

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

В роботі представлена методика аналізу теплових полів електричних машин, побудована на основі рішень рівнянь теплопровідності. Показано, що температурний аналіз може являтися універсальним показником якості роботи складних електромеханічних систем, до яких безпосередньо відносяться електричні машини. Такий аналіз характеризує енергоефективність системи в цілому або його окремих вузлів. Фактичні значення температури у вузлах і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованої системи. В роботі також проведено натурне моделювання реально існуючого синхронного двигуна із збудженням від постійних магнітів з внутрішнім розташуванням магнітів у роторі (Interior Permanent Magnet, IPM). Аналіз проведеного моделювання синхронних двигунів на постійних магнітах з великим ступенем кореляції дозволяє апроксимувати одержані результати для електричних машин всіх типів та принципу дії. Методика теплового аналізу може мати прикладне застосування.

Ключові слова: електродвигун, температура, теплове поле, теплові втрати, рівняння теплопровідності, тепловий потік, вектор, градієнт.

V. STETSIUK, M. VLASUK
Khmelnytsky National University

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES OF ELECTRICAL MACHINES

The paper presents a method of analysis of thermal fields of electric machines, built on the basis of solutions of the equations of thermal conductivity and volume distribution of heat fluxes. Since energy losses are released inside the structural elements of the engine, its temperature field is a field with internal heat sources, and the thermal conductivity equation that describes this field is inhomogeneous. The derivation of the differential equation of thermal conductivity is based on the law of conservation of energy. It is shown that temperature analysis can be a universal indicator of the quality of complex electromechanical systems, which directly include electric machines. This analysis characterizes the energy efficiency of the system as a whole or its individual components. The actual values of temperature in the nodes and their relative difference with the corresponding maximum allowable values are an indicator of the optimality of the designed system. Electromagnetic and thermal fields have a mutual influence and are mutually correlated components in the calculations of electric motors. This connection directly affects the design of any type of electric machine. For a rational analysis it is necessary to find the optimal relationship between the intensity and distribution of electromagnetic and thermal fields. It is necessary to carry out a symbiosis of methods of electromagnetic and thermal calculations, integrating them into a general mathematical model, which should provide a clear picture of the general processes occurring in electric motors. The most suitable methods for modeling the processes of magnetic and thermal fields, as well as taking into account the nonlinearity of ferromagnetic properties are numerical methods. Numerical solution of field equations with the help of software and hardware and special programs based, for example, on the methods of finite differences (MCP) or finite elements (ITU) and others, allows almost without any simplifications and assumptions with high accuracy to calculate the field distribution in any electromechanical device, for example, using ANSYS, Matlab & Simulink, Femlab. The paper also performs a full-scale modeling of a real synchronous motor with excitation from permanent magnets with the internal arrangement of magnets in the rotor (Interior Permanent Magnet, IPM). Mathematical modeling of synchronous motors on permanent magnets, aimed at studying thermal processes, revealed the universality of this technique for all other classes of electric machines.

Keywords: electric motor, temperature, heat field, heat losses, heat conduction equation, heat flux, vector, gradient.

Вступ.

Промисловістю випускається досить широка номенклатура електричних машин, серед яких найбільшу цікавість представляють синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів (СДПМ). У порівнянні з колекторними і асинхронними машинами СДПМ мають ряд істотних переваг: високий ККД, можливість роботи на малих обертах, високі регульовальні властивості, підвищена переважувальна здатність, високі динамічні характеристики, надійність та підвищений ресурс роботи, високі питомі енергетичні показники (відсутність втрат на збудження за рахунок застосування постійних рідкоземельних магнітів), тощо. Однак, забезпечення якісних показників електричних машин в повній мірі залежить від грамотного проектування конструкції, підбору і поєднання матеріалів, вибору оптимальних режимів роботи, в тому числі і теплових. Все вищесказане стосується всіх електричних машин, не залежно від їх типу та принципу дії. Грамотний тепловий аналіз – запорука тривалої та надійної роботи будь-якого електродвигуна.

Основна частина.

Сумарну величину теплових втрат в вузлах синхронного двигуна на постійних магнітах можна оцінити через тепловий потік. Значення теплового потоку від будь-якого матеріального тіла – універсальний

показник якості, що характеризує енергетику і здатність вузла відпрацювати необхідний ресурс. Фактичні значення температури у вузлах і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованого електродвигуна. При цьому повинно виконуватися наступне критеріальне співвідношення:

$$\frac{T_{imax} - T_i}{T_{imax}} \leq 1 - C_0, \tag{1}$$

T_{imax} – гранично допустиме значення температури вузла (області) двигуна;

T_i – значення температури відповідного вузла;

C_0 – рекомендований запас, обумовлений певним інженерним досвідом побудови електричних машин.

Вибір конструкції, типу і параметрів обмоток, магнітної системи в цілому, повинні здійснюватися не тільки на підставі основних технічних параметрів (наприклад, заданих у ТЗ), але і з врахуванням теплових режимів електродвигуна (величини теплових втрат).

Методика теплового розрахунку електродвигуна, як правило, побудована на основі рішень рівнянь теплопровідності. Оскільки втрати енергії виділяються всередині елементів конструкції двигуна, поле його температури є полем з внутрішніми джерелами тепла, і рівняння теплопровідності, яке описує це поле є неоднорідним [1]. В основу виведення диференціального рівняння теплопровідності покладено закон збереження енергії, який в даному випадку може бути сформульовано таким чином: кількість теплоти dQ , введена в елементарний об'єм ззовні за час $d\tau$ внаслідок теплопровідності, а також від внутрішніх джерел, дорівнює зміні внутрішньої енергії або ентальпії речовини, що міститься в елементарному об'ємі:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \tag{2}$$

де dQ_1 – кількість теплоти, [Дж], введеної в елементарний об'єм шляхом теплопровідності за час $d\tau$;

dQ_2 – кількість теплоти, яка за час $d\tau$ виділилася в елементарному об'ємі dV за рахунок внутрішніх джерел;

dQ – зміна внутрішньої енергії, що міститься в елементарному об'ємі dV за час $d\tau$.

Кількість теплоти dQ , підведена в результаті теплопровідності до об'єму dV із рівняння (2.2) може бути визначена наступним чином:

$$dQ_1 = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz d\tau, \tag{3}$$

Поширення теплових потоків в загальному випадку в одиничному об'ємі приведено на рис. 1.

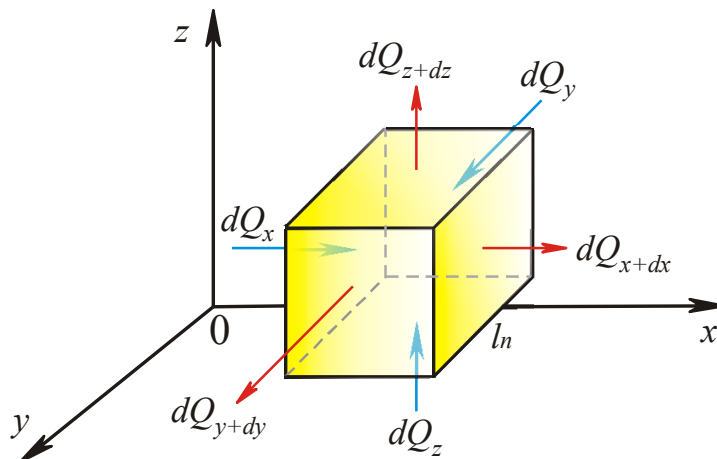


Рис. 1. Об'ємний розподіл теплових потоків

Кількість теплоти dQ_2 із рівняння (2):

$$dQ_2 = q_V dV d\tau, \tag{4}$$

де q_V – потужність внутрішніх джерел теплоти, [Вт/м³].

І, нарешті, зміна внутрішньої енергії dQ із рівняння (2):

$$dQ = C_V \frac{\partial t}{\partial \tau} dV d\tau = c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV d\tau, \tag{5}$$

де C_V – теплоємність одиниці об'єму, $[Дж/(м^3 \cdot K)]$; c_V – теплоємність одиниці маси, $[Дж/(кг \cdot K)]$; ρ – щільність речовини, $[кг \cdot м^3]$.

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\text{div} \vec{q} + q_V. \quad (7)$$

Для функції $u(x, y, z, t)$ трьох просторових змінних (x, y, z) і часу t , рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\xi \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

Для довільної системи координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \xi \nabla^2 u = 0, \quad (9)$$

де ξ – додатна константа, ∇^2 – оператор Лапласа.

Із врахуванням динаміки процесу поширення теплоти, у виразі для щільності теплового потоку Фур'є з'являється додатковий член:

$$\vec{q} = -\sigma_t \text{grad}(t) - \tau_r \frac{\partial \vec{q}}{\partial \tau} \quad (10)$$

де σ_t – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $[Вт/(м \cdot K)]$.

Основним недоліком такого підходу для аналізу поля температури є невизначеність при виборі коефіцієнтів теплопровідності вузлів електродвигуна і значень коефіцієнтів теплопередачі [1]. З метою уточнення цих параметрів розрахунок виконується на основі застосування законів теплопровідності, а величини коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну визначаються експериментально на модельних установках. При цьому доводиться оперувати поняттями середніх величин коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну, що відносяться до двигунів в цілому, або до великих конструктивних вузлів.

Основний закон теплопровідності встановлює кількість тепла, що проходить через поверхню dF за час $d\tau$ в залежності від grad і властивостей матеріалу – встановлений емпірично. Якщо $d\vec{q}/d\tau = 0$ виразу (10), то:

$$\vec{q} = -\sigma_t \text{grad}(t), \quad (11)$$

В інтегральній формі це вираз запишеться так (якщо мова йде про стаціонарний потік тепла від однієї грані паралелепіпеда до іншої, рис. 1):

$$P = -\sigma_t \frac{S \Delta t}{l_n} \quad (12)$$

де P – повна потужність теплових втрат, S – площа перетину паралелепіпеда, Δt – перепад температури граней, l_n – лінійні розміри паралелепіпеда, тобто відстань між гранями.

Гradient температури являється вектором, спрямованим по нормалі до ізотермічної поверхні в бік зростання температури і чисельно рівний частковій похідній від температури за цим напрямком. За додатний напрямок gradientа приймається напрям зростання температури:

$$\text{grad}(t) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left. \frac{\Delta t}{\Delta n} \right| \quad (13)$$

Розглянемо характер зміни температури по товщині стінки і тепловий потік через стінку. Нескінченно велика плоска стінка товщиною l і теплопровідністю σ передає тепло при постійних температурах на границі t_1 і t_2 (граничні умови):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \xi \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (14)$$

При розглянутих умовах теплота може поширюватися тільки вздовж осі x і температурне поле буде одновимірним:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \quad (15)$$

Після інтегрування виразу (14) та підстановок t_1 і t_2 , отримаємо рівняння температурного поля:

$$t = \frac{t_2 - t_1}{l_2} \cdot x + t_1 \quad (16)$$

де l_2 – товщина стінки з боку температури t_2 .

Щільність теплового потоку через плоску стінку:

$$q = -\sigma_t \frac{dt}{dx} = \frac{\sigma_t(t_1 - t_2)}{l} = \frac{t_1 - t_2}{R_t}, \quad R_t = \frac{l}{\sigma_t} \quad (17)$$

де R_t – термічний опір плоскої стінки.

Подальше рішення зводиться до розгляду теплової схеми заміщення, де використовується аналогія із законом Ома для електричного кола. Термічні опори вилучаються із простих геометричних фігур, на які можна розбити весь аналізований об'єм електричного двигуна.

Зв'язок коефіцієнта теплопровідності σ_t з питомою електричною провідністю σ_e в металах встановлює закон Відемана-Франца:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_e} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 T, \quad (18)$$

де k – постійна Больцмана;

e – заряд електрона;

T – абсолютна температура.

Відповідно до різноманітності умов тепловідводу для теплового розрахунку електричних двигунів використовуються різні методи [2]:

1. Метод точного або наближеного аналітичного рішення рівнянь для трьох або двовірних температурних полів зазвичай застосовується при значній нерівномірності поля. При цьому часто потрібні певні спрощення геометричної форми і граничних умов в математичній моделі.

2. Чисельний метод сіток застосовується в подібних випадках, але не вимагає значних спрощень форми розрахунку областей простору.

3. Метод одновимірного температурного поля застосовується для розрахунку розподілу температури по довжині обмоток і інших частин електричних машин. Оснований на приведенні трьох- і двовірних полів до одновимірного шляхом спрощеного представлення теплопередачі вздовж всіх осей координат, крім однієї, за допомогою дискретних параметрів (теплових опорів).

4. Метод еквівалентних теплових схем (ЕТС) набув найбільшого поширення зважаючи на простоту і достатню точності розрахунку. Недолік методу полягає в тому, що він дає не повну картину температурного поля, а тільки деякі середні значення температури для окремих елементів машини. Даний метод оснований на використанні теплових опорів, що з'єднуються в теплову мережу, яка імітує реальні шляхи передачі теплових потоків в машині, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом, основану на однаковій формі основного закону теплопровідності (закон Фур'є).

Найбільш придатними методами для моделювання процесів магнітних і теплових полів, а також обліку нелінійності феромагнітних властивостей є чисельні методи. Чисельне рішення рівнянь поля за допомогою програмно-апаратних засобів та спеціальних програм, основаних, наприклад, на методах скінченних різниць (МСР) або скінченних елементів (МСЕ) та інших, дозволяє практично без будь-яких спрощень і припущень з високою точністю розрахувати розподіл поля в будь-якому електромеханічному пристрої, наприклад, за допомогою ANSYS, Matlab&Simulink, Femlab [3, 4]. Для проведення натурного моделювання візьмемо реальний синхронний двигун MITRON типу IPM (рис. 2)

Висновки.

В роботі представлена методика аналізу теплових полів електричних машин, побудована на основі рішень рівнянь теплопровідності. Значення теплового потоку від будь-якого матеріального тіла – універсальний показник якості, що характеризує енергетику і здатність вузла відпрацювати необхідний ресурс. Фактичні значення температури у вузлах і їх відносна різниця з відповідними гранично допустимими значеннями є показником оптимальності спроектованого електродвигуна.

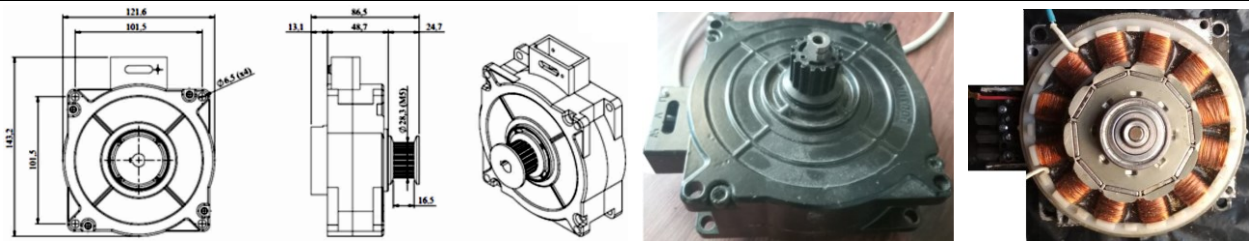


Рис. 2. Фото реального синхронного двигуна MITRON типу IPM

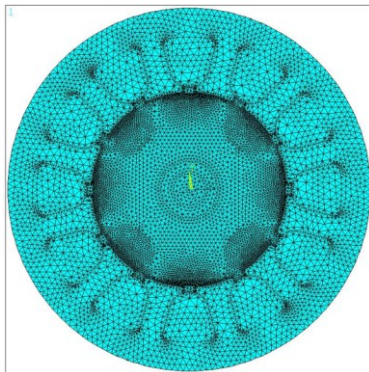


Рис. 3. Геометрія активної частини СДПМ з сіткою кінцевих елементів

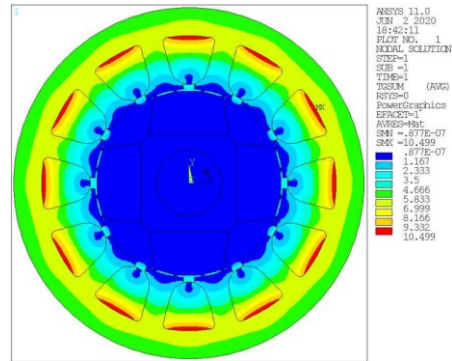


Рис. 4. Розподіл модуля вектора градієнта температури (°C/м)

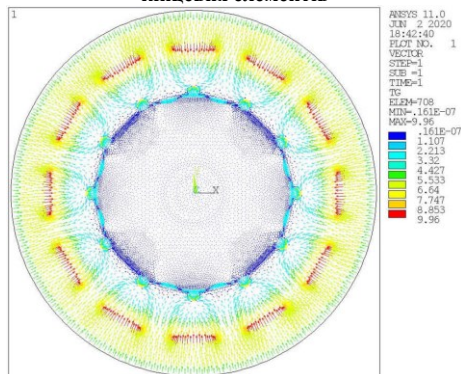


Рис. 5. Розподіл модуля вектора теплового градієнта у вигляді векторів (°C/м)

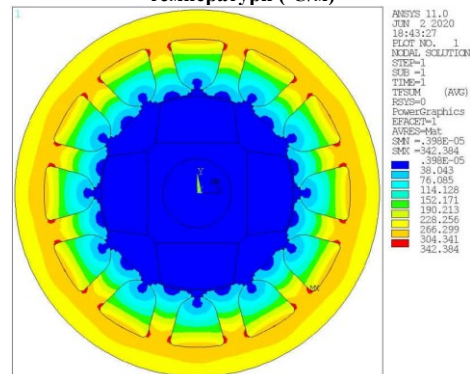


Рис. 6. Розподіл модуля вектора теплового потоку (Дж/с)

Електромагнітне і теплове поля мають взаємний вплив і являються взаємнокореляційними складовими при розрахунках електродвигунів. Цей зв'язок безпосередньо впливає на конструкцію електричної машини будь-якого типу. Для раціонального аналізу необхідно знайти оптимальне співвідношення між інтенсивністю і розподілом електромагнітних і теплових полів. Необхідно здійснити симбіоз методик електромагнітних і теплових розрахунків, інтегрувавши їх в загальній математичній моделі, яка повинна надати наочну картину загальних процесів, що протікають в електродвигунах.

Математичне моделювання синхронних двигунів на постійних магнітах, направлене на вивчення теплових процесів виявило універсальність даної методики для всіх інших класів електричних машин.

Література

1. Анненков А. Н. Анализ теплового поля на постоянных магнитах с применением обратных связей по температурам / А. Н. Анненков, С. С. Акимов // Энергия-XXI век / Журнал. – Воронеж: 2013, – №1 (84), – С. 35-39.
2. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М.: ДМК Пресс, 2006. – С. 240.
3. Документація Simulink: URL: <https://docs.exponenta.ru/simulink/index.html>. (дата звернення: 29.10.2020).
4. Система конечноэлементных расчётов FEMLAB 3.x. Документація. URL: http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/2_1_4.php (дата звернення: 4.11.2020).

References

1. Annenkov A. N. Analiz teplovoho polia na postoianniakh mahnytakh s pryomeneniyem obratnykh svyazi po temperaturam / A. N. Annenkov, S. S. Akymov // Enerhiya- XXI vek / Zhurnal. – Voronezh: 2013, – №1 (84), – С. 35-39.
2. Basov K. A. ANSYS y LMS Virtual Lab. Neometrycheskoe modelyrovanye. – М.: DMK Press, 2006. – С. 240.
3. Dokumentatsiya Simulink: URL: <https://docs.exponenta.ru/simulink/index.html>. (data zvernennia: 29.10.2020).
4. Sistema konechnoelementnykh raschetov FEMLAB 3.x. Dokumentatsiya. URL: http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/2_1_4.php (data zvernennia: 4.11.2020).

Надійшла / Paper received : 06.11.2020 р. Надрукована/Printed : 04.01.2021 р.