

account the permissible values of transmission angles. Further increase of the angle α will lead to jamming of the mechanism links. As a result of the study, it was established that the stroke of the needle guide 7 can be adjusted in the range from 18 to 23 mm. The conducted computer modeling and corresponding kinematic analysis in SOLIDWORKS Motion confirmed the correctness of the analytical calculations and the operability of the proposed mechanisms.

References

1. Kumar E.S. Theory of Machines and Mechanisms. Foundation Publishing House, 2018 – 336 p.
2. Sharma C.S., Purohit K. Theory of Mechanisms and Machines. PHI Learning, New Delhi, 2011. 753 p.
3. Sarkissyan Y. L. Approximations in Synthesis of Mechanisms / State Engineering University of Armenia Proceedings, series “Mechanics, Machine Science, Machine-building”, Issue 15, # 2, 2012, pp. 9–21.
4. Wang D. Kinematic Differential Geometry and Saddle Synthesis of Linkages / Wang D., Wang W. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. – 484 p.
5. McCarthy, J., Soh, G. (2011) Geometric Design of Linkages, 2nd edition. New York : Springer-Verlag.

СТАН ПРОБЛЕМИ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ РОТОРА СУЧАСНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

*Горошко А. В., Зембицька М. В.
Хмельницький національний університет, Україна*

Асинхронні електричні машини (АМ), зокрема асинхронні електричні двигуни (АД) є найпоширенішими електричними машинами. АД споживають понад 80 % електроенергії, що виробляється електростанціями України. Дефекти і несправності у двигуні прогресують у процесі експлуатації, викликаючи зношування справних частин, а також спряжених машин і механізмів. Відмова АД спричиняє значні економічні витрати, тому проблема надійності АМ є актуальною.

Для АМ в якості опор ротора використовують підшипники, закріплені у спеціальних стояках. Стояки болтами прикріплюються до нижньої половини торцевого щита. Відмови підшипників АМ складають близько 40 % від загальної кількості відмов асинхронних машин [1, 2]. Вихід з ладу підшипників в основному викликаний їх підвище-

ним зносом. Основними факторами зносу є механічний дисбаланс ротора через ексцентриситет маси ротора і незрівноважене магнітне натягіння (UMP) внаслідок магнітного ексцентриситету. Оскільки АМ мають відносно невеликий повітряний проміжок, вони є більш схильними до UMP.

Механічний дисбаланс виникає через неминучі технологічні відхилення при виготовленні, неточність складання та конструктивні особливості роторів, внаслідок чого порушується осьова симетрія і центр інерції у деяких поперечних перерізах не збігається з геометричним центром перерізів і віссю обертання ротора. Магнітний ексцентриситет викликає додаткове радіальне навантаження на підшипник, що скорочує його термін служби. Крім того, UMP знижує загальну жорсткість системи, що може підсилити вібрації всередині системи [3].

За даними різних джерел на ексцентриситет доводиться від 20 до 40 % відмов асинхронних двигунів (АД) [4–6]. В АД часто виникає ексцентриситет ротора, що призводить до нерівномірності повітряного проміжку машини. Причини появи магнітного ексцентриситету обумовлені як помилками під час виробництва та збирання машини, так і несприятливими умовами її експлуатації. Розрізняють статичний і динамічний ексцентриситети. Статичний ексцентриситет виникає через ексцентричне положення ротора у розточці статора, тому нерівномірна конфігурація повітряного зазору не змінюється в часі при обертанні ротора. При динамічному ексцентриситеті, який виникає через ексцентричне положення ротора відносно осі вала, конфігурація повітряного зазору при обертанні ротора змінюється, що обумовлено обертанням осі ротора щодо осі статора. Зважаючи на невеликий розмір повітряного зазору АД навіть незначний ексцентриситет ротора, порушуючи симетрію конструкції машини, значно погіршує її роботу.

Відомі як аналітичні підходи до визначення UMP, так і методи на основі методу скінченних елементів [7–10]. В загальному випадку необхідно окремо розглядати вплив статичного ексцентриситету маси ротора і статичного ексцентриситету ротора, що є причиною нерівномірності повітряного зазору електричної машини. Багатьма авторами [1–11] проводяться дослідження зі створення математичних моделей, які б найбільш ефективно описували б роторну динаміку АД. В роботі [12] розглядається аналітична модель та ділянки стійкого руху обертючих машин, лапи яких змонтовані на податливому фундаменті. Автором у [13] розглянуто аналітичну модель вібрації корпусу і вала двигуна, що враховує динамічний ексцентриситет маси, відхилення деформованого вала і магнітний ексцентриситет для двигуна з підшипниками ковзання, що змонтовано на податливому фундаменті.

У згадуваних роботах прийняте припущення, що інерція зосереджена у площині, яка ділить довжину ротора навпіл, а ексцентриситет маси викликає відцентрову силу, під дією якої ротор здійснює лише поступальні переміщення. На відміну від цих робіт у [14] авторами створено математичну модель коливань корпусу АД, яка враховує: ексцентриситет маси ротора; статичний магнітний ексцентриситет ротора, вплив гіроскопічного моменту ротора; податливість опор статора до фундаменту, що дозволяють шість ступенів вільності (три поступальних і три обертальних); врахування нерівножорсткості опор статора, їх кількості та місць приєднання до статора; загальний випадок неспівпадиння центрів мас статора і ротора з віссю обертання по всіх трьох осях x , y , z .

Результати чисельних експериментів показали ефективність моделі для визначення амплітудно-частотних характеристик двигуна та його критичних швидкостей, досліджень повздовжніх коливань та поворотів статора, впливу ексцентриситету маси та магнітного ексцентриситету. Модель може бути корисною для дослідження діагностичних ознак при вібраційній діагностиці електричних машин.

Література

1. Popa, L. M., Jensen, B. B., Ritchie, E., et al. (2003). Condition monitoring of wind generators. 38th IAS Annual Meeting on Conf. Record of the Industry Applications Conf., Salt Lake City, Utah, USA, vol. 3, pp. 1839–1846.
2. Thomson, W. (2020). Vibration Monitoring of Induction Motors and Case Histories on Shaft Misalignment and Soft Foot. In *Vibration Monitoring of Induction Motors: Practical Diagnosis of Faults via Industrial Case Studies* (pp. 1–46). Cambridge: Cambridge University Press.
3. Michon, M., Holehouse, R. C., Atallah, K., et al. (2014). Effect of rotor eccentricity in large synchronous machines. *IEEE Trans. Magn.* 50 (11), pp. 1–4.
4. Richard N. Bell et al. (1985) Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations. Part II. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 21 (4), pp. 865–872.
5. Cornell, E. P., Owen, E. L., Appiaris, J. C., McCoy, R. M., Albrecht, P. F., and Houghtaling, D. W. (1982). Improved motors for utility applications. Final report. United States: N. p., Web.
6. Bellini, A., Immovilli, F., Rubini, R., Tassoni, C. (2008). Diagnosis of bearing faults of induction machines by vibration or current signals: A critical comparison. In: *Industry Applications Society Annual Meeting. IAS'08. IEEE, 2008*, pp. 1–8.

7. Dorrell, D. G., Hsieh, M., & Guo, Y. (2009). Unbalanced Magnet Pull in Large Brushless Rare-Earth Permanent Magnet Motors With Rotor Eccentricity. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45, 4586–4589.
8. Burakov, A. Arkkio, A. (2007). Comparison of the unbalanced magnetic pull mitigation by the parallel paths in the stator and rotor windings. *IEEE Trans. Magn.*, 43(12). pp. 4083–4088.
9. Zhu, Z. Q., Ishak, D., Howe, D., Chen, J. (2007). Unbalanced magnetic forces in permanent-magnet brushless machines with diametrically asymmetric phase windings, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 43(6). pp. 1544–1553.
10. Dorrell, D. G., & Hsieh, M. F. (2010). Calculation of radial forces in cage induction motors at start – The effect of rotor differential. *IEEE transactions on magnetics*, 46(8), 3029–3032.
11. Liu F., Xiang C., Liu H., Chen X., Feng F., Cong H., Kuilong Yu. (2022). Model and experimental verification of a four degrees-of-freedom rotor considering combined eccentricity and electromagnetic effects. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169.
12. Werner, U. (2017) Influence of the Foundation on the Threshold of Stability for Rotating Machines with Roller Bearings – A Theoretical Analysis. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 5, 1380–1397.
13. Werner, U. (2017). Mathematical multibody model of a soft mounted induction motor regarding forced vibrations due to dynamic rotor eccentricities considering electromagnetic field damping. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 5 (2). 346–364.
14. Горошко А. В., Косенков В. Д., Зембицька М. В. Математична модель асинхронної машини з ексцентриситетом маси ротора та магнітним ексцентриситетом // Сучасні досягнення в науці та освіті : зб. пр. XVIII Міжнар. наук. конф., 13–20 верес. 2023 р., м. Нетанія (Ізраїль). Хмельницький : ХНУ, 2023. С. 122–128.

АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗМІН В КОЛІННИХ СУГЛОБАХ

*Кузь О. П.¹, Дунаєвський В. І.², Венгер С. Ф.², Котовський В. Й.¹, Орел В. Е.³,
Сіднев О. Б.², Тимофєєв В. І.¹, Дрозденко О. В.¹, Назарчук С. С.¹*

¹Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»

E-mail: kotovsk@kpi.ua

²Інститут фізики напівпровідників ім. В.С. Лашкарьова НАН України

³ДНП «Національний Інститут раку» МОЗ України

Вступ. Захворювання кістково-м'язової системи належать до найбільш розповсюджених патологій та продовжують неухильно зростати