

# Розробка методів та систем інтелектуального захисту систем електроприводів

Олександр Бешта, Олександр Балахонцев, Ольга Тоткал, Микола Куваєв

Кафедра електропривода, Національний гірничий університет, УКРАЇНА,  
м. Дніпропетровськ, Проспект Карла Маркса, 19, E-mail: BeshtaA@nmu.org.uaAbstract

*Presented work is devoted to the methods and systems for temperature protection and control of electric drives' operating modes using means of technical diagnostic on basis of microprocessors.*

*As a result of a country's hard economic situation our enterprises are made to exploit the drives which have been once or more repaired. Such electric drives come out of order in a short period of time. The reason is overheating. Introduction of a fail-safe temperature protection is a required and compulsory condition for normal and reliable operating of electric drives.*

*An actual issue in designing protection systems is creating an intellectual structure of protection.*

*Direct measuring of windings temperature can provide an error that depends on the location of thermal sensor. Therefore in this article a special attention is paid to the indirect temperature measuring using thermal model.*

Ключові слова – electric drive, asynchronous machine, direct current drive, system of intellectual protection, thermal model.

## I. Вступ

Згідно існуючим стандартам кожна електроустановка повинна бути обладнана пристроями захисту. Для систем електроприводів, що працюють у складі відповідальних технологічних процесів, передбачається наявність спеціальних систем захисту, які повинні адекватно реагувати на можливі види аварійних режимів роботи електродвигуна.

Більша частина сучасних систем електроприводів характеризується високими показниками в області керування та високою надійністю систем захисту електродвигунів. Але питання стосовно захисту електричних машин залишаються актуальними, незважаючи на розвиток мікроелектронної і мікропроцесорної техніки, та діагностичного обладнання на їх базі.

Для вітчизняної промисловості ці питання стоять особливо гостро. Внаслідок скрутного матеріального стану промислові підприємства вимушені експлуатувати електродвигуни, що пройшли один або декілька капітальних ремонтів. Відомо, що внаслідок особливостей процесу ремонту електродвигунів значно знижується їх навантажувальна здатність. Експлуатація такого двигуна призводить до швидкого виходу його з ладу внаслідок перегрівання. Статистика свідчить, що близько 60% електродвигунів, які пройшли капітальний ремонт, повертаються на електроремонтне підприємство впродовж перших трьох місяців експлуатації.

Сучасні електродвигуни мають достатньо високі показники надійності. Але в процесі експлуатації навіть при вірно заданих параметрах робочого режиму можливе перевищення температури окремих

частин до недозведеного рівня. Це трапляється внаслідок відхилень умов експлуатації від нормальних та виникнення аварійних режимів. Наслідком тривалих систематичних перегрівів обмотки є її тепловий пробій. Отже, впровадження *безвідмовного температурного захисту* є обов'язковою умовою надійної експлуатації електродвигунів.

В теперішній час особливо актуальними є питання створення методів та систем температурного захисту і контролю режимів роботи систем електроприводів з використанням засобів технічної діагностики на базі мікропроцесорної техніки. В ході дослідження проведений аналіз умов роботи технологічного електроустановки та виявлені найбільш поширені причини аварійних режимів роботи електродвигунів.

Розрізняють 3 типи пошкоджень електродвигунів змінного струму, пов'язаних з пошкодженням обмоток: перегорання ізоляції обмоток, пробій ізоляції, механічні ушкодження. Найбільш впливовим фактором пошкодження ізоляції є **тепловий перегрів**. Головними причинами перегріву обмоток є:

- перевантаження електричної машини;
- робота в однофазному режимі (обрив фаз);
- робота на зниженій напрузі живлення;
- роботи при несиметрії живильної напруги;
- значний період пуску двигуна (затяжний пуск);
- висока частота включення-виключення електричного двигуна;
- погіршення охолодження двигуна.

Всі вище названі аварійні режими характеризуються підвищенням струму у всіх або двох фазах. Тобто струм у фазі можливо характеризувати як критичний та основний параметр, величина якого характеризує тип системи захисту в цілому. Звісно, для того, щоб проаналізувати характеристики та властивості засобів захисту, необхідно, в першу чергу, знати властивості електричної ізоляції та доволі точно відтворювати фізичні процеси що проходять всередині машини. Складність процесів теплообміну перешкоджає точному контролю за нагрівом двигуна. Безпосередній вимір температури обмоток теж може давати суттєву помилку, величина якої залежить від місця встановлення термодатчика (лобова частина обмотки чи пазова). Тому в даній роботі зроблено акцент на визначенні температури обмоток непрямым шляхом, з використанням уточненої теплової моделі двигуна.

Актуальним питанням при розробці системи захисту є розробка *інтелектуальної структури захисту*. Орієнтованість лише на один параметр, призводить до хибного спрацювання системи захисту.

Отже, проаналізувавши можливі причини аварійних режимів електродвигунів, можна сформулювати ряд вимог до систем захисту:

*швидкодія* (якомога швидке відключення споживача від мережі живлення у випадку виникнення аварійної ситуації);

*адекватна реакція на аварійну ситуацію* (необхідно забезпечити поточний моніторинг за параметрами, що контролюються, з урахуванням специфіки електричної установки і технологічного процесу в цілому);

*простота схемотехнічної реалізації* (необхідно розробити систему захисту таким чином, що б окремі модулі цієї системи не мали зв'язків, що блокують працездатність інших блоків у разі виходу з ладу);

*невелика собівартість* (в собівартості слід враховувати зменшення витрат за рахунок попереджених аварій);

## II. Наукове обґрунтування

Відомо [7], що електрична машина є перетворювачем енергії з одного виду в інший. Причому процес перетворення супроводжується втратами енергії. В результаті цього температура машини досягає допустимого рівня, а в аварійних режимах перевищує його. Величина допустимого рівня температури визначається тепловими властивостями активних матеріалів двигуна та режимом його роботи. В більшості випадків під час перевантаження перегрів електричної машини супроводжується тепловим пробієм ізоляції статорної або якірної обмотки [4].

Під час роботи двигуна виникають втрати енергії, які різняться за своєю фізичною природою, за місцем концентрації та за режимом роботи. Тому, для контролю температури в найбільш уразливій частині машини слід визначати ті втрати, які мають місце в конкретній частині машини. При цьому слід врахувати той факт, що механічні втрати в підшипниках і вентиляторі не є гріючими для обмоток електричної машини.

Для визначення конкретного типу втрат, а отже і температури, в конкретному вузлі машини, застосовують теплові схеми заміщення (теплові моделі машини). Теплові схеми заміщення є класичними [7,9,1,2,3,8], і використовуються під час розрахунків та проектуванні електричних машин. Головним джерелом інформації для побудови цих схем є дані про теплові провідності конструктивних частин електродвигуна та значення теплових втрат в ньому.

Для визначення та розподілу теплових втрат в електродвигуні використовують рівняння енергобалансу електромеханічної системи електропривода, що працює в режимі холостого ходу.

$$\Delta P = \Delta P_{M1} + \Delta P_C + \Delta P_{M2} + (\Delta P_{IAO} + \Delta \dot{E}_{AIA}), \quad (1)$$

де  $\Delta P$  – втрати холостого ходу;

$\Delta P_{M1}$  – втрати у міді статора (якоря);

$\Delta P_{M2}$  – втрати у міді ротора (обмотки збудження);

$(\Delta P_{MECH} + \Delta P_{ДОД})$  – механічні та додаткові втрати;

$\Delta P_C$  – втрати у сталі.

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

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

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

Таблиця 1 – формули для розрахунку втрат в АД.

Вхідна потужність, $\Delta P$	$3U_1 I_1 \cos \phi$
Втрати в міді статора, $\Delta P_{M1}$	$3I_1^2 R_1$
Втрати в обмотці ротора, $\Delta P_{M2}$	$3I_2^2 R_2$
Втрати в сталі, $\Delta P_C$	$dU_1^2 f^\alpha$

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  $R_1, R_2, df^\alpha$ . Прийmemo ці параметри як невідомі, для їх визначення скористаємося методами регресійного аналізу.

З точки зору регресійного аналізу [5,6] рівняння (1) являє собою регресійну двофакторну модель вигляду:

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

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

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 матричній формі:

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

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

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

$$B^T = \|b_0 \ b_1 \ b_2\|;$$

$X_0$  – фіктивний чинник, рівний одиниці.

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

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

Перевірка значимості рівняння регресії (2) здійснюється за критерієм Фішера, значимість коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента.

Запропонований методологічний підхід є загальним для основних типів двигунів і дозволяє визначити і розділяти втрати при роботі електричних двигунів у режимі холостого ходу. При цьому двигуни повинні бути підключені 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 і інших параметрів для різних типів машин дозволяє узагальнити науковий підхід при створенні систем інтелектуального захисту електромеханічних систем різних типів.

Отже, дані, що отримані в результаті експериментів в 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 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 законів теплообміну в  $i$ -ому вузлі:

$$\sum Q_{\theta x, i} + \sum \Delta P_i = \sum Q_{\theta ux, i}, \quad (5)$$

де  $\sum Q_{\theta x, i}$  – 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;

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

Між  $i$ -м та  $j$ -м вузлами тепловий потік визначається як

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

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

$\theta_i, \theta_j$  – 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:

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

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

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

Матриця теплових провідностей  $\lambda$  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 вирішення матричного рівняння

$$\theta = \lambda^{-1} \cdot \Delta P, \quad (8)$$

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

Умовою нормальної роботи є виконання нерівності

$$\theta_{max} \leq \theta_{дон}. \quad (9)$$

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

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

$$I_n = \sqrt{\frac{\det \lambda \cdot \theta_{дон} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N A_{j, i} \Delta}{\sum A_{j, k} R_k}} \quad (10)$$

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

$A_{i, k}$  – відповідні алгебраїчні доповнення матриці (2).

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

$$\Delta P = \lambda \cdot \theta, \quad (7)$$

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

### Висновки

1. Запропонований метод визначення реального значення навантажувальної здатності з використанням теплових моделей забезпечує високу точність при визначенні температури конструктивних елементів електричної машини та номінального значення струмів статора двигуна змінного струму та струму якоря машини постійного струму. Досліджені теплові характеристики конструктивних елементів двигунів надають можливість точного контролю температури в відповідальних вузлах електричної машини.
2. Результати дослідження залежностей складових енергетичних втрат від параметрів режиму роботи електропривода – рівня живильної напруги та частоти, дозволяють корегувати ustalеними значеннями системи захисту в залежності від умов роботи технологічного обладнання.
3. Впровадження експериментального зразка системи інтелектуального захисту електроприводів в промисловості принесе значний економічний ефект за рахунок низької собівартості системи та за рахунок запобігання виникнення можливих аварійних

режимів, що призводять до виходу з ладу технологічного обладнання.

### Список використаних джерел:

- [1] Богаенко И.Н. Контроль температуры электрических машин. – Киев: Техніка, 1975. – 975 с.
- [2] Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 356 с.
- [3] Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 297 с.
- [4] Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергоиздат, 1989. – 331 с.
- [5] Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
- [6] Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн.1 / Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 351 с.: ил.
- [7] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [8] Каминский М.Л. Проверка и испытания электрических машин. – М.: Энергия, 1977. – 102 с.
- [9] Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. – М.: Энергия. – 1968. – 264 с.