

Температурна діагностика приводних систем за наявності шумів

Богдан Благітко¹, Ігор Заячук², Ігор Ярмолівський³

¹ к. т. н., доцент, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. ген. Тарнавського, 107, Львів, e-mail: blagitko@electronics.wups.lviv.ua

² к. т. н., с. н. с., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудасва, 15, Львів, 79005, e-mail: igorzaj@litech.lviv.ua

³ Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. ген. Тарнавського, 107, Львів

Зміна температурного поля впливає на робочі характеристики мехатронічних систем. Системи електричного приводу є найбільш важливими джерелами теплової емісії всередині пристрою. Робота присвячена проблемам моделювання й ідентифікації змін температурного поля в електродвигуні. Розглянуто метод ідентифікації, який базується на спільному використанні вейвлет-перетворення та нечіткої логіки. Проаналізовано основні принципи розроблених вимірювальних систем для проведення температурних вимірювань параметрів електродвигунів.

Ключові слова: мехатронічний пристрій, електричний привід, двигун постійного струму, вейвлет-перетворення, нечітка логіка.

Вступ. Мехатронічні пристрої, у яких механічні функції реалізуються як результат збудження з керуючого модуля, можуть впливати на параметри фізичних явищ. Багато з цих явищ залежать від температури підсистем пристрою. Ця температура визначається навколишніми умовами та термічними ефектами всередині пристрою [1].

Підвищення температури підсистем, яке спричинене випромінюванням теплоти, може мати як позитивний, так і негативний вплив на властивості пристрою. Позитивним ефектом є покращення змащувальних властивостей, зріст еластичності пластикових і гумових елементів, утворення ізоляційного шару, прискорення хімічних реакцій у пристрої, який працює за низьких температур. До негативних ефектів належать посилене старіння матеріалів, погіршення робочих характеристик пристрою, незворотні магнітні втрати в постійних магнітах.

У системах електричного приводу зміна температури інтенсивно впливає на електричні та фізичні явища в них. Якщо в пристрої відбувається перетворення енергії, то випромінюється тепла енергія. У модулях живлення випромінювання теплоти призводить до електричних втрат. Зменшити вплив теплової енергії на чутливі до температурних змін елементи можна шляхом їх віддалення від модулів пристрою, які випромінюють тепло. Також негативним є вплив теплової емісії на роботу двигуна. Ця емісія зумовлена взаємним розміщенням його елементів. Для прикладу, висока температура вала двигуна спричиняє деформацію пластикових шестерень, які передають його обертання навантажувальному пристрою.

1. Розробка математичної моделі

У процесі побудови температурної моделі пристрою використовують результати аналізу впливу температури на характеристики пристрою, а також дані про шляхи теплових потоків. Базова математична модель двигуна постійного струму описується системою диференціальних рівнянь [2]

$$u = R_t i + L \frac{di}{dt} + K_E \omega, \quad (1)$$

$$K_T i = (J_s + J_h) \frac{d\omega}{dt} + K_D \omega + M_F \text{sign}(\omega) + M_h, \quad (2)$$

де i — струм у роторі, J_h та J_s — моменти інерції привідних елементів і ротора відповідно, K_D — константа в'язкого затухання, K_E — константа напруги, K_T — обертова константа, L — індуктивність ротора, M_F — статичний коефіцієнт тертя обертового моменту, M_h — початковий обертовий момент, R_t — опір ротора, u — контрольна напруга, ω — кутова швидкість обертання ротора.

Підвищення температури елементів двигуна, яке спричинене його роботою, зумовлює зміну характеристик двигуна. Особливо зростає опір ротора

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(T_r - T_0)], \quad (3)$$

де R_0 — опір ротора при температурі T_0 , α — температурний коефіцієнт магнетної індукції, T_0 — задана температура, T_r — миттєва температура ротора. Результат цієї зміни проявляється у збільшенні електромеханічних часових констант двигуна. Зростання температури, спричинене магнетною індукцією, зумовлює зменшення індукції в повітряному проміжку й обертового моменту. В результаті зменшуються напругові константи, а саме

$$K_E = K_{E0} [1 - \beta(T_s - T_0)], \quad (4)$$

$$K_T = K_{T0} [1 - \beta(T_s - T_0)], \quad (5)$$

де K_{E0} — константа напруги при температурі T_0 , K_{T0} — обертова константа при температурі T_0 , T_s — миттєва температура статора, β — термічний коефіцієнт магнетної індукції. Співвідношення (3)-(5) можуть використовуватися лише тоді, коли відомі збільшення температури ротора та температури, спричиненої магнетною індукцією.

При розробці температурної моделі необхідно розрізняти щонайменше два термічних тіла, температура яких впливає на параметри двигуна. Ця модель включає рівняння термічного балансу ротора та статора [3].

Джерелами теплоти є електричні втрати в обмотках і струмові вихори. Подамо втрати в обмотках ротора у вигляді

$$P_r = i^2 R_t. \quad (6)$$

Для визначення термічної потужності всередині статора маємо

$$P_{rs} = 1/R_{rs} (T_r - T_s), \quad (7)$$

де R_{rs} — термічний опір між ротором і статором.

2. Моніторинг залежних від температури параметрів

Застосування моделі в інженерних і дослідницьких роботах вимагає знання як електромеханічних, так і термальних параметрів двигуна. Під час розрахунку термічної ємності й опору незнання конструктивних особливостей приводить до вагомих помилок. Зокрема, для розрахунку термічного опору необхідно враховувати механізми проходження теплового потоку через внутрішні складові мехатронічної системи. Для проведення моніторингу температурних параметрів двигуна скористаємося температурним методом і методом, основою якого є вейвлет-перетворення та нечітка логіка.

У температурному методі максимум різниці між температурами у вибраних точках статора приймаємо за критерій виявлення підвищення його температури.

Обчислити величини опору можна, якщо відомі температура аналізованого тіла, температура оточуючого середовища, а також тепловий потік між тілом і зовнішнім середовищем у рівноважному стані. Теоретично можна реалізувати два підходи. Згідно з першим, приймають, що різниця температури двох тіл є постійною упродовж вимірювання теплового потоку. Другий підхід полягає у забезпеченні теплового потоку визначеної величини та вимірюванні температури між тілом і оточуючим середовищем. Суттєвою проблемою є вимірювання теплового потоку між об'єктами, тому другий метод є прийнятливіший.

Для обчислення опорів R_{rs} і R_{sa} (термічний опір між статором і зовнішнім середовищем) необхідно знати температури ротора, статора й оточуючого середовища, а також потужності P_r і P_{rs} . При цьому, динамічними компонентами ми нехтуємо, оскільки величини ємностей C_r і C_s є незначними [3].

Програмне забезпечення для розрахунку такої моделі запропоновано в [3].

Для проведення експерименту потрібно вибрати область всередині двигуна, у якій встановлюється температурний сенсор. Окрім цього, необхідно забезпечити задану величину теплового потоку, рівноважний термічний стан в об'єкті, вимірювання температури досліджуваного тіла в рівноважному стані. Об'єктом дослідження вибрано мікродвигун РВМ-40 [4]. Двигун має зовнішній діаметр 40 мм, його максимальна потужність — 5 Вт.

Приймаємо, що двигун постійного струму містить лише електромеханічні підсистеми [3]. Тому використаємо рівняння стану для опису електромеханічної частини двигуна. У загальному випадку рівняння (1), (2) можна записати так

$$\dot{\vec{z}}(t, \vec{P}) = A(\vec{P})\vec{z}(t, \vec{P}) + B(\vec{P})\vec{r}(t), \quad (8)$$

де \vec{z} — вектор стану змінних i , $\vec{\omega}$; $\vec{r}(t)$ — вектор заданих сигналів $u(t)$; у векторі \vec{P} згруповані електромеханічні параметри ($J_h, J_s, K_D, K_E, K_T, L, R_t, M_h$).

При застосуванні описаного методу для діагностики мехатронічної системи та моніторингу залежних від температури параметрів двигуна постійного струму необхідно зробити наступні логічні кроки:

- виміряти сигнали реального двигуна;
- провести симуляцію сигналів номінального двигуна;

- застосувати вейвлет-перетворення для усунення шуму з суміші сигнал-шум;
- для побудови засад прийняття рішення скористатися правилами нечіткої логіки;
- визначити параметри для моніторингу температурних ефектів.

3. Результати експериментальних досліджень

Для аналізу температурних явищ системи електричного приводу проведено температурні вимірювання.

У методі температурного вимірювання використано контактний сенсор резистивного типу. Сенсор достатньо малий (\varnothing 2 мм), щоб його можна було вмонтувати у виділеному місці. Опір виконує функцію давача тепла для безконтактного вимірювання температури пірометром. У такий спосіб доцільно вимірювати температуру рухомих поверхонь. Однак дослідження показали, що вимірювання температури в рухомих частинах мікродвигуна з допомогою контактного методу є ефективнішим і точнішим. Застосування контактного сенсора для вимірювань на рухомому роторі вимагає застосування спеціального модуля для передачі сигналу. Під час тестів із рухомих ротором використовується модуль із ковзкими кільцями.

Основним критерієм при дослідженнях є дотримання стабільного значення потужності двигуна. Необхідна величина потужності забезпечується з допомогою контрольного модуля у вигляді програмного забезпечення. Цифроаналоговий перетворювач (ЦАП) є частиною контрольного модуля, розміщеного зовні комп'ютера. ЦАП перетворює величину потужності в аналоговий сигнал, який поступає до PD-контролера. Контролер слідкує за тим, щоб фактична потужність не перевищувала допустиму.

Електронний модуль вимірює миттєві значення величини струму та напруги й обчислює активну електричну потужність. Сигнал контрольного каналу забезпечує ефективну стабілізацію потужності в процесі першого етапу експерименту. Це суттєво для визначення температурно-часової константи ротора на основі температурної характеристики елементів двигуна. Залежність температурної константи від часу для двигуна РМВ-40 ілюструють криві на рис. 1.

Для вибраного двигуна опір дає можливість забезпечити стабільну електричну потужність до 100 Вт, якщо струм і напруга не перевищують 10 А і 10 В відповідно. У процесі вимірювання важливо знати величину постійної напруги, а також проводити неперервне вимірювання швидкості. Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що всередині широкого часового вікна систематична похибка при визначенні температурно-часової константи ротора не перевищує 6 %.

Наступний етап експерименту включає електромеханічні вимірювання. Досліджуваний двигун з'єднаний зі шпилем динамометра, який оснащений давачем деформації для перетворення прикладеного обертового моменту. Експериментальні дані було отримано при навантаженнях $M_1 = 20$ Н·мм і $M_2 = 30$ Н·мм. Кутову швидкість двигуна вимірювали тахогенератором. Із допомогою PD-контролера обчислювали миттєві значення величини прикладеного обертового моменту.

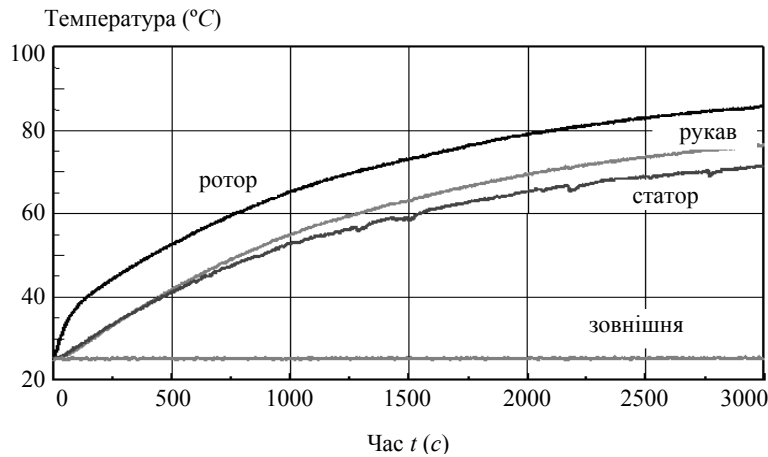


Рис. 1. Температурна характеристика елементів двигуна РМВ-40

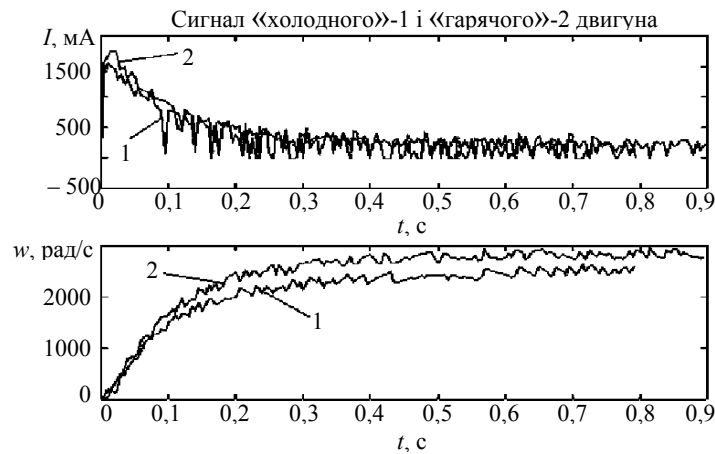


Рис. 2. Сигнал «холодного» та «гарячого» двигуна постійного струму

На рис. 2 показані експериментально отримані залежності струму в якорі від кутової швидкості ротора для «холодного» та «гарячого» двигуна постійного струму. «Холодний» ротор має температуру $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ й опір $R(T_0) = 6\text{ }\Omega$. Застосувавши вейвлет-перетворення та нечітку логіку для ідентифікації «гарячого» двигуна постійного струму, обчислено опір $R(T_r)$, величина якого є в межах $7,1\div 7,2\text{ }\Omega$. З використанням рівняння (3) знайдено температуру «гарячого» двигуна T_r . Ця температура дорівнює $76\div 78\text{ }^\circ\text{C}$.

4. Порівняльна характеристика методів моніторингу параметрів двигуна, які залежать від температури

Температурний метод застосовується для моніторингу температури ротора та статора. До позитивних аспектів цього методу можна віднести можливість передбачення зміни температури, а основними його недоліками є тривалий час вимірювань і низька точність обчислених параметрів досліджуваного об'єкта.

Метод, який базується на вейвлет-перетворенні та нечіткій логіці, застосовано для розрахунку параметрів R_t , K_E , K_T . Використання біртогонального вейвлета біорб.8 із рівнем розкладу $j=5$ дає найкращі результати. Температуру статора та ротора визначаємо з рівнянь (3)-(5). Перевагою цього методу є незначний час вимірювань, а недоліком — високі обчислювальні вимоги.

Результати порівняльного аналізу методів температурної діагностики, які використовувалися для моніторингу температурно-залежних параметрів двигуна постійного струму РВМ-40, подано у таблиці.

Таблиця

Назва методу	Час вимірювання	Обчислювальні затрати	Систематична похибка
Температурний метод	90÷120 хвилин	середні	6-10%
Вейвлет-перетворення та нечітка логіка	1 секунда	високі	10-15%

Висновки. У статті проаналізовано системи діагностики експериментального контролю теплових процесів, які відбуваються в електромеханічних системах. Запропоновано й описано два різних методи діагностики температурних змін параметрів двигуна. Результати дослідження показали, що обидва методи можуть використовуватися для моніторингу температурних змін у привідних системах.

Література

- [1] *Blagitko B., Brygilewich W., Yarmolovskyj I.* Temperature diagnosis of drive systems with a noise // XIII International symposium on Theoretical Electrical Engineering. — Lviv: July 4-7, 2005. — P. 319-322.
- [2] *Благітко Б. Я., Рабик В. Г.* Теоретичні засади діагностики аналогових кіл постійного струму // Респ. міжвуз. наук.-техн. зб. «Теоретична електротехніка». — Львів, 1985. — Вип. 44. — С. 121-129.
- [3] *Wierciak J.* Measuring systems for investigations into thermal phenomena appearing in drive systems with electric micromotors // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. — 2000. — № 38. — P. 669-691.
- [4] *Brygilewich W., Wierciak J.* Monitoring of temperature dependent parameters in drive systems with electric micromotors // IV International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering». — Zakopane, 2002. — P. 44-47.

Temperature diagnostics of the drive systems at presence of noises

Bohdan Blagitko, Igor Zayachuk, Igor Yarmolovskyj

Thermal phenomena occurring in mechatronic devices may effect on device performance characteristics in various ways. Electrical drive systems are among the most significant sources of heat emission inside of the device. The paper concerns the problems of modelling and identification of thermal changes of drive systems. The identification method based on wavelet transform and fuzzy logic has been applied. The designed measuring systems for implementation of temperature measuring of parameters of electromotor are discussed.

Температурная диагностика приводных систем при наличии шумов

Богдан Блажитко, Игорь Заячук, Игорь Ярмоловский

Изменение температурного поля влияет на рабочие характеристики электромеханических систем. Системы электрических приводов относятся к одним из наиболее важных источников тепловой эмиссии внутри приборов. Работа посвящена проблемам моделирования и идентификации влияния изменений температурного поля на параметры электромотора. Рассмотрен метод идентификации, базирующийся на совместном применении вейвлет-преобразования и нечеткой логики. Проанализированы основные принципы разработанных измерительных систем для выполнения температурных измерений параметров электромоторов.

Отримано 07.11.07