

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) знаходять широке застосування на транспорті. Але способи охолодження PMSM все ще залишаються проблемою. У статті пропонується використання методу кінцевих елементів під час створення математичної моделі на ефекті перехідного охолодження. Змодельовані і проаналізовані умови різних теплових навантажень і різних температур навколишнього середовища. Розрахунки показують, що склавши модель нагрівання корпусу електродвигуна можна отримати оптимальний варіант для випробування нових і вже створених прототипів.

**Ключові слова:** електричний транспорт, електродвигуни, математична модель, тепловий контроль, діагностика, випробування.

D. ZUBENKO, O. PETRENKO

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

## MATHEMATICAL COOLING MODEL FOR SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

Permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in transportation. But the cooling strategy of the PMSM is still a problem. The article proposes the use of the finite element method when creating a mathematical model on the effect of transitional cooling. The conditions of various heat loads and various ambient temperatures are modelled and analysed. Calculations show that by making a model of the motor case, it is possible to obtain the best option for testing new and already created prototypes. Electric motors with permanent magnets are increasingly used in electric vehicles. The advantage of these engines is ease of maintenance, reliability, and significant efficiency. However, the output power can never be equal to the input power, because there is always a loss. More heat will inevitably be generated inside the engine with increasing power requirements [5, 6]. Most of the engines in production can no longer be maintained at a safe temperature level only by the natural convection cooling system [7], such as permanent magnet synchronous motors (PMSM) in drive systems [8, 9]. There is a contradiction between high heat generation and insufficient cooling capacity of the PMSM during operation time. Consequently, how to balance heat management requirements and the engine's limited ability to generate heat is an imperative problem that must be solved. There are various approaches to the implementation of engine cooling. For example, the simplest is self-cooling by natural convection with external ribs embedded in the housing, and the cooling effect can be enhanced by a fan mounted on one end of the shaft. There are other cooling systems such as liquid, but their main drawback is the presence of additional devices, which increases the drive mass and reduces reliability. Self-cooling or air-cooling is still the main thermal control method for the PMSM in the system drive. Therefore, it is relevant to develop a mathematical model for this type of engine.

**Keywords:** electric transport, electric motors, mathematical model, heat control, diagnostics, testing.

### Вступ

Електродвигуни з постійними магнітами все частіше застосовуються на електротранспорті. Перевага даних двигунів – простота обслуговування, надійність і значний ККД.

Проте, вихідна потужність ніколи не може дорівнювати вхідній потужності, тому що завжди є втрати. Більша кількість тепла буде неминуче генеруватися усередині двигуна зі зростаючими затратами до вихідної потужності [1–5, 6]. Більшість двигунів на виробництві не можна підтримувати на безпечному рівні їх температури тільки природною конвекційною системою охолодження [7], наприклад, синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) в системах приводу [8, 9].

Існує протиріччя між великим виробленням тепла і недостатнім охолодженням PMSM під час роботи. Отже, необхідно збалансувати вимоги до теплового управління і обмежену здатність двигуна до виділення тепла, що є імперативною проблемою, яка повинна бути вирішена.

### Експериментальна частина

Для нестационарної температури тривимірної моделі PMSM стаціонарне рівняння в похідних теплопровідності у декартових координатах можна виразити рівнянням (1).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \quad (1)$$

Граничні умови в розв'язанні рівняння (1) визначаються формулою (2), включаючи природну конвекцію теплообміну з повітрям, випромінювання теплообміну з навколишнім середовищем і теплопровідність між двома різними матеріалами на кордонах.

$$\left\{ \begin{array}{l} -k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T_r - T_0) \\ -k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_0^4) \\ k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

Еквівалентне інтегрування для диференціальних рівнянь (1) і (2) визначається формулою (3).

$$\int_{\Omega} \left[ \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \right] d\Omega + \int_{\Gamma} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - q \right) + u_2 \left[ k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - h(T_0 - T) \right] + u_3 \left[ k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - \varepsilon \sigma (T_0^4 - T^4) \right] d\Gamma = 0 \quad (3)$$

де  $u, u_1, u_2$  и  $u_3$  – довільні функції. Нехай  $u = u_1 = u_2 = u_3 = dT$  за допомогою методу Гальоркіна, з рівняння (3) слідує наступне рівняння:

$$\int_{\Omega} \left[ \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \delta T \varphi \right] d\Omega - \int_{\Gamma} \left[ \delta T [q + h(T_0 - T) + \varepsilon \sigma (T_0^4 - T^4)] \right] d\Gamma = 0 \quad (4)$$

Коли метод кінцевих елементів прийнятий, вся модель PMSM розділена на безліч дрібних елементів, які складаються з декількох вузлів, ліній і поверхонь.

$$T(x, y, z, \tau) = \sum_e N_i(x, y, z) T_i(\tau) \quad (5)$$

Кінцеве рівняння поля температури зазвичай приймає форму

$$C \frac{dT}{d\tau} + KT = P, \quad (6)$$

де  $C$  – матриця теплоємності,  $K$  – матриця теплопровідності і  $P$  – температурне навантаження матриці; елементи матриць визначаються наступними рівняннями.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_y = \sum_e K_y^e + \sum_e H_y^e \\ C_y = \sum_e C_y^e \\ P_i = \sum_e P_{qi}^e + \sum_e P_{\psi i}^e + \sum_e P_{Hi}^e + \sum_e P_{Ri}^e \end{array} \right. \quad (7)$$

Всі перераховані параметри визначаються наступними інтерполяційними інтегралами в обсягах  $X$  або на поверхнях  $S$  кожного елемента:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_y^e = \int_{\Omega^e} \left( k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) d\Omega \\ H_{ij}^e = \int_{\Gamma^e} h N_i N_j d\Gamma \\ C_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \rho c N_i N_j d\Omega \\ P_{\psi i}^e = \int_{\Omega^e} \Psi N_i d\Omega \\ P_{qi}^e = \int_{\Gamma^e} q N_i d\Gamma \\ P_{Hi}^e = \int_{\Gamma^e} h T_0 N_i d\Gamma \\ P_{Ri}^e = \int_{\Gamma^e} \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) N_i d\Gamma \end{array} \right. \quad (8)$$

Найвищу температуру на внутрішній стороні корпусу біля статора обрано в якості місця контролю для оцінки терморегулюючої здатності корпусу.

У головному циліндричному корпусі тепло, накопичене металом, може бути розраховане за формулою (9).

$$Q_{\text{para}} = \begin{cases} \int_{T_{\text{init}}}^T mc_{\text{para}} dT & T < T_{m1} \\ \int_{T_{\text{init}}}^{T_{n1}} mc_{\text{para}} dT + \int_{T_{m1}}^T \frac{L}{T_{m2} - T_{m1}} dT & T_{m1} < T < T_{m2} \\ \int_{T_{\text{init}}}^{T_{n1}} mc_{\text{para}} dT + L + \int_{T_{m2}}^T mc_{\text{para}} dT & T > T_{m2} \end{cases} \quad (9)$$

Модель заміщення може бути визначена за формулою (10).

$$\eta = \begin{cases} 0 & 0 < T < T_{m1} \\ \frac{T - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}} & T_{m1} < T < T_{m2} \\ 1 & T > T_{m2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{m \cdot L}{V_s \cdot \Psi \cdot \tau} \quad (11)$$

Середня теплоакумуюча здатність матеріалу заміщення під час процесу нагрівання показує співвідношення, визначене у формулі (11).

### Висновки

У цій статті запропоновано метод контролю температури із застосуванням спеціального закритого кожуха двигуна, який описується математичною моделлю.

Робочий цикл двигуна є важливим фактором, що впливає на ефект терморегуляції корпусу на основі заміщення матеріалу. Тривалий час ефективного охолодження двигуна можна отримати як час переривання в кожному робочому циклі, що досить для повного вимірювання параметрів.

### Література

1. Qi H.T., Fu Y.L., Qi X.Y., Lang Y. Architecture optimization of more electric aircraft actuation system, *Chin. J. Aeronaut.* 24 (2011), 506–513.
2. Cao W.P., Mecrow B.C., Atkinson G.J., Bennett J.W., Atkinson D.J. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA), *IEEE Trans. Industr. Electron.* 9 (59) (2012), 3523–3531.
3. Kang R.J., Jiao Z.X., Wang S.P., Chen L.S. Design and simulation of electrohydrostatic actuator with a built-in power regulator, *Chin. J. Aeronaut.* 22 (2009), 700–706.
4. Bennett J.W., Mecrow B.C., Jack A.G., Atkinson D.J. A prototype electrical actuator for aircraft flags, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 46 (3) (2010), 915–921.
5. Morimoto S., Tong Y., Takeda Y., Hirasaka T. Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 14 (5) (1994), 511–517.
6. Yamazaki K., Seto Y. Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 42 (4) (2006), 1045–1052.
7. Moir I., Seabridge A. *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*, third ed., John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2008.
8. Guo H., Xu J.Q., Kuang X.L. A novel tolerant permanent magnet synchronous motor with improved optimal torque control for aerospace application, *Chin. J. Aeronaut.* 28 (2) (2015), 535–544.
9. Shi J.T., Zhu Z.Q. et al., Comparative study of synchronous machines having permanent magnet in stator, *Electr. Pow. Syst. Res.* 133 (2016), 304–312.
10. Farsane K., Desevaux P., Panday P.K. Experimental study of the cooling of a closed type electric motor, *Appl. Therm. Eng.* 20 (2000), 1321–1334.
11. Micallef C., Pickering S.J., Simmons K.A. et al., Improved cooling in the end region of a strip-wound totally enclosed fan-cooled induction electric machine, *IEEE Trans. Industr. Electron.* 55 (10) (2008), 3517–3524.
12. Pyrhonen J., Lindh P., Polikarpova M. et al. Heat-transfer improvements in an axial-flux permanent-magnet synchronous machine, *Appl. Therm. Eng.* 76 (2015), 245–251.
13. Kulkarni D.P., Rupertus G., Chen E. Experimental investigation of contact resistance for water cooled jacket for electric motors and generators, *IEEE Trans. Energy Convers.* 27 (1) (2012), 204–210.
14. Davin T., Pelle J., Harmand S., Yu R. Experimental study of oil cooling systems for electric motors, *Appl. Therm. Eng.* 75 (2015), 1–13.
15. Lim D.H., Kim S.C. Thermal performance of oil spray cooling system for in wheel motor in electric vehicles, *Appl. Therm. Eng.* 63 (2014), 577–587.

Рецензія/Peer review : 6.12.2019 р.

Надрукована/Printed : 02.01.2020

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Смирний М. Ф.