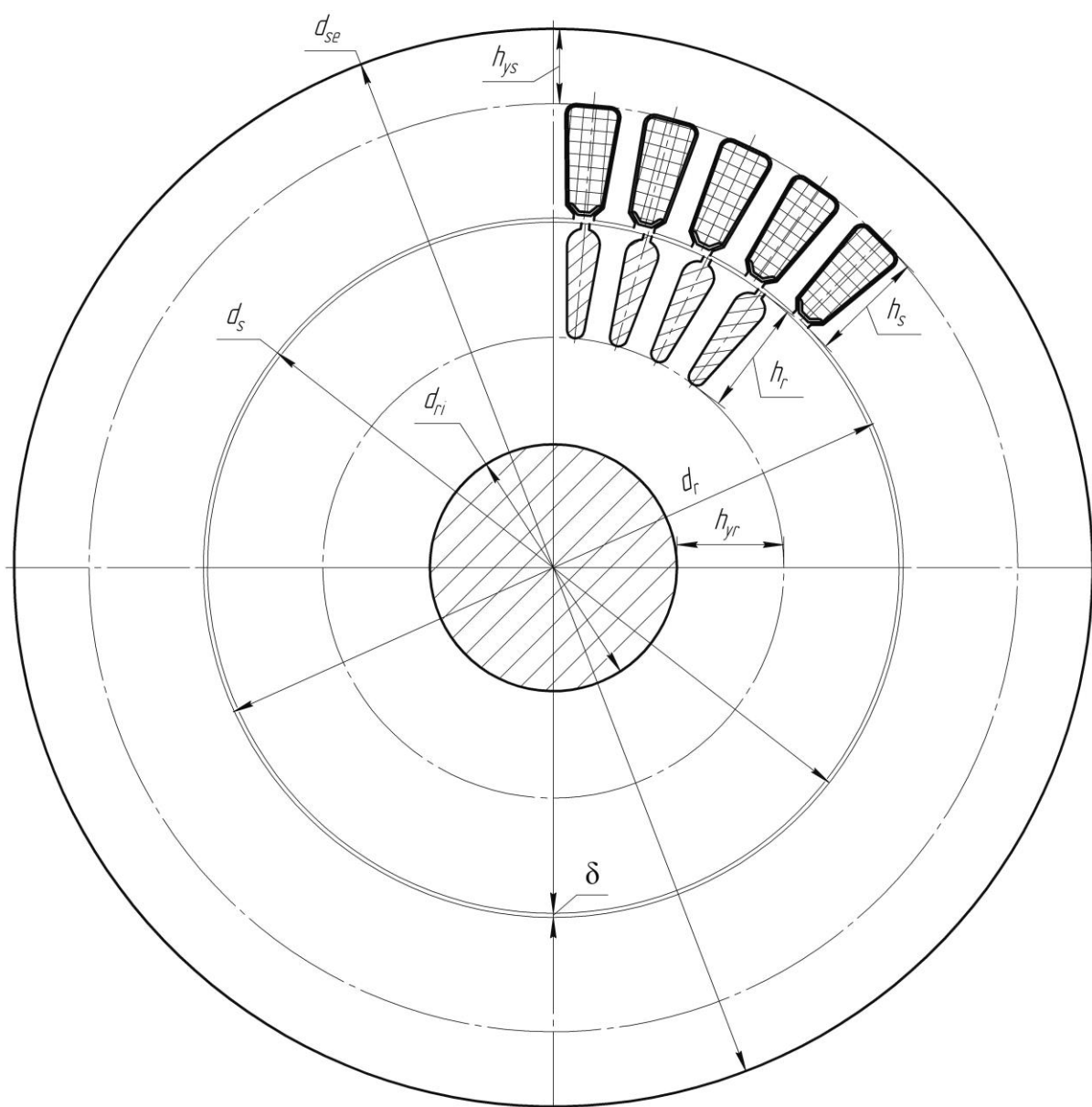


Рисунок 3.1 – Загальне компонування конструкції АД

Голові розміри жорстко пов'язані з висотою осі обертання вала h , яка в свою чергу пов'язана з номінальною потужністю P_N і синхронною частотою обертання n_s двигуна. Її попереднє значення вибирається по [7], $h = 80$ мм.

3.1.2 Зовнішній діаметр статора d_{se} , визначається згідно [7] з урахуванням обраної величини h , $d_{se}=131$ мм.

$$3.1.3 \text{ Кількість полюсів } 2p = \frac{120 \cdot f_s}{n_s} = \frac{120 \cdot 50}{1500} = 4.$$

3.1.4 Попереднє значення внутрішнього діаметра статора визначається за співвідношенням

$$d_s = k_{ds} \cdot d_{se}, \quad (3.1)$$

де k_{ds} - коефіцієнт, значення якого вибирається по [7], $k_{ds}=0,65$.

Підставляємо отримане значення k_{ds} у (3.1) $d_s = 0,65 \cdot 131 = 85$ мм.

3.1.5 Знаходимо довжину осердя статора. Починаємо з розрахунку його попереднього значення

$$l'_s = \frac{8,62 \cdot 10^{10} \cdot P_{calc}}{d_s^2 \cdot A_s \cdot B_\delta \cdot K_{ws} \cdot n_s}, \quad (3.2)$$

де P_{calc} – розрахункова потужність, Вт;

A_s – лінійне навантаження, визначається по [7], $A_s = 215$ А/см;

B_δ – магнітна індукція в повітряному проміжку, визначається по [7], $B_\delta = 0,69$ Тл;

K_{ws} – обмотувальний коефіцієнт, який для одношарових обмоток статора приймається рівним 0,96 [7].

Розрахункова потужність визначається за формулою:

$$P_{calc} = \frac{P_N \cdot K_E}{\eta_N \cdot \cos \varphi_N}, \quad (3.3)$$

де K_E – коефіцієнт відношення ЕРС в фазі обмотки статора до номінальної фазної напруги, визначається по [7], $K_E = 0,96$;

η_N – номінальний ККД, визначається по [7], $\eta_N = 0,785$.

$\cos \varphi_N$ – коефіцієнт потужності, визначається по [7], $\cos \varphi_N = 0,86$.

Підставляємо отримані значення у (3.3)

$$P_{calc} = \frac{1,5 \cdot 0,96}{0,785 \cdot 0,86} = 2,133 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Отримане значення P_{calc} підставляємо у (3.2)

$$l'_s = \frac{8,62 \cdot 10^{10} \cdot 2,133}{85^2 \cdot 215 \cdot 0,69 \cdot 0,96 \cdot 1500} = 119,1 \text{ мм}.$$

В результаті розрахунку попереднє значення l'_s округляємо до цілого числа з точністю до 1 мм при $l'_s < 100$ мм і з точністю до 5 мм при $l'_s > 100$ мм. Тобто, остаточно приймаємо значення $l_s = 120$ мм.

Оцінка правильності вибору головних розмірів здійснюється за величиною $\lambda_s = l_s / d_s$, при правильному виборі головних розмірів λ знаходиться у межах від 1,3 до 1,4.

За результатами проведеного розрахунку $\lambda_s = l_s / d_s = 120 / 85 = 1,41$, як бачимо умова виконується.

3.2 Проектування статора

3.2.1 Для осердя статора і ротора приймаємо сталь марки 2013. Ізолювання листів сталі проводиться шляхом оксидування, у цьому разі коефіцієнт заповнення осердя сталлю $K_{Fe} = 0,97$ [7].

Визначаємо кількість пазів статора

$$Q_s = 2 \cdot p \cdot m_s \cdot q_s, \quad (3.4)$$

де m_s – кількість фаз статора, $m_s = 3$;

q_s – кількість пазів статора на полюс і фазу, вибирається по [7], $q_s = 3$.

Підставляємо отримані значення m_s та q_s у (3.4)

$$Q_s = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36.$$

3.2.2 Приймаємо трифазну, одношарову концентричну обмотку.

Середній крок обмотки по пазах

$$y_{Qs} = \frac{Q_s}{2p} = \frac{36}{4} = 9.$$

Коефіцієнт скорочення обмотки $K_{ps} = 1$ і обмотувальний коефіцієнт $K_{ws} = K_{ds} \cdot K_{ps}$ визначається тільки коефіцієнтом розподілу обмотки K_{ds} [7]

$$K_{ws} = K_{ds} = \frac{0,5}{q_s \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{q_s}\right)} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{4}\right)} = 0,96.$$

Схему обмотки статора зображено на рис. 3.2.

3.2.3 Визначаємо попередню кількість витків у фазі обмотки статора

$$N'_s = \frac{K_E \cdot U_{sN}}{4,44 \cdot f_s \cdot K_{ws} \cdot \Phi'}, \quad (3.5)$$

де U_{sN} – номінальна фазна напруга, $U_{sN} = 220$ В;

Φ' – попереднє значення магнітного потоку, Вб.

Попереднє значення магнітного потоку визначається за формулою:

$$\Phi' = \frac{B_\delta \cdot d_s \cdot l_s \cdot 10^{-6}}{p} = \frac{0,69 \cdot 85 \cdot 120 \cdot 10^{-6}}{2} = 3,519 \cdot 10^{-3}, \text{ Вб.}$$

Підставляємо отримане значення Φ' у (3.5)

$$N'_s = \frac{0,96 \cdot 220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,96 \cdot 3,519 \cdot 10^{-3}} = 281,7.$$

Для уточнення кількості витків необхідно визначити кількість ефективних провідників в пазу

$$z'_s = \frac{N'_s \cdot a_s}{p \cdot q_s}, \quad (3.6)$$

де a_s – кількість паралельних віток обмотки статора, приймаємо $a_s = 1$.

Підставляємо значення a_s у (3.6)

$$z'_{qs} = \frac{281,7 \cdot 1}{2 \cdot 3} = 46,95.$$

Округляємо z'_{qs} до цілого числа – $z_{qs} = 47$.

Уточнюємо значення кількості витків

$$N_s = \frac{z_{qs} \cdot p \cdot q_s}{a_s} = \frac{47 \cdot 2 \cdot 3}{1} = 282.$$

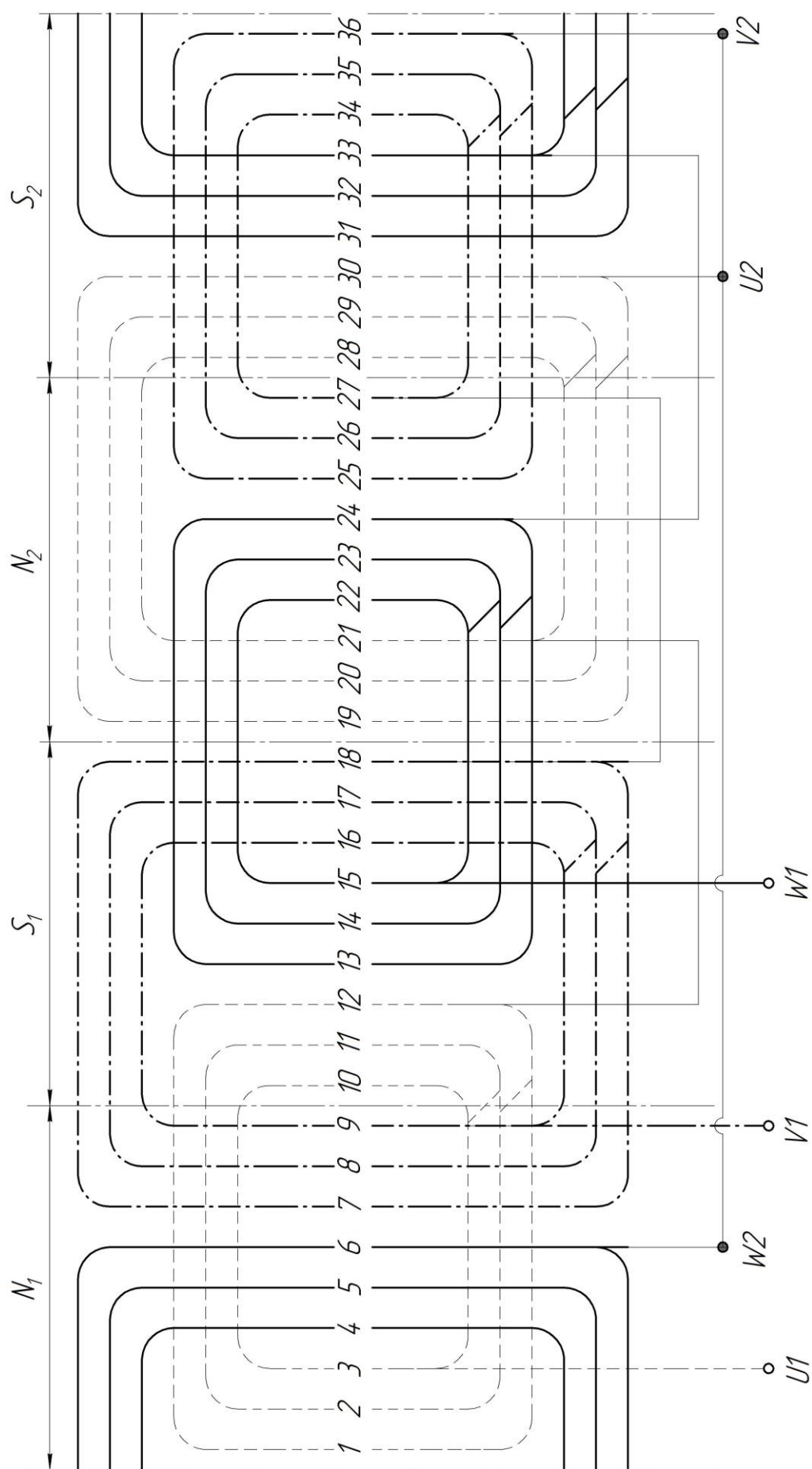


Рисунок 3.1 – Схема одношаровой концентричной обмотки статора

Уточнюємо значення магнітного потоку

$$\Phi = \frac{\Phi' \cdot N'_s}{N_s} = \frac{3,519 \cdot 10^{-3} \cdot 281,7}{282} = 3,515 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Визначаємо магнітну індукцію в повітряному проміжку

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p \cdot 10^6}{d_s \cdot l_s} = \frac{3,515 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^6}{85 \cdot 120} = 0,69 \text{ Тл.}$$

Для оцінки правильності визначення кількості витків уточняється лінійне навантаження

$$A_s = \frac{10 \cdot z_{Qs} \cdot Q_s \cdot I_{sN}}{\pi \cdot d_s \cdot a_s}, \quad (3.7)$$

де I_{sN} – номінальний фазний струм обмотки статора, А.

Номінальний фазний струм обмотки статора визначається за формулою:

$$I_{sN} = \frac{P_N \cdot 10^3}{3 \cdot U_{sN} \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_N} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,785 \cdot 0,86} = 3,4 \text{ А.}$$

Підставляємо отримане значення I_{sN} у (3.7)

$$A_s = \frac{10 \cdot 47 \cdot 36 \cdot 3,4}{\pi \cdot 85 \cdot 1} = 214 \text{ А/см.}$$

3.2.4 Розміри трапецеїдальних пазів статора:

1) зубцевий крок статора на розточці його осердя

$$\tau_s = \frac{\pi \cdot d_s}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 85}{36} = 7,4 \text{ мм;}$$

2) висота спинки статора

$$h_{ys} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot K_{Fe} \cdot l_s \cdot B_{ys}}, \quad (3.8)$$

де B_{ys} – магнітна індукція в спинці статора, вибирається по [7], $B_{ys} = 1,66 \text{ Тл.}$

Висота паза статора

$$h_s = \frac{d_{se} - d_s}{2} - h_{ys} \quad (3.8)$$

Підставляємо отримане значення B_{ys} в (3.8)

$$h_{ys} = \frac{3,515 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 0,97 \cdot 120 \cdot 1,66} = 9,1 \text{ мм;}$$

$$3) \text{ висота паза статора } h_s = \frac{131-85}{2} - 9,1 = 13,9 \text{ мм};$$

4) ширина зубця статора b_{ts} по всій висоті його основної частини приймається однаковою

$$b_{ts} = \frac{\tau_s \cdot B_\delta}{K_{Fe} \cdot B_{ts}}, \quad (3.9)$$

де B_{ts} – середнє значення магнітної індукції в зубцях статора, яке вибираємо по [7], $B_{ts} = 1,7 \text{ Тл}$.

Підставляємо отримане значення B_{ts} у (3.9)

$$b_{ts} = \frac{7,4 \cdot 0,69}{0,97 \cdot 1,7} = 3,1 \text{ мм};$$

5) висота шліца h_{s1} приймається рівною 0,5 мм, відповідно [7];

6) ширина шліца $b_{s1} = 0,3 \cdot \sqrt{h} = 0,3 \cdot \sqrt{80} \approx 2,7 \text{ мм}$, але виходячи з досвіду проектування приймаємо $b_{s1} = 2,5 \text{ мм}$;

7) менша b_{s2} та більша b_{s3} ширина паза відповідно:

$$b_{s2} = \frac{\pi \cdot (d_s + 2 \cdot h_{s1} - b_{s1}) - Q_s \cdot b_{ts}}{Q_s - \pi} = \frac{\pi \cdot (85 + 2 \cdot 0,5 - 2,5) - 36 \cdot 3,1}{36 - \pi} = 4,6 \text{ мм};$$

$$b_{s3} = \frac{\pi \cdot (d_s + 2 \cdot h_{s1})}{Q_s} - b_{ts} = \frac{\pi \cdot (85 + 2 \cdot 0,5)}{36} - 3,1 = 6,7 \text{ мм}.$$

На рис. 3.3 зображено зубцево-пазову структуру осердя статора.

3.2.5 Для обмоток статора застосовуємо провід ПЭТ-155 (клас нагрівостійкості F). При механізації обмотувальних робіт застосовують провід з механічно міцнішою ізоляцією марки ПЭТМ-155.

Попередній діаметр елементарного ізольованого проводу

$$d'_{scis} = \sqrt{\frac{K_{Qs} \cdot S_{sn}}{z_{Qs} \cdot N_c}}, \quad (3.10)$$

де K_{Qs} – коефіцієнт заповнення паза, який приймаємо по [7], $K_{Qs} = 0,72$;

S_{sn} – площа поперечного перерізу паза, зайнята обмоткою, мм^2 ;

N_c – кількість елементарних провідників в одному ефективному, $N_c = 1$.

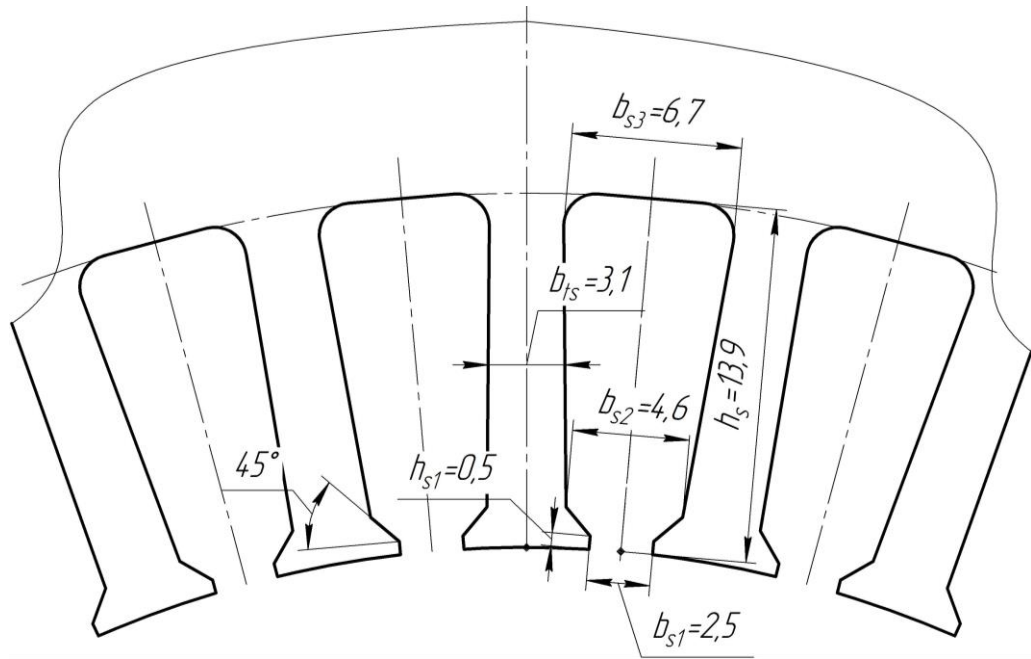


Рисунок 3.3 – Зубцево-пазова структура осердя статора

Площа поперечного перерізу паза, зайнята обмоткою, визначається за формулою:

$$S_{sn} = S'_{sn} - S_{isp} - S_{isfr}, \quad (3.11)$$

де S'_{sn} – площа поперечного перерізу паза напросвіт, мм^2 ;

S_{isp} – площа поперечного перерізу прокладок на дні паза і під клином, мм^2 ;

S_{isfr} – площа поперечного перерізу корпусної ізоляції, мм^2 .

Площа поперечного перерізу паза напросвіт визначається за формулою:

$$\begin{aligned} S'_{sn} &= \left(\frac{b_{s2} + b_{s3}}{2} - 0,1 \right) \cdot \left(h_s - h_{s1} - \frac{b_{s2} - b_{s1}}{2} - 0,1 \right) = \\ &= \left(\frac{4,6 + 6,7}{2} - 0,1 \right) \cdot \left(13,9 - 0,5 - \frac{4,6 - 2,5}{2} - 0,1 \right) = 68,5 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Площа поперечного перерізу прокладок на дні паза і під клином знаходиться як

$$S_{isp} = 0,5 \cdot b_{s3} + 0,75 \cdot b_{s2} = 0,5 \cdot 6,7 + 0,75 \cdot 4,6 = 6,8 \text{ мм}^2.$$

Площа поперечного перерізу корпусної ізоляції визначається за формулою:

$$S_{is\ fr} = b_{is\ fr} \cdot (2h_s + b_{s2} + b_{s3}), \quad (3.12)$$

де $b_{is\ fr}$ – товщина односторонньої корпусної ізоляції, приймаємо по [7], $b_{is\ fr} = 0,19$ мм.

Підставляємо прийняте значення $b_{is\ fr}$ у (3.12)

$$S_{is\ fr} = 0,19 \cdot (2 \cdot 13,9 + 4,6 + 6,7) = 6,8 \text{ мм}^2.$$

Підставляємо отримані значення S'_{sn} , $S_{is\ p}$, $S_{is\ fr}$ у (3.11)

$$S_{sn} = 68,5 - 6,8 - 7,4 = 54,3 \text{ мм}^2.$$

Підставляємо отримане значення S_{sn} в (3.11)

$$d'_{scis} = \sqrt{\frac{0,72 \cdot 54,3}{47 \cdot 1}} = 0,912 \text{ мм}.$$

Вибираємо по [7] найближчий стандартний провід:

- 1) найближчий стандартизований діаметр проводу $d_{scis} = 0,895$ мм;
- 2) відповідний йому діаметр неізолюваного проводу $d_{sc} = 0,83$ мм, площа поперечного перерізу якого $S_{sc} = 0,541 \text{ мм}^2$.

Оскільки попереднє d'_{scis} і остаточне значення d_{scis} не співпадають, тому уточнюємо коефіцієнт заповнення паза K_{Qs} і ширину шліца b_{s1} :

$$K_{Qs} = \frac{z_{Qs} \cdot N_c \cdot d_{scis}^2}{S_{sn}} = \frac{47 \cdot 1 \cdot 0,895^2}{54,30} = 0,69;$$

$$b_{s1} = d_{scis} + 2 \cdot b_{is\ fr} + 0,4 = 0,895 + 2 \cdot 0,19 + 0,4 = 1,7 \text{ мм}.$$

Після порівняння уточненого і заздалегідь прийнятого значення b_{s1} остаточно приймається більше з них, тобто $b_{s1} = 2,5$ мм.

Тоді, вважаючи що кут скосу коронки зубця складає 45° , його висота

$$h_{s2} = \frac{(b_{s2} - b_{s1})}{2} = \frac{(4,6 - 2,5)}{2} = 1,05 \text{ мм}.$$

Визначаємо густину струму в провіднику обмотки статора

$$J_{sc} = \frac{I_{sN}}{N_c \cdot S_{sc} \cdot a_s} = \frac{3,4}{1 \cdot 0,541 \cdot 1} = 6,23 \text{ А/мм}^2.$$

Проводимо оцінку правильності вибору d_{scis} за добутком лінійного навантаження A_s на цю густину струму J_{sc} : $A_s \cdot J_{sc} = 215 \cdot 6,23 = 1333 \text{ А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$.

Максимально допустиме значення $A_s \cdot J_{sc} = 1970 \text{ А}^2/(\text{см} \cdot \text{мм}^2)$. Розраховане значення знаходиться в межах норми, умова дотримана – вибір вірний.

3.2.6 Визначаємо розміри елементів обмотки статора:

1) середній зубцевий (або пазовий) крок статора

$$\tau_{sav} = \frac{\pi \cdot (d_s + h_s)}{Q_s} = \frac{\pi \cdot (85 + 13,9)}{36} = 8,6 \text{ мм};$$

2) середня ширина котушки обмотки статора

$$b_{wav} = \tau_{sav} \cdot y_{Qs} = 8,6 \cdot 9 = 77,4 \text{ мм};$$

3) середня довжина однієї лобової частини котушки

$$l_{fh} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{wav} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 2) \cdot 77,4 + 15 = 126,5 \text{ мм};$$

4) середня довжина витка обмотки

$$l_{wav} = 2 \cdot (l_s + l_{fh}) = 2 \cdot (120 + 126,5) = 493 \text{ мм};$$

5) довжина вильоту лобової частини обмотки

$$l_{fs} = (0,19 + 0,1 \cdot p) \cdot b_{wav} + 10 = (0,19 + 0,1 \cdot 2) \cdot 77,4 + 10 \approx 40 \text{ мм}.$$

3.3 Проектування ротора

3.3.1 Повітряний проміжок між осердям статора і осердям ротора $\delta = 0,25 \text{ мм}$ відповідно [7].

3.3.2 Зовнішній діаметр ротора $d_r = d_s - 2\delta = 85 - 2 \cdot 0,25 = 84,5 \text{ мм}$.

3.3.3 Довжина пакету осердя ротора $l_r = l_s = 120 \text{ мм}$.

3.3.4 Кількість пазів короткозамкненого ротора $Q_r = 34$ за [7].

3.3.5 Форма паза ротора – напівзакритий паз трапецеїдальної овальної форми. Висоту паза приймаємо $h_r = 14 \text{ мм}$ відповідно [7].

3.3.6 Внутрішній діаметр осердя ротора $d_{ri} \approx 0,23 \cdot d_{se} \approx 0,23 \cdot 131 \approx 30$ мм.

3.3.7 Значення d_{ri} підлягає узгодження з мінімально допустимим діаметром валу під осердям ротора виходячи з механічно міцності, а саме визначення його мінімально допустимого діаметру

$$d_{c \min} = K_{dc} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_N}{n_s}}, \quad (3.13)$$

де K_{dc} – множник, який для машин середньої потужності знаходиться у межах від 240 до 290 [7], приймаємо $K_{dc} = 290$.

Отримані значення підставляємо у (3.13)

$$d_{c \min} = 290 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_N}{n_s}} = 290 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,5}{1500}} \approx 10 \text{ мм.}$$

Як бачимо діаметр d_{ri} значно більше за $d_{c \min}$, тому приймаємо

$$d_c = d_{ri} = 30 \text{ мм.}$$

3.3.8 Рекомендована розрахункова висота спинки ротора

$$h_{yr} = 0,38 \cdot d_r - h_r = 0,38 \cdot 84,5 - 14 = 18,1 \text{ мм,}$$

але у підсумку треба узгодити значення d_{ri} і h_{yr} , зважаючи на співвідношення

$$h_{yr} = \frac{d_r - d_{ri}}{2} - h_r = \frac{84,5 - 30}{2} - 14 = 13,25 \text{ мм.}$$

3.3.9 Магнітна індукція в спинці ротора

$$B_{yr} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot K_{Fe} \cdot l_r \cdot h_{yr}} = \frac{3,515 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 0,97 \cdot 120 \cdot 13,25} = 1,14 \text{ Тл.}$$

3.3.10 Зубцевий крок ротора $\tau_r = \frac{\pi \cdot d_r}{Q_r} = \frac{\pi \cdot 84,5}{34} = 7,8 \text{ мм.}$

3.3.11 Магнітна індукція в зубцях ротора $B_{tr} = 1,7 \text{ Тл}$ [8].

3.3.12 Ширина зубця ротора

$$b_{tr} = \frac{B_{\delta} \cdot \tau_r}{B_{tr} \cdot K_{Fe}} = \frac{0,69 \cdot 7,8}{1,7 \cdot 0,97} = 3,3 \text{ мм.}$$

3.3.13 Визначаємо розміри напівзакритого паза ротора:

1) висота і ширина шліца $h_{r1} = 0,7 \text{ мм}$, $b_{r1} = 1 \text{ мм}$ відповідно [7];

2) більший і менший радіуси

$$r_{r1} = \frac{\pi \cdot (d_r - 2 \cdot h_{r1}) - Q_r \cdot b_{tr}}{2 \cdot (Q_r + \pi)} = \frac{\pi \cdot (84,5 - 2 \cdot 0,7) - 34 \cdot 1,7}{2 \cdot (34 + \pi)} = 2,0 \text{ мм};$$

$$r_{r2} = \frac{\pi \cdot (d_r - 2 \cdot h_r) - Q_r \cdot b_{tr}}{2 \cdot (Q_r - \pi)} = \frac{\pi \cdot (84,5 - 2 \cdot 14) - 34 \cdot 1,7}{2 \cdot (34 - \pi)} = 1,05 \text{ мм};$$

3) відстань між центрами дуг радіусів r_{r1} і r_{r2}

$$h_{r2} = h_r - h_{r1} - r_{r1} - r_{r2} = 14 - 0,7 - 2 - 1,05 = 10,3 \text{ мм};$$

4) площа поперечного перерізу паза S_{rn} (і одночасно стрижня S_{rc})

$$S_m = S_{rc} = 0,5 \cdot \pi \cdot (r_{r1}^2 + r_{r2}^2) + (r_{r1} + r_{r2}) \cdot h_{r2} = 0,5 \cdot \pi \cdot (2^2 + 1,05^2) + (2 + 1,05) \cdot 10,3 = 39,4 \text{ мм}^2.$$

Радіуси r_{r1} і r_{r2} визначені, виходячи з умови, що $b_{tr} = \text{const}$. Перевірку правильності їх визначення здійснюють за допомогою виразу: $\pi \cdot h_{r2} - Q_r (r_{r1} - r_{r2}) \approx 0$. В нашому випадку $\pi \cdot 10,3 - 34 \cdot (2 - 1,05) \approx 0$, умова виконується, тобто розміри пазової зони ротора визначено вірно.

Зубцево-пазову структуру короткозамкненого ротора зображено на рис. 3.4.

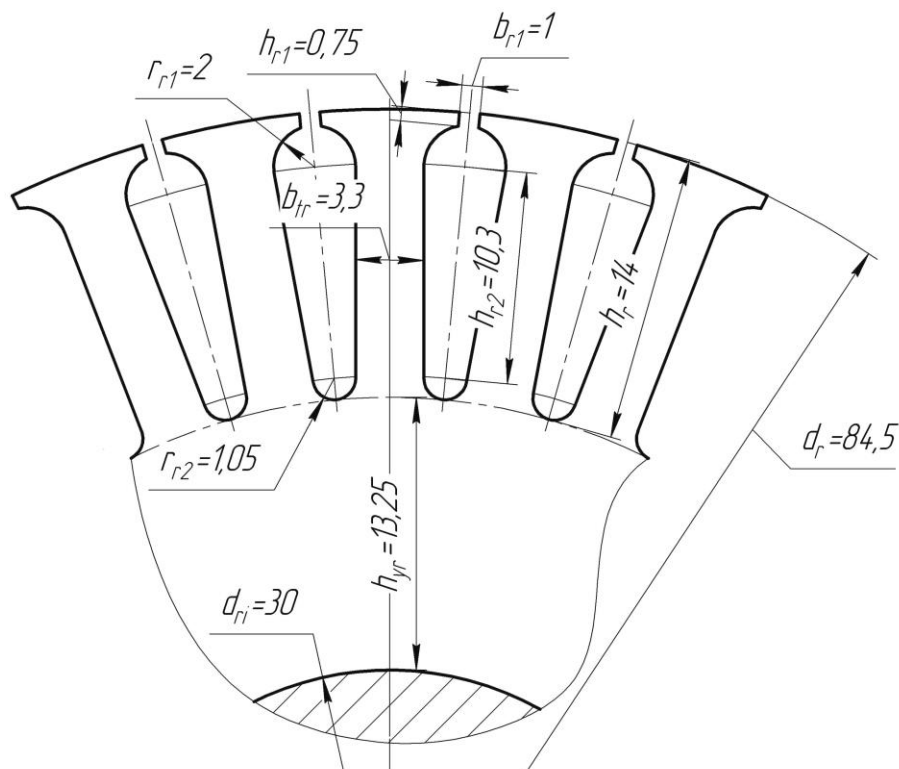


Рисунок 3.4 – Зубцево-пазова структура короткозамкненого ротора

3.3.14 Визначаємо розміри короткозамикального кільця литої алюмінієвої клітки:

1) поперечний переріз кільця

$$S_{fhr} = \frac{0,35 \cdot Q_r \cdot S_m}{2p} = \frac{0,35 \cdot 34 \cdot 39,4}{2 \cdot 2} = 117,2 \text{ мм}^2;$$

2) висота кільця $h_{fhr} \approx 1,2 \cdot h_r \approx 1,2 \cdot 14 \approx 16,8 \text{ мм};$

3) довжина кільця $l_{fhr} = \frac{S_{fhr}}{h_{fhr}} = \frac{117,2}{16,8} = 7 \text{ мм},$ але враховуючи необхідність

розміщення в кільці канавки для встановлення балансувальних ваг $l_{fhr} = 9 \text{ мм};$

4) середній діаметр кільця $d_{fnavr} = d_r - d_{fhr} = 84,5 - 16,8 = 67,7 \text{ мм}.$

3.3.15 Визначаємо параметри вентиляційних лопаток:

1) кількість лопаток n_{bl} при h від 50 до 100 мм повинна знаходитися в межах від 5 до 9 [7], приймаємо $n_{bl} = 7;$

2) товщина лопатки $b_{bl} = 0,3 \cdot \sqrt{h} = 0,3 \cdot \sqrt{80} = 2,8 \text{ мм};$

3) довжина лопатки $l_{bl} = 0,31 \cdot h = 0,31 \cdot 80 = 24,8 \text{ мм};$

4) висота лопатки $h_{bl} = 0,83 \cdot \sqrt[3]{h^2} = 0,83 \cdot \sqrt[3]{80^2} = 15,4 \text{ мм}.$

Приймаємо, що висота вентиляційної лопатки дорівнює висоті короткозамикального кільця $h_{bl} = 16,8 \text{ мм}.$ Переріз короткозамикального кільця литої алюмінієвої клітки приведено на рис. 3.5.

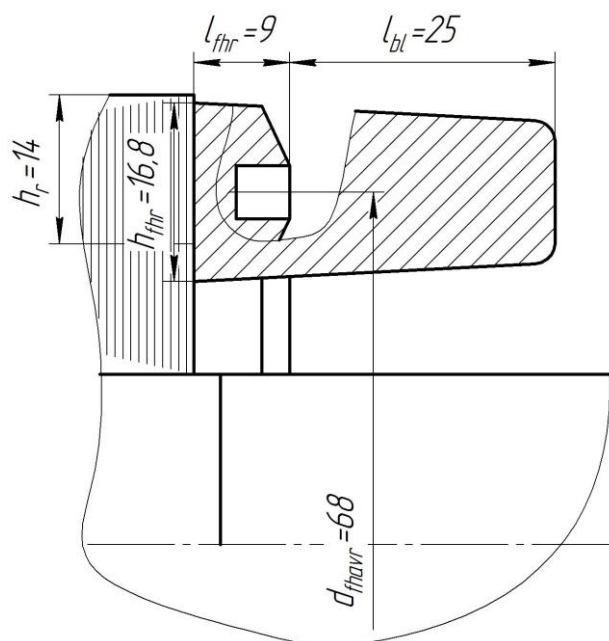


Рисунок 3.5 – Переріз короткозамикального кільця литої алюмінієвої клітки

3.4 Перевірний розрахунок

3.4.1 Розрахунок магнітного кола

3.4.1.1 Коефіцієнт повітряного проміжку

$$K_C = K_{Cs} \cdot K_{Cr}, \quad (3.14)$$

де K_{Cs} і K_{Cr} – коефіцієнти, які враховують зубчасту структуру статора і ротора.

Коефіцієнт, що враховує зубчасту структуру статора K_{Cs} визначається за формулою:

$$K_{Cs} = \frac{\tau_s + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_s}{b_{s1}}}{\tau_s - b_{s1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_s}{b_{s1}}} = \frac{7,4 + \frac{5 \cdot 0,25 \cdot 7,4}{2,7}}{7,4 - 2,7 + \frac{5 \cdot 0,25 \cdot 7,4}{2,7}} = 1,29.$$

Коефіцієнт, що враховує зубчасту структуру ротора K_{Cr} визначається за формулою:

$$K_{Cr} = \frac{\tau_r + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_r}{b_{r1}}}{\tau_r - b_{r1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot \tau_r}{b_{r1}}} = \frac{7,8 + \frac{5 \cdot 0,25 \cdot 7,8}{1}}{7,8 - 1 + \frac{5 \cdot 0,25 \cdot 7,8}{1}} = 1,06.$$

Підставляємо отримані значення K_{Cs} і K_{Cr} у (3.14) $K_C = 1,29 \cdot 1,06 = 1,37$.

3.4.1.2 Магнітна напруга сила повітряного проміжку

$$F_\delta = 0,8 \cdot \delta \cdot K_C \cdot B_\delta \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,25 \cdot 1,37 \cdot 0,69 \cdot 10^3 = 189 \text{ А.}$$

3.4.1.3 Визначаємо напруженість магнітного поля в зубцях статора H_{ts} , згідно з [7] $H_{ts} = 11,5 \text{ А/см}$.

3.4.1.4 Середня довжина шляху магнітного потоку в зубці статора

$$l_{mts} = h_s = 13,9 \text{ мм.}$$

3.4.1.5 Магнітна напруга зубців статора

$$F_{ts} = 0,1 \cdot H_{ts} \cdot l_{mts} = 0,1 \cdot 11,5 \cdot 13,9 = 16 \text{ А.}$$

3.4.1.6 Напруженість магнітного поля в спинці статора $H_{ys} = 10,2 \text{ А/см}$ [7].

3.4.1.7 Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці статора

$$l_{mys} = \frac{\pi \cdot (d_{se} - h_{ys})}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (131 - 9,1)}{4 \cdot 2} = 47,9 \text{ мм.}$$

3.4.1.8 Магнітна напруга спинки статора

$$F_{ys} = 0,1 \cdot H_{ys} \cdot l_{mys} = 0,1 \cdot 10,2 \cdot 47,9 = 48,9 \text{ А.}$$

3.4.1.9 Напруженість магнітного поля в зубцях ротора $H_{tr} = 11,5 \text{ А/см}$, згідно [7].

3.4.1.10 Середня довжина шляху магнітного потоку в зубці ротора

$$l_{mtr} = h_r - 0,2 \cdot r_{r2} = 14 - 0,2 \cdot 1,05 = 13,8 \text{ мм.}$$

3.4.1.11 Магнітна напруга зубців ротора

$$F_{tr} = 0,1 \cdot H_{tr} \cdot l_{mtr} = 0,1 \cdot 11,5 \cdot 13,8 = 15,9 \text{ А.}$$

3.4.1.12 Напруженість магнітного поля в спинці ротора $H_{yr} = 1,29 \text{ А/см}$, згідно [7].

3.4.1.13 Середня довжина шляху магнітного потоку в спинці ротора

$$l_{myr} = \frac{\pi \cdot (d_{ri} + h_{yr})}{4 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot (30 + 13,25)}{4 \cdot 2} = 38,4 \text{ мм.}$$

3.4.1.14 Магнітна напруга спинки ротора

$$F_{yr} = 0,1 \cdot H_{yr} \cdot l_{myr} = 0,1 \cdot 1,29 \cdot 38,4 = 4,95 \text{ А.}$$

3.4.1.15 Магніторушійна сила обмотки статора на один полюс

$$\sum F = F_{\delta} + F_{ts} + F_{ys} + F_{tr} + F_{yr} = 189 + 16 + 48,9 + 15,9 + 4,95 \approx 275 \text{ А}$$

3.4.1.16 Коефіцієнт насичення магнітного кола

$$k_{\mu} = \frac{\sum F}{F_{\delta}} = \frac{275}{189} \approx 1,45.$$

3.4.1.17 Складова намагнічувального струму статора

$$I_{s\mu} = \frac{2,22 \cdot p \cdot \sum F}{m_s \cdot N_s \cdot K_{ws}} = \frac{2,22 \cdot 2 \cdot 275}{3 \cdot 282 \cdot 0,96} = 1,5 \text{ А,}$$

у відносних одиницях

$$I_{s\mu}^* = \frac{I_{s\mu}}{I_{sN}} = \frac{1,5}{3,4} = 0,445.$$

3.4.1.18 Головний індуктивний опір

$$X_{\mu} = \frac{E_s}{I_{s\mu}}, \quad (3.15)$$

де E_s – ЕРС в обмотці статора, В.

Електрорушійна сила в обмотці статора визначаємо за формулою:

$$E_s = K_E \cdot U_{sN} = 0,96 \cdot 220 = 211,2 \text{ В.}$$

Підставляємо отримане значення E_s у (3.15)

$$X_\mu = \frac{E_s}{I_{s\mu}} = \frac{211,2}{1,5} = 140,8 \text{ Ом,}$$

у відносних одиницях

$$X_{\mu*} = \frac{X_\mu \cdot I_{sN}}{U_{sN}} = \frac{140,8 \cdot 3,4}{220} = 2,16.$$

3.4.2 Визначення активних і індуктивних опорів обмоток двигуна

3.4.2.1 Питомі опори при базовій температурі $\theta_a = 20^\circ\text{C}$, за [7] приймаються такі:

- 1) для міді $\rho_{Cu20^\circ\text{C}} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{ммкм}$;
- 2) для алюмінію $\rho_{Al20^\circ\text{C}} = 0,037 \text{ Ом} \cdot \text{ммкм}$.

3.4.2.2 Активний опір фазної обмотки статора при 20°C

$$R_{s\theta a} = \frac{\rho_{Cu20^\circ\text{C}} \cdot N_s \cdot l_{Wav}}{a_s \cdot N_c \cdot S_{sc}} \cdot 10^{-3} = \frac{0,0175 \cdot 282 \cdot 493}{1 \cdot 1 \cdot 0,541} \cdot 10^{-3} = 4,508 \text{ Ом.}$$

3.4.2.3 Активний опір обмотки статора, приведений до робочої температурі

$$R_s = k_{\theta Cu} \cdot R_{s\theta a} = 1,38 \cdot 4,508 = 6,22 \text{ Ом.}$$

3.4.2.4 Активний опір обмотки ротора:

- 1) активний опір стрижня клітки ротора

$$R_{r\theta a1} = \frac{\rho_{Al20^\circ\text{C}} \cdot l_r}{S_{rc}} \cdot 10^{-3} = \frac{0,037 \cdot 4120}{39,4} \cdot 10^{-3} = 11,28 \cdot 10^{-5} \text{ Ом;}$$

2) коефіцієнт зведення струму короткозамикального кільця до струму стрижня ротора

$$K_{fhr} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q_r}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{34}\right) = 0,37;$$

3) опір короткозамкнених кілець, зведений до струму стрижня

$$R_{r\theta a2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_{Al20^\circ C} \cdot d_{favr}}{Q_r \cdot S_{fhr} \cdot K_{fhr}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,037 \cdot 67,7}{34 \cdot 117,2 \cdot 0,37^2} \cdot 10^{-3} = 2,89 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

4) Активний опір обмотки ротора при робочій температурі

$$R_r = k_{\theta Al} (R_{r\theta a1} + R_{r\theta a2}) = 1,41 \cdot (11,28 \cdot 10^{-5} + 2,89 \cdot 10^{-5}) = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

5) центральний кут скосу пазів

$$\alpha_{sq} = \frac{2 \cdot p \cdot \tau_s \cdot \beta_{sq}}{d_s}, \quad (3.16)$$

де β_{sq} – відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого кроку статора.

Відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого кроку статора визначається за формулою:

$$\beta_{sq} = \frac{b_{sq}}{\tau_s}, \quad (3.17)$$

де b_{sq} – ширина дуги скосу і в асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором при $h \leq 160$ береться рівною одному зубцевому кроку статора $b_{sq} = \tau_s = 7,4 \text{ мм}$ [7].

$$\text{Підставляємо значення } b_{sq} \text{ у (3.17) } \beta_{sq} = \frac{b_{sq}}{\tau_s} = \frac{7,4}{7,4} = 1,$$

$$\text{а значення } \beta_{sq} \text{ у (3.16) } \alpha_{sq} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 7,4 \cdot 1}{85} = 0,35 \text{ рад};$$

5) коефіцієнт скосу пазів ротора $K_{sq} = 0,994$ [7];

6) коефіцієнт зведення опору обмотки ротора до обмотки статора

$$K_{sr} = \frac{4 \cdot m_s}{Q_s} \cdot \left(\frac{N_s \cdot K_{ws}}{K_{sq}} \right)^2 = \frac{4 \cdot 3}{36} \cdot \left(\frac{282 \cdot 0,96}{0,994} \right)^2 = 24715;$$

7) зведений активний опір обмотки ротора при 20°C

$$R'_{r\theta a} = K_{sr} (R_{r\theta a1} + R_{r\theta a2}) = 24715 \cdot (11,28 \cdot 10^{-5} + 2,89 \cdot 10^{-5}) = 3,5 \text{ Ом};$$

8) зведений активний опір обмотки ротора при робочій температурі

$$R'_r = k_{\theta Al} \cdot R'_{r\theta a} = 1,41 \cdot 3,5 = 4,94 \text{ Ом};$$

3.4.2.5 Індуктивний опір фази обмотки статора:

1) коефіцієнт провідності пазового розсіяння

$$\lambda_{sn} = \frac{h_{s4}}{3b_{s2}} + \frac{3h_{s2}}{b_{s2} + 2b_{s1}} + \frac{h_{s1}}{b_{s1}} + \frac{h_{s3}}{b_{s2}}, \quad (3.18)$$

де h_{s2} – висота коронки зубця, $h_{s2} = 1,05$ мм;

h_{s3} – проміжок між коронкою зубця та обмоткою, $h_{s3} = 0,6$ мм [7];

h_{s4} – висота обмотки, мм;

h_{s5} – величина проміжку між обмоткою та дном пазу, $h_{s5} = 0$ мм [7].

Висота обмотки визначається за формулою:

$$h_{s4} = h_s - h_{s1} - h_{s2} - h_{s3} - h_{s5} = 13,9 - 0,5 - 1,05 - 0,6 - 0 = 11,75 \text{ мм.}$$

Розміри паза статора, що необхідні для виконання розрахунків пазового розсіяння вказані на рис. 3.6.

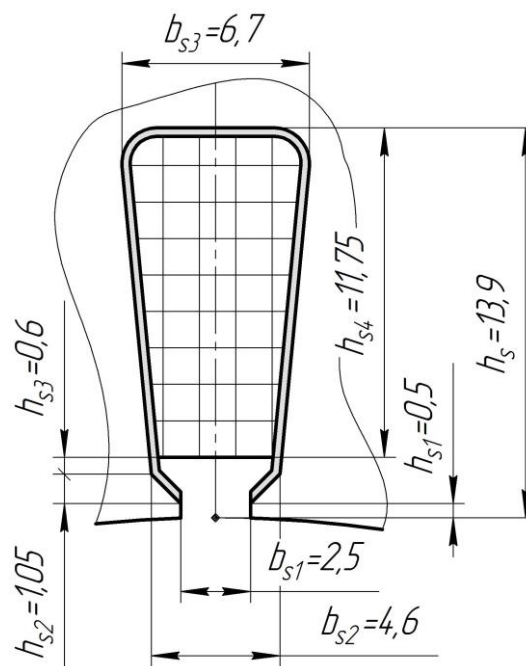


Рисунок 3.6 – Розміри паза статора до розрахунку пазового розсіяння

Підставляємо отримані значення у (3.18)

$$\lambda_{sn} = \frac{11,75}{3 \cdot 4,6} + \frac{3 \cdot 1,05}{4,6 + 2 \cdot 2,5} + \frac{0,5}{2,5} + \frac{0,6}{4,6} = 1,51;$$

2) коефіцієнт провідності диференціального розсіяння

$$\lambda_{sd} = 0,9 \cdot \frac{(\tau_s \cdot K_{ws})^2 \cdot K_{rdm} \cdot K_{ns} \cdot K_{difs}}{\delta \cdot K_c}, \quad (3.19)$$

де K_{rdm} – коефіцієнт, що враховує демпфувальну реакцію струмів, наведених в короткозамкненій обмотці ротора вищими гармоніками поля статора, $K_{rdm} = 0,912$ [7];

K_{ns} – коефіцієнт, що враховує вплив відкриття пазів статора;

K_{difs} – коефіцієнт диференціального розсіяння статора, рівний відношенню сумарної ЕРС від вищих гармонік магнітного поля статора до ЕРС від першої гармоніки, вибирається по [7], $K_{difs} = 0,0141$.

Коефіцієнт, що враховує вплив відкриття пазів статора

$$K_{ns} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{s1}^2}{\tau_s \cdot \delta} = 1 - \frac{0,033 \cdot 2,7^2}{7,4 \cdot 0,25} = 0,89.$$

Підставляємо отримані значення K_{rdm} , K_{ns} і K_{difs} у (3.19)

$$\lambda_{sd} = 0,9 \cdot \frac{(7,4 \cdot 0,96)^2 \cdot 0,912 \cdot 0,89 \cdot 0,0141}{0,25 \cdot 1,37} = 1,515;$$

3) коефіцієнт провідності розсіяння лобових частин обмотки статора

$$\lambda_{s fh} = 0,34 \cdot \frac{q_s}{l_s} \cdot (l_{fh} - 0,64 \cdot \beta_Q \cdot \tau_p), \quad (3.20)$$

де τ_p – полюсний крок двигуна по розточці статора;

β_Q – скорочення кроку обмотки статора, при одношаровій обмотці з діаметральним кроком, $\beta_Q = 1$ [7].

Полюсний крок двигуна по розточці статора знаходиться по формулі

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot d_s}{2p} = \frac{\pi \cdot 85}{4} = 66,8 \text{ мм.}$$

Підставляємо отримані значення τ_p і β_Q у (3.20)

$$\lambda_{s fh} = 0,34 \cdot \frac{3}{120} \cdot (126,5 - 0,64 \cdot 1 \cdot 66,8) = 0,71;$$

4) сумарний коефіцієнт провідності розсіювання обмотки статора

$$\lambda_{\sigma s} = \lambda_{sn} + \lambda_{sd} + \lambda_{sfh} = 1,51 + 1,52 + 0,71 = 3,74;$$

5) індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора

$$X_{\sigma s} = 1,58 \cdot \frac{f_s \cdot l_s \cdot N_s^2 \cdot \lambda_{\sigma s}}{p \cdot q_s \cdot 10^8} = 1,58 \cdot \frac{50 \cdot 120 \cdot 282^2 \cdot 3,74}{2 \cdot 3 \cdot 10^8} = 4,7 \text{ Ом.}$$

6) індуктивний опір розсіювання лобових частин обмотки статора (для підготовки даних для комп'ютерної програми з метою тестування проєкту

$$X_{sjh} = X_{\sigma s} \cdot \frac{\lambda_{sfh}}{\lambda_{\sigma s}} = 4,7 \cdot \frac{0,71}{3,74} = 0,89 \text{ Ом.}$$

3.4.2.6 Індуктивний опір обмотки ротора:

1) коефіцієнт провідності диференціального розсіювання

$$\lambda_{rd} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \left(\frac{Q_r}{6 \cdot p} \right)^2 \cdot K_{dr}}{\delta \cdot K_c}, \quad (3.21)$$

де K_{dr} – коефіцієнт диференціального розсіювання ротора, визначається за [7], $K_{dr} = 0,0124$.

Підставляємо отримане значення K_{dr} у (3.21)

$$\lambda_{rd} = \frac{0,9 \cdot 7,8 \left(\frac{34}{6 \cdot 2} \right)^2 \cdot 0,0124}{0,25 \cdot 1,37} = 2,04.$$

2) коефіцієнт провідності пазового розсіювання для овального напівзакритого паза

$$\begin{aligned} \lambda_{rn} &= \frac{h_{r1}}{b_{r1}} + \frac{h_{r2} + 0,8 \cdot r_{r2}}{6 \cdot r_{r1}} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot r_{r1}^2}{2 \cdot S_{rc}} \right) + 0,66 - \frac{b_{r1}}{4r_{r1}} = \\ &= \frac{0,7}{1} + \frac{10,3 + 0,8 \cdot 1,05}{6 \cdot 2} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 1,05^2}{2 \cdot 39,4} \right) + 0,66 - \frac{1}{4 \cdot 2} = 1,89. \end{aligned}$$

3) кількість пазів ротора на полюс і фазу статора

$$q_r = \frac{Q_r}{2 \cdot p \cdot m_s} = \frac{34}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2,83.$$

4) коефіцієнт провідності розсіювання короткозамикальних кілець

$$\lambda_{r\,fh} = \frac{2,9 \cdot d_{fhavr}}{Q_r \cdot l_r \cdot K_{fhr}^2} \cdot \lg \left(\frac{2,35 \cdot d_{fhavr}}{h_{fhr} + l_{fhr}} \right) = \frac{2,9 \cdot 67,7}{34 \cdot 120 \cdot 0,37^2} \cdot \lg \left(\frac{2,35 \cdot 67,7}{16,8 + 7} \right) = 0,29.$$

5) коефіцієнт провідності розсіювання скошу пазів

$$\lambda_{rsq} = \frac{\tau_r \cdot \beta_{sqr}^2}{9,5 \cdot \delta \cdot K_C \cdot k_\mu}, \quad (3.22)$$

де β_{sqr} – відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого кроку ротора.

Визначаємо відносний скіс пазів ротора в частках зубцевого кроку ротора

$$\beta_{sqr} = \beta_{sq} \cdot \frac{\tau_s}{\tau_r} = 1 \cdot \frac{7,4}{7,8} = 0,95.$$

Підставляємо отримане значення у (3.22)

$$\lambda_{rsq} = \frac{\tau_r \cdot \beta_{sqr}^2}{9,5 \cdot \delta \cdot K_C \cdot k_\mu} = \frac{7,8 \cdot 0,95^2}{9,5 \cdot 0,25 \cdot 1,37 \cdot 1,45} = 1,49;$$

6) сумарний коефіцієнт провідності розсіювання обмотки ротора

$$\lambda_{\sigma r} = \lambda_{rn} + \lambda_{rd} + \lambda_{r\,fh} + \lambda_{rsq} = 1,89 + 2,04 + 0,29 + 1,49 = 5,71;$$

7) індуктивний опір обмотки ротора

$$X_{\sigma r} = 7,9 \cdot f_s \cdot l_r \cdot \lambda_{\sigma r} \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 120 \cdot 5,71 \cdot 10^{-9} = 2,71 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

8) зведений індуктивний опір обмотки ротора

$$X'_{\sigma r} = K_{sr} \cdot X_{\sigma r} = 24715 \cdot 2,71 \cdot 10^{-4} = 6,7 \text{ Ом}.$$

У правильно спроектованій машині зазвичай співвідношення $\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}$

знаходиться у межах від 0,7 до 1,0.

$$\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} = \frac{4,7}{6,7} = 0,702 \text{ – умова виконується.}$$

3.4.2.7 Опори обмоток перетвореної Г-подібної схеми заміщення, з винесеним намагнічувальним контуром:

1) коефіцієнт розсіювання статора

$$k_{\sigma s} = \frac{X_{\sigma s}}{X_\mu} = \frac{4,7}{140,8} = 0,033;$$

2) коефіцієнт опору статора $C_s = \frac{R_s}{X_{\sigma s} + X_\mu} = \frac{6,22}{4,7 + 140,8} = 0,043$;

3) перетворені опори обмоток:

$$R'_s = R_s = 6,22 \text{ Ом};$$

$$X'_{\sigma s} = X_{\sigma s} \cdot (1 + k_{\sigma s}) \cdot \left(1 + \frac{R_s \cdot C_s}{X_{\sigma s}}\right) = 4,7 \cdot (1 + 0,033) \cdot \left(1 + \frac{6,22 \cdot 0,043}{4,7}\right) = 5,13 \text{ Ом};$$

$$R'_r = R_r \cdot (1 + k_{\sigma s})^2 \cdot (1 + C_s^2) = 4,94 \cdot (1 + 0,033)^2 \cdot (1 + 0,043^2) = 5,28 \text{ Ом};$$

$$X''_{\sigma r} = X'_{\sigma r} \cdot (1 + k_{\sigma s})^2 \cdot (1 + C_s^2) = 6,7 \cdot (1 + 0,033)^2 \cdot (1 + 0,043^2) = 7,15 \text{ Ом};$$

Перетворена Г-подібна схема заміщення, з винесеним намагнічувальним контуром зображена на рис. 3.7.

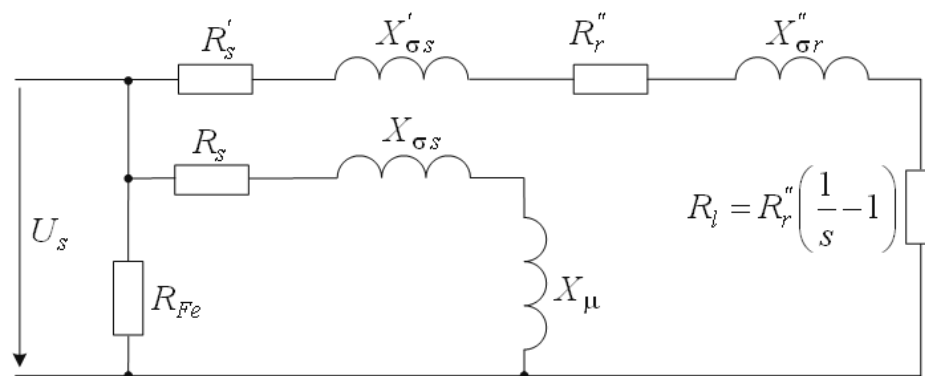


Рисунок 3.7 – Схема заміщення зведеного асинхронного двигуна

3.4.3 Режим неробочого ходу

3.4.3.1 Реактивна складова струму статора при синхронному обертанні

$$I_{s\mu s} = \frac{U_{sN}}{X_\mu \cdot (1 + k_{\sigma s})^2 \cdot (1 + C_s^2)} = \frac{220}{140,8 \cdot (1 + 0,033)^2 \cdot (1 + 0,043^2)} = 1,51 \text{ А}.$$

3.4.3.2 Електричні втрати в обмотці статора при синхронному обертанні

$$P_{el\mu} = m_s \cdot I_{s\mu s}^2 \cdot R'_s \cdot (1 + C_s^2) = 3 \cdot 1,51^2 \cdot 6,22 \cdot (1 + 0,043^2) = 42,63 \text{ Вт}.$$

3.4.3.3 Магнітні втрати в окремих елементах осердя статора:

1) для сталі марки 2013 питомі магнітні втрати $p_{1/50} = 2,6 \text{ Вт/кг}$, емпіричний показник ступеню $\beta_f = 1,5$, а поправочний коефіцієнт, який враховує збільшення

магнітних втрат через різні технологічні пошкодження листів осердя в процесі його виготовлення, для машин змінного струму приймається по [7] $K_{mag} = 1,7$;

2) розрахункова маса сталі зубців статора

$$m_{Fets} = 7,8 \cdot Q_s \cdot b_{ts} \cdot h_s \cdot l_s \cdot K_{Fe} \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 36 \cdot 3,1 \cdot 13,9 \cdot 120 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 1,4 \text{ кг};$$

3) розрахункова маса сталі спинки статора

$$\begin{aligned} m_{Feys} &= 7,8 \cdot \pi \cdot (d_{se} - h_{ys}) \cdot h_{ys} \cdot l_s \cdot K_{Fe} \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,8 \cdot \pi \cdot (131 - 9,1) \cdot 9,1 \cdot 120 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 3,2 \text{ кг}; \end{aligned}$$

4) магнітні втрати в зубцях статора при $f_s = 50$ Гц і вказаних значеннях $p_{1/50}$ і K_{mag} для сталі марки 2013

$$P_{magts} = 1,7 \cdot 2,6 \cdot B_{ts}^2 \cdot m_{Fets} = 1,7 \cdot 2,6 \cdot 1,7^2 \cdot 1,41 = 17 \text{ Вт};$$

5) магнітні втрати в спинці статора при $f_s = 50$ Гц і вказаних значеннях $p_{1/50}$ і K_{mag} для сталі марки 2013

$$P_{magys} = 4,4 \cdot B_{ys}^2 \cdot m_{Feys} = 4,4 \cdot 1,55^2 \cdot 3,2 = 38,8 \text{ Вт}.$$

3.4.3.4 Сумарні магнітні втрати в осерді статора з урахуванням додаткових втрат

$$\begin{aligned} P_{mags} &= P_{magts} \cdot \left[1 + 2 \sqrt{\frac{\tau_s}{10}} \cdot (K_C - 1)^2 \right] + P_{magys} = \\ &= 17,9 \cdot \left[1 + 2 \sqrt{\frac{7,4}{10}} \cdot (1,37 - 1)^2 \right] + 38,8 = 68,1 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

3.4.3.5 Механічні втрати при ступені захисту IP54 і способі охолодження IC411

$$P_{mec} = K_{mec} \cdot \left(\frac{n_s}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{d_{se}}{100} \right)^4, \quad (3.23)$$

де K_{mec} – коефіцієнт, що враховує механічні втрати, $K_{mec} = 1$ [7].

Підставляємо отримане значення K_{mec} у (3.23)

$$P_{mec} = 1 \cdot \left(\frac{1500}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{131}{100} \right)^4 = 6,63 \text{ Вт}.$$

3.4.3.6 Активна складова струму неробочого ходу

$$I_{sa0} = \frac{P_{el\mu} + P_{mag\ s} + P_{mec}}{m_s \cdot U_s} = \frac{42,63 + 68,1 + 6,63}{3 \cdot 220} = 0,18 \text{ A.}$$

3.4.3.7 Струм неробочого ходу

$$I_{s0} = \sqrt{I_{sa0}^2 + I_{s\mu s}^2} = \sqrt{0,18^2 + 1,51^2} = 1,52 \text{ A.}$$

3.4.3.8 Коефіцієнт потужності при неробочому ході

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{sa0}}{I_{s0}} = \frac{0,18}{1,52} = 0,118.$$

3.4.4 Параметри і характеристики номінального режиму роботи

3.4.4.1 Активний опір короткого замикання

$$R_k = R'_s + R''_r = 6,22 + 5,28 = 11,5 \text{ Ом.}$$

3.4.4.2 Індуктивний опір короткого замикання

$$X_k = X'_{\sigma s} + X''_{\sigma r} = 5,13 + 7,15 = 12,28 \text{ Ом.}$$

3.4.4.3 Повний опір короткого замикання

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{11,5^2 + 12,28^2} = 16,9 \text{ Ом.}$$

3.4.4.4 Додаткові втрати в номінальному режимі

$$P_{ad} = P_{ad\ nom} = 0,005 \cdot P_N \cdot \frac{10^3}{\eta_N} = 0,005 \cdot 1,5 \cdot \frac{10^3}{0,785} = 9,55 \text{ Вт.}$$

3.4.4.5 Механічна потужність двигуна

$$P_{mc} = P_N \cdot 10^3 + P_{mec} + P_{ad} = 1,5 \cdot 10^3 + 6,63 + 9,55 = 1516,2 \text{ Вт.}$$

3.4.4.6 Повний опір схеми заміщення

$$Z_l = \sqrt{(R_l + R_k)^2 + X_k^2}, \quad (3.24)$$

де R_l – опір схеми заміщення (див. рис. 3.7), який імітує навантаження двигуна, Ом.

Опір схеми заміщення, який імітує навантаження двигуна, знаходиться як

$$R_l = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2 \cdot P_{mc}} - R_k + \sqrt{\left(\frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2 \cdot P_{mc}} - R_k \right)^2 - Z_k^2} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 1516,2} - 11,5 + \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 1516,2} - 11,5 \right)^2 - 16,9^2} = 68,64 \text{ Ом.}$$

Підставляємо отримане значення R_l у (3.24)

$$Z_l = \sqrt{(R_l + R_k)^2 + X_k^2} = \sqrt{(68,64 + 11,5)^2 + 12,28^2} = 81,1 \text{ Ом.}$$

3.4.4.7 Ковзання у номінальному режимі

$$s_N = \frac{1}{1 + R_l / R_r''} = \frac{1}{1 + 68,64 / 5,28} = 0,071.$$

3.4.4.8 Номінальна частота обертання

$$n_N = n_s \cdot (1 - s_N) = 1500 \cdot (1 - 0,071) = 1394 \text{ об/хв.}$$

3.4.4.9 Активна складова струму статора при синхронному обертанні

$$I_{sas} = \frac{P_{el\mu} + P_{mag\ s}}{m_s \cdot U_{sN}} = \frac{42,63 + 68,1}{3 \cdot 220} = 0,168 \text{ А.}$$

3.4.4.10 Зведений струм ротора

$$I_r'' = \frac{U_{sN}}{Z_l} = \frac{220}{81,1} = 2,71 \text{ А.}$$

3.4.4.11 Активна складова струму статора

$$I_{sa} = I_{sas} + I_r'' \cdot \left(\frac{(R_l + R_k) \cdot (1 - C_s^2) + 2 \cdot X_k \cdot C_s}{Z_l \cdot (1 + C_s^2)} \right) =$$

$$I_{sa} = 0,168 + 2,71 \cdot \left(\frac{(68,64 + 11,5) \cdot (1 - 0,043^2) + 2 \cdot 12,28 \cdot 0,043}{81,1 \cdot (1 + 0,043^2)} \right) = 2,87 \text{ А.}$$

3.4.4.12 Реактивна складова струму статора

$$I_{s\mu} = I_{s\mu s} + I_r'' \cdot \left(\frac{X_k \cdot (1 - C_s^2) - 2 \cdot (R_l + R_k) \cdot C_s}{Z_l \cdot (1 + C_s^2)} \right) =$$

$$= 1,51 + 2,71 \cdot \left(\frac{12,28 \cdot (1 - 0,043^2) - 2 \cdot (68,64 + 11,5) \cdot 0,043}{81,1 \cdot (1 + 0,043^2)} \right) = 1,69 \text{ А.}$$

3.4.4.13 Фазний струм статора $I_{sN} = \sqrt{I_{sa}^2 + I_{s\mu}^2} = \sqrt{2,87^2 + 1,69^2} = 3,33 \text{ А.}$

3.4.4.14 Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_N = \frac{I_{sa}}{I_{sN}} = \frac{2,87}{3,33} = 0,862.$$

3.4.4.15 Лінійне навантаження статора

$$A_s = \frac{10 \cdot I_{sN} \cdot z_{Qs}}{a_s \cdot \tau_s} = \frac{10 \cdot 3,33 \cdot 47}{1 \cdot 7,4} = 212 \text{ A/см.}$$

3.4.4.16 Густина струму в обмотці статора

$$J_{sc} = \frac{10 \cdot I_{sN} \cdot z_{Qs}}{N_c \cdot S_{sc} \cdot a_s} = \frac{3,33}{1 \cdot 0,541 \cdot 1} = 6,16 \text{ A/мм}^2.$$

3.4.4.17 Лінійне навантаження ротора

$$A_r = \frac{A_s \cdot I_r'' \cdot (1 + k_{\sigma s}) \cdot K_{Ws} \cdot \sqrt{1 + C_s^2}}{I_{sN} \cdot K_{Wr} \cdot K_{sq}}, \quad (3.25)$$

де K_{Wr} – обмотковий коефіцієнт короткозамкненого ротора, визначається по [7], $K_{Wr} = 1$.

Підставляємо отримане значення у (3.25)

$$A_r = \frac{212 \cdot 2,71 \cdot (1 + 0,033) \cdot 0,96 \cdot \sqrt{1 + 0,043^2}}{3,33 \cdot 1 \cdot 0,994} = 172,25 \text{ A/см.}$$

3.4.4.18 Струм в стрижні ротора

$$\begin{aligned} I_{r1} &= \frac{2 \cdot m_s \cdot N_s \cdot K_{Ws} \cdot I_r'' \cdot (1 + k_{\sigma s}) \cdot \sqrt{1 + C_s^2}}{Q_r \cdot K_{sq}} = \\ &= \frac{2 \cdot 3 \cdot 282 \cdot 0,96 \cdot 2,71 \cdot (1 + 0,033) \cdot \sqrt{1 + 0,043^2}}{34 \cdot 0,994} = 134,64 \text{ A.} \end{aligned}$$

3.4.4.19 Густина струму в стрижні ротора $J_{rc} = \frac{I_{r1}}{S_{rc}} = \frac{134,64}{39,4} = 3,42 \text{ A/мм}^2.$

3.4.4.20 Струм в короткозамикальному кільці

$$I_{r2} = \frac{I_{r1}}{K_{fhr}} = \frac{134,64}{0,37} = 363,9 \text{ A.}$$

3.4.4.21 Електричні втрати в обмотці статора

$$P_{els} = m_s \cdot I_{sN}^2 \cdot R'_s = 3 \cdot 3,33^2 \cdot 6,22 = 207 \text{ Вт.}$$

3.4.4.22 Електричні втрати в обмотці ротора

$$P_{elr} = m_s \cdot (I_r'')^2 \cdot R_r' = 3 \cdot 2,71^2 \cdot 5,28 = 116,4 \text{ Вт.}$$

3.4.4.23 Сумарні втрати потужності в двигуні

$$\Delta P = P_{els} + P_{elr} + P_{mags} + P_{mec} + P_{ad} = 207 + 116,4 + 68,1 + 6,63 + 9,55 = 407,7 \text{ Вт.}$$

3.4.4.24 Потужність (електрична), що підводиться до двигуна

$$P_{in} = P_N \cdot 10^3 + \Delta P = 1,5 \cdot 10^3 + 407,7 = 1907,7 \text{ Вт.}$$

3.4.4.25 Коефіцієнт корисної дії

$$\eta_N = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}} = 1 - \frac{407,7}{1907,7} = 0,7863.$$

3.4.4.26 Уточнене значення номінальної корисної потужності двигуна

$$P_N = m_s \cdot U_{sN} \cdot I_{sN} \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_N = 3 \cdot 220 \cdot 3,33 \cdot 0,7863 \cdot 0,862 = 1489,7 \text{ Вт.}$$

4 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК

4.1 Розрахунок робочих характеристик

4.1.1 Результати основних етапів розрахунку механічних характеристик викладені в табл. 4.1. За цими результатами в загальній координатній системі побудовано залежності $I_s(P)$, $\eta(P)$, $\cos\varphi(P)$, $P_{in}(P)$, $s(P)$. Графіки наведені на рис. 4.1.

4.2 Розрахунок максимального обертового моменту

4.2.1 Для розрахунку максимального моменту використовується Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна (див. рис. 3.7).

4.2.1.1 Змінна частина коефіцієнта провідності пазового розсіяння статора

$$\lambda_{snv} = \left[\frac{3 \cdot h_{s2}}{(b_{s2} + b_{s1})} + \frac{h_{s1}}{b_{s1}} \right] \cdot K'_{\beta s}, \quad (4.1)$$

де $K'_{\beta s}$ – коефіцієнт, що враховує укорочення кроку обмотки статора, вибирається по [7], $K'_{\beta s} = 1$.

Підставляємо отримане значення $K'_{\beta s}$ у (4.1)

$$\lambda_{snv} = \left[\frac{3 \cdot 1,05}{(4,6 + 2,5)} + \frac{0,5}{2,5} \right] \cdot 1 = 0,39.$$

4.2.1.2 Складова коефіцієнта провідності розсіяння обмотки статора, залежна від насичення

$$\lambda_{sv} = \lambda_{snv} + \lambda_{sd} = 0,39 + 1,52 \approx 1,9.$$

4.2.1.3 Змінна частина коефіцієнта пазового розсіяння обмотки ротора для напівзакритого паза овальної форми

$$\lambda_{rv} = \frac{h_{r1}}{b_{r1}} = \frac{0,7}{1} = 0,7.$$

4.2.1.4 Складова коефіцієнта провідності розсіяння обмотки ротора, залежна від насичення $\lambda_{rv} = \lambda_{rnv} + \lambda_{rd} = 0,7 + 2,04 = 2,74$.