

Д.Ю. Зубенко, О.М. Петренко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

## ТЕПЛОВА І ЕЛЕКТРИЧНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

У даній роботі представлені моделювання і перевірка теплових, електричних і механічних властивостей, моделі трифазного асинхронного двигуна (ТІМ). Розглянуто взаємозв'язки між втратами і зміною температури в ТІМ, що робить моделювання роботи електродвигуна прогнозованим. Визначено втрати в ТІМ, як еквівалент електричного кола в довільному використовується система відліку, яка поєднує в собі традиційну модель з більш звичайним моделюванням і враховує втрати в залізі статора.

**Ключові слова:** асинхронний електродвигун, теплові процеси, діагностика, теплової контроль, математична модель.

### Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій

З огляду на поточну зростаючу вартість електричної енергії та її обмежену доступність, оптимізація енергоефективності була предметом інтенсивних досліджень.

Найбільша кількість енергії на електротранспорті поглинає електродвигуни. Це споживання становить від 65% електроенергії, яка використовується в промисловості [1 - 12].

Один із способів максимізувати ефективність ТІМ може бути здійснений шляхом поліпшення існуючих технологій. При розробці систем управління для приводу ТІМ використовуються математичні моделі, які включають моделювання електричних і механічних частин в ТІМ.

Одним з основних обмежень стратегій контролю є ефективне використання енергії та оптимізація сенсорів. [13-14]

Збільшення температури ТІМ обумовлено втратами в машині. Тому, щоб вивести помірну температуру і оцінити втрати в двигуні необхідно, щоб моделі включали в себе всі фактори, які генерують їх. Таким чином можна встановити відповідність між електричної, механічної і теплової моделями.

У той час як перші два використовуються для визначення втрат в роторі і статорі, третій дає значення температури. Значення опору буде оцінюватися в роторі і статорі, параметри якого будуть відчувати більшу зміну пов'язані з температурою [15].

Теплова математична модель асинхронного електродвигуна, представлена в даній статті, також враховує і механічні втрати, що відповідають за збільшення температури двигуна.

### Мета статті

Розробка теплової та електричної моделі для асинхронних електродвигунів.

### Виклад основного матеріалу

Рівняння для магнітного потоку визначаються як:

$$\Phi_{qs} = L_{ls}(i_{qs} - i_{qir}) + L_M(i_{qs} - i_{qir} + i_{qr}) \quad (1)$$

$$\Phi_{ds} = L_{ls}(i_{ds} - i_{dir}) + L_M(i_{ds} - i_{dir} + i_{dr}) \quad (2)$$

$$\Phi_{qr} = L_{lr}(i_{qr}) + L_M(i_{qs} - i_{qir} + i_{qr}) \quad (3)$$

$$\Phi_{dr} = L_{lr}(i_{dr}) + L_M(i_{ds} - i_{dir} + i_{dr}) \quad (4)$$

Рівняння напруги в машині визначаються як:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \quad (5)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \quad (6)$$

$$0 = r_r i_{qr} + (\omega - \omega_r) \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \quad (7)$$

$$0 = r_r i_{dr} - (\omega - \omega_r) \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \quad (8)$$

Рівняння крутного моменту можна представити в наступному вигляді:

$$T_2 = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) L_M [(i_{qs} - i_{qFe}) i_{dr} - (i_{ds} - i_{dFe}) i_{qr}] \quad (9)$$

Електромагнітний крутний момент, створений індукцією двигуна, буде дорівнює сумі

крутного моменту навантаження і крутного моменту через механічних втрат (тертя і вітру).

Крутний момент навантаження можна розділити на дві частини: прискорення і крутний момент (потребується для зміни кінетичної енергії обертових мас) і стійкий до навантаження крутний момент. Прискорює момент прямо пропорційний опорі моменту інерції навантаження електродвигуна. Стійкий до навантаження крутний момент, через тертя, лінійно пов'язаний з кутовий швидкістю [2-5].

Таким чином, електромагнітний крутний момент дорівнює:

$$T_e = J \left( \frac{2}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \right) + D \frac{2}{P} \omega_r + T_L \quad (10)$$

де  $T_L$  - момент навантаження,  $J$  - момент інерції навантаження двигуна,  $D$  - коефіцієнт тертя ротора і  $P$  - число полюсів.

З представленої моделлю можна визначити вплив втрат в статорі і в роторі, втрати в залозі статора і механічні втрати. Втрати впливають за вироблення тепла в ньому, вони буде використовуватися в якості вхідних даних для теплової моделі для моделювання змін температури ТІМ [5-8].

$$P_s = G_s T_s + C_s \frac{dT_s}{dt} + G_{sr} (T_s - T_r) \quad (11)$$

$$P_r = G_r T_r + C_r \frac{dT_r}{dt} + G_{sr} (T_r - T_s) \quad (12)$$

Механічні втрати  $P_{mech}$  пов'язані  $D$  з коефіцієнтом тертя в підшипниках ротора. втрати  $P_s$ ,  $P_r$  и  $P_{mech}$  розраховуються за формулою:

$$P_s = \frac{3}{2} [(i_{qs}^2 + i_{ds}^2) r_s + (i_{qFe}^2 + i_{dFe}^2) R_{Fe}] \quad (13)$$

$$P_r = \frac{3}{2} (i_{qr}^2 + i_{dr}^2) r_s \quad (14)$$

$$P_{mech} = D \left( \frac{2}{P} \omega_r \right)^2 \quad (15)$$

Необхідність в більш ефективних двигунах призводить до зниження оптимізації конструкції. Повітряний зазор в машині з подальшим зменшенням місць для датчиків і кількість точок, щоб мати температурні вимірювання [8-15]. Тому використання FBG як чутливі елементи є потенційним рішенням, яке дозволило б отримати параметри теплової моделі з ТІМ.

## Висновки

Дослідження показали, що існує внутрішня складність моделювання підвищення температури,

викликаною механічними втратами, оскільки воно є відносно невеликим значенням у порівнянні з електромагнітними втратами. Як було показано в результаті в формулах, підвищення температури через механічних втрат відповідає  $4^\circ \text{C}$ . і використання FBG дозволяє вимірювати і моделювати зміна температури при діагностиці ТІМ.

## References

1. Scarmin, A., Gnoatto, C., Aguiar, E., Camara, H., Carati, E. (2010) Hybrid adaptive efficiency control technique for energy optimization in induction motor drives, in: *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 1–6. doi:10.1109/INDUSCON.2010.5739975.
2. Тартаковський, Е.Д. Діагностування підшипників кочення допоміжних машин електровоза з використанням параметричної моделі та спектра об'єдної вібрації. [Текст] / Е.Д. Тартаковський, С.В. Михалків, А.М. Ходаківський, Р.С. Сапон // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. 2016. №3(78). С. 12 — 18. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.79374>
2. Tartakovsky, E.D., Mikhalkov, S.V., Khodakivsky, A.M., Sapon, R.S. (2016) Diagnostics of rolling bearings of auxiliary electric locomotive cars using a parametric model and an oscillatory vibration spectrum. *Bulletin of NTUU "KPI". Series of mechanical engineering*, 3 (78), 12 - 18. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.79374>
3. Moreno, J., Hidalgo, F., Martinez, M. (2001) Realisation of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 148 (5), 393–397. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:20010580>.
4. Duran, M., Fernandez, J. (2004) Lumped-parameter thermal model for induction machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19 (4), 791–792. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2004.837272>.
5. Sousa, K.D.M., Hafner, A.A., Kalinowski, H.J., Silva, J.C.C. da (2012) Determination of temperature dynamics and mechanical and stator losses relationships in a three-phase induction motor using fiber Bragg grating sensors. *IEEE Sensors Journal* 12 (10), 3054 – 3061. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2012.2210203>.
6. Zhang, P., Habetler, Y. Du, T. (2010) A transfer-function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46 (5), 1919–1926. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2010.2058831>.
7. Park, R.H. (1929) Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis – Part I, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48 (3), 716–727. <http://dx.doi.org/10.1109/T-AIEE.1929.5055275>.
8. Krause, P.C., Thomas, C.H. (1965) Simulation of symmetrical induction machinery. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 84 (11), 1038–1053. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAS.1965.4766135>.
9. Dong, G., Ojo, O. (2006) Efficiency optimizing control of induction motor using natural variables. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53 (6), 1791–1798. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2006.885117>.

10. Boys, J., Miles, M. (1994) Empirical thermal model for inverter-driven cage induction machines. *IEEE Proceedings – Electric Power Applications*, 141 (6), 360–372. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:19941462>.
11. Plotkin, J., Stiebler, M., Schuster, D. (2008). A novel method for online stator resistance estimation of inverter-fed ac-machines without temperature sensors, in: *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 155–161. doi:10.1109/OPTIM.2008.4602403.
12. Gao, Z., Habetler, T., Harley, R., Colby, R. (2008) A sensorless adaptive stator winding temperature estimator for mains-fed induction machines with continuous-operation periodic duty cycles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44 (5), 1533–1542. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2008.2002208>.
13. Hurst, K., Habetler, T. (1997) A thermal monitoring and parameter tuning scheme for induction machines, in: *Industry Applications Conference. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, Conference Record of the 1997 IEEE*, 1, 136–142. doi:10.1109/IAS.1997.643019.
14. Willsch, R., Ecke, W., Bartelt, H. (2002) Optical fiber grating sensor networks and their application in electric power facilities, aerospace and geotechnical engineering, in: *15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 1, 49–54. doi:10.1109/OFS.2002.1000499.

15. Grabarski, L., Silva, J. da, Kalinowski, H., Paterno, A. (2009) Static and dynamic measurements in small induction motors using a fiber Bragg grating interrogation unit, in: *Brazilian Power Electronics Conference*, 1113–1117. doi:10.1109/COBEP.2009.5347759.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.Ф. Смирний, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

**Автор:** ЗУБЕНКО Денис Юрійович  
кандидат технічних наук, доцент  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – Denis04@ukr.net  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6736-7849>

**Автор:** ПЕТРЕНКО Олександр Миколайович  
доктор технічних наук, доцент  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – petersanya1972@gmail.com  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4027-4818>

## HEAT AND ELECTRIC MATHEMATICAL MODEL FOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

D. Zubenko, O. Petrenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

*This paper presents the modeling and testing of thermal, electrical and mechanical properties, models of three-phase asynchronous motor (TIM). The relationships between losses and temperature changes at TIM are considered, which makes simulation of motor operation predictable. In determining the loss at the TIM equivalent electric circuit in an arbitrary, a reference system is used, which combines the traditional model with more conventional modeling and takes into account losses in the stator iron. Thermal study of the engine is performed using an equivalent thermal circuit formed by thermal capacitances and thermal conductivities, which are separately considered for the stator and rotor. Losses calculated using electrical and mechanical modeling are input parameters for the thermal model.*

*Given the current growing cost of electrical energy and its limited availability, energy efficiency optimization has been the subject of intense research.*

*The greatest amount of energy in electric transport absorbs electric motors. This consumption is from 65% of electricity used in industry.*

*One way to maximize the effectiveness of TIMS can be done by improving existing technologies. In the development of control systems for the TIM drive, mathematical models are used, which include the simulation of electrical and mechanical parts in TIM.*

*One of the main limitations of control strategies is the efficient use of energy and the optimization of sensors.*

*The increase in temperature TIM due to losses in the car. Therefore, to derive a moderate temperature and estimate engine losses, it is necessary that the models include all the factors that generate them. Thus, it is possible to establish a correspondence between the electrical, mechanical and thermal models.*

*While the first two are used to determine losses in the rotor and the stator, the third gives the temperature value. The resistance value will be evaluated in the rotor and stator, the parameters of which will experience a greater change associated with temperature.*

*The thermal model of an asynchronous electric motor, presented in this article, also takes into account the mechanical losses responsible for increasing the temperature of the engine.*

**Keywords:** asynchronous electric motor, thermal processes, diagnostics, thermal control, mathematical model.