

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 4 |
| 1. Вибір головних розмірів | 5 |
| 2. Розрахунок статора та повітряного зазору | 7 |
| 3. Розрахунок ротору. | 12 |
| 4. Розрахунок намагнічуючого струму. | 15 |
| 5. Розрахунок параметрів робочого режиму. | 19 |
| 6. Розрахунок втрат. | 24 |
| 7. Розрахунок робочих характеристик. | 28 |
| 8. Розрахунок пускових характеристик. | 32 |
| 9. Тепловий та вентиляційний розрахунок. | 40 |
| Висновки. | 44 |
| Список використаної літератури. | 45 |

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ВСТУП

Електротехнічна індустрія – провідна галузь народного господарства. Продукцію електротехнічної індустрії використовують майже в усіх промислових установах і тому якість продукції електротехнічних виробів багато в чому визначає якість продукції інших галузей промисловості.

Електричні машини в загальному випадку виробництва електротехнічної індустрії займають головне місце, тому експлуатаційні характеристики електричних машин мають важливе значення для економіки нашої країни.

Проектування електричних машин – це мистецтво, поєднуюче знання процесів електромеханічних перетворень енергії з навиками, накопиченими поколіннями інженерів електромеханіків, вміння застосовувати обчислювальну техніку і талант інженерів, що створюють нову чи покращуючи вже існуючу машину.

При проектуванні електричної машини розраховуються розміри ротора і статора, вибираються типи обмоток, обмоткові проводи, ізоляція, матеріали активних і конструктивних частин машини та ін.

Окремі частини машини мають бути так сконструйовані, щоб при виготовленні машини трудоемкість і витрати були найменшими, а при експлуатації машина мала найкращі показники.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1. ВИБІР ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ

Число пар полюсів:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 2$$

Висота осі обертання:

$$h = 180 \text{ мм}$$

$$D_a = 0.322 \text{ м}$$

Внутрішній діаметр статора:

$$D = K_D \cdot D_a = 0.6 \cdot 0.322 = 0.193 \text{ м}$$

де

$$K_D = 0.6$$

Полюсна поділка:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3.14 \cdot 0.193}{2 \cdot 2} = 0.152 \text{ м}$$

Розрахункова потужність:

$$P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 45 \frac{0.99}{0.88 \cdot 0.90} = 56.25 \text{ кВт}$$

де по рис. 1.2 $k_E = 0.99$

по рис. 1.3 а $\cos \varphi = 0.88$, $\eta = 90\%$.

Електромагнітні навантаження по рис. 1.4 а:

$$A = 50 \cdot 10^3 \text{ А/м}, \quad B_\delta = 0.80 \text{ Тл}$$

Обмоточний коефіцієнт

$$k_{o\delta} = 0.91$$

Розрахункова довжина повітряного зазору по 1.4:

$$l_\delta = \frac{P'}{k_B D^2 \Omega k_{o\delta} A B_\delta} = \frac{56.25}{0.193^2 \cdot 104.72 \cdot 1.11 \cdot 0.99 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0.80} = 0.289 \quad (1.5)$$

де $k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.11$ - коефіцієнт форми поля

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

$\Omega = 2\pi \frac{n_1}{60} = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{1000}{60} = 104.72 \text{ Рад/с}$ – синхронна кутова швидкість валу
двигуна

Відношення

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0.289}{0.152} = 1.9 \quad (1.6)$$

Отримане значення λ знаходиться в рекомендованих межах

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

2. РОЗРАХУНОК СТАТОРА ТА ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ

2.1 Визначення Z_1 , ω_1 і перерізу провідників обмотки статора

Граничні значення t_1 (по рис. 6-15):

$$t_{1\max} = 0.014 \text{ мм}$$

$$t_{1\min} = 0.012 \text{ мм}$$

Число пазів статора:

$$Z_{1\min} = \frac{\pi D}{t_{1\max}} = \frac{3.14 \cdot 0.193}{0.014} \approx 43.3 \text{ шт.} \quad (2.1)$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{1\min}} = \frac{3.14 \cdot 0.193}{0.012} \approx 50.5 \text{ шт.} \quad (2.2)$$

Приймаємо $Z_1 = 48$, тоді

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{48}{4 \cdot 3} = 4 \text{ шт.} - \text{число пазів на полюс (фазу)} \quad (2.3)$$

Зубцова поділка статора (кінцева):

$$t_1 = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{3.14 \cdot 0.193}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 0.013 \text{ м} \quad (2.4)$$

Число ефективних провідників в пазу (попередньо, при умові $a=1$ по 2.4):

$$u_n = \frac{\pi D A}{I_{1H} Z_1} = \frac{3.14 \cdot 0.193 \cdot 50 \cdot 10^3}{86.088 \cdot 48} = 7.3 \approx 7 \text{ шт.} \quad (2.5)$$

$$\text{де } I_{1H} = \frac{P_2}{m U_H \eta \cos \varphi} = \frac{45000}{3 \cdot 220 \cdot 0.90 \cdot 0.88} = 86.088 \text{ А} - \text{номінальний струм статора.}$$

Приймаємо $a = 2$, тоді по 2.6 число ефективних провідників в пазу:

| | | | | | |
|-------|------|----------|---------|-------|------|
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата. | Арк. |
| Змін. | Арк. | № докум. | Підпис. | Дата. | Арк. |

Кінцеві значення по 2.7:

Число витків в фазі обмотки:

$$w_1 = \frac{u_n Z_1}{2am} = \frac{14 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 56 \text{ шт.} \quad (2.6)$$

Значення лінійного навантаження

$$A = \frac{2I_{1H} w_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 86.08 \cdot 56 \cdot 3}{3.14 \cdot 0.193} = 47.7 \cdot 10^3 \text{ A/м} \quad (2.7)$$

Потік

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1H}}{4k_B w_1 k_{o\phi 1} f_1} = \frac{0.99 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 56 \cdot 0.90 \cdot 50} = 19 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} \quad (2.8)$$

де $k_{o\phi 1} = k_p = 0.90$ - обмоточний коефіцієнт

$k_p = 0.90$ - коефіцієнт розподілення (із табл. 2.3)

$k_E = 0.99$ - по рис. 1.2

Індукція в повітряному зазорі:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = \frac{2 \cdot 19 \cdot 10^{-3}}{0.172 \cdot 0.437} = 0.53 \text{ Тл} \quad (2.9)$$

Отримані значення A і B_δ знаходяться в допустимих межах.

цільність струму в обмотці статора по (2.17):

$$J_1 = \frac{(AJ_1)}{A} = \frac{310 \cdot 10^9}{50 \cdot 10^3} = 62 \cdot 10^5 \text{ A/м}^2$$

Переріз ефективного провідника

$$q_{ef} = \frac{I_{1H}}{aJ_1} = \frac{86.08}{2 \cdot 62 \cdot 10^5} = 6.94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$n_{el} = 2$ - кількість елементарних провідників

Обмоточний провід ПЭТВ:

$$q_{el} = 1.54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$d_{el} = 1.32 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$d_{i3} = 1.405 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Щільність струму в обмотці статора:

$$J = \frac{I_{1H}}{aq_{el} n_{el}} = \frac{86.08}{2 \cdot 1.54 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 13,97 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (2.12)$$

2.2 Розрахунок розмірів зубцевої зони статора

Прийmemo попередньо значення індукції в зубцях статора та ярмі:

$$B_{z1} = 1.8 \text{ Тл}$$

$$B_a = 1.4 \text{ Тл}$$

Визначимо розміри паза:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} t_1 l_{\delta}}{B_{z1} l_{cm1} k_c} = \frac{0.8 \cdot 0.015 \cdot 0.437}{1.8 \cdot 0.437 \cdot 0.97} \approx 6.873 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

де $k_c = 0,97$ по табл. 2.4 для окисдованих листів сталі

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{cm1} k_c} = \frac{19 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1.4 \cdot 0.473 \cdot 0.97} \approx 14.8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad 14.8$$

Розміри пазу в штампі приймаємо

Прийmemo

$$\text{висота шліца: } h_{ш} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\text{ширина шліца: } b_{ш} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Тоді:

висота паза:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 9 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0.318 - 0.172}{2} - 14.8 \cdot 10^{-3} = 58.2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.15)$$

більша ширина паза:

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b_{z1} = \frac{3.14(0.172 + 2 \cdot 0.0582)}{32} - 6.873 \cdot 10^{-3} = 21.44 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.16)$$

менша ширина паза:

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_u - b_u) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{3.14(0.172 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}) - 32 \cdot 6.873 \cdot 10^{-3}}{32 - 3.14} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.17)$$

висота активної частини паза:

$$h_1 = h_n - \left(h_u + \frac{b_2 - b_u}{2} \right) = 58.2 \cdot 10^{-3} - \left(1 \cdot 10^{-3} + \frac{13 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 52.7 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.18)$$

Розміри паза в світлі з урахуванням припуску на збирання:

Прийmemo припуски на збирання по ширині та по висоті відповідно рівними:

$$\Delta b_n = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta h_n = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Тоді

$$b_1' = b_1 - \Delta b_n = 21.44 \cdot 10^{-3} - 0.2 \cdot 10^{-3} = 21.24 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.19)$$

$$b_2' = b_2 - \Delta b_n = 12 \cdot 10^{-3} - 0.2 \cdot 10^{-3} = 11.8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.20)$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_n = 52.7 \cdot 10^{-3} - 0.2 \cdot 10^{-3} = 52.5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.21)$$

Площа поперечного перерізу пазу для розміщення провідників

$$S_n' = \frac{b_1' + b_2'}{2} \cdot h_1' - S_{iz} - S_{np} = \frac{21.24 \cdot 10^{-3} + 11.8 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 52.5 \cdot 10^{-3} - 7.492 \cdot 10^{-5} - 1.93 \cdot 10^{-5} = 75.418 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (2.22)$$

де

Площа поперечного перерізу корпусної ізоляції в пазу:

| | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|------|
| | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | 10 |

$$S_{i3} = b_{i3}(2h_n + b_1 + b_2) = 0.5 \cdot 10^{-3}(2 \cdot 58.2 \cdot 10^{-3} + 21.44 \cdot 10^{-3} + 12 \cdot 10^{-3}) = 7.492 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Площа поперечного перерізу прокладок:

$$S_{np} = 1.93 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Коефіцієнт заповнення пазу

$$k_3 = \frac{d_{i3}^2 \cdot u_n \cdot n_{el}}{S_n'} = \frac{(1.405 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 20 \cdot 2}{75.418 \cdot 10^{-5}} = 0.71$$

Отримане значення k_3 лежить в допустимих межах: при $2p \geq 2$
(0.69–0.71)

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 11 |

3. РОЗРАХУНОК РОТОРУ

Число пазів ротора (по табл. 2.2):

$$Z_2 = 34$$

Зовнішній діаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\delta = 0.122 - 2 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} = 0.121 \text{ м} \quad (3.13)$$

Довжина ротора:

$$l_2 = l_1 = 0.14 \text{ м}$$

Зубцова поділка:

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{3.14 \cdot 0.121}{34} = 0.011 \text{ м}$$

Внутрішній діаметр ротора рівний діаметру валу, так як осердя безпосередньо насаджене на вал:

$$D_j = D_B = k_B D_a = 0.23 \cdot 0.225 = 0.052 \text{ м} \quad (3.3)$$

де значення коефіцієнту $k_B = 0.23$ визнач. по табл. 4.1

Струм в стержні ротора

$$I_2 = k_i I_1 \nu_i = 0.928 \cdot 20.813 \cdot 13.045 = 251.946 \text{ А} \quad (3.14)$$

де $k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos \varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.91 = 0.928$

$$\nu_i = \frac{2m_1 w_1 k_{obl}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 77 \cdot 0.95}{34} = 13.045 \text{ - коефіцієнт приведення струмів}$$

Площа поперечного перерізу стержня:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{251.946}{3 \cdot 10^6} = 83.98 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.5)$$

Значення щільності струму в стержні литої клітки приймемо рівним

$$J_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 12 |

Паз ротора – на рис. 1. Приймаємо:

Паз ротора – на рис. 1. Приймаємо:

$$b_u = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$h_u = 0.75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b'_u = 0.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Допустима ширина зубця ротора:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_2}{B_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0.756 \cdot 0.012 \cdot 0.14}{1.85 \cdot 0.14 \cdot 0.97} = 4.458 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.6)$$

Розміри паза:

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_u - 2h'_u) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2} = \frac{3.14(0.122 - 2 \cdot 0.75 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3}) - 34 \cdot 4.458 \cdot 10^{-3}}{3.14 + 34} = 5.42 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.6)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2 + \pi}{\pi} \right) - q_c \cdot 4}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{(5.42 \cdot 10^{-3})^2 \left(\frac{34}{3.14} + \frac{3.14}{2} \right) - 83.98 \cdot 10^{-6} \cdot 4}{\frac{34}{3.14} - \frac{3.14}{2}}} = 1.742 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.7)$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi} = (5.42 - 1.742) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{34}{2 \cdot 3.14} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.8)$$

Прийmemo по рис. 6.66 б

$$b_1 = 5.4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_2 = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$h_1 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Повна висота паза:

$$h_{п2} = h'_u + h_u + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0.3 + 0.75 + \frac{5.4}{2} + 20 + \frac{1.7}{2} = 0.025 \text{ мм} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.10)$$

Переріз стержня:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 = \frac{3.14}{8} (5.4^2 + 1.7^2) + \frac{1}{2} (5.4 + 1.7) \cdot 20 = 83.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.11)$$

Щільність струму в стержнях:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{251.496}{83.6 \cdot 10^{-6}} = 3.014 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2 \quad (3.12)$$

Короткозамкнуті кільця:

Площа поперечного перерізу:

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{682.644}{3.014 \cdot 10^6} = 2.664 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2 \quad (3.13)$$

де $I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{251.496}{0.369} = 682.644 \text{ А}$ – струм в короткозамкнутих кільцях.

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha_2}{Z2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{34} = 0.369$$

$$J_{кл} = 0.85 J_2 = 0.85 \cdot 3.067 \cdot 10^6 = 2.562 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \text{ – щільність струму в кільцях}$$

Розміри замикаючих кілець:

$$h_{кл} = 1.25 h_{П2} = 1.25 \cdot 25 = 31 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.14)$$

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{266.4}{31} = 8.665 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.15)$$

$$D_{к.ср} = D_2 - h_{кл} = 114 - 25 = 0.083 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.16)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 14 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

4. РОЗРАХУНОК НАМАГНІЧУЮЧОГО СТРУМУ

Значення індукцій.

Індукція в зубцях статора:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_1 l_{\delta}}{b_{z1} l_{cm1} k_c} = \frac{0.756 \cdot 9.08 \cdot 10^{-3} \cdot 0.14}{4.166 \cdot 10^{-3} \cdot 0.14 \cdot 0.97} = 1.7 \text{ Тл} \quad (4.1)$$

Індукція в зубцях ротора:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l_{\delta}}{b_{z2} l_{cm2} k_c} = \frac{0.756 \cdot 0.011 \cdot 0.14}{4.458 \cdot 10^{-3} \cdot 0.137 \cdot 0.97} = 1.882 \text{ Тл} \quad (4.2)$$

Індукція в ярі статора

$$B_a = \frac{\Phi}{2 h_a l_{cm1} k_c} = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 36.412 \cdot 10^{-3} \cdot 0.14 \cdot 0.97} = 1.3 \text{ Тл} \quad (4.3)$$

Індукція в ярі ротора:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 h_j l_{cm1} k_c} = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0.14 \cdot 0.97} = 1.578 \text{ Тл} \quad (4.4)$$

де h_j - розрахункова висота яра ротора, визначається за формулою:

$$h_j = \frac{2+p}{3.2p} \left(\frac{D2}{2} - h_{n2} \right) = \frac{2+1}{3.2 \cdot 1} \left(\frac{0.114}{2} - 22 \cdot 10^{-3} \right) = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (4.5)$$

Магнітна напруга повітряного зазору:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \delta \cdot k_{\delta} = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.756 \cdot 0.483 \cdot 10^{-3} \cdot 1.226 = 710,498 \text{ А} \quad (4.6)$$

де k_{δ} - коефіцієнт повітряного зазору, визначається за формулою:

$$k_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \delta} = \frac{9.08}{9.08 - 3.441 \cdot 0.483} = 1.224 \quad (4.7)$$

γ - коефіцієнт, що визначається за формулою:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

$$\gamma = \frac{(b_{u1} / \delta)^2}{5 + b_{u1} / \delta} = \frac{(3.5 / 0.483)^2}{5 + 3.5 / 0.483} = 3.441$$

(4.8)

Магнітні напруги зубцевих зон

статора:

$$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 16.265 \cdot 10^{-3} \cdot 1150 = 27.8 \text{ A} \quad (4.9)$$

ротора:

$$F_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot 1670 = 80.16 \text{ A} \quad (4.10)$$

де h_{z1} - розрахункова висота зубця статора, визначається за формулою:

$$h_{z1} = h_{n1} = 12.088 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (4.11)$$

h_{z2} - розрахункова висота зубця ротора, визначається за формулою:

$$h_{z2} = h_{n2} - 0.1b_2 = 22 - 0.1 \cdot 2.9 = 21.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (4.12)$$

Значення напруженості поля в зубцях статора H_{z1} та ротора H_{z2} що відповідають індукціям B_{z1} та B_{z2} для сталі 2013 визначається по додатку [ЖЗ]:

$$B_{z1} = 1.7 \text{ Тл} \quad H_{z1} = 1150 \text{ А/м}$$

$$B_{z2} = 1.88 \text{ Тл} \quad H_{z2} = 1670 \text{ А/м}$$

Коефіцієнт насичення зубцевої зони:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{27.802 + 80.16}{710.498} = 1.152 \quad (4.13)$$

Магнітні напруги ярм статора та ротора:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.296 \cdot 320 = 94.795 \text{ A} \quad (4.14)$$

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.081 \cdot 678 = 55.147 \text{ A} \quad (4.15)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 16 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

де напруженості поля в ярмах статора H_a та ротора H_j визначаються у відповідності із значеннями індукцій B_a та B_j із додатку [Ж1]:

$$H_a = 320 \text{ А/м при } B_a = 1.3 \text{ Тл}$$

$$H_j = 678 \text{ А/м при } B_j = 1.578 \text{ Тл}$$

Довжини середніх магнітних ліній потоку в ярмі статора L_a та ротора L_j визначаються за формулами:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p} = \frac{3.14(0.225 - 16 \cdot 10^{-3})}{2} = 0.296 \text{ м} \quad (4.16)$$

$$L_j = \frac{\pi(D_j - h_j)}{2p} = \frac{3.14(0.054 + 0.031)}{2} = 0.081 \text{ м} \quad (4.17)$$

де h'_j - висота спинки ротора, визначається за формулою:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} = \frac{0.121 - 0.054}{2} = 0.057 \text{ м} \quad (4.18)$$

Магнітна напруга на пару полюсів:

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 702.746 + 67.338 + 77.88 + 85.123 + 3.539 = 968.402 \text{ А} \quad (4.19)$$

Коефіцієнт насичення магнітного кола:

$$k_\mu = \frac{F_u}{F_\delta} = \frac{968.402}{710.498} = 1.363 \quad (4.20)$$

Намагнічуючий струм:

$$I_\mu = \frac{pF_u}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = \frac{1 \cdot 968.402}{0.9 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 0.96} = 4.852 \text{ А} \quad (4.21)$$

Відносне значення намагнічуючого струму:

$$I_{\mu*} = \frac{I_\mu}{I_{1H}} = \frac{4.852}{10.552} = 0.473 \quad (4.22)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО РЕЖИМУ

Активний опір фази обмотки статора:

$$r_1 = k_r \cdot \rho_g \frac{L}{q_{ef} a} = \frac{10^{-6} \cdot 83.992}{41 \cdot 1.483 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0.069 \text{ Ом} \quad (5.1)$$

де ρ_g - питомий опір матеріалу обмотки при розрахунковій температурі;

L - загальна довжина провідників фази обмотки статора, визначається за формулою:

$$L = l_{cp} w = 0.583 \cdot 144 = 83.992 \text{ мм} \quad (5.2)$$

l_{cp} - середня довжина витка обмотки, м:

$$l_{cp} = 2(l_n + l_l) = 2 \cdot (0.137 + 0.155) = 0.583 \text{ м} \quad (5.3)$$

l_n - довжина пазової частини обмотки:

$$l_n = l_1 = 0.137 \text{ м} \quad (5.4)$$

l_l - довжина лобової частини

$$l_l = K_l b_{\kappa m} + 2B = 1.4 \cdot 0.096 + 2 \cdot 0.01 = 0.155 \text{ м} \quad (5.5)$$

K_l , $K_{вил}$ - коефіцієнти, значення яких береться з таблиці 6.1 в залежності від кількості пар полюсів:

$$K_l = 1.4 \quad K_{вил} = 0.5$$

B - довжина вильоту прямолінійної частини котушок з паза від торця осердя до початку відгину лобової частини, для всипної обмотки, що вкладається в пази до запре совки осердя в корпус, беруть $B = 0.01$.

$b_{\kappa m}$ - середня ширина котушки, що визначається по дузі кола, що проходить по серединам висоти пазів:

$$b_{\kappa m} = \frac{\pi(D + h_1)}{2p} \beta_1 = \frac{3.14(0.122 + 0.016265)}{2} \cdot 1 = 0.096 \text{ м} \quad (5.6)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 19 |

Довжина вильоту лобових частин котушки:

$$l_{вил} = K_{вил} b_{кл} + B = 0.5 \cdot 0.096 + 0.01 = 0.058 \text{ м} \quad (5.7)$$

Відносне значення опору:

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0.0609 \frac{15.915}{220} = 0.004996 \quad (5.8)$$

Активний опір фази обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} = 78.09 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 2.338 \cdot 10^{-6}}{0.747^2} = 104 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (5.9)$$

де

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3.14 \cdot 3}{44} = 0.747 \quad (5.10)$$

r_c - опір стержня обмотки ротора, визначається за формулою:

$$r_c = \rho_c \frac{l_2}{q_c} k_r = \frac{10^{-6}}{20.5} \cdot \frac{0.137}{85.3 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 = 78.09 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (5.11)$$

$r_{кл}$ - опір замикаючих кілець, визначається за формулою:

$$r_{кл} = \rho_{кл} \frac{\pi D_{кл.сер}}{Z_2 q_{кл}} = \frac{10^{-6} \cdot 3.14 \cdot 0.158 \cdot 10^{-3}}{20.5 \cdot 44 \cdot 236.1 \cdot 10^{-6}} = 2.338 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (5.12)$$

В даних формулах:

ρ_c , $\rho_{кл}$ - питомий опір матеріалу стержня та замикаючих кілець відповідно при розрахунковій температурі, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

q_c , $q_{кл}$ - переріз стержня та кільця відповідно м^2 ;

k_r - коефіцієнт збільшення активного опору стержня від дії ефекту витіснення струму; при розрахунку робочих режимів в межах зміни ковзання від холостого ходу до номінального приймають $k_r = 1$.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 20 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Приводимо r_2 до числа витків обмотки статора:

$$r_2' = r_2 \frac{4m(w_1 k_{o\partial 1})^2}{Z_2} = 104 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (144 \cdot 0.137)^2}{44} = 0.542 \text{ Ом} \quad (5.13)$$

Відносне значення активного опору ротора:

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0.542 \frac{15.915}{220} = 0.039 \text{ Ом} \quad (5.14)$$

Індуктивний опір фази обмотки статора:

$$\begin{aligned} x_1 &= 15.8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta'}{pq} (\lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1}) = \\ &= 15.8 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{144}{100} \right)^2 \cdot \frac{0.137}{3 \cdot 3} (1.73 + 0.785 + 2.001) = 1.123 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (5.15)$$

де

$\lambda_{\pi 1}$ - коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора:

$$\begin{aligned} \lambda_{\pi 1} &= \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k_\beta' = \\ &= \frac{14.44 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 3.5 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 + \left(\frac{0.25}{3.5 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 0.72 \cdot 10^{-3}}{3.5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} + \frac{0.5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 1 = 1.73 \end{aligned} \quad (5.16)$$

В даній формулі:

k_β, k_β' - коефіцієнти, значення яких визначають в залежності від кроку обмотки

$$h_1 = 0.25 \text{ мм} \quad b_1 = 3.5 \text{ мм}$$

$$h_2 = 14.44 \text{ мм} \quad h_{\text{ш}} = 0.5 \text{ мм}$$

$$h_k = 0.82 \text{ мм} \quad b_{\text{ш}} = 3 \text{ мм}$$

$\lambda_{\pi 1}$ - коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання:

$$\lambda_{\pi 1} = 0.34 \frac{q}{l_\delta'} (l_\pi - 0.64 \beta \tau) = 0.34 \frac{3}{0.137} (0.155 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.088) = 0.785 \quad (5.17)$$

$\lambda_{\pi 1}$ - коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання обмотки статора:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

$$\lambda_{д1} = \frac{t_1}{12\delta \cdot k_{\delta}} \xi = \frac{9.76 \cdot 10^{-3} \cdot 1.207}{12 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot 1.226} = 2.001 \quad (5.18)$$

ξ - коефіцієнт, значення якого залежить від числа q , скорочення кроку обмотки та розмірних співвідношень зубцевих зон та повітряного зазору:

$$\xi = 2k'_{ck} k_{\beta} - k_{об}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 (1 + \beta_{ck}^2) = 2 \cdot 1.3 \cdot 1 - 0.96^2 \left(\frac{12}{9.76} \right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 1.207 \quad (5.19)$$

k'_{ck} - коефіцієнт, який визначається по рис. 6.4 б при $\beta_{ck} = 0$

Відносне значення індуктивного опору статора:

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_H} = 1.123 \frac{15.915}{220} = 0.081 \quad (5.20)$$

Індуктивний опір фази обмотки ротора:

$$x_2 = 7.9 f_1 l'_{\delta} (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) \cdot 10^{-6} = 7.9 \cdot 50 \cdot 0.137 (2.031 + 0.551 + 1.998) \cdot 10^{-6} = 247.1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (5.21)$$

$\lambda_{п2}$ - коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіяння обмотки ротора:

$$\begin{aligned} \lambda_{п2} &= \left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{uu}}{2b_1} \right] k_{д} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} + 0.3 + 1.12 \frac{h'_{uu} \cdot 10^6}{I_2} = \\ &= \left[\frac{17}{3 \cdot 6.8} \left(1 - \frac{3.14 \cdot 6.8^2}{8 \cdot 98.7} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5}{2 \cdot 6.8} \right] \cdot 1 + \frac{0.75}{1} + 0.3 + 1.12 \frac{0.3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{261.618} = 2.031 \end{aligned} \quad (5.22)$$

де

$$h_0 = 17 \text{ мм}$$

$$b_1 = 6.8 \text{ мм}$$

$$b_{uu} = 1.5 \text{ мм}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 22 |

$k_d = 1$ (для робочого режиму)

$\lambda_{\lambda 2}$ - коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання:

$$\lambda_{\lambda 2} = \frac{2.3 D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 l_{\delta}' \Delta^2} \lg \frac{4.7 D_{\text{кл.ср}}}{2 b_{\text{кл}} + h_{\text{кл}}} = \frac{2.3 \cdot 158 \cdot 10^{-3}}{44 \cdot 0.137 \cdot 0.747^2} \lg \frac{4.7 \cdot 158 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 8.507 \cdot 10^{-3} + 28 \cdot 10^{-3}} = 0.551 \quad (5.23)$$

$\lambda_{\lambda 2}$ - коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіювання обмотки ротора:

$$\lambda_{\lambda 2} = \frac{t_2}{12 \delta \cdot k_{\delta}} \xi = \frac{12}{12 \cdot 0.4 \cdot 1.226} \cdot 0.98 = 1.998 \quad (5.24)$$

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta Z}{1 - (p/Z_2)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{3.14 \cdot 3}{44} \right)^2 - \frac{0.02}{1 - \left(\frac{3}{44} \right)^2} = 0.98 \quad (5.25)$$

де $\Delta Z = 0.02$ - із рис. 6.4 а

Приведемо значення x_2 до числа витків статора:

$$x_2' = x_2 \frac{4m(w_1 k_{\text{обл}})^2}{Z_2} = 247.1 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(144 \cdot 0.96)^2}{44} = 1.288 \quad (5.26)$$

Відносне значення:

$$x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 1.288 \frac{15.915}{220} = 0.093 \quad (5.27)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 23 |

6. РОЗРАХУНОК ВТРАТ

$$P_{ст.осн.} = P_{1.0/5.0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{\Delta a} B_a^2 m_a + k_{\Delta z} B_{z1}^2 m_{z1}) =$$

$$= 2.5 \left(\frac{50}{50} \right)^{1.5} (1.6 \cdot 1.25^2 \cdot 63.825 + 1.8 \cdot 1.8^2 \cdot 20.386) = 696.12 \text{ Вт} \quad (6.1)$$

- витрати в сталі основні

де для сталі 2013 $p_{1.0/5.0} = 2.5 \text{ Вт/кг}$

$k_{\Delta a}$, $k_{\Delta z}$ - коефіцієнти що враховують вплив на втрати в сталі нерівномірності розподілення потоку по перерізам ділянок магнітопроводу та технологічних факторів. Для машин потужністю менше 250 кВт приймають:

$$k_{\Delta a} = 1.6 \text{ та } k_{\Delta z} = 1.8$$

B_a , B_{zcp} - індукція в ярмі та середня індукція в зубцях статора, Тл;

m_a , m_{z1} - маса сталі ярма та зубців статора, визначається за формулами:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{cm1} k_c \gamma_c =$$

$$= 3.14(0.437 - 0.0285) \cdot 0.0285 \cdot 0.231 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 63.825 \text{ кг} \quad (6.2)$$

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{cm1} k_c \gamma_c = 0.026 \cdot 5.35 \cdot 10^{-3} \cdot 84 \cdot 0.231 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 20.386 \text{ кг} \quad (6.3)$$

h_a - висота ярма статора, м:

$$h_a = 0.5(D_a - D) - h_{n1} = 0.5(0.437 - 0.328) - 0.026 = 0.0285 \text{ м} \quad (6.4)$$

γ_c - питома маса сталі; в розрахунках приймають $\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

h_{z1} - розрахункова висота зубця статора

b_{z1cp} - середня ширина зубця статора

Поверхневі втрати в роторі:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

$$P_{\text{ноб2}} = p_{\text{ноб}}(t_2 - b_{\text{и2}})Z_2 l_{\text{см2}} = 228.04(14.6 \cdot 10^{-3} - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 70 \cdot 0.231 = 48.23 \text{ Вт} \quad (6.5)$$

де $p_{\text{ноб2}}$ - питомі поверхневі втрати (втрати, що приходяться на 1 м^2 поверхні головок зубців ротора, визначаються за формулою:

$$p_{\text{ноб2}} = 0.5k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000} \right)^{1.5} (B_{02} t_2 \cdot 10^3)^2 =$$

$$= 0.5 \cdot 1.5 \left(\frac{84 \cdot 750}{10000} \right)^{1.5} (0.364 \cdot 0.012 \cdot 10^3)^2 = 228.04 \text{ Вт/м}^2 \quad (6.6)$$

де k_{02} - коефіцієнт, що враховує вплив обробки поверхні головок зубців ротора на питомі втрати:

$$k_{02} = 1.5$$

B_{02} - амплітуда пульсації індукції в повітряному зазорі над коронками зубців ротора

$$B_{02} = \beta_{02} k_{\delta} B_{\delta} = 0.37 \cdot 1.228 \cdot 0.804 = 0.364 \text{ Тл} \quad (6.7)$$

β_{02} - коефіцієнт, що залежить від відношення ширини шліца пазів статора до повітряного зазору. Визначається з рис. 7.1:

$$\beta_{02} = 0.37$$

Поверхневі втрати в статорі

$$P_{\text{ноб1}} = p_{\text{ноб1}}(t_1 - b_{\text{и1}})Z_1 l_{\text{см1}} = 256.8(0.012 - 3.7 \cdot 10^{-3}) \cdot 84 \cdot 0.231 = 36.318 \text{ Вт} \quad (6.8)$$

$$\text{де } p_{\text{ноб1}} = 0.5k_{01} \left(\frac{Z_2 n}{10000} \right)^{1.5} (B_{01} t_2 \cdot 10^3)^2 =$$

$$= 0.5 \cdot 1.5 \left(\frac{70 \cdot 750}{10000} \right)^{1.5} (0.365 \cdot 0.0146 \cdot 10^3)^2 = 256.8 \text{ Вт/м}^2 \quad (6.9)$$

$$k_{01} = 1.5$$

$$B_{01} = \beta_{01} k_{\delta} B_{\delta} = 0.37 \cdot 1.228 \cdot 0.804 = 0.365 \text{ Тл} \quad (6.10)$$

Пульсаційні втрати в зубцях ротора

$$P_{\text{пуль2}} = 0.11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пуль2}} \right)^2 m_{Z2} = 0.11 \left(\frac{84 \cdot 750}{1000} \cdot 0.141 \right)^2 \cdot 217.9 = 155.658 \text{ Вт} \quad (6.11)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 25 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

де $B_{\text{нул}2}$ - амплітуда пульсацій індукції в середньому перерізі зубців ротора:

$$B_{\text{нул}2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_2} B_{Z2\text{cep}} = \frac{5.568 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 14.6 \cdot 10^{-3}} \cdot 1.85 = 0.141 \text{ Тл} \quad (6.12)$$

Пульсаційні втрати в зубцях статора

$$P_{\text{нул}} = 0.11 \left(\frac{Z_2 n}{1000} B_{\text{нул}1} \right)^2 m_{Z1} = 0.11 \left(\frac{70 \cdot 750}{1000} \cdot 0.0263 \right)^2 \cdot 20.386 = 4.3 \text{ Вт} \quad (6.13)$$

$$\text{де } B_{\text{нул}1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_1} B_{Z1\text{cep}} = \frac{0.833 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 12 \cdot 10^{-3}} \cdot 1.9 = 0.0263 \text{ Тл} \quad (6.14)$$

Сума додаткових втрат в сталі:

$$P_{\text{ст.дод.}} = P_{\text{нов2}} + P_{\text{нул2}} + P_{\text{нов1}} + P_{\text{нул1}} = 36.318 + 4.3 + 48.23 + 155.65 = 244.5 \text{ Вт} \quad (6.15)$$

Повні втрати в сталі:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн.}} + P_{\text{ст.дод.}} = 696.12 + 244.5 = 940.6 \text{ Вт} \quad (6.16)$$

Механічні втрати:

$$P_{\text{мех}} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_a^4 = 0.732 \left(\frac{750}{10} \right)^2 \cdot 0.437^4 = 150.141 \text{ Вт} \quad (6.17)$$

де K_T - коефіцієнт, що залежить від зовнішнього діаметру статора:

$$K_T = 1.3(1 - D_a) = 1.3(1 - 0.437) = 0.732 \quad (6.18)$$

Додаткові втрати при номінальному режимі:

$$P_{\text{доодн.}} = 0.005 \frac{P_{2H}}{\eta} = 0.005 \frac{45 \cdot 10^3}{0.91} = 247.253 \text{ Вт} \quad (6.19)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

Холостий хід двигуна:

Струм холостого ходу двигуна:

$$I_{x.x.} \approx \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{1.835^2 + 20.01^2} = 20.09 \text{ A} \quad (6.20)$$

де $I_{x.x.a}$ - активна складова струму холостого ходу:

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{cm} + P_{мех} + P_{e.x.x.}}{mU_{1H}} = \frac{940.6 + 150.141 + 120.1}{3 \cdot 220} = 1.835 \text{ A} \quad (6.21)$$

$P_{e.x.x.}$ - електричні втрати в статорі при холостому ході, які наближено приймають рівними:

$$P_{e.x.x.} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 20.01^2 \cdot 0.1 = 120.1 \text{ Bm} \quad (6.22)$$

$$\cos \varphi_{x.x.} = \frac{I_{x.x.a}}{I_{x.x.}} = \frac{1.835}{20.09} = 0.091 \quad (6.23)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 27 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

7. РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Опір r_{12} розраховується по формулі:

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн.}}{mI_{\mu}^2} = \frac{696.12}{3 \cdot 20.01} = 0.58 \text{ Ом} \quad (7.1)$$

Опір x_{12} визначається по формулі:

$$x_{12} = \frac{U_{1H}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{20.01} - 0.231 = 10.765 \text{ Ом} \quad (7.2)$$

Коефіцієнт c_1 може наближено розраховується за формулою:

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.231}{10.765} = 1.022$$

- так як $|\gamma| \leq 1^\circ$

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} = \arctg \frac{0.1 \cdot 10.765 - 0.58 \cdot 0.231}{0.58(0.1 + 0.58) + 10.765(0.231 + 10.765)} =$$

$$= \arctg 0.008 \text{ рад} = |26'| < 1^\circ$$

активна складова струму статора:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн.} + 3I_{\mu}^2 r_1}{3U_{1H}} = \frac{696.12 + 3 \cdot 20.01^2 \cdot 0.1}{3 \cdot 220} = 1.237 \text{ А} \quad (7.6)$$

Значення розрахункових величин:

$$a' = c_1^2 = 1.022^2 = 1.044 \quad (7.7)$$

$$b' = 0 \quad (7.8)$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1.022 \cdot 0.1 = 0.1022 \quad (7.9)$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') = 1.022 \cdot (0.231 + 1.022 \cdot 0.317) = 0.567 \quad (7.10)$$

Втрати, що не змінюються при зміні ковзання:

$$P_{ст} + P_{мех} = 940.6 + 150.141 = 1090.7 \text{ Вт} \approx 1.09 \text{ кВт}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 28 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 1 Вихідні дані до розрахунку робочих характеристик асинхронного двигуна з КЗ ротором

| № п/п | Величини | Позначення | Розмірність | Значення |
|----------|---|--------------------------|-------------|----------|
| 1 | Номінальна потужність, що віддається | $P_{ном}$ | $кВт$ | 45 |
| 2 | Номінальна фазна напруга | $U_{1ном}$ | $В$ | 220 |
| 3 | Номінальний струм статора | $I_{1ном}$ | $А$ | 90.271 |
| 4 | Активна складова струму х.х. | I_{0a} | $А$ | 1.237 |
| 5 | Реактивна складова струму х.х. | $I_{0p} \approx I_{\mu}$ | $А$ | 20.01 |
| 6 | Механічні втрати потужності | $P_{мех}$ | $кВт$ | 0.15 |
| 7 | Повні втрати в сталі | $P_{ст}$ | $кВт$ | 0.94 |
| 8 | Активний опір фази обмотки статора | r_1 | $Ом$ | 0.1 |
| 9 | Індуктивний опір фази обмотки статора | x_1 | $Ом$ | 0.231 |
| 10 | Приведений активний опір фази обмотки ротора | r_2' | $Ом$ | 0.07 |
| 11 | Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора | x_2' | $Ом$ | 0.317 |
| 12 | Коефіцієнт | c_1 | - | 1.022 |
| 13 | Розрахункова величина | a | - | 0.102 |
| 14 | Розрахункова величина | b | - | 0.567 |
| 15 | Розрахункова величина | a' | - | 1.044 |
| 16 | Розрахункова величина | b' | - | 0 |

Приймаємо $s_n \approx r_{2*}' \approx 0.029$ та розраховуємо робочі характеристики, задаючись значенням ковзання:

$$s = 0.005, \quad s = 0.01, \quad s = 0.015, \quad s = 0.02, \quad s = 0.025, \quad s = 0.03.$$

Після побудови кривих уточнюємо значення номінального ковзання

$$s_{ном} = 0.0266.$$

Результати розрахунку приведені в таблиці 2. Характеристики представлені на рис. 2

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 29 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 2 Результати розрахунку робочих характеристик АД

| № | Розрахункова формула | Од. · ВИ М | Ковзання s_i | | | | | | |
|----|--|---------------------|----------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | | 0.005 | 0.01 | 0.015 | 0.02 | 0.025 | 0.03 | 0.0266 |
| 1 | $a' \cdot r_2' / s_i$ | - | 14.66 | 7.33 | 4.887 | 3.665 | 2.932 | 2.443 | 2.756 |
| 2 | $b' \cdot r_2' / s_i$ | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | $R_i = a + a' \cdot r_2' / s_i$ | Ом | 14.762 | 7.432 | 4.988 | 3.776 | 3.033 | 2.545 | 2.857 |
| 4 | $X_i = b + b' \cdot r_2' / s_i$ | Ом | 0.567 | 0.567 | 0.567 | 0.567 | 0.567 | 0.567 | 0.567 |
| 5 | $Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$ | Ом | 14.77 | 7.453 | 5.02 | 3.809 | 3.086 | 2.607 | 2.913 |
| 6 | $I_{2i}'' = U_{1n} / Z_i$ | А | 14.89 | 29.51 | 43.82 | 57.76 | 71.29 | 84.38 | 75.52 |
| 7 | $\cos \varphi_{2i}' = R_i / Z_i$ | в.о. | 0.999 | 0.997 | 0.994 | 0.989 | 0.983 | 0.976 | 0.981 |
| 8 | $\sin \varphi_{2i}' = X_i / Z_i$ | в.о. | 0.038 | 0.076 | 0.113 | 0.149 | 0.184 | 0.218 | 0.195 |
| 9 | $I_{lai} = I_{0a} + I_{2i}'' \cdot \cos \varphi_{2i}'$ | А | 16.119 | 30.67 | 44.778 | 58.351 | 71.31 | 83.595 | 75.31 |
| 10 | $I_{lpi} = I_{0p} + I_{2i}'' \cdot \sin \varphi_{2i}'$ | А | 20.58 | 22.257 | 24.96 | 28.61 | 33.11 | 38.373 | 34.72 |
| 11 | $I_{li} = \sqrt{I_{lai}^2 + I_{lpi}^2}$ | А | 26.14 | 37.894 | 51.26 | 64.99 | 78.62 | 91.981 | 82.93 |
| 12 | $I_{2i}' = c_1 \cdot I_{2i}''$ | А | 15.22 | 30.165 | 44.783 | 59.025 | 72.85 | 86.23 | 77.18 |
| 13 | $P_{li} = 3 \cdot U_{1n} \cdot I_{lai} \cdot 10^{-3}$ | кВт | 10.638 | 20.24 | 29.55 | 38.512 | 47.06 | 55.173 | 49.71 |
| 14 | $P_{eli} = 3 \cdot I_{li}^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$ | кВт | 0.205 | 0.431 | 0.788 | 1.267 | 1.854 | 2.538 | 2.063 |
| 15 | $P_{emi} = P_{li} - P_{cm} - P_{eli}$ | кВт | 9.5 | 18.87 | 27.825 | 36.3 | 44.27 | 51.694 | 46.7 |
| 16 | $P_{e2i} = s_i \cdot P_{emi}$ | кВт | 0.047 | 0.189 | 0.417 | 0.726 | 1.107 | 1.551 | 1.242 |
| 17 | $P_{\partial i} = 0.005 \cdot P_{li}$ | кВт | 0.053 | 0.101 | 0.148 | 0.193 | 0.235 | 0.276 | 0.249 |
| 18 | $\Sigma P_i = P_{cm} + P_{mexi} + P_{el} + P_{e2i} + P_{\partial i}$ | кВт | 1.396 | 1.811 | 2.444 | 3.276 | 4.287 | 5.455 | 4.645 |
| 19 | $P_{2i} = P_{li} - \Sigma P_i$ | кВт | 9.242 | 18.43 | 27.11 | 35.23 | 42.77 | 49.717 | 45.06 |
| 20 | $\eta_1 = 1 - \Sigma P_i / P_{li}$ | в.о. | 0.869 | 0.911 | 0.917 | 0.915 | 0.909 | 0.901 | 0.907 |
| 21 | $\cos \varphi_i = I_{lai} / I_{li}$ | в.о. | 0.617 | 0.809 | 0.873 | 0.898 | 0.907 | 0.909 | 0.908 |

8. РОЗРАХУНОК ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Розрахуємо точки характеристик, що відповідають ковзанню:

$$s = 1, s = 0.8, s = 0.5, s = 0.2, s = 0.1$$

Докладний розрахунок проведений для ковзання $s = 1$. Дані розрахунку інших точок зведені в таблицю 3 Пускові характеристики спроектованого двигуна представлені на рис. 3.

Приведена висота стержня ξ :

$$\xi = 63.61 h_c \sqrt{s} = 63.61 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1} = 1.4 \quad (8.1)$$

$$\text{де } h_c = h_n - (h_{uu} + h'_{uu}) = 0.023 - (0.7 \cdot 10^{-3} + 0.3 \cdot 10^{-3}) = 0.022$$

Для даного значення ξ :

по рис. 9.1 $\varphi = 0.25$

Глибина проникнення струму:

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0.022}{1 + 0.25} = 0.0176 \text{ м} \quad (8.2)$$

Площа перерізу q_r :

$$\begin{aligned} q_r &= \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \\ &= \frac{3.14 \cdot (7.67 \cdot 10^{-3})^2}{8} + \frac{7.67 \cdot 10^{-3} + 6.4 \cdot 10^{-3}}{2} \left(17.6 \cdot 10^{-3} - \frac{7.67 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 120.3 \text{ мм}^2 \end{aligned} \quad (8.3)$$

де

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 7.67 \cdot 10^{-3} - \frac{7.67 \cdot 10^{-3} - 6.35 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} \left(17.6 \cdot 10^{-3} - \frac{7.67 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 6.4 \text{ мм} \quad (8.4)$$

Коефіцієнт k_r :

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{143.9}{120.3} = 1.196 \quad (8.5)$$

Коефіцієнт загального збільшення опору фази ротора під дією ефекту витіснення струму:

$$K_r = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1) = 1 + \frac{7.85 \cdot 10^{-5}}{1.007 \cdot 10^{-4}} (1.196 - 1) = 1.152 \quad (8.6)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 32 |

Приведений активний опір ротора з врахуванням дії ефекту витіснення струму:

$$r'_{2\xi} = K_R r'_2 = 1.152 \cdot 0.07 = 0.081 \quad (8.7)$$

коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіяння ротора з урахуванням ефекту витіснення струму розраховується за формулою:

$$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = 1.97 - 0.12 = 1.85 \quad (8.8)$$

$$\text{де } \Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda'_{\Pi 2} \cdot (1 - k_o) = 1.202 \cdot (1 - 0.9) = 0.12$$

$$\lambda'_{\Pi 2} = \left[\frac{h0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{\text{ш}}}{2b_1} \right] = 1.202$$

Зміна індуктивного опору фази обмотки ротора від дії ефекту витіснення струму:

$$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\text{Д2}}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\text{Д2}}} = \frac{1.85 + 0.477 + 2.5}{1.97 + 0.477 + 2.5} = 0.976 \quad (8.9)$$

Індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення струму:

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 0.317 \cdot 0.976 = 0.309 \text{ Ом} \quad (8.10)$$

Пускові параметри:

- індуктивний опір взаємоіндукції

$$x_{12n} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 1.371 \cdot 10.765 = 14.76$$

- коефіцієнт

$$c_{\text{с1нас}} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}} = 1 + \frac{0.231}{14.76} = 1.016$$

$$R_n = r_1 + \frac{c_{1n} \cdot r'_{2\xi}}{s} = 0.1 + \frac{1.016 \cdot 0.081}{1} = 0.182 \text{ Ом}$$

$$X_n = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi} = 0.231 + 1.016 \cdot 0.309 = 10.545 \text{ Ом}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 33 |

Струм в обмотці ротора:

$$I'_{2\xi} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.182^2 + 0.545^2}} = 382.742 \text{ A} \quad (8.11)$$

Струм в обмотці статора:

$$I_{1n} = I'_{2\xi} \cdot \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}}{c_{1n} \cdot x_{12n}} = 382.742 \cdot \frac{\sqrt{0.182^2 + (0.545 + 14.76)^2}}{1.016 \cdot 14.76} = 390.7 \text{ A} \quad (8.12)$$

Таблиця 3 Розрахунок струмів із врахуванням впливу зміни параметрів під впливом ефекту витіснення струму

| № | Розрахункова формула | Розмірність | Ковзання s | | | | | |
|----|--|-------------|------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | | 1 | 0.8 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.15 |
| 1 | $\xi = 63.61 h_c \sqrt{s}$ | - | 1.4 | 1.252 | 0.99 | 0.626 | 0.443 | 0.542 |
| 2 | $\varphi(\xi)$ | - | 0.25 | 0.18 | 0.09 | 0.013 | 0.0034 | 0.076 |
| 3 | $h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}$ | м | 0.0176 | 0.019 | 0.02 | 0.022 | 0.022 | 0.02 |
| 4 | $k_r = \frac{q_c}{q_r}$ | - | 1.196 | 1.133 | 1.052 | 0.981 | 0.976 | 1.04 |
| 5 | K_R | - | 1.152 | 1.103 | 1.041 | 0.985 | 0.981 | 1.031 |
| 6 | $r'_{2\xi} = K_R r'_2$ | Ом | 0.081 | 0.077 | 0.073 | 0.069 | 0.069 | 0.072 |
| 7 | $\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{n2} - \Delta \lambda_{\Pi 2\xi}$ | - | 1.85 | 1.885 | 1.921 | 1.946 | 1.958 | 1.952 |
| 8 | $k_{\gamma} = \varphi'(\xi)$ | - | 0.9 | 0.93 | 0.96 | 0.98 | 0.99 | 0.985 |
| 9 | $K_x = \Sigma \lambda_{n2\xi} / \Sigma \lambda_2$ | - | 0.976 | 0.983 | 0.99 | 0.995 | 0.998 | 0.996 |
| 10 | $x'_{2\xi} = x'_2 K_x$ | Ом | 0.309 | 0.312 | 0.314 | 0.315 | 0.316 | 0.316 |
| 11 | $R_n = r_1 + \frac{c_{1n} \cdot r'_{2\xi}}{s}$ | Ом | 0.182 | 0.198 | 0.248 | 0.451 | 0.8 | 0.59 |
| 12 | $X_n = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi}$ | Ом | 0.545 | 0.548 | 0.55 | 0.551 | 0.552 | 0.552 |
| 13 | $I'_{2\xi} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}}$ | А | 382.7 | 377.8 | 364.6 | 308.8 | 226.4 | 272.3 |
| 14 | $I_{1n} = I'_{2\xi} \cdot \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}}{c_{1n} \cdot x_{12n}}$ | А | 390.7 | 385.8 | 372.4 | 315.5 | 231.5 | 278.3 |

Середня магніторушійна сила (МРС) обмотки, віднесена до одного пазу обмотки статора:

$$F_{n.c.p.} = 0.7 \frac{k_{nac} I_1 u_{n1}}{a} (k'_\beta + k_{y1} \cdot k_{o61} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}) = 0.7 \frac{1.35 \cdot 390.7 \cdot 5}{2} \left(1 + 1 \cdot 0.911 \frac{84}{70} \right) = 1932 \text{ A} \quad (8.13)$$

По середній МРС розрахуємо фіктивну індукцію потоку розсіяння в повітряному зазорі:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.c.p.}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-6} = \frac{1932}{1.6 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot 0.947} = 3.19 \text{ Тл} \quad (8.14)$$

де C_N - коефіцієнт, що дорівнює:

$$C_N = 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{0.4}{0.012 + 0.0146}} = 0.947 \quad (8.15)$$

По кривій на рис. 9.5 для $B_{\phi\delta} = 3.19 \text{ Тл}$ визначається відношення потоку розсіяння при насиченні до потоку розсіяння ненасиченої машини, що характеризується коефіцієнтом χ_δ :

$$\chi_\delta = 0.68$$

Розрахуємо коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіяння обмотки статора з урахуванням впливу насичення.

Значення додаткового розкриття пазів статора:

$$c_1 = (t_1 - b_{u1})(1 - \chi_\delta) = (12 - 3.7)(1 - 0.68) = 2.65 \text{ м} \quad (8.16)$$

Зменшення коефіцієнта провідності розсіяння, що викликається насиченням від полів розсіяння:

$$\Delta\lambda_{\Pi\text{нас}} = \frac{h_{u1} + 0.58h_k}{b_{u1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + 1.5b_{u1}} = \frac{0.6 + 0.58 \cdot 1.76}{3.7} \cdot \frac{2.65}{2.65 + 1.5 \cdot 3.7} = 0.142 \quad (8.17)$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіяння при насиченні $\lambda_{\Pi\text{нас}}$ визначається для статора за виразом:

$$\lambda_{\Pi\text{нас}} = \lambda_{\Pi} - \Delta\lambda_{\Pi\text{нас}} = 1.486 - 0.142 = 1.344 \quad (8.18)$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіяння обмотки статора з урахуванням впливу насичення визначається за формулою:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 35 |

$$\lambda_{\text{Д1нас}} = \lambda_{\text{Д1}} \cdot \chi_{\delta} = 1.711 \cdot 0.68 = 1.163 \quad (8.19)$$

Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням впливу насичення:

$$x_{1\text{нас}} = x_1 \frac{\Sigma \lambda_{1\text{нас}}}{\Sigma \lambda_1} = 0.231 \frac{3.45}{4.139} = 0.193 \quad (8.20)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \Sigma \lambda_{\text{нас}} &= \lambda_{\text{П1нас}} + \lambda_{\text{Д1нас}} + \lambda_{\text{Л1}} = 1.344 + 1.163 + 0.943 = 3.45 \\ \Sigma \lambda_1 &= \lambda_{\text{П1}} + \lambda_{\text{Д1}} + \lambda_{\text{Л1}} = 1.711 + 0.943 + 1.486 = 4.139 \end{aligned}$$

Зменшення коефіцієнта провідності розсіяння, що викликається насиченням від полів розсіяння:

$$\Delta \lambda_{\text{П2нас}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} \cdot \frac{c_2}{b_{\text{ш2}} + c_2} = \frac{0.7}{1.5} \cdot \frac{4.19}{1.5 + 4.19} = 0.344 \quad (8.21)$$

де c_2 - значення додаткового розкриття пазів ротора, визначається за формулою:

$$c_2 = (t_2 - b_{\text{ш2}})(1 - \chi_{\delta}) = (14.6 - 1.5)(1 - 0.68) = 4.19 \quad (8.22)$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіяння при насиченні $\lambda_{\text{П1нас}}$ визначається для статора за виразом:

$$\lambda_{\text{П2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{П2}\xi} - \Delta \lambda_{\text{П2нас}} = 1.85 - 0.344 = 1.506 \quad (8.23)$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференційного розсіяння ротора з урахуванням впливу насичення:

$$\lambda_{\text{Д2нас}} = \lambda_{\text{Д2}} \chi_{\delta} = 2.5 \cdot 0.68 = 1.731 \quad (8.24)$$

Приведений індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням впливу витіснення струму та насичення:

$$x'_{2\xi\text{нас}} = x'_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xi\text{нас}}}{\Sigma \lambda_2} = 0.317 \frac{3.71}{4.991} = 0.236 \quad (8.25)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \Sigma \lambda_{2\xi\text{нас}} &= \lambda_{\text{П2}\xi\text{нас}} + \lambda_{\text{Д2нас}} + \lambda_{\text{Л2}} = 1.506 + 1.731 + 0.477 = 3.71 \\ \Sigma \lambda_2 &= \lambda_{\text{П2}} + \lambda_{\text{Д2}} + \lambda_{\text{Л2}} = 1.97 + 0.477 + 2.5 = 4.991 \end{aligned}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 36 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Розрахунок струмів та моментів:

Значення коефіцієнтів $R_{\text{нас}}$ та $X_{\text{нас}}$:

$$R_{\text{нас}} = r_1 + c_{1\text{нас}} \frac{r_{2\xi}'}{s} = 0.1 + 1.013 \frac{0.081}{1} = 0.184 \quad (8.26)$$

$$X_{\text{нас}} = x_{1\text{нас}} + c_{1\text{нас}} x_{2\xi\text{нас}}' = 0.193 + 1.013 \cdot 0.236 = 0.431 \quad (8.27)$$

$$\text{де } c_{1\text{нас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{n}}} = 1 + \frac{0.193}{14.76} = 1.013$$

Струм в обмотці ротора:

$$I_{2\text{нас}}' = \frac{U_{\text{H}}}{\sqrt{R_{\text{нас}}^2 + X_{\text{нас}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.184^2 + 0.431^2}} = 468.87 \text{ A} \quad (8.28)$$

Струм в обмотці статора:

$$I_{1\text{нас}} = I_{2\text{нас}}' \frac{\sqrt{R_{\text{нас}}^2 + (X_{\text{нас}} + x_{12\text{n}})^2}}{c_{1\text{нас}} x_{12\text{n}}} = \frac{\sqrt{0.184^2 + (0.431 + 14.76)^2}}{1.013 \cdot 14.76} = 476.4 \text{ A} \quad (8.29)$$

Відносне значення пускового струму:

$$I_{\text{П*}} = \frac{I_{1\text{нас}}}{I_{1\text{H}}} = \frac{476.4}{82.9} = 5.747 \quad (8.30)$$

Відносне значення пускового моменту:

$$M_{\text{П*}} = \left(\frac{I_{2\text{нас}}'}{I_{2\text{H}}'} \right)^2 K_R \frac{s_{\text{H}}}{s_{\text{n}}} = \left(\frac{468.87}{77.18} \right)^2 \cdot 1.152 \cdot \frac{0.0266}{1} = 1.131 \quad (8.31)$$

Критичне ковзання визначаємо після розрахунку всіх точок пускових характеристик по середнім значенням ковзання $x_{1\text{нас}}$ та $x_{2\xi\text{нас}}$, що відповідають ковзанню $s = 0.2 - 0.1$:

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2'}{\frac{x_{1\text{нас}}}{c_{1\text{нас}}} + x_{2\xi\text{нас}}'} = \frac{0.07}{\frac{0.2046}{1.014} + 0.2602} \approx 0.15 \quad (8.32)$$

Кратності пускового та максимального моментів та пускового струму спроектованого двигуна задовольняють вимогам ГОСТ.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 37 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Таблиця 4 Розрахунок струмів і моменту у пусковому режимі АД із врахуванням впливу ефекту витіснення струму і насичення від полів розсіювання

| № | Розрахункова формула | Розм і рніст ь | Ковзання s | | | | | |
|----|---|----------------|------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,15 |
| 1 | $k_{нас}$ | - | 1.35 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.05 | 1.075 |
| 2 | $F_{н.ср.} = 0.7 \frac{k_{нас} I_{1u_{n1}}}{a} (k_{\beta}' + k_{y1} \cdot k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2})$ | A | 1932 | 1837 | 1637 | 1271 | 890.64 | 1096 |
| 3 | $B_{\phi\delta} = \frac{F_{н.ср.}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-6}$ | Tл | 3.19 | 3.033 | 2.702 | 2.099 | 1.47 | 1.809 |
| 4 | $C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}$ | - | 0.947 | 0.947 | 0.947 | 0.947 | 0.947 | 0.947 |
| 5 | $\chi_{\delta} = f(B_{\phi\delta})$ | - | 0.68 | 0.7 | 0.75 | 0.85 | 0.94 | 0.88 |
| 6 | $c_1 = (t_1 - b_{u1})(1 - \chi_{\delta})$ | - | 2.65 | 2.49 | 2.075 | 1.245 | 0.498 | 0.996 |
| 7 | $\lambda_{П1нас} = \lambda_{П1} - \Delta\lambda_{П1нас}$ | - | 1.344 | 1.35 | 1.367 | 1.405 | 1.45 | 1.419 |
| 8 | $\lambda_{Д1нас} = \lambda_{Д1} \cdot \chi_{\delta}$ | - | 1.163 | 1.198 | 1.283 | 1.454 | 1.608 | 1.506 |
| 9 | $x_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1}$ | Ом | 0.193 | 0.195 | 0.2 | 0.212 | 0.223 | 0.216 |
| 10 | $c_{1нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}}$ | - | 1.013 | 1.013 | 1.014 | 1.014 | 1.015 | 1.015 |
| 11 | $c_2 = (t_2 - b_{u2})(1 - \chi_{\delta})$ | - | 4.19 | 3.93 | 3.275 | 1.965 | 0.786 | 1.572 |
| 12 | $\lambda_{П2\xi нас} = \lambda_{П2\xi} - \Delta\lambda_{П2нас}$ | - | 1.506 | 1.547 | 1.601 | 1.681 | 1.798 | 1.713 |
| 13 | $\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2} \chi_{\delta}$ | - | 1.731 | 1.781 | 1.909 | 2.163 | 2.392 | 2.24 |
| 14 | $x_{2\xi нас}' = x_2' \frac{\sum \lambda_{2\xi нас}}{\sum \lambda_2}$ | Ом | 0.236 | 0.242 | 0.253 | 0.274 | 0.296 | 0.281 |
| 15 | $R_{нас} = r_1 + c_{1нас} \frac{r_{2\xi}'}{s}$ | Ом | 0.184 | 0.206 | 0.269 | 0.523 | 0.946 | 0.664 |
| 16 | $X_{нас} = x_{1нас} + c_{1нас} x_{2\xi нас}'$ | Ом | 0.431 | 0.44 | 0.457 | 0.491 | 0.524 | 0.501 |
| 17 | $I_{2нас}' = \frac{U_H}{\sqrt{R_{нас}^2 + X_{нас}^2}}$ | A | 468.87 | 453.3 | 414.8 | 306.9 | 203.4 | 264.5 |
| 18 | $I_{1нас} = I_{2нас}' \frac{\sqrt{R_{нас}^2 + (X_{нас} + x_{12n})^2}}{c_{1нас} x_{12n}}$ | A | 476.4 | 460.7 | 422 | 312.8 | 207.9 | 269.8 |
| 19 | $I_{П*} = \frac{I_{1нас}}{I_{1н}}$ | - | 5.747 | 5.558 | 5.091 | 3.773 | 2.508 | 3.254 |
| 20 | $M_{П*} = \left(\frac{I_{2нас}'}{I_{2H}} \right)^2 K_R \frac{s_n}{s_n}$ | - | 1.131 | 1.265 | 1.6 | 2.071 | 1.813 | 2.147 |

9. ТЕПЛОВИЙ ТА ВЕНТИЛЯЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК

Перевищення температури внутрішньої поверхні осердя статора над температурою повітря всередині двигуна:

$$\Delta \vartheta_{\text{ноел}} = K \frac{P'_{\text{э.лп}} + P_{\text{см.осн}}}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0.19 \frac{1110 + 696.12}{3.14 \cdot 0.328 \cdot 0.231 \cdot 96} = 14.24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.1)$$

де K - коефіцієнт, значення якого залежить від способу захисту та кількості пар полюсів асинхронного двигуна, знаходиться з табл. 10.1

Для двигуна зі способом захисту $IP44$ та $2p = 8$ значення коефіцієнту:
 $K = 0.18$

α_1 - середнє значення коефіцієнту тепловіддачі з поверхні, дорівнює:

$$\alpha_1 = 96 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$P'_{\text{э.лп}}$ - електричні втрати в пазовій частині статора; визначаються за формулою:

$$P'_{\text{э.лп}} = k_p P_{\text{эл}} \frac{2l_1}{l_{cp}} = 1.07 \cdot 2.063 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 0.231}{0.918} = 1110 \text{ Bm} \quad (9.2)$$

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора:

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{\text{із.лп}} &= \frac{P'_{\text{э.лп}}}{Z_1 \Pi_{\text{лп}} l_1} \left(\frac{b_{\text{із.лп}}}{\lambda_{\text{екв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{\text{екв}}} \right) = \\ &= \frac{1110}{84 \cdot 0.068 \cdot 0.231} \left(\frac{0.4 \cdot 10^{-3}}{0.16} + \frac{8.87 \cdot 10^{-3} + 7.083 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 1.4} \right) = 2.705 \text{ } ^\circ\text{Ci} \end{aligned} \quad (9.3)$$

де $\Pi_{\text{лп}}$ - розрахунковий периметр поперечного перерізу паза статора, що дорівнює:

$$\Pi_{\text{лп}} = 2h_n + b_1 + b_2 = 2 \cdot 26 + 8.87 + 7.083 = 67.9 \approx 0.068 \text{ м} \quad (9.4)$$

$\lambda_{\text{екв}}$ - середня еквівалентна теплопровідність пазової ізоляції. Для ізоляції класу нагрівостійкості F :

$$\lambda_{\text{екв}} = 0.16 \frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 40 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

$\lambda'_{екв}$ - середнє значення коефіцієнту теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки всипної обмотки із емальованих провідників з врахуванням нещільності прилягання провідників один до одного.

Значення $\lambda'_{екв}$ по рис. 10.3 $\frac{d_{ел}}{d_{іх}} = \frac{1.6}{1.685} = 0.95$ рівне:

$$\lambda'_{екв} = 1.4$$

Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин:

$$\Delta \vartheta_{із..л1} = \frac{P'_{Э..л1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}} \left(\frac{b_{із..л1}}{\lambda'_{екв}} + \frac{h_{л1}}{12\lambda'_{екв}} \right) = \frac{1099}{2 \cdot 84 \cdot 0.068 \cdot 0.229} \left(\frac{0}{0.16} + \frac{0.026}{12 \cdot 1.4} \right) = 0.652 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.5)$$

де $\Pi_{л1}$ - периметр умовної поверхні охолодження лобової частини однієї котушки.

$$\Pi_{л1} \approx \Pi_{л1} = 0.068 \text{ м}$$

$P'_{Э..л1}$ - електричні втрати в лобових частинах котушки. Вони дорівнюють:

$$P'_{Э..л1} = k_p P_{Э1} \frac{2l_{л1}}{l_{cp}} = 1.07 \cdot 2063 \cdot \frac{2 \cdot 0.229}{0.918} = 1099 \text{ Вт} \quad (9.6)$$

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря всередині машини:

$$\Delta \vartheta_{нов..л1} = \frac{KP'_{Э..л1}}{2\pi D l_{вил1} \alpha_1} = \frac{0.18 \cdot 1099}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.328 \cdot 0.08 \cdot 96} = 12.57 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.7)$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині машини:

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta'_1 &= \frac{(\Delta \vartheta_{нов..л1} + \Delta \vartheta_{із..л1}) 2l_1}{l_{cp1}} + \frac{(\Delta \vartheta_{із..л1} + \Delta \vartheta_{нов..л1}) 2l_1}{l_{cp1}} = \\ &= \frac{(14.24 + 2.705) \cdot 2 \cdot 0.237}{0.918} + \frac{(0.652 + 12.57) \cdot 2 \cdot 0.237}{0.918} = 15.09 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (9.8)$$

Перевищення температури повітря всередині машини над температурою оточуючого середовища:

$$\Delta \vartheta_B = \frac{\Sigma P'_B}{S_{кор} \alpha_B} = \frac{3261}{1.93 \cdot 18} = 93.513 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.9)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 41 |

де $\Sigma P'_B$ - сума втрат, що відводяться на повітря всередині двигуна:

$$\begin{aligned}\Sigma P'_B &= \Sigma P' - (1 - K)(P'_{\Sigma.П1} + P_{ст.осн.}) - 0.9P_{мех} = \\ &= 4876 - (1 - 0.18)(1110 + 696.12) - 0.9 \cdot 150.141 = 3261 \text{ Вт}\end{aligned}\quad (9.10)$$

В даній формулі:

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1)(P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}) = 4.645 \cdot 10^3 + (1.07 - 1)(2.063 \cdot 10^3 + 1.242 \cdot 10^3) = 4876 \text{ Вт}\quad (9.11)$$

$s_{кор}$ - еквівалентна поверхня охолодження корпусу:

$$s_{кор} = (\pi D_a + 8 \Pi_p)(l_1 + 2l_{вил1}) = (3.14 \cdot 0.437 + 8 \cdot 0.45)(0.231 + 2 \cdot 0.08) = 1.93 \text{ м}^2\quad (9.12)$$

де Π_p - умовний периметр поперечного перерізу ребер станіни. Значення Π_p може бути взяте наближено по кривій на рис. 10.4 $h = 250 \text{ мм}$:

$$\Pi_p = 0.45 \text{ м}$$

α_B - коефіцієнт підігріву повітря, що враховує тепловіддаючу властивість поверхні корпусу та інтенсивність перемішування повітря всередині машини. Для $D_a = 0.437 \text{ м}$ рис. 10.1

$$\alpha_B = 18 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою оточуючого середовища:

$$\Delta \theta_1 = \Delta \theta'_1 + \Delta \theta'_{B1} = 15.09 + 93.513 = 108.6 \text{ }^\circ \text{C}\quad (9.13)$$

Розрахунок вентиляції.

Необхідна для охолодження витрата повітря:

$$Q_B = \frac{k_m \Sigma P'_B}{1100 \Delta \theta_B} = \frac{4.526 \cdot 3261}{1100 \cdot 93.513} = 0.143 \text{ м}^3/\text{с}\quad (9.14)$$

де k_m - коефіцієнт, що враховує зміну умов охолодження по довжині поверхні корпусу, що обдувається зовнішнім вентилятором:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 42 |

$$k_m = m \sqrt{\frac{n}{100} D_a} = 2.5 \sqrt{\frac{750}{100} \cdot 0.437} = 4.526 \quad (9.15)$$

де коефіцієнт $m = 2.5$ для двигунів з $2p \geq 4$ при $h \geq 160$ мм

Витрата повітря, що забезпечується зовнішнім вентилятором:

$$Q'_B = 0.6 D_a^3 \frac{n}{100} = 0.6 \cdot 0.437^3 \frac{750}{100} = 0.376 \text{ м}^3/\text{с} \quad (9.16)$$

$$Q'_B > Q_B$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 43 |

ВИСНОВКИ

В даній курсовій роботі я поглибила свої навички в галузі проектування електричних машин та навчилася визначати за вихідними даними характеристики асинхронного двигуна, такі як: головні розміри, зубцеву поділку статора та ротора, робочі та пускові характеристики, переріз обмотки статора та ротора, розміри зубцевої зони статора та повітряного зазору, температурний режим, головні та додаткові втрати, які в свою чергу складаються з основних втрат в сталі, поверхневих втрат в роторі, пульсуючих втрат в зубцях ротора, додаткових втрат в сталі та механічних втрат.

Головні дані розрахунків зведені і представлені на графіках.

Спроектований двигун належить до серії 4А та відповідає ДСТУ.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 44 |

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. И.П. Копылов «Проектирование электрических машин» - М.; Энергия, 1980 г.
2. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник /А.Э. Кравчик – М.; Энергоатомиздат, 1982 г.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 45 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |