

Д.Ю. Зубенко, к.т.н., доц.
О.М. Петренко, д.т.н., доц.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Обчислювальний аналіз явищ підвищення температури в електричних асинхронних двигунах

При розробці електричних машин в цілому, а також асинхронних двигунів зокрема граничні значення температури є ключовими факторами, що впливає на ефективність загальної конструкції. Оскільки звичайне навантаження асинхронних двигунів часто відбувається в різних режимах роботи, отже, оцінка зростання температури за допомогою інструментів математичного моделювання та обчислювальних експериментів стає все більш важливою. У цій роботі розробляється та перевіряється експериментально модель обліку втрат та опис теплових явищ в асинхронних двигунах. Розроблена модель була впроваджена у MATLAB і була застосована для прогнозування підвищення температури в повністю замкнутому вигляді для вентилятора охолодження асинхронних двигунів. Проведено порівняння з експериментальними результатами, отриманими для двигунів 1,5 кВт. Математична модель двигуна показує ефективність розробленої моделі в прогнозуванні підвищення температури для ряду умов експлуатації, зокрема для різних частот і напруг. На основі SIMULINK була розроблена тепла модель.

Ключові слова: електричний асинхронний двигун; тепла модель; частота; аналіз кінцевих елементів; математична модель; діагностика температури.

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електрична машина – це складна інженерна система, що складається з різних матеріалів різних теплових властивостей та розподілення джерела тепла. Хоча і спостерігаються успіхи в багатьох аспектах вдосконалення конструкції електричної машини, але у розвитку теплових методів для розрахунку конструкції при їх проектуванні відстають [3].

Однією з найпоширеніших машин змінного струму, що застосовується з промисловою метою, є асинхронний електродвигун з вентиляційним охолодженням (АЕДВО). Ці двигуни часто керуються змінною напругою та змінною частотою. У результаті ми можемо керувати швидкістю та виконувати контроль крутного моменту за конкретним навантаженням, але негативний момент при цьому буде збільшення температури двигуна при експлуатації. Крім того, одна з причин зростання температури – це підвищення напруги асинхронного двигуна що веде до нагріву систем ізоляції. Визначив впливовість теплового фактора в загальній ефективності роботи мотору, існують різні методи, що були запропоновані для теплового контролю ротора та статора [2]. Більшість таких методів базується на деяких проміжних оцінках, наприклад опір ротора та ідентифікація [2], але при застосуванні таких методів неможливо в повному обсязі визначити розподіл температури та виявити термічно критичні частини двигуна за різних робочих умов. Тепловий аналіз асинхронних електродвигунів може бути ефективним за допомогою технології теплового моніторингу, що суттєво сприяє покращенню продуктивності роботи електродвигуна при безвідмовній роботі. Актуальною є розробка математичної моделі, яка дозволяє розрахувати розподіл температури двигуна як функцію входу параметрів, визначену поточними умовами експлуатації, реалізація моделі та порівняння результатів обчислень з результатами експериментальних вимірювань. Модель може бути застосована для різних частот і навантажень, а потім визначену температуру можна порівняти з тепловими межами та сигнальними порогоми для запобігання перегріву двигунів, які можуть бути сформовані за допомогою ряду факторів, наприклад, перевантаження, замикання ротора, тривалий запуск або незбалансований струм. Методологія базується на числових методах, таких як кінцеві елементи, що є оптимальним інструментом при термічному аналізі електричних машин [1, 6, 20]. Хоча методологія пропонує більшу гнучкість та більшу точність, порівняно з більш традиційними інженерними підходами, такі як метод зосереджених та розподілених параметрів [9, 14, 17, 18], цей додаток часто обмежується спрощеною геометрією та стаціонарним аналізом через високу геометричну та обчислювальну складність задачі. Спрощені методики, зокрема ті, що базуються на теорії теплових мереж, досить корисні для попереднього аналізу. Використовуючи основні методології, які розглядають електричну машину як складову з елементів, що розглядаються як вузли в мережі схем, в той час як теплові ємності вважаються зосередженими в кожному вузлі та теплові опори вводяться між двома послідовними вузлами. Для досягнення досить точного результату як правило, потрібна, велика кількість вузлів у мережі, і тому технічна процедура стає набагато схожою на чисельну дискретизацію геометрії двигуна. Проте необхідно підкреслити, що гнучкість теплових мереж на базі класичної моделі зменшиться, коли двигун працює в

різних режимах. Це питання ускладнюється важкістю розрахунків при швидкості додавання тепла до кожного вузла та невизначеністю теплового опору між двома вузлами.

В літературі також були запропоновані різні емпіричні теплові моделі [4]. Як правило, такі моделі дають оцінку температури статора та ротора за допомогою зосереджених параметрів теплових моделей. Типові припущення, що використовуються в цьому підході, пов'язані з однією частотою залежно від термічного опору і часової константи. На практиці статор та ротор мають різні значення термічного опору і ємності, і отже, процедура має бути істотно модифікована практично в кожному конкретному випадку.

Виходячи із вище сказаного актуальним постає питання розробки універсальної математичної моделі контролю температурних параметрів електродвигуна по принципу кінцевих елементів.

Мета статті. Розробити математичну модель та обчислювальний аналіз явищ підвищення температури в електричних асинхронних двигунах.

Виклад основного матеріалу. Математична модель для термічного аналізу асинхронного електродвигуна та модель енергетичного балансу:

$$\rho \left(\frac{de}{dt} + v \times \nabla e \right) = \sigma : \varepsilon - \nabla \times q + \rho Q, \quad (1)$$

де q – густина матеріалу; e – внутрішня енергія; q – енергетичний потік; Q – енергозабезпечення.

Дотримуючись умов [15], та розробляючи загальне уявлення про граничні умови для задачі, в цьому контексті зручно ввести скалярну величину, W_{out} , що представляє втрати тепла на поверхні.

Тоді баланс енергії на поверхні [15] визначається за формулою

$$W_{out} \equiv q_{sup} = kVT - h(T_{exp} - T) - C_{cons}(T_{am}^4 - T^4). \quad (2)$$

Представлення (4) дозволяє «активізувати» коефіцієнти k , h , C_{cons} , залежно від конкретного типу теплопередачі слід враховувати, зокрема частину двигуна. Якщо позначимо тепло, вироблене в системі W_{in} , то оригінальна модель може бути схематично переформульована як основний закон збереження у вигляді $W_{out} = W_{in} - W_{change}$,

де W ; $W_{change} = \rho c_v \partial T / \partial t$ формально буде представляти собою зміну енергії, що зберігається в системі.

Для того, щоб заповнити сформульовану математичну модель, нам потрібно вказати введені функції та коефіцієнти моделі (1) – (2), оскільки вони залежать від геометрії й характеру ділянки двигуна й розглянути їх граничний сегмент.

Використовуючи стандартну схему еквівалента в техніці, ми застосуємо закони Ома і обчислюємо необхідні електромагнітні втрати таким чином:

$$P_{cu1} = mR_1 I_1^2 (\text{stator copper losses}), \quad (3)$$

$$P_m = mR_m I_m^2 (\text{stator core losses}), \quad (4)$$

$$P_{cu2} = mR_2 I_2^2 (\text{rotor copper losses}), \quad (5)$$

де m – номер фази двигуна (у нашому випадку $m = 3$). Формули (3) – (5) використовують значення фазових струмів, обчислені за допомогою

$$I_1 = \frac{U_1(Z_m + Z_2)}{Z_{1\sigma}Z_m + Z_{1\sigma}Z_2 + Z_mZ_2}, \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{U_1Z_m}{Z_{1\sigma}Z_m + Z_{1\sigma}Z_2 + Z_mZ_2}, \quad (7)$$

$$I_m = \frac{U_1Z_m}{Z_{1\sigma}Z_m + Z_{1\sigma}Z_2 + Z_mZ_2}, \quad (8)$$

де $Z_{1\sigma}$, Z_m та Z_2 – фазова складова статора, намагнічування та ланцюга ротора відповідно:

$$Z_{1\sigma} = R_1 + jX_{1\sigma}, Z_2 = R_2/s + jX_{2\sigma}, Z_m = R_m + jX_m \quad (9)$$

Нарешті, вхідні викиди реактивів $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$ та X_m обчислюються за допомогою таких формул

$$X_{1\sigma} = 2\pi f l_1, X_{2\sigma} = 2\pi f l_2, X_m = 2\pi f l_m \quad (10)$$

де $l_i, i = 1, 2, 3$ – індуктивності витoku статора та ротора, а також магнітна індуктивність відповідно. Значення цих параметрів призначаються, коли двигун сконструйований та специфічні значення для двигуна проаналізовані.

Частина тепла в асинхронних двигунах переноситься випромінюванням. Фактична кількість енергії передана у вигляді електромагнітних хвиль залежить не тільки від властивостей випромінюваності частини розглянутого двигуна, але і сама температура з нелінійним виміром. Через різницю температури між поверхнею двигуна та температурою навколишнього середовища тепло буде випромінюватися з усієї поверхні двигуна та енергії випромінювання може бути оцінено відповідно до закону радіації Стефана-Больцмана [19]:

$Q = \epsilon \sigma T^4 \Delta t$, де A – площа поверхні розглянутого двигуна ϵ коефіцієнтом випромінювання; $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ константа Стефана-Больцмана.

Є інші частини двигуна, де працюють конвекційні моделі для передачі енергії, зокрема, в повітряному проміжку, від валів, від ротора, кінці валів і магнітні підшипники (наступні три можуть бути змодельовані як теплообмін обертових частин), в охолоджуючому повітрі та в просторі обмотки. Вираз для конвекції надається у формі:

$$q = h(T - T_{ext}), \quad (11)$$

де, T – температура поверхні і T_{ext} – температура повітря/рідини.

Оцінку h в (11) можна провести, використовуючи відомі інструменти [8], у кожному з цих випадків оцінку коефіцієнта теплопередачі можна розглянути як:

$$H' = \frac{0.7(Re)^{0.5}[1-0.12(F_h/F_w)^{1/3}]K}{F_l}, \quad (12)$$

де F_w – відстань між двома ребрами, а F_h – висота ребер, а K – теплова провідність повітря. Потім ми обчислимо коефіцієнт конвекції, пов'язаний з обдувом ребер рами таким чином:

$$h_a = H'[1 - 0.02(F_h/F_w)], \quad (13)$$

і значення коефіцієнта конвекції, пов'язане з розсіюванням від поверхні між ребрами як:

$$H' = \frac{0.7(Re)^{0.5}[1-0.35(F_h/F_w)^{1/3}]K}{F_l} \quad (14)$$

У цьому випадку H розраховується як:

$$H' = \frac{0.035(Re)^{0.6}[1-0.09(F_h/F_w)^{0.5}]K}{F_l} \quad (15)$$

Використовуючи значення (14), тоді розраховується за формулою (15), тоді як для розрахунку h_l ми використовуємо таку формулу:

$$h_l = \frac{0.03(Re)^{0.8}[1-0.23(F_h/F_w)^{0.5}]K}{F_l} \quad (16)$$

$$h_{free} = 6.5 + 0.05(T - T_{ext}) \quad (17)$$

Нарешті, зазначимо, що для коефіцієнта вільної конвекції ми використовуємо наступну формулу [16].

Таким чином ефективні графічні користувацькі інтерфейси та автоматична процедура генерації сітків, візуалізація та обробка інформації характерні для аналізу кінцевих елементів, забезпечують загальний інструмент для термічного аналізу електричної індукції мотора.

Висновки. У даній роботі запропоновано загальний підхід до моделювання явищ підвищення температури в електричних асинхронних двигунах і продемонстровано ефективність цього підходу шляхом порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних вимірювань. Як приклад – дослідження та аналіз індукційних двигунів (АЕДВО), що працюють під різними джерелами напруги та навантаженням

References:

1. Armor, A.F. (1976), *Heat flow in the stator core of large turbine-generators by the method of 3D finite elements*, pp. 1648–1656.
2. Beguenane, R. (1999), «Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification», *M.E.H. Benbouzid IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 14 (3), pp. 566–570.
3. Bousbaine, A. (1999), «Thermal modelling of induction motors based on accurate loss density distribution», *Electr. Machines Power Syst.* 27, pp. 311–324.
4. Boys, J.T. and Miles, M.J. (1994), «Empirical thermal model for inverter-driven cage induction machines», *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 141 (6), pp. 360–372.
5. Chan, T.F. (1990), «A method to determine the temperature rise of induction motors», *The International Journal of Electrical Engineering and Education*, Vol. 27, pp. 45–52.
6. Dokopoulos, P. and Xypteras, J. (1984), «Analytische berechnung der transienten temperaturverteilung in elektrischen maschinen», *BetaArchive*, Vol. 6 (2), pp. 23–76.
7. Ho, S.L. and Fu, W.N. (2001), «Analysis of indirect temperature-rise tests of induction machines using time stepping FEM», *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 16 (1), pp. 55–60.
8. Kreith, F. (1998), *CRC Handbook of Mechanical Engineering*, CRC Press.
9. Kylander, G. (1995), «Thermal modeling of small cage induction motors, Doctoral thesis, Goteborg, Sweden, Chalmers & University of Technology», *Technical Report*, School of Electrical and Computer Engineering, No. 265.
10. Luo, X. (1995), «Multiple coupled circuit modeling of induction motors», *IEEE Trans. Indust. Appl.*, Vol. 31 (2), pp. 311–318.
11. Melnik, R.V. and Roberts, A.J. (2002), «Phase transitions in SMA with hyperbolic heat conduction and differential-algebraic models», *Comput. Mech.*, Vol. 29, pp. 16–26.
12. Metwally, H.M. (2001), «Loadless full load temperature rise test for three phase induction motors», *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 42, pp. 519–528.
13. Mihalea, A., Szabados, B. and Hoolboom, J. (2001), «Determining total losses and temperature rise in induction motors using equivalent loading methods», *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 16 (3), pp. 214–219.
14. Mukhoppadhyay, S.C. and Pal, S.K. (1998), «Temperature analysis of induction motors using a hybrid thermal model with distributed heat sources», *J. Appl. Phys.*, Vol. 83 (11), pp. 6368–6370.
15. Ozisik, M.N. (1993), *Heat Conduction*, second ed., John Wiley and Sons.
16. Richter, R. (1954), «Elektrische Maschinen», *Birkhauser Verlag*, Basel.
17. Romo, J.L. and Adrian, M.B. (1998), «Prediction of internal temperature in three-phase induction motors with electronic speed control», *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 45, pp. 91–99.
18. Saari, J. (1995), «Thermal model of high-speed induction machines», *Acta Polytechnica Scandinavia, Electrical Engineering Series*, Helsinki, Vol. 82.

19. Siegel, R. and Howell, J.R. (1992), *Thermal radiation heat transfer*, third ed., Hemisphere Publ. Co., Washington.
20. Tindall, C.E. and Brankin, S. (1998), «Loss-at-source thermal modeling in salient pole alternators using 3D finite difference technique», *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 24 (1), pp. 278–281.
21. Toliyat, H.A., Lipo, T.A. and White, J.C. (1991), «Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications», *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 6 (4), pp. 679–692.
22. Zocholl, S.E. (2002), *Induction motors. Schweitzer Engineering Labs Technical Reports*, [Online], available at: <http://www.selinc.com/techpprs.htm>
23. Woolfolk, A. (1995), «Specifying filters for forced convection cooling», *Electron. Cooling*, Vol. 1 (2), pp. 20–23.

Зубенко Денис Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

Наукові інтереси:

– ресурсозберігаючі технології в енергетиці і виробництві.

E-mail: Denis04@ukr.net.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6736-7849>

Петренко Олександр Миколайович – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова.

Наукові інтереси:

– вдосконалення електродвигунів для рухомого складу.

E-mail: petersanya1972@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 06.02.2019.