

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.316.91: 621.316.573

О.Г. Серeda, канд. техн. наук, доц.,
А.О. Прохоренко, д-р техн. наук, доц.

Національний технічний університет „Харківський
політехнічний інститут“, м. Харків, Україна, e-mail:
lexus_suba@mail.ru, ap.kpi@rambler.ru

ЗАХИСТ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ З БЕЗПОСЕРЕДНІМ КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТКИ В МОМЕНТ ПУСКУ

О.Н. Sereda, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.
А.О. Prokhorenko, Dr. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine, e-mail: lexus_suba@mail.ru,
ap.kpi@rambler.ru.

AGAINST OVERCURRENT INDUCTION MOTOR PROTECTION WITH DIRECT WINDING TEMPERATURE MONITOR AT START

Мета. Теоретичне обґрунтування, розробка та реалізація у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою способу захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску.

Методика. Для вирішення поставленого завдання використовувалася теорія електромагнітних перехідних процесів в електричних колах. Розроблена математична модель зміни миттєвої потужності, що споживається асинхронним електродвигуном у перехідному режимі пуску, в якій застосування простих і широко використовуваних у пристроях релейного захисту, зокрема в мікропроцесорних розчіплювачах автоматичних вимикачів, математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень струму дозволяє найбільш гармонійно поєднуватись з математичним апаратом побудови інших видів мережевих захистів.

Результати. Доведена необхідність безпосереднього контролю температури обмотки асинхронних електродвигунів. Шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається електродвигуном у початковий момент часу після пуску, здійснюється контроль над температурним режимом електродвигунів, що працюють у повторно-короткочасному режимі роботи.

Наукова новизна. Теоретично досліджена можливість отримання інформації щодо параметрів електричного кола в перехідному режимі зміни струму збурення, зокрема визначення температури асинхронних електродвигунів шляхом контролю за зміною активного опору обмотки. Теоретичне обґрунтування вдосконаленого методу теплового захисту асинхронних електродвигунів при струмах перевантаження шляхом безпосереднього визначення температури нагрівання обмоток статора.

Практична значимість. Розроблений алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів, що працюють у повторно-короткочасному режимі, від неприпустимого перегрівання обмоток при струмах перевантаження.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, мікропроцесорний пристрій захисту

Постановка проблеми. Системи електропостачання підземних гірничих машин і комплексів будуються за принципом передачі електроенергії по кабелях від вибухозахищених комплектних розподільчих пристроїв (КРП) центральної підземної підстанції (ЦПП) до комплектних трансформаторних підстанцій (КТП), що перетворюють напругу 6 (10) кВ у напругу 380, 660 або 1140 В з подальшим розподілом електроенергії через апарати керування й захисту на електродвигуни (ЕД) гірничих

машин. При цьому допускається підключення до одного КРП не більше трьох технологічно зв'язаних пересувних підстанцій або трансформаторів однакової потужності за умови забезпечення високої чутливості максимального струмового захисту. Усе це надзвичайно ускладнює систему захисту підземного електропостачання шахт [1]. Одним з напрямів удосконалення вибухозахищених КТП є підвищення їх функціональних можливостей у частині систем захисту на стороні низької напруги. Це вимагає створення конструкцій, що включають у себе пристрої

захисту приєднань, що живлять і керують роботою ЕД гірничих машин [2].

За змінного тривалого режиму роботи деякі робочі органи та механізми створюють навантаження, що змінюється у значних межах, наприклад, у машинах для дроблення. Періодичні перевантаження ЕД супроводжуються недовантаженнями аж до холостого ходу. Кожне збільшення струму, взяте окремо, не призводить до небезпечного зростання температури ЕД. Проте, якщо кидки струму часто повторюються, дія підвищеної температури на ізоляцію ЕД швидко накопичується. Процес нагрівання ЕД за змінного навантаження відрізняється від процесу нагрівання за постійного або слабо вираженого змінного навантаження. Періодичні перегрівки обмотки скорочують термін служби ізоляції. За великих коливань навантаження ЕД постійно перебуває в перехідному процесі. Протікання перехідних теплових процесів при навантаженні, що змінюється – явище складне й не завжди піддається розрахунку. Тому температуру обмоток ЕД не можливо оцінити за струмом, що протікає в даний момент часу. З огляду на те, що окремі частини ЕД нагріваються по-різному, усередині ЕД відбувається перетікання тепла з однієї частини до іншої. Може бути й таке, що після відключення ЕД температура обмоток статора буде зростати за рахунок тепла, що надходить від ротора. Таким чином, величина струму може не відобразити ступінь нагрівання ізоляції. Слід також урахувати, що в деяких режимах ротор буде нагріватися більш інтенсивно, а охолоджуватися менш інтенсивно, ніж статор. Складність процесів теплообміну ускладнює контроль нагріву ЕД. Повторно-короткочасний режим роботи відноситься до найбільш несприятливого з точки зору дії захисту. Періодичне вмикання в роботу передбачає короткочасне перевантаження двигуна. При цьому величина перевантаження повинна бути обмежена за умови нагріву обмоток не вище допустимого значення. Захист, що стежить за температурою нагріву обмотки, повинен отримувати відповідний сигнал. Оскільки в перехідних режимах струм і температура можуть не відповідати один одному, то захист, дія якого базується на вимірюванні струму, не може виконувати свої функції належним чином.

Саме від величини перевищення температури ізоляції обмоток залежить термін служби ізоляції та ЕД у цілому. Перегрів на кожні $8\div 10$ °С понад допустимого скорочує термін служби ізоляції у 2 рази (правило „восьми градусів“ Монтзігера) [3]. Згідно з останніми дослідженнями, тривала робота двигуна зі струмом перевантаження всього на 5% від номінального скорочує термін його служби в 10 разів [4].

Таким чином, контроль температури обмотки є важливим засобом забезпечення тривалого терміну служби електродвигунів.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомі способи захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження I_L , в яких захисна часо-струмова характеристика формується з використанням так званої „інтегральної“ уставки Q_L

$$Q_L = I_{ph}^2 t_L, \quad (1)$$

де I_{ph} – середньоквадратичне (діюче) значення фазного струму; t_L – час спрацьовування захисту при струмі перевантаженні.

Використання інтегральної уставки забезпечує зворотну залежність $t_L = f(I_{ph}^2)$ часу спрацьовування захисту t_L від квадрата величини фазного струму I_{ph}^2 при струмовому перевантаженні. Якщо термічне навантаження на ЕД, що захищається, перевищить значення інтегральної уставки Q_L і відбудеться спрацьовування захисту, то алгоритм роботи захисного пристрою передбачає витримку часу повторного вмикання t_r . Величина t_r обирається за умови охолодження ЕД до регламентованого [5] значення температури. Це дозволяє здійснювати хоча б непрямий контроль над температурним режимом ЕД, що є незаперечною перевагою застосування інтегральної захисної характеристики з інтегральною уставкою Q_L . Водночас, зазначені параметри захисної характеристики негативно впливають на ефективність роботи технологічного обладнання, що працює в повторно-короткочасному режимі. Це обумовлено тим, що інтегральна уставка ЕД, яка працює у складі вказаного обладнання, уповільнює роботу останнього та знижує його продуктивність. Тому, у захисних пристроях від струмів перевантаження ЕД, призначених для роботи в повторно-короткочасному режимі, передові електротехнічні компанії виключають інтегральні уставки, замінюючи їх часовими. Часова уставка, величина якої порівняно невелика ($10\div 30$ с), знижує час існування струму перевантаження, й тим самим дозволяє швидше провести повторне вмикання ЕД.

Прикладом захисного пристрою ЕД від струмів перевантаження є реле TeSys LR97D і LT47 фірми „Schneider electric“ [6]. Реле LR97D і LT47 розроблені для забезпечення захисту саме в повторно-короткочасному режимі роботи ЕД з підвищеним моментом навантаження при блокуванні ротора або зникненні фази, при зтяжному пуску зі зростаючим моментом або частих вмиканнях механізмів, що мають велику інерцію та високу ймовірність заклинювання у сталому режимі, таких механізмів як конвеєри, дробарки та змішувачі, вентилятори, насоси та компресори, центрифуги й сушарки, преси, підйомники, оброблювальні верстати тощо. Серед захисних функцій реле LR97D і LT47 відзначають швидке виявлення перевантаження в порівнянні з пристроями теплового захисту на основі інтегральної уставки Q_L .

Поряд з перевагами способу захисту від перевантажень ЕД без використання інерційних інтегральних уставок, слід відзначити і його недоліки. Основним недоліком є відсутність контролю рівня струмового та термічного навантажень, що зазнають ЕД не оснащені термісторами. У випадку досить агресивного режиму частих пусків без зниження навантаження на технологічне обладнання нагрів обмотки ЕД може значно перевищити допустимий рівень. Нагадаємо, що в повторно-короткочасному режимі значному нагріванню може піддаватися не весь ЕД у цілому, а лише його обмотки, зокрема, їх ізоляція.

Існує декілька технічних рішень опосередкованого контролю за температурою обмотки ЕД.

Електронні реле E16DU-E1250DU перевантаження фірми „ABB“ [7] моделюють термічні характеристики поведінки ЕД. При частих пусках (повторно-короткочасний режим) вирішальне значення має не номінальний, а більш високий пусковий струм ЕД, а також пускова частота – час пуску й вимикання. При кожному пуску відбувається надзвичайно сильне нагрівання ЕД, але в короткий проміжок часу. При цьому температура може перевищити допустиму межу. Щоб уникнути виведення двигуна з експлуатації, його слід зупинити. Тому відбувається спрацьовування реле перевантаження, якщо температура перевищить максимально допустиме значення. Крива спрацьовування реле визначає допустиму тривалість пуску електродвигуна, коли, у результаті тривалого пуску або частих пусків, середнє ефективне значення струму досягає значення номінального. Термісторні реле захисту електродвигуна АВВ типу CM-MSE, CM-MSS, CM-MSN контролюють температурний режим електродвигунів, оснащених температурним датчиком з позитивним температурним коефіцієнтом опору (термістором). Вбудовані в обмотки двигунів термістори вимірюють ступінь нагрівання двигуна, що дозволяє контролювати й оцінювати різні експлуатаційні умови: перегрів унаслідок недостатнього охолодження, важкий пуск, часті вмикання та вимикання, однофазний режим роботи, гальмування, асиметрію фаз. При нагріванні навіть одного термістора понад встановлену межу вихідне реле вимикається.

Система захисту Moeller ZEV [8] та електронні реле перевантаження Siemens Sirius 3RB20/21 [9] підходять для найбільш важких умов пуску електродвигуна. Клас спрацьовування попередньо налаштовується й дозволяє надійно захистити двигун з часом розгону від 5–40 с. Наростання струму реєструється вбудованим у реле трансформатором струму й обробляється відповідною електронікою, що потім видає імпульс на допоміжні вимикачі. Замикання на землю виявляється завдяки зовнішнім трансформаторам витоку. Можливість об'єднання термісторних датчиків в єдину систему дозволяє забезпечити повний захист двигуна. Термісторні реле захисту Moeller EMT6 та Siemens Sirius 3RB22/23 мають необхідні характеристики для взаємодії з термісторами при затяжних пусках або зупинках електродвигуна.

Спільним недоліком перерахованих технічних рішень з теплового захисту електродвигунів є обмеженість їх застосування. Реле перевантаження з контролем температури за допомогою термісторів можуть застосовуватися тільки для захисту електродвигунів, в обмотки яких вбудовані термістори.

Більш універсальним буде контроль за перевищенням температури обмотки ЕД від струмів перевантаження не за допомогою вимірювання опору спеціальних датчиків (термісторів), які ще потрібно вмонтувати в обмотку, а за допомогою вимірювання ступеня збільшення опору самої обмотки ЕД. Іншими словами, найкращим буде таке технічне рішення, коли в якості датчика температури використовувалася б сама обмотка електродвигуна.

Оскільки в динамічних захистах ЕД без інтегральної уставки Q_L відсутня можливість контролю температури обмотки, що здійснюється шляхом розрахунку температури за термічним впливом від струму, який протікає,

уявляється доцільним розробити спосіб безпосереднього контролю температури за допомогою вимірювання активного опору R_m обмотки ЕД.

Спосіб, описаний у [10], передбачає вимірювання опору R_m з метою визначення температури обмотки ЕД. Вимірювання R_m здійснюється спеціальним пристроєм, що підключається до обмотки ЕД перед його вмиканням. Для підключення вузла вимірювання R_m та його відключення перед пуском ЕД, використовується проміжне реле, контакти якого з'єднують цей вузол з колом живлення обмотки двигуна. Вочевидь, що такий спосіб вимірювання опору R_m і подальшого визначення температури, який вимагає введення додаткового вузла вимірювання з проміжним реле, обумовлює підвищені габарити й вартість захисного пристрою, знижує надійність його роботи. Крім того, при використанні описаного способу вимірювання R_m при захисті ЕД, що працюють у повторно-короткочасному режимі, знижується динамічність роботи технологічного обладнання. Перед черговим пуском ЕД необхідно здійснювати всі описані вище операції підключення, вимірювання та відключення вузла виміру R_m .

З урахуванням вищевикладеного, уявляється доцільним розробити таке технічне рішення визначення величини R_m з метою контролю температури обмотки ЕД, в якому розрахунок R_m проводиться без застосування додаткових вузлів виміру, а тільки за рахунок аналізу залежності в часі миттєвої потужності ЕД при пуску. Контроль температури обмотки ЕД шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається в момент пуску, дозволяє спростити функціональний склад пристрою захисту, тим самим знизивши фінансові витрати на його виготовлення, тому що не потрібні додаткові вузли вимірювання R_m і пристрої керування ними, а також забезпечити динамічність роботи як самих ЕД, так і технологічного устаткування, що працюють в умовах повторно-короткочасного режиму, за рахунок того, що вимір температури обмотки ЕД здійснюється дуже швидко, за час, що не перевищує 20 мс.

Формулювання мети. Теоретичне обґрунтування, розробка та реалізація у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою способу захисту асинхронних ЕД від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску, в якому визначення величини активного опору й подальшого розрахунку температури обмотки ЕД здійснюється при кожному пуску.

Матеріали дослідження. У мікропроцесорних пристроях релейного захисту для швидкого визначення сталого діючого значення струму використовують аналіз дискретних значень струму. Використання залежності суми квадратів дискретних значень фазних струмів $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$ у часі t

$$s(t) = \sum_j (i_{ja}^2 + i_{jb}^2 + i_{jc}^2) \quad (2)$$

так званої силової функції електричного кола, дозволяє виключити негативний вплив такого випадкового параметру, як момент виникнення струму збурення.

Контроль за температурним режимом обмоток ЕД пропонується проводити в перехідному режимі збу-

рення електричного кола (пуск ЕД) за дискретних значень фазних струмів i_{ja}, i_{jb}, i_{jc} ($i_{j(a,b,c)}$) та відповідних напруг u_{ja}, u_{jb}, u_{jc} ($u_{j(a,b,c)}$), а точніше за їх добутків: миттєві значення потужності p_{ja}, p_{jb}, p_{jc} ($p_{j(a,b,c)}$). Можливість такого контролю, заснована на аналізі характеру зміни в часі сумарної миттєвої потужності трифазного кола $p_{\Sigma}(t)$ у перший період T_1 виникнення збурення, аналогічного характеру зміни силової функції $S(t)$, а саме за співвідношенням екстремальних значень p_{\min} і p_{\max} , залежності $p_{\Sigma}(t)$ у перехідному режимі зміни пускового струму. Аналізу, по суті, піддається залежність суми добутків дискретних значень струму i_{ja}, i_{jb}, i_{jc} на дискретні значення фазних напруг u_{ja}, u_{jb}, u_{jc} відповідно.

Можливість контролю температури обмотки ЕД за екстремальними значеннями миттєвої потужності, що споживається ЕД у початковий момент часу пуску (перші 20 мс), обумовлена виявленими особливостями залежності $p_{\Sigma}(t)$. За допомогою математичного моделювання процесу пуску ЕД була проаналізована залежність зміни в часі сумарної миттєвої потужності всіх трьох фаз, тобто потужності

$$p_{\Sigma}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t), \quad (3)$$

де $p_a(t) = i_a(t) \cdot u_a(t)$; $p_b(t) = i_b(t) \cdot u_b(t)$; $p_c(t) = i_c(t) \cdot u_c(t)$ – миттєві значення потужностей, що споживаються електродвигуном у фазах a, b, c відповідно.

Відомі аналітичні вирази для зміни в часі струмів у симетричній трифазній системі

$$i_a(t) = \sqrt{2}I_{ph} \left[\begin{matrix} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) - \\ - \sin\left(\psi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \end{matrix} \right]; \quad (4)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I_{ph} \left[\begin{matrix} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \end{matrix} \right]; \quad (5)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I_{ph} \left[\begin{matrix} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) - \\ - \sin\left(\psi - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \end{matrix} \right], \quad (6)$$

де I_{ph} – середньоквадратичне (діюче) значення періодичної складової струму у фазі; $\varphi = \arctg(\omega L/R)$ – кут зсуву, на який періодична складова фазного струму відстає від фазної електрорушійної сили (ЕРС); L, R – індуктивність та активний опір фази; $\tau = \frac{L}{R} = \frac{\sin \varphi}{\omega \cdot \cos \varphi}$ – постійна часу електричного кола; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота мережі; f – робоча частота мережі; ψ – момент виникнення пускового струму.

Вирази для зміни фазних ЕРС у часі

$$u_a(t) = \sqrt{2}U_{ph} \sin\left(\omega t + \psi + \frac{2}{3}\pi\right); \quad (7)$$

$$u_b(t) = \sqrt{2}U_{ph} \sin(\omega t + \psi); \quad (8)$$

$$u_c(t) = \sqrt{2}U_{ph} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2}{3}\pi\right), \quad (9)$$

де U_{ph} – середньоквадратичне (діюче) значення фазної напруги.

Як видно з виразів (7–9), напруги у фазах, на відміну від струмів, не мають аперіодичної складової.

Після підстановки рівнянь (4–9) у (3), відповідних перетворень і спрощень, отримаємо аналітичний опис зміни миттєвої потужності, що споживається ЕД у початковий момент пуску

$$p_{\Sigma}(t) = 3I_{ph}U_{ph} \left[\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right]. \quad (10)$$

Результати математичного моделювання процесу пуску ЕД довели, що сталі значення залежності миттєвої потужності $p_{\Sigma}(t)$, що споживається електродвигуном, є величина постійна $p_{std} = \text{const}$. У відповідності до цього, як підтвердили результати математичного аналізу, характер залежності $p_{\Sigma}(t)$ у перехідному режимі не залежить від моменту виникнення пускового струму. А це означає, що характер функції $p_{\Sigma}(t)$, зокрема її екстремальні значення p_{\min} і p_{\max} , залежать тільки від величини електромагнітної постійної часу електричного кола τ .

На рис. 1 наведені графіки зміни миттєвої потужності, що споживається ЕД, для різних випадків постійної часу τ (відповідно $\cos \varphi$).

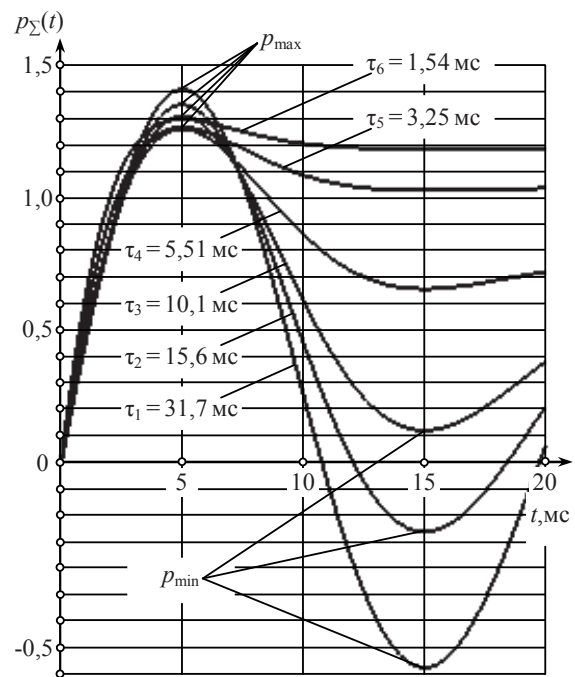


Рис. 1. Зміна в часі миттєвої потужності, що споживається електродвигуном у перехідному режимі пуску

Наведені залежності ілюструють необхідні властивості функції $p_{\Sigma}(t)$ у перехідному режимі. Для зручності порівняння, амплітудні значення струму I_m і напруги U_m дорівнюють 1. Як видно з графіків, в усіх випадках зміна миттєвої потужності відбувається з коливанням від одного екстремального значення p_{\max} до наступного p_{\min} .

При цьому зміна потужності від значення p_{\max} до значення p_{\min} , за різних значень τ , суттєво відрізняється. „Розмах“ екстремальних значень потужності для кола з постійною часу τ_2 ($\Delta p^{15,6} = p_{\max}^{15,6} - p_{\min}^{15,6}$) виходить, більше ніж удвічі, більшим, ніж аналогічний „розмах“ для кола з τ_4 ($\Delta p^{5,51} = p_{\max}^{5,51} - p_{\min}^{5,51}$). Таким чином, можна констатувати, що за екстремальними значеннями p_{\max} і p_{\min} можливо досить точно проводити оцінку зміни електромагнітної постійної часу τ нагрітої обмотки ЕД, а, отже, і вимір її температури.

Щоб критерій оцінки зміни постійної часу τ за величинами екстремальних значень миттєвої потужності не залежав від значень струму та напруги, він повинен бути виражений у відносних одиницях. Функція $p_{\Sigma}(t)$ може приймати від’ємні значення (рис. 1), тому використовувати відношення $K = p_{\max} / p_{\min}$ або $K = p_{\min} / p_{\max}$ не завжди зручно. У першому випадку, у залежності $\tau = f(p_{\max} / p_{\min})$, буде розрив при $p_{\min} = 0$, а у другому – значення коефіцієнта $K = p_{\min} / p_{\max}$ можуть приймати як додатні, так і від’ємні значення.

Більш зручним і значущим коефіцієнтом, що характеризує ступінь нерівномірності екстремальних значень миттєвої потужності при зміні постійної часу τ , є відношення різниці екстремальних значень потужності до їх суми

$$K_p = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max} + p_{\min}} \quad (11)$$

На рис. 2 наведена залежність коефіцієнта K_p у функції електромагнітної постійної часу електричного кола τ , побудована за виразом (11).

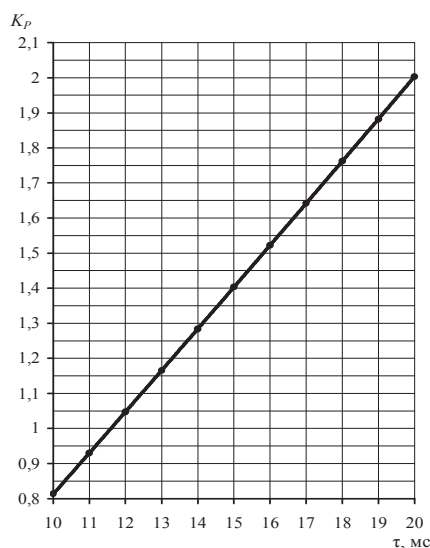


Рис. 2. Залежність ступеня нерівномірності екстремальних значень миттєвої потужності у функції постійної часу τ

Щоб оцінити значимість коефіцієнта K_p для визначення величини зміни опору R_m обмотки ЕД при її нагріванні, прийемо, що постійна часу τ обмотки в момент пуску дорівнює $\tau_{25} = 15,6$ мс при навколишній температурі $T_{nc} = 25$ °С (відповідає $\cos\varphi = 0,2$). Допустимою температурою обмотки для ізоляції класу „В“, за якої збері-

гається регламентований термін служби цієї ізоляції, є температура $T_B = 155$ °С [7]. Оцінимо, як зміниться значення коефіцієнта K_p при нагріванні обмотки до цієї температури. Опір мідного дроту обмотки при нагріванні на $\Delta T = 130$ °С зростає в 1,55 рази: $R_{155} = 1,55 \cdot R_{25}$. Відповідно, постійна часу τ нагрітої до $T_B = 155$ °С обмотки знизиться в 1,55 рази: $\tau_{155} = 0,645\tau_{25} = 10,06$ мс.

Якщо проаналізувати залежність $\tau = f(K_p)$, наведену на рис. 2, то неважко переконатися, що, при зміні величини τ в 1,55 рази, значення коефіцієнта K_p зміниться в 1,66 рази. Тим самим підтверджується значимість коефіцієнта K_p для оцінки постійної часу τ , а, відповідно, й опору R_m , та, в остаточному підсумку, температури обмотки ЕД. Для порівняння зазначимо, що при нагріванні на $\Delta T = 130$ °С імпеданс обмотки Z_m збільшиться всього на 2,5%. На стільки ж знизиться величина пускового струму. Така незначна зміна струму, по-перше, сумірна зі статистичною похибкою вимірювання, а, по-друге, менша за величини можливих коливань напруги кола, що призводять до відповідної зміни струму.

Таким чином, сама обмотка ЕД, дійсно, може бути датчиком її температури, якщо в якості параметра, що характеризує зміну активного опору нагрітої обмотки, використовувати екстремальні значення сумарної для трьох фаз миттєвої активної потужності, що споживається ЕД у початковий момент часу пуску.

Алгоритм побудови захисту ЕД від струмів перевантаження з контролем температури обмотки шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності в момент пуску полягає в наступному.

При кожному пуску ЕД визначається співвідношення екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається в перехідному режимі, та характеризується коефіцієнтом K_p . За величиною K_p визначають значення електромагнітної постійної часу τ_{Θ} електричного кола, що відповідає нагріванню обмотки в момент чергового поточного пуску ЕД. Величини τ й K_p пов’язані залежністю $\tau = f(K_p)$ (рис. 2).

Порівняння значення τ_{Θ} , що відповідає нагрітому стану ЕД, із заданим (відомим) значенням $\tau_{T_{kn}}$ при температурі T_{kn} й визначення коефіцієнта зниження величини постійної часу нагрітої обмотки

$$K_{\tau} = \frac{\tau_{T_{kn}} - \tau_{\Theta}}{\tau_{\Theta}} \quad (12)$$

дозволяє легко визначити відповідне збільшення величини активного опору нагрітої обмотки, а відтак і температуру обмотки T_{Θ} у момент чергового пуску

$$T_{\Theta} = \frac{K_{\tau}}{\alpha_{cu}} + T_{kn}, \quad (13)$$

де α_{cu} – температурний коефіцієнт опору міді.

На рис. 3 наведена блок-схема, що ілюструє роботу мікропроцесорного пристрою захисту при реалізації захисту ЕД від струмів перевантаження. Окремі обчислювальні та логічні операції, що виробляє мікропроцесорний пристрій, умовно подані у вигляді модулів. Фізично зазначені модулі не існують, їх використання необхідне

для зручності викладу функціонування мікропроцесорного пристрою при реалізації запропонованого способу струмового захисту.

Функціонує мікропроцесорний пристрій наступним чином.

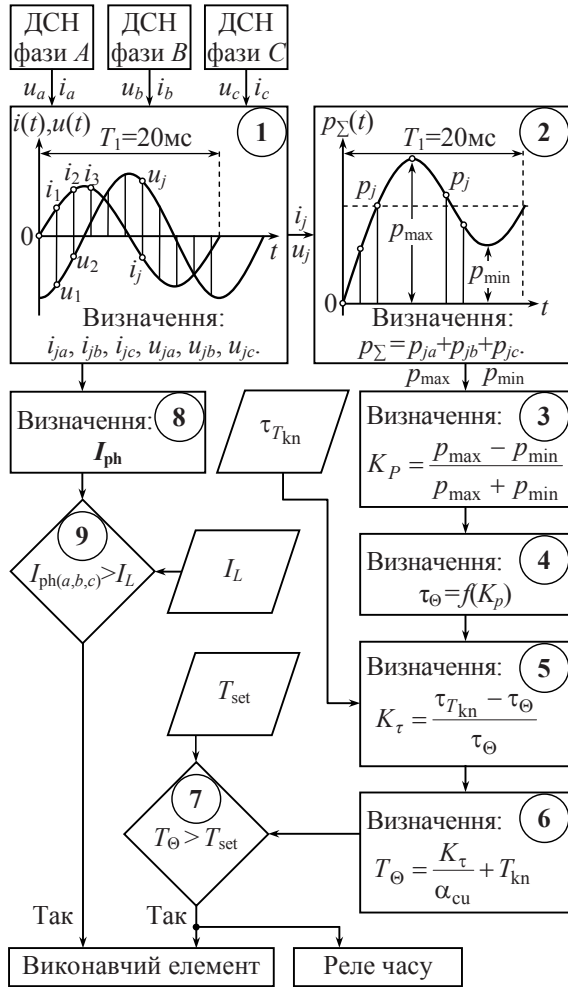


Рис. 3. Блок-схема алгоритму спрацьовування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегріву обмоток

У кожній з трьох фаз a, b, c електродвигуна здійснюють вимір струмів, їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення i_{ja}, i_{jb}, i_{jc} й методом інтегрування квадратів знайдених дискретних значень $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$ визначають діючі значення фазних струмів I_a, I_b, I_c . Якщо величина I_a, I_b або I_c виявляється більшою значення струмової уставки перевантаження I_L , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу t_L . Додатково, при кожному повторному пуску ЕД, здійснюють вимір лінійних напруг $u_{jab}, u_{jbc}, u_{jac}$ у разі вимірювання потужності за схемою з двома ватметрами або фазних напруг u_{ja}, u_{jb}, u_{jc} у разі вимірювання потужності за схемою з одним ватметром і штучною нейтральною точкою, після чого визначають залежність $p_{\Sigma}(t)$ миттєвої потужності ЕД p_{Σ} у часі t за відрізок часу, що дорівнює першому періоду T_1 зміни пускового струму. Шляхом аналі-

зу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживає ЕД у момент пуску, а саме за максимальним p_{\max} й мінімальним p_{\min} , екстремальними значеннями залежності $p_{\Sigma}(t)$ визначають температуру нагрітої обмотки T_{Θ} .

1. У модулі 1 аналогові сигнали від датчиків струму й напруги ДСН у фазах a, b, c перетворюють у дискретні значення $i_{j(a,b,c)}$ і $u_{j(a,b,c)}$ відповідно.

2. У модулі 2 визначають залежність миттєвих значень потужності у функції часу $p_{\Sigma}(t)$ і знаходять екстремальні значення цієї функції p_{\max} й p_{\min} .

3. У модулі 3 визначають коефіцієнт співвідношення екстремальних значень миттєвої потужності з виразу (11).

4. У модулі 4 за величиною K_p визначають значення електромагнітної постійної часу τ_{Θ} електричного кола, що відповідає нагріванню обмотки в момент чергового пуску електродвигуна $\tau = f(K_p)$.

5. У модулі 5 за рівнянням (12) визначають коефіцієнт K_{τ} , що характеризує зменшення постійної часу τ_{Θ} нагрітої обмотки в порівнянні з заданим значенням $\tau_{T_{kn}}$, яке відповідає температурі обмотки, за якої термін служби ізоляції відповідає нормованому терміну служби ЕД.

6. У модулі 6 визначають температуру обмотки ЕД за виразом (13).

7. У модулі 7 знайдене значення температури T_{Θ} порівнюють з температурною уставкою T_{set} і, у випадку, якщо $T_{\Theta} \geq T_{set}$, виробляють два керуючі сигнали: один на спрацьовування захисту, другий – формування часу блокування повторного вмикання t_r .

• „Так“ на виконавчий елемент (ВЕ) захисного пристрою;

• „Так“ на формування витримки часу повторно пуску ЕД.

8. У модулі 8 визначають діючі значення фазних струмів I_a, I_b, I_c у момент пуску ЕД.

9. У модулі 9 виконують порівняння значень фазних струмів I_a, I_b, I_c з величиною максимальної струмової уставки I_L . Якщо величина струму в одній з фаз a, b, c виявиться більшою за задане значення I_L , виробляють керуючий сигнал „Так“ на виконавчий елемент захисного пристрою (незалежний розчіплювач автоматичного вмикача).

Мікропроцесорний захисний пристрій при роботі за наведеним алгоритмом формує нову, більш досконалу, у порівнянні з існуючими, захисну характеристику від струмів перевантажень електродвигунів, що працюють у повторно-короткочасному режимі. Переваги отриманої захисної характеристики полягають у наступному:

• передбачений контроль над температурним режимом обмоток електродвигунів, не оснащених термісторами;

• у порівнянні з аналогічними захистами, відсутність додаткових вузлів вимірювання опору для контролю температури нагрітої обмотки ЕД.

Висновки. Розроблено та теоретично обґрунтовано метод визначення параметрів електричного кола, що полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої потужності, яка споживається в перехідному режимі виникнення струму збурення.

Розроблений спосіб теплового захисту електродвигунів, що працюють у повторно-короткочасному режи-

мі, від неприпустимого перевищення температури обмоток при струмах перевантаження за рахунок безпосереднього контролю температури обмотки статора шляхом розрахунку збільшення її активного опору.

Швидко, у перші 20 мс після виникнення пускового струму, обчислення в реальному часі активного опору обмоток статора в гарячому стані та його порівняння з відомим значенням холодного стану без додаткових вузлів вимірювання опору й пристроїв їх керування, дозволяє істотно покращити захисні властивості апаратів захисту електродвигунів, значно спрощує конструкцію захисного пристрою та зменшує фінансові витрати на його виготовлення.

Список літератури / References

1. Новое направление в создании рудничных взрывозащищенных трансформаторных подстанций на низшее напряжение до 3300 В / Н.М. Басов, В.С. Дзюбан, В.В. Кардаш [и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научных трудов. – Донецк: ООО „АИР“, 2010. – С. 61–71.

Basov, N.M., Dzyuban, V.S., Kardash, V.V., Koshkin, V.E. and Shvecova, T.V. (2010), “New direction in creating mine explosion protected transformer substations for low voltage up to 3300 V”, *Explosion Protected Electrical Equipment*, pp. 61–71.

2. Анализ технико-эксплуатационных показателей современных зарубежных взрывозащищенных трансформаторных подстанций / И.Я. Чернов, В.В. Шилов, В.Е. Налбатов [и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО „Юго-Восток, Лтд“, 2006. – С.74–89.

Chernov, I.Ya., Shilov, V.V., Nalbatov, V.Ye., Volkov, N.A. and Kuznetsov, V.L. (2006), “Technical and operational performance analysis of modern foreign explosion protected transformer substations”, *Explosion Protected Electrical Equipment*, pp. 74–89.

3. Закладной А.Н. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей / А.Н. Закладной, О.А. Закладной // Энергетика та електрифікація. – 2010. – №4. – С. 63–67.

Zakladnoi, A.N. and Zakladnoi, O.A. (2010), “Assessing methods for the induction motors life”, *Energy and Electrification*, no. 4, pp. 63–67.

4. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники / Данилов И.А., Иванов П.М. – М.: Высшая школа, 2005. – 745 с.

Danilov, I.A. and Ivanov, P.M. (2005), *Obshchaya elektrotehnika s osnovami elektroniki* [General Electrical Engineering with the Electronics Basics], High School, Moscow, Russia.

5. ГОСТ Р МЭК 60085-2011. Электрическая изоляция. Классификация и обозначение по термическим свойствам. – [Введ. 2012-06-01]. – М.: Стандартинформ, 2012. – III, 8 с.

GOST R MEK 60085-2011 (2012), *Electrical Insulation. Thermal Evaluation and Designation*, valid since June 1, 2012, Moscow, Russia.

6. Пускорегулирующая аппаратура TeSys / Каталог Schneider Electric. – 2007. – 567 с.

“Control starting equipment TeSys”, (2007), *Catalog Schneider Electric*.

7. Низковольтное оборудование АВВ. Контактторы, реле управления, аппараты защиты электродвигателей / Технический каталог АВВ. – 2010. – 366 с.

“Low voltage equipment ABB. Contactors, relays, motor protection devices”, (2010), *Technical Catalog ABB*.

8. Пуск и защита электродвигателей / Каталог продукции Moeller. – 2009. – 176 с.

“Motor start and protection”, (2009), *Catalog Moeller*.

9. Низковольтные аппараты управления и распределения Siemens. SIRIUS – SENTRON – SIVACON / Каталог LV1 Siemens. – 2007. – 1270 с.

“Low-Voltage Controls and Distribution Siemens. SIRIUS – SENTRON – SIVACON”, (2007), *Catalog Siemens LV1*.

10. Пат. №2227354 Российской Федерации МПК H02H5/04, H02H7/06 Способ тепловой защиты двигателя и устройство для его осуществления / Г.А. Бугаев, Е.Ю. Ерохин, А.Н. Леонтьев, М.А. Шамис – №2002108251/092002108251/09. Заявлено 01.04.2002; Опубл. 20.04.2004.

Bugaev, G.A., Yerokhin, Ye.Yu., Leontyev, A.N. and Shamis, M.A. (2004), *Sposob teplovoy zashchity dvigatelya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Motor Thermal Protection Method and Device for Its Implementation], Pat. 2227354 Russian Federation, *Invention. Utility models. Official Bulletin*, Vol. 11, Moscow, Russian Federation.

Цель. Теоретическое обоснование, разработка и реализации в виде алгоритма функционирования микропроцессорного устройства способа защиты асинхронных электродвигателей от токов перегрузки с непосредственным контролем температуры обмотки в момент пуска.

Методика. Для решения поставленной задачи использовалась теория электромагнитных переходных процессов в электрических цепях. Разработана математическая модель изменения мгновенной мощности, потребляемой асинхронным электродвигателем в переходном режиме пуска, в которой применение простых и широко используемых в устройствах релейной защиты, в частности в микропроцессорных расцепителях, автоматических выключателей, математических операций интегрирования квадратов мгновенных значений тока, позволяет наиболее гармонично сочетаться с математическим аппаратом построения других видов сетевых защит.

Результаты. Доказана необходимость непосредственного контроля температуры обмотки асинхронных электродвигателей. Путем анализа экстремальных значений мгновенной потребляемой мощности электродвигателем в начальный момент времени после пуска, осуществляется контроль над температурным режимом электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме работы.

Научная новизна. Теоретическое исследование возможности получения информации о параметрах электрической цепи в переходном режиме изменения тока возмущения, в частности определения температуры асинхронных электродвигателей путем контроля за измене-

нием активного сопротивления обмотки. Теоретическое обоснование усовершенствованного метода тепловой защиты асинхронных электродвигателей при токовых перегрузках путем непосредственного определения температуры нагрева обмоток статора.

Практическая значимость. Разработан алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты асинхронных электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, от недопустимого перегрева обмоток при токах перегрузки.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, микропроцессорное устройство защиты

Purpose. Theoretical justification and engineering of the method of induction motors protection from overload currents with the winding temperature direct control at the launch time and implementation as microprocessor device functioning algorithm.

Methodology. To solve the problem we used the theory of electromagnetic transients in electrical circuits. A mathematical model of the instantaneous power change of an induction motor consumption in starting transient mode was developed, in which the application of simple and widely used in relay protection, circuit breakers microprocessor trips, in particular, mathematical operations of instantaneous

current squares integration allows the most in harmony with the mathematical apparatus construction other network protection types.

Findings. The need for direct winding temperature control of induction motors was proved. To realize the control of the working in intermittent mode motor temperature by the extreme values analysis of the instantaneous power consumption of the motor at the initial time after start-up.

Originality. Theoretical research of ways to obtain information about the electrical circuit parameters in the transient mode of perturbations current variation, in particular the induction motors temperature determining by the variation winding resistance monitoring. Theoretical substantiation of induction motors thermal protection improved method at current overloads by directly detecting the temperature of the stator windings heating.

Practical value. Against impermissible heating windings at current overload algorithm of induction motors microprocessor protection operation of operating in intermittent mode was designed.

Keywords: induction motors, microprocessor protection

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.Ф. Болюхом. Дата надходження рукопису 28.02.14.

Wei Han¹, Qiang Liu²,
Chunmei Pei¹, Yanqiu Wang¹,
Yong Liu¹

1 – Beijing Polytechnic, Beijing, China
2 – China Railway 16th Bureau Group City Construction
Development Co., Ltd., Beijing, China

CONTACTLESS POWER TRANSFER SYSTEM BASED ON MULTI MODEL ADAPTIVE CONTROL

Вей Хань¹, Цян Лю²,
Чуньмей Пей¹, Яньцю Ван¹,
Юн Лю¹

1 – Пекінський політехнічний університет, м. Пекін, КНР
2 – Чайна Рейлвей 16 Бюро Груп Сіті Кенстракшн Дівелопмент Ко., Лтд., м. Пекін, КНР

БЕЗКОНТАКТНА СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ З БАГАТОМОДЕЛЬНИМ АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ

Purpose. For the contactless inductive power transfer (CIPT) system, the power is transferred by the mutual inductance coupling, which results in many problems, such as speed, reliability, and stability. This paper puts forward a method of contactless power transfer based on multi-model adaptive control.

Methodology. This method adjusts the duty cycle of control pulse by using the fuzzy control algorithm, and thus to control the output voltage.

Findings. This paper brings in the theories related to the multi-model reference adaptive control, establishes an ideal model for CIPT system, and obtains an approximate curve of the output voltage in the ideal model by way of curve fitting. By using fuzzy controller, the output voltage may well real-time track the ideal reference model.

Originality. The proposed fuzzy control method of multi-model adaptive duty cycle may improve the performance of the contactless power transfer system.

Practical value. The method proposed in the paper can ensure that the output voltage could be kept constantly at an ideal value after the system came to a steady state. The experimental result shows the efficiency of this algorithm.

Keywords: contactless inductive power transfer, multi model, control pulse, duty cycle, curve fitting, fuzzy control

Introduction. As a new technology, CIPT has no standard definition at present. However, it also has a

common ground: power transfer to non-conductor mechanical connection and power supply and use equipment relatively movable may be achieved by loose coupling. As a result, traditional power transfer mode for tight coupling transform-