

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 62-83-529.015

О.В. Балахонцев, аспір.**О.С. Бешта, д.т.н., проф.****С.Г. Ківільов, студ.****С.С. Худолій, аспір.***Національний гірничий університет***МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМАХ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**

Пропонується новий принцип організації теплового захисту в системах електропривода. Принцип заснований на використанні теплової моделі електродвигуна для непрямого визначення номінального струму електродвигуна.

Відомо, що майже кожна електроустановка обладнується захисними пристроями. В найпростішому випадку (найчастіше) це – плавкий запобіжник або автоматичний вимикач. Системи електроприводів у складі відповідальних технологічних процесів обладнуються спеціальними системами захисту. Ці системи реалізують відключення живильної напруги при виникненні аварійних режимів роботи електропривода – коротких замикань, обривів фаз, перенапруг або падіння напруги до недозволеного рівня тощо.

Існують системи різного ступеня складності. За кордоном спостерігається тенденція впровадження т.з. “інтелектуальних систем захисту”, тобто систем, в яких інтегровані функції визначення контрольованих параметрів, їх моніторингу та оперативного реагування на аварійні ситуації. Використання мікропроцесорних технологій дозволяє реалізувати в таких системах складні наукові методики для визначення параметрів режимів роботи електроприводів.

Сучасний стан вітчизняної промисловості має певні особливості. Підприємства вимушені експлуатувати двигуни, що пройшли один або декілька капітальних ремонтів. Але відомо, що після ремонту суттєво змінюється їх навантажувальна здатність. Це трапляється внаслідок особливостей технології ремонту електродвигунів, під час якого їх сталь та обмотки підлягають термічній або хімічній обробкам. В результаті цього погіршується ізоляція між листами шихтованих магнітопроводів, зростають термальні втрати. Експлуатація такого двигуна у тому ж режимі, що був до ремонту, призводить до виходу його з ладу внаслідок теплового пробоя ізоляції. За даними статистики майже всі відремонтовані двигуни виходять з ладу впродовж першого року експлуатації, близько 40 % з них – у перші три місяці [1,2]. Доведено, що реальна навантажувальна здатність електродвигунів після ремонту падає на 20–40 % відносно паспортної потужності [1,3].

Таким чином, окрім перерахування режиму роботи електродвигуна необхідне використання спеціальних підходів щодо теплового захисту системи електропривода. Доцільно розробити систему захисту електродвигуна від теплового перевантаження з урахуванням його реальної навантажувальної здатності.

Традиційним методом визначення номінальної потужності електродвигунів є випробування на нагрівання. Двигун, що досліджується, механічно сполучається із навантажувальною машиною. Впродовж кількох годин здійснюється навантаження двигуна, потім вимірюється температура його обмоток. Очевидні недоліки такого підходу – значна енергоємність, необхідність механічного з'єднання електродвигунів, складність експерименту.

Авторами статті запропоновано новий метод визначення номінальних параметрів електродвигунів. Метод ґрунтується на використанні т.з. “теплових моделей” електродвигунів, які використовуються в класичній теорії їх проектування та розрахунків. Теплова модель електродвигуна відбиває теплову картину в ньому та дозволяє визначити температури в його окремих вузлах. Для цього необхідні дані про теплові провідності конструктивних частин електродвигунів та значення теплових втрат в електродвигуні.

Для визначення та розподілу теплових втрат в електродвигуні скористаємося таким методом.

Укладемо рівняння енергобалансу електромеханічної системи електропривода, що працює в режимі холостого ходу. В загальному випадку воно має вигляд:

$$\Delta P = \Delta P_{м1} + \Delta P_c + \Delta P_{м2} + (\Delta P_{мех} + \Delta P_{доd}), \quad (1)$$

де ΔP – втрати холостого ходу;

$\Delta P_{м1}$ – втрати у міді статора (якоря);

$\Delta P_{м2}$ – втрати у міді ротора (обмотки збудження);

$(\Delta P_{мех} + \Delta P_{доd})$ – механічні та додаткові втрати;

ΔP_c – втрати у сталі.

Додаткові втрати викликані зубчатістю статора і (або) ротора і залежать від швидкості обертання електричного двигуна.

Рівняння (1) дійсне для всіх видів двигунів, але для двигунів постійного і синхронного струмів втрати в обмотці збудження $\Delta P_{м2}$ враховуються окремо від втрат холостого ходу ΔP , для цих двигунів складається рівняння, що не враховує ці втрати.

Розглянемо метод розподілу втрат на прикладі асинхронного двигуна (АД).

Для асинхронного двигуна формули для розрахунку теплових втрат мають вигляд, наведений у табл. 1.

Таблиця 1

Формули для розрахунку втрат в АД

Вхідна потужність, ΔP	$3U_1 I_1 \cos \phi$
Втрати в міді статора, $\Delta P_{м1}$	$3I_1^2 R_1$
Втрати в обмотці ротора, $\Delta P_{м2}$	$3I_2^2 R_2$
Втрати в сталі, ΔP_c	$dU_1^2 f^\alpha$

У формулах табл. 1: U_1 – живильна напруга, I_1, I_2 – струми статора та ротора, $\cos \phi$ – коефіцієнт потужності, R_1, R_2 – активні опори обмоток статора та ротора, f – частота живильної мережі, d – коефіцієнт, що враховує дефекти при обробці сталі, $\alpha = 1,3 \dots 1,5$ – емпіричний коефіцієнт.

Таким чином, для визначення теплових втрат в різних режимах роботи електромеханічної системи необхідне знання параметрів R_1, R_2, df^α . Прийнемо ці параметри як невідомі, для їх визначення скористаємося методами регресійного аналізу.

З точки зору регресійного аналізу [4] рівняння (1) являє собою регресійну двофакторну модель:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \quad (2)$$

У нашому випадку $Y = \Delta P$; $b_0 = \Delta P_{мех} + \Delta P_{доd}$; $b_1 = R_1$; $b_2 = df^\alpha$; $X_1 = 3I_1^2$; $X_2 = U_1^2$. Нехтуючи в режимі холостого ходу додатковими втратами $\Delta P_{доd}$, можна прийняти $b_0 = \Delta P_{мех}$.

Для розподілу втрат в сталі і механічних, а також для визначення активного опору статора необхідно визначити невідомі коефіцієнти b_0, b_1, b_2 .

Ідентифікацію невідомих параметрів АД можна реалізувати в системі: перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД) або регулятор напруги – асинхронний двигун (РН-АД). Необхідно провести серію вимірів струму та напруги статора на різних рівнях живильної напруги або частоти. Якщо зроблено N вимірів, то отримані дані можна записати у матричному вигляді:

$$Y = X \cdot B, \quad (3)$$

де $Y^T = \|Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_N\|$;

$$X = \begin{pmatrix} X_0 & X_{11} & X_{12} \\ X_0 & X_{21} & X_{22} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_0 & X_{N1} & X_{N2} \end{pmatrix};$$

$$V^T = \|b_0 \quad b_1 \quad b_2\|;$$

X_0 – фіктивний чинник, що дорівнює одиниці.

Відповідно до теорії регресійного аналізу коефіцієнти системи рівнянь можуть бути отримані у вигляді:

$$V = (X^T X)^{-1} X^T Y. \tag{4}$$

Перевірка значущості рівняння регресії (2) здійснюється за критерієм Фішера, значущість коефіцієнтів регресії – за критерієм Стьюдента.

Запропонований методологічний підхід є загальним для основних типів двигунів і дозволяє визначити і розділити втрати при роботі електричних двигунів у режимі холостого ходу. При цьому двигуни повинні бути підключенні до відповідних джерел живлення для регулювання запропонованих чинників. Основною умовою реалізації експерименту є сталість кутової швидкості двигунів, що повинно забезпечуватися системою регулювання джерел живлення. Спільність алгоритму обчислення витрат та інших параметрів для різних типів машин дозволяє узагальнити науковий підхід при створенні систем інтелектуального захисту електромеханічних систем різних типів.

Отже, дані, отримані в результаті експериментів у режимі холостого ходу за методами регресійного аналізу, є вхідними параметрами для визначення максимального значення струму двигуна, при якому забезпечується допустимий тепловий режим. За допомогою теплової моделі електродвигуна складемо систему рівнянь відносно гріючих втрат та відносно теплових провідностей його окремих частин. Вузлами теплової моделі є окремі види втрат, що визначаються за допомогою рівняння (4). Між вузлами циркулюють теплові потоки, обумовлені різницею температур. Згідно з законами теплообміну в i -ому вузлі:

$$\sum Q_{вх,i} + \sum \Delta P_i = \sum Q_{вих,i}, \tag{5}$$

де $\sum Q_{вх,i}$ – сума теплових потоків, що надходять до i -го вузла теплової моделі;

$\sum \Delta P_i$ – сума втрат, що гріють електричний двигун, в i -му вузлі;

$\sum Q_{вих,i}$ – сума теплових потоків, що витікають з i -го вузла.

Між i -м та j -м вузлами тепловий потік визначається таким чином:

$$Q_{i,j} = \lambda_{i,j} (\theta_i - \theta_j), \tag{6}$$

де $\lambda_{i,j}$ – теплова провідність між вузлами i та j ;

θ_i, θ_j – відповідні перевищення температур в i -му та j -му вузлах над температурою зовнішнього повітря.

Матрична форма запису системи з N рівнянь теплової моделі електричної машини має вигляд:

$$\Delta P = \lambda \cdot \theta, \tag{7}$$

де $\Delta P^T = |\Delta P_1 \quad \Delta P_2 \quad \dots \quad \Delta P_i \quad \dots \quad \Delta P_N|;$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{\Sigma,1} & -\lambda_{12} & \dots & -\lambda_{1,i} & \dots & -\lambda_{1,N} \\ -\lambda_{21} & \lambda_{\Sigma,2} & & & & -\lambda_{2,N} \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ -\lambda_{j,1} & & & \lambda_{\Sigma,j} & & -\lambda_{j,N} \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ -\lambda_{N,1} & -\lambda_{N,2} & \dots & -\lambda_{N,i} & \dots & \lambda_{\Sigma,N} \end{pmatrix};$$

$$\theta^T = |\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_i \ \dots \ \theta_N|.$$

Матриця теплових провідностей λ є симетричною відносно головної діагоналі, в яку входять теплові провідності $\lambda_{\Sigma,i}$, що є сумою теплових провідностей для вхідних потоків i -го вузла.

Значення температур в окремих вузлах електричної машини можна отримати шляхом розв'язання матричного рівняння:

$$\theta = \lambda^{-1} \cdot \Delta P. \tag{8}$$

Найбільш критичною, з точки зору локальних перегрівів та надійності роботи електродвигуна, є пазова частина обмоток двигуна, оскільки саме тепловий пробій статорної є найчастішою причиною виходу електродвигунів з ладу.

Умовою нормальної роботи є виконання нерівності:

$$\theta_{max} \leq \theta_{доп}. \tag{9}$$

$\theta_{доп}$ – визначається за каталожними даними для даного класу ізоляції.

Теплові втрати та температури обмоток залежать від струму електродвигуна. Для визначення реальної навантажувальної здатності розраховуємо такий струм, при якому виконується нерівність (9):

$$I_{II} = \sqrt{\frac{\det \lambda \cdot \theta_{доп} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N A_{j,i} \Delta P_i}{\sum A_{j,k} R_k}}, \tag{10}$$

де R_k – активний опір обмотки, де сконцентровані втрати P_k ;

$A_{i,k}$ – відповідні алгебраїчні доповнення матриці (4).

Таким чином, організація системи інтелектуального захисту за методикою, що пропонується, передбачає проведення попередньої ідентифікації номінального струму за формулою (10). В робочому режимі система контролює значення струму статора АД та порівнює його з номінальним, отриманим за формулою (10).

За даними про теплові втрати в електромеханічній системі можливо розрахувати енергетичні показники – ККД, коефіцієнт поужності системи електропривода.

У системі захисту доцільно передбачити моніторинг поточного теплового стану та енергетичних показників електропривода. В залежності від рівня перевищення поточного струму відносно номінального можливі два варіанти реагування системи. В першому варіанті здійснюється повідомлення обслуговуючого персоналу про аварійний стан роботи та розрахунок строку безвідмовної роботи системи електропривода з поточним значенням струму. Це може бути реалізовано за допомогою відомих емпіричних формул, наприклад:

$$T = A e^{-\left(\frac{B}{\tau} + b\right)}, \tag{11}$$

де τ – температура ізоляції (визначається за формулою (8));

A, B – емпіричні коефіцієнти.

Якщо рівень струму загрожує тепловим пробоем статорної обмотки, система повинна оперативно вимкнути живильну напругу. При певному значенні струму (апріорно аварійному, наприклад, струму короткого замикання) система повинна вимкнути живлення без розрахунків.

У формулу (10) входять значення активних опорів обмоток АД, які суттєво змінюються в процесі роботи системи електропривода. Для забезпечення задовільної точності моніторингу та доцільного відключення необхідно передбачити в системі інтелектуального захисту поточний контроль активного опору статорної обмотки. Це може бути реалізовано одним з відомих методів [2,5].

Таким чином, запропоновано алгоритм інтелектуального захисту з використанням нового підходу до захисту від теплового перевантаження. Впровадження алгоритму в системах захисту дозволить відслідковувати енергетичні показники системи електропривода та здійснити оперативне вимкнення живильної папруги при досягненні критичної теплової температури.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Родькин Д.И., Здор И.Е. Современные методы определения параметров асинхронных двигателей после их ремонта // Проблемы создания новых машин и технологий: Научные труды КрГПИ. – Вып. 1. – Кременчуг, 1998. – С. 100–106.
2. Родькин Д.И. Энергодиагностика двигателей постоянного тока в задачах управления и испытания // Труды конференции "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков: Основа. – 1996. – С. 130–132.
3. Бешта А.С. Определение потерь в стали в электрических машинах при их испытаниях // Проблемы створення нових машин і технологій: Збірник наукових праць КрДПІ. – Вип.2. – Ч.1. – 1997. – С. 97–102.
4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 1/ Пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Финансы и статистика. 1987. – 351 с.
5. Бешта О.С., Балахонцев О.В., Худолій С.С. Ідентифікація опорів обмоток асинхронного двигуна в робочому режимі за допомогою універсальної дискретної моделі струму статора / Наукові праці КрДПУ "Проблеми створення нових машин та технологій". – Кременчук. – №1. – 2002.

БАЛАХОНЦЕВ Олександр Васильович – аспірант Національного гірничого університету.
Наукові інтереси:

- адаптивні системи керування;
- мікропроцесорні системи.

Тел. (0562)-27-34-63.

E-mail: hollow@mail.ru.

БЕШТА Олександр Степанович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електропривода Національного гірничого університету.

Наукові інтереси:

- теорія цифрових систем ідентифікації та адаптивного керування;
- інтелектуальні системи захисту.

Тел.: (0562)-47-25-00.

E-mail: beshita@nmmu.dp.ua.

КІВІЛЬОВ Сергій Григорович – студент Національного гірничого університету.

Наукові інтереси:

- дослідження електромеханічних процесів в електродвигунах.

Тел.: (0562)-45-85-39.

E-mail: kivilev@ukr.net.

ХУДОЛІЙ Сергій Сергійович – аспірант Національного гірничого університету.

Наукові інтереси:

- практична реалізація методик ідентифікації;
- експериментальні дослідження.

Тел.: (0562)-18-32-63.

E-mail: sergeich@ukr.net.