

bodies, the importance of stakeholder engagement, spatial planning tools, and sustainable land use practices are analyzed. The necessity of implementing an integrated approach to land resource management in the context of decentralization is substantiated.

Keywords: land resource management, sustainable land use, spatial planning, stakeholders, agroecological zoning, land policy.

УДК 621.5

DOI 10.31521/978-617-7149-94-0-129

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ ТА ВТРАТ

Ставинський А.А., д-р техн. наук, професор

Миколаївський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7573-9238>

Садовий О.С., канд. тех. наук, доцент

Миколаївський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7369-0714>

Анотація: У роботі розглянуто вплив електромагнітних процесів на надійність асинхронного двигуна із зубчастим ротором (АДЗР). Проаналізовано причини виникнення вібрацій, зокрема дію зубцевих гармонік та ексцентриситету повітряного зазору. Запропоновано удосконалену конструкцію двопакетного ротора зі зміщенням пакетів і використанням проміжних короткозамикаючих кілець. Обґрунтовано доцільність феромагнітного закриття проміжного кільця та оптимізації геометрії зубців ротора. Показано, що запропоновані рішення забезпечують зниження вібрацій, втрат і металоємності, а також підвищення енергоефективності та надійності двигуна.

Ключові слова: асинхронний двигун, зубчастий ротор, електромагнітні сили, вібрації, зубцеві гармоніки, ексцентриситет, двопакетний ротор, енергоефективність, надійність.

У сучасних умовах розвитку електротехнічних систем актуальним є підвищення енергоефективності та надійності асинхронних двигунів, зокрема двигунів із зубчастим ротором (АДЗР), які широко застосовуються в промисловості. Значний вплив на їх роботу мають електромагнітні процеси, зокрема наявність зубцевих гармонік і ексцентриситету повітряного зазору, що призводять до підвищених вібрацій, шуму, додаткових втрат і зниження ресурсу елементів двигуна [1]. Традиційні методи зменшення цих негативних явищ, такі як скіс пазів ротора, мають обмежену ефективність через виникнення додаткових осьових сил та ускладнення конструкції [2]. У зв'язку з цим актуальним є розроблення нових конструктивних рішень, спрямованих на зменшення впливу електромагнітних збурень без погіршення інших характеристик двигуна.

Метою роботи є підвищення ефективності, надійності та експлуатаційних характеристик АДЗР шляхом удосконалення конструкції ротора та оптимізації його геометричних параметрів.

Результати дослідження. Надійність асинхронного двигуна з зубчастим ротором (АДЗР) визначається сукупністю теплових, електромагнітних та механічних процесів, серед яких одним із ключових факторів є вібрації, що виникають під дією електромагнітних сил [3]. Традиційним способом зниження зубцевих гармонік є скіс пазів ротора (рис. 1), однак такий підхід супроводжується появою осьових електромагнітних сил, які визначаються виразом (1), що, у свою чергу, викликає додаткові вібрації та знижує загальну надійність двигуна [2].

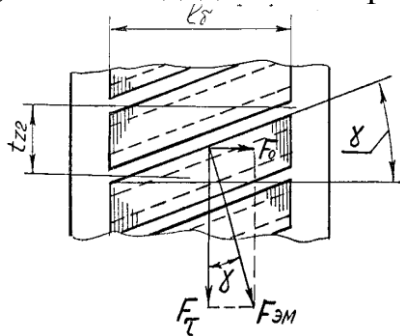


Рис. 1. Схема скосів пазів ротора

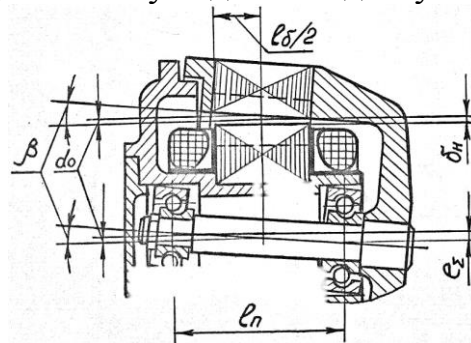


Рис. 2. Схема ексцентриситету АДЗР

$$F_0 = F_{em} \cdot \sin \gamma, \quad (1)$$

де γ - кут скосу; F_{EM} - електромагнітна сила, тангенціальна складова якої (F_{τ}) виконує корисну роботу.

Суттєвий вплив на роботу АДЗР також має ексцентриситет повітряного зазору (рис. 2), який призводить до нерівномірного розподілу магнітного поля, локального перегріву обмоток, зростання магнітного тяжіння та підвищеного зносу підшипників; його величина визначається залежностями (2–3) і залежить від точності виготовлення та конструктивних параметрів двигуна.

$$B_{\delta} = \sum_{v=1}^{v=\infty} B_{\delta v} \cdot \sin v\alpha, \quad A_2 = \sum_{\mu=1}^{\mu=\infty} A_{2\mu} \cdot \sin(\mu\alpha - \psi_2), \quad (2)$$

де $B_{\delta v}$ та $A_{2\mu}$ - відповідно амплітуди гармонійного складу індукції поля в зазорі і лінійного струмового навантаження ротора; ψ_2 - зсув фаз між $B_{\delta v}$ та $A_{2\mu}$.

$$F_0 = l_{\delta} \cdot \sin \gamma \cdot \sum_{v=1}^{v=\infty} \cdot \sum_{\mu=1}^{\mu=\infty} B_{\delta} \cdot A_{2\mu} \cdot \sin v\alpha \cdot \sin(\mu\alpha - \psi_2), \quad (3)$$

З метою усунення недоліків традиційних конструкцій запропоновано удосконалену схему у вигляді двопакетного ротора (рис. 3-4), який складається з двох симетричних частин, зміщених на половину зубцевого кроку.

Таке рішення дозволяє зменшити рівень зубцевих гармонік, еквівалентно замінити скіс пазів без виникнення осьових сил, а також знизити вібрації та шум. У конструкції передбачено використання проміжних короткозамикаючих кілець, що забезпечують вирівнювання розподілу струмів у роторі, зменшення додаткових втрат і покращення теплового стану двигуна, однак їх наявність призводить до

зниження середнього значення магнітної індукції (рис. 3), що негативно впливає на потужність двигуна відповідно до виразу (4).

$$P_{em} = M_{em} / \omega_R = I_2 \cdot l_\delta \cdot B_{\delta cp}, \quad (4)$$

де M_{em} - елекромагнітний момент, ω - частота обертання; I_2 - струм ротора; $B_{\delta cp}$ - середнє значення індукції зазору.

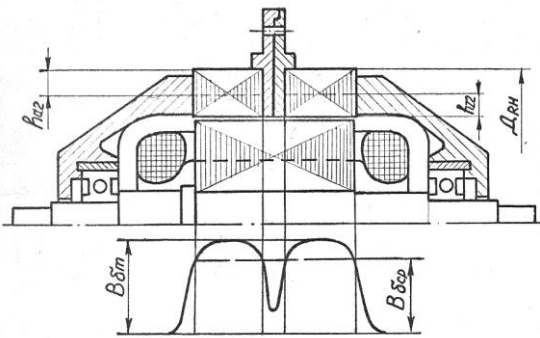


Рис. 3. Аксіальне розподілення індукції в зазорі двигуна з двухпакетним ротором

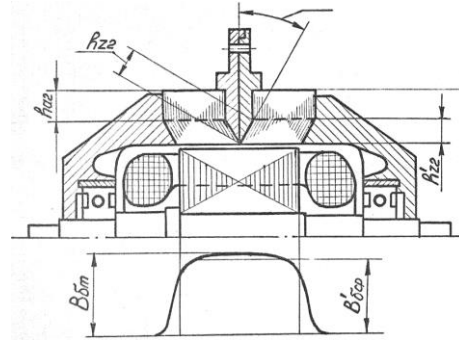


Рис. 4. Схема АДЗР з двухпакетним ротором і конічними поверхнями зубців, які охоплюють проміжне кільце

Для усунення цього недоліку запропоновано феромагнітне закриття проміжного кільця (рис. 4), що відновлює рівномірність магнітного поля та підвищує ефективність двигуна. Подальша оптимізація конструкції реалізується шляхом зміни геометрії зубців ротора (рис. 5), зокрема використанням похилих поверхонь, що дозволяє зменшити середній діаметр ротора, знизити масу та момент інерції, а також підвищити використання активного об'єму; зменшення металоемності описується виразами (5), (6) і може досягати 5–20% залежно від конструктивних параметрів.

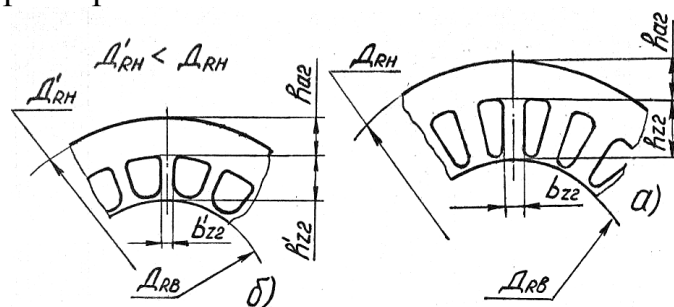


Рис. 5. Конфігурація пластин магнітопроводу ротора АДЗР: а - пластина магнітопроводу АДЗР (рис. 3); б - пластина магнітопроводу АДЗР (рис. 4).

$$\Delta Y_R = Y_R - Y'_R = \frac{1}{4} \left[D_a^2 \cdot \Delta m_\alpha + \Delta D_\alpha (2D_\alpha - \Delta D_\alpha) \cdot (m_\alpha - \Delta D_\alpha) + D_Z^2 \Delta m_Z + \right. \\ \left. + \Delta D_Z (2 \cdot D_Z - \Delta D_Z) \cdot (m_Z - \Delta D_Z) \right]$$

, (5)
де $D_{\alpha(z)}$ та $\Delta D_{\alpha(z)}$, $\Delta m_{\alpha(z)}$ - відповідно середні діаметри та уменшення середніх діаметрів і мас ярма(зубців) АДЗР.

$$\begin{aligned}\Delta D_{\alpha} &= 2h_{z2}(1 - \cos \alpha_Z), \\ \Delta m_{\alpha} &= 2\pi\gamma_c l_{\delta} h_{\alpha 2} h_{z2}(1 - \cos \alpha_Z)\end{aligned}\tag{6}$$

$$\Delta D_Z = h_{z2}(1 - \cos \alpha_Z),$$

$$\Delta m_Z = \gamma_c l_{\delta} h_{z2}(b_{z2} - b'_{z2} \cos \alpha_Z),$$

де γ_c - щільність електротехнічної сталі; $h_{\alpha 2}$ - висота ярма; b_{z2} - ширина зубців (рис. 5,б), ротора (рис.3); b'_{z2} - ширина зубців (рис. 5,б), ротора (рис. 4).

У результаті запропонована конструкція АДЗР (рис. 4) характеризується підвищеною симетричністю, зниженням рівня вібрацій і шуму, зменшенням моменту інерції, покращенням теплового стану та зниженням металоємності, при цьому вона є технологічно доцільною завдяки можливості використання уніфікованих пресформ для виготовлення елементів ротора.

Висновки. Запропонована конструкція АДЗР із двopakетним ротором забезпечує ефективне зниження зубцевих гармонік без виникнення осьових електромагнітних сил, що дозволяє зменшити вібрації, шум і підвищити надійність двигуна. Додаткове застосування проміжних кілець і їх феромагнітного закриття покращує розподіл магнітного поля та тепловий стан, а оптимізація геометрії зубців знижує металоємність і момент інерції. У сукупності це забезпечує підвищення енергоефективності та експлуатаційних характеристик двигуна при збереженні технологічності конструкції.

Список використаних джерел

1. Goroshko A. V., Zembytska M. V., Paiuk V. P. Induction motor vibrations caused by mechanical and magnetic rotor eccentricity. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11, No. 1. DOI: 10.21272/jes.2024.11(1).d8.
2. Goroshko A. V., Zembytska M. V. Study on the eccentric rotor dynamics in a three-phase induction motor. *Proceedings of scientific research*. 2024.
3. Kotsur I. S., et al. Investigation of electromagnetic processes in the case of static eccentricity of a two-pole induction motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024.

Abstract: The paper considers the influence of electromagnetic processes on the reliability of an induction motor with a geared rotor (AMG). The causes of vibrations, in particular the effect of gear harmonics and air gap eccentricity, are analyzed. An improved design of a two-pack rotor with shifting the packages and using intermediate short-circuiting rings is proposed. The feasibility of ferromagnetic closure of the intermediate ring and optimization of the rotor tooth geometry is substantiated. It is shown that the proposed solutions provide a reduction in vibrations, losses and metal consumption, as well as an increase in energy efficiency and reliability of the motor.

Keywords: induction motor, geared rotor, electromagnetic forces, vibrations, gear harmonics, eccentricity, two-pack rotor, energy efficiency, reliability.