

УДК 621.316.91: 621.316.573

к.т.н. Серєда О. Г.  
(НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, e-mail: lexis\_suba@mail.ru)

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

Доведена необхідність безпосереднього контролю температури обмотки асинхронних електродвигунів. Шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності що споживається електродвигуном в початковий момент часу після пуску, здійснюється контроль над температурним режимом електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі. Надано теоретичне обґрунтування можливості отримання інформації про параметри електричного кола в перехідному режимі зміни струму збурення, зокрема визначення температури асинхронних електродвигунів шляхом контролю за зміною активного опору обмотки. Розроблено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, від неприпустимого перегріву обмоток.

**Ключові слова:** асинхронний електродвигун, мікропроцесорний пристрій захисту.

**Постановка проблеми.** Системи електропостачання підземних гірничих машин будуються за принципом передачі електроенергії по кабелях від вибухозахищених комплектних розподільчих пристроїв (КРП) центральної підземної підстанції до комплектних трансформаторних підстанцій (КТП), що перетворюють напругу 6 (10) кВ в 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 максимально го струмового захисту, що надзвичайно ускладнює систему підземного електропостачання шахт [1]. Одним з напрямів вдосконалення вибухозахищених КТП є підвищення їх функціональних можливостей в частині систем захисту на стороні низької напруги. Це вимагає створення конструкцій, що містять в собі пристрої захисту приєднань для живлення й керування роботою ЕД гірничих машин [2].

При змінному тривалому режимі роботи деякі робочі органи та механізми створю-

ють навантаження, що змінюється у великих межах, наприклад, в машинах для дроблення. Періодичні перевантаження ЕД супроводжуються недовантаженнями аж до холостого ходу. Окреме короткочасне збільшення струму не призводить до небезпечного зростання температури. Проте, якщо надструми повторюються, дія підвищеної температури на ізоляцію ЕД швидко накопичується. Процес нагрівання ЕД при змінному навантаженні відрізняється від процесу нагрівання при постійному або слабо вираженому змінному навантаженні. При коливаннях навантаження ЕД постійно перебуває в перехідному процесі. Протікання перехідних теплових процесів при змінному навантаженні — 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, всередині ЕД відбувається передача теплоти з однієї частини в інші. Після відключення ЕД температура обмоток статора може зростати за рахунок теплоти, що надходить від ротора. Таким чином, величина

струму не відображає ступінь нагріву ізоляції. Слід врахувати, 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 є найбільш несприятливим з точки зору дії захисту. Періодичне вмикання в роботу передбачає короткочасне перевантаження ЕД. 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 якої базується на вимірюванні струму, не може виконувати свої функції належним чином.

Періодичний перегрів обмотки скорочує термін служби ізоляції. Саме від величини перевищення температури ізоляції обмоток залежить термін служби ізоляції та ЕД в цілому. Перегрів на кожні  $8\div 10$  °С понад допустимого скорочує термін служби ізоляції в 2 рази (правило «восьми градусів» Монтзігера) [3]. Згідно з останніми дослідженнями, тривала робота двигуна зі струмовим перевантаженням 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 перевантаження.

При струмі перевантаження інтегральна уставка забезпечує зворотну залежність  $t_L = f(I_{ph}^2)$  часу  $t_L$  від квадрата величини фазного струму  $I_{ph}^2$ . Якщо термічне навантаження на ЕД, що захищається, перевищить  $Q_L$  і відбудеться спрацьовування захисту, то алгоритм роботи захисного пристрою передбачає витримку часу повторного вмикання  $t_r$ . Величина  $t_r$  вибирається за умови охолодження ЕД до регламентованої [5] температури. Це дозволяє здійснювати хоча б непрямий контроль над температурним режимом ЕД, що є незаперечною перевагою застосування інтегральної захисної характеристики з уставкою  $Q_L$ . Водночас, зазначені властивості захисної характеристики негативно впливають на ефективність роботи технологічного обладнання, що працює в повторно-короткочасному режимі. Інтегральна уставка ЕД, що працює в складі вказаного обладнання, уповільнює роботу останнього і знижує його продуктивність. Тому, в захисних пристроях від струмів перевантаження ЕД, призначених для роботи в повторно-короткочасному режимі, передові електротехнічні компанії виключають інтегральні уставки, замінюючи їх часовими. Часова уставка знижує час існування 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]. Ці реле розроблені для забезпечення захисту саме в повторно-короткочасному режимі роботи ЕД з підвищеним моментом навантаження при блокуванні ротора або зникненні фази, при затяжному пуску зі зростаючим моментом або частих вмиканнях механізмів, що мають велику інерцію та високу ймовірність заклинювання в сталому режимі, таких механізмів як конвеєри, дробарки та змішувачі, вентилятори, насоси та компресори, центрифуги й сушарки, преси, підйомники, оброблювальні верстати тощо. Серед захисних функ-

цій 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 недоліки. Основним недоліком є відсутність контролю рівня термічного навантаження, якого зазнають ЕД не оснащені термісторами. У випадку агресивного режиму частих пусків без зниження навантаження на технологічне обладнання нагрів обмотки ЕД може перевищити допустимий рівень. Нагадаємо, що в повторно-короткочасному режимі значному нагріванню піддається не весь ЕД в 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 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 за короткий час. При цьому температура може перевищити допустиму межу. Щоб уникнути виведення двигуна з експлуатації його слід зупинити. Спрацьовування реле перевантаження відбувається, якщо температура перевищить максимально допустиме значення. Алгоритм спрацьовування реле визначає допустиму тривалість пуску ЕД, коли в результаті тривалого пуску або частих пусків середнє ефективне значення струму досягає значення номінального. Термісторні реле типу CM-MSE, CM-MSS і CM-MSN фірми «ABB» контролюють температурний режим ЕД, оснащених температурним датчиком з позитивним температурним коефіцієнтом опору (термістором). Вбудовані в обмотки ЕД термістори вимірюють ступінь нагрівання двигуна, що дозволяє кон-

тролювати різні експлуатаційні умови: перегрів внаслідок недостатнього охолодження, важкий пуск, часті вмикання та вимикання, однофазний режим роботи, гальмування, асиметрію фаз. При нагріванні навіть одного термістора понад встановлену межу вихідне реле відключає ЕД від мережі.

Система захисту Moeller ZEV [8] та електронні реле перевантаження Siemens Sirius 3RB20/21 [9] підходять для найбільш важких умов пуску ЕД. Клас спрацьовування налаштовується й дозволяє надійно захистити двигун з часом розгону до 40 секунд. Наростання струму реєструється вбудованим трансформатором струму й обробляється відповідною електронікою, яка потім видає імпульс на допоміжні вимикачі. Замикання на землю виявляється завдяки зовнішнім трансформаторам витоків. 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 ЕД.

Спільним недоліком перерахованих технічних рішень теплового захисту ЕД є обмеженість їх застосування. Реле перевантаження з контролем температури за допомогою термісторів можуть застосовуватися тільки для захисту ЕД, в обмотки яких вбудовані термістори. Більш універсальним буде безпосередній контроль за перевищенням температури обмотки ЕД при перевантаженні не за допомогою вимірювання опору термісторів [10, 11], які ще потрібно вмонтувати в обмотку, а за допомогою вимірювання ступеня збільшення активного опору  $R_m$  самої обмотки ЕД. Тобто коли в якості датчика температури використовується сама обмотка ЕД.

В технічному рішенні [12] вимірювання опору  $R_m$  з метою визначення температури обмотки ЕД здійснюється спеціальним пристроєм, який підключається до обмотки перед її вмиканням. Для підключення вузла вимірювання  $R_m$  та його відключен-

ня перед пуском ЕД, використовується проміжне реле, контакти якого з'єднують цей вузол з колом живлення ЕД. Такий спосіб вимірювання опору  $R_m$ , який вимагає введення додаткового обладнання з проміжним реле, обумовлює підвищені габарити й вартість захисного пристрою та знижує надійність його роботи. Крім того, при використанні описаного способу вимірювання  $R_m$  при захисті ЕД, що працюють в 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 викладеного, уявляється доцільним розробити таке технічне рішення визначення  $R_m$  з метою контролю температури обмотки ЕД, в якому розрахунок  $R_m$  проводиться без додаткових вузлів виміру, а тільки за рахунок аналізу співвідношення активної та реактивної потужностей, що споживаються ЕД при пуску. Контроль температури обмотки ЕД шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності дозволяє спростити функціональний склад пристрою захисту тим самим знизивши фінансові витрати на його виготовлення, тому що не потрібні додаткові вузли вимірювання  $R_m$  й 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 10 мс.

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

**Матеріали дослідження.** Контроль над температурним режимом обмоток ЕД пропонується проводити в перехідному режимі збурення електричного кола (пуск ЕД) за дискретними значеннями фазних струмів  $i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}$  ( $i_{j(a,b,c)}$ ) та напруг  $u_{ja}, u_{jb}, u_{jc}$  ( $u_{j(a,b,c)}$ ). Можливість такого контролю заснована на аналізі характеру зміни в часі миттєвих значень сумарних активної  $p_{\Sigma}(t)$  та реактивної  $q_{\Sigma}(t)$  потужностей трифазного кола в перший період  $T_1$  виникнення збурення, а саме за співвідношенням екстремальних значень  $p_{\max}$  залежності  $p_{\Sigma}(t)$  та  $q_{\max}$  залежності  $q_{\Sigma}(t)$  в перехідному режимі зміни пускового струму. Аналізу, по суті, піддається залежність суми добутків дискретних значень фазних струму  $i_{j(a,b,c)}$  на дискретні значення фазних напруг  $u_{j(a,b,c)}$ , відповідно.

Досліджувалась поведінка в часі миттєвих значень  $p_{ja}, p_{jb}, p_{jc}$  ( $p_{j(a,b,c)}$ ) активної та  $q_{ja}, q_{jb}, q_{jc}$  ( $q_{j(a,b,c)}$ ) реактивної потужностей в перехідному режимі пуску ЕД при різних значеннях електромагнітної постійної часу  $\tau$  електричного кола. За допомогою математичного моделювання процесу пуску ЕД отримані часові залежності миттєвих активної  $p_{\Sigma}(t)$  та реактивної  $q_{\Sigma}(t)$  потужностей всіх трьох фаз:

$$p_{\Sigma}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t), \quad (2)$$

$$q_{\Sigma}(t) = q_a(t) + q_b(t) + q_c(t), \quad (3)$$

де  $p_a(t) = i_a(t)u_a(t)$ ;  $p_b(t) = i_b(t)u_b(t)$ ;  $p_c(t) = i_c(t)u_c(t)$  — миттєві значення активних потужностей, що споживаються ЕД в фазах  $a, b, c$ , відповідно;

$$q_a(t) = i_a(t)u_a(t - T/4);$$

$$q_b(t) = i_b(t)u_b(t - T/4);$$

$q_c(t) = i_c(t)u_c(t - T/4)$  — миттєві значення реактивних потужностей, що споживаються ЕД в фазах  $a, b, c$ , відповідно;  $T$  — період зміни напруги мережі живлення.

Відомі аналітичні вирази для зміни в часі струмів в перехідному режимі в симетричній трифазній системі:

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

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

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

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

Вирази для зміни в часі фазних ЕРС:

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

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

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

де  $U_{ph}$  — середньоквадратичне (діюче) значення фазної ЕРС;  $\psi$  — початковий кут ЕРС у фазі  $b$  (момент виникнення збурення).

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

Після підстановки рівнянь (4)–(9) в (2) і в (3) та відповідних перетворень і спрощень, отримуємо аналітичний опис зміни миттєвої потужності що споживається ЕД в початковий момент пуску:

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

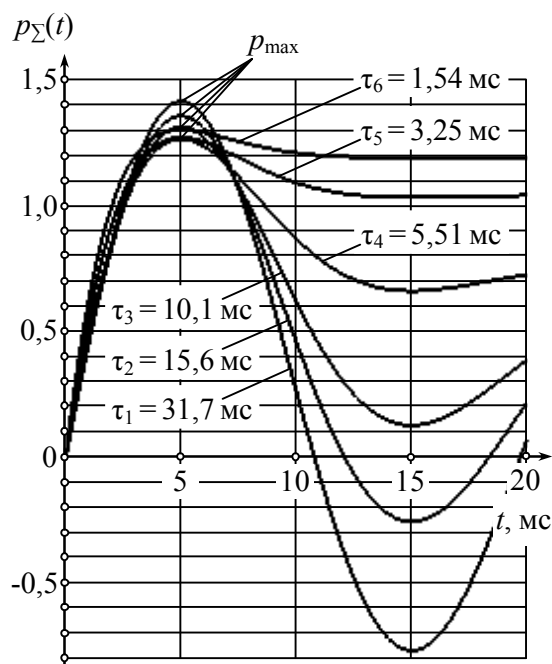
$$q_{\Sigma}(t) = 3I_{ph}U_{ph} [\sin \varphi - \sin(\omega t + \varphi) \cdot e^{-t/\tau}]. \quad (11)$$

Аналіз виразів (10) і (11) показав, що характер залежностей  $p_{\Sigma}(t)$  і  $q_{\Sigma}(t)$  в перехідному режимі зміни струму не залежить від  $\psi$ . Це означає, що характер зміни функцій  $p_{\Sigma}(t)$  і  $q_{\Sigma}(t)$ , зокрема їх екстремальні значення  $p_{\max}$  і  $q_{\max}$  залежать тільки від постійної часу електричного кола  $\tau$ .

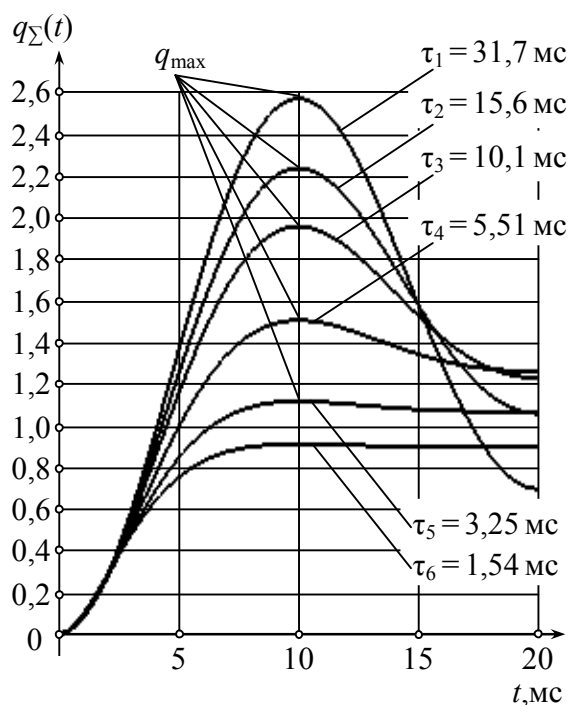
На рисунку 1 наведені залежності  $p_{\Sigma}(t)$  і  $q_{\Sigma}(t)$  для різних випадків постійної часу  $\tau$  (відповідно  $\cos \varphi$ ), побудовані за умови, що діючі значення струмів і напруг при визначенні миттєвих значень  $p_j$  і  $q_j$ , а відповідно і при розрахунку значень  $p_{\Sigma}$  і  $q_{\Sigma}$ , дорівнюють одиниці. Наведені залежності ілюструють необхідні властивості функцій  $p_{\Sigma}(t)$  і  $q_{\Sigma}(t)$  в перехідному режимі. Вочевидь, що значення  $p_{\max}$  і  $q_{\max}$  відрізняються один від одного тим сильніше, чим менша постійна часу  $\tau$ . Тому за співвідношенням значень  $p_{\max}$  і  $q_{\max}$  в перші 10 мс після пуску ЕД, можливо оцінити величину  $\tau$  обмотки ЕД, визначити опір  $R_m$ , а відтак і температуру обмотки ЕД.

Аналіз зміни в часі значень  $p_{\Sigma}$  і  $q_{\Sigma}$  актуальний протягом першого періоду  $T_1 = 20$  мс зміни пускового струму. Такий малий інтервал часу необхідний для того, щоб виключити вплив початку обертання двигуна на величину постійної часу  $\tau$  обмотки. Відомо, що значення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  обмотки ЕД змінюється від величини  $0,2 \div 0,3$  на початку пуску до значення  $0,9$  при виході в режим холостого ходу. При збільшенні швидкості обертання ЕД, відповідно, змінюється і значення постійної часу  $\tau$ . Тому, щоб визначити вплив на  $\tau$  саме нагріву обмотки ЕД, необхідно

визначати величину  $\tau$  якнайшвидше, до того, як ротор ЕД почне обертання.



а



б

Рисунок 1 — Зміна в часі миттєвої потужності, що споживається електродвигуном в перехідному режимі пуску: а — зміна активної потужності; б — зміна реактивної потужності

Використовувати різницю  $q_j - p_j$  реактивної та активної потужностей, зокрема  $q_{\max} - p_{\max}$ , як критерій оцінки зміни постійної часу  $\tau$  обмотки ЕД при її нагріві, в загальному випадку, коли величина струму і напруги не дорівнюють одиниці, не можна. Різниця  $q_{\max} - p_{\max}$  буде залежати від величини пускового струму ЕД. Щоб критерій зміни  $\tau$  не залежав від струму і напруги, він повинен бути виражений у відносних одиницях.

Визначимо робочий інтервал зміни величини  $\tau$  при визначенні опору  $R_m$  обмотки ЕД при її нагріві. Прийнемо, що в момент пуску ЕД  $\cos\varphi = 0,2$  при навколишній температурі  $T_{nc} = 25^\circ\text{C}$ . Такий  $\cos\varphi$  відповідає постійній часу  $\tau_{25} = 15,6$  мс ( $f = 50$  Гц). Допустимою температурою обмотки для ізоляції класу «В», при якій зберігається регламентований термін служби цієї ізоляції, є температура  $T_B = 155^\circ\text{C}$  [5]. Опір мідного дроту при нагріванні на  $\Delta T = 130^\circ\text{C}$  зростає в 1,55 рази:  $R_{155} = 1,55 \cdot R_{25}$ . Відповідно, постійна  $\tau$  нагрітої до  $T_B = 155^\circ\text{C}$  обмотки знизиться до  $\tau_{155} = 0,645\tau_{25} = 10,06$  мс. Таким чином, інтервал  $\tau = (10 \div 16)$  мс є робочим. Відношення  $K = p_{\max}/q_{\max}$  або  $K = q_{\max}/p_{\max}$  використовувати незручно внаслідок низької чутливості характеристики  $\tau = f(K)$  в робочому інтервалі зміни  $\tau$ .

Більш значущим коефіцієнтом ступеня нерівномірності екстремальних значень  $p_{\max}$  и  $q_{\max}$  при зміні  $\tau$ , є співвідношення активної  $W_P$  та реактивної  $W_Q$  енергій:

$$K_W = \frac{W_Q - W_P}{W_P}, \quad (12)$$

де

$$W_P = \sum_0^{t=T_1/2} p_{\Sigma j} \Delta t =$$

$$= \sum_0^{t=T_1/2} (u_{ja}i_{ja} + u_{jb}i_{jb} + u_{jc}i_{jc}) \Delta t; \quad (13)$$

$$W_Q = \sum_0^{t=T_1/2} q_{\Sigma j} \Delta t =$$

$$= \sum_0^{t=T_1/2} (u_{ja-T/4}i_{ja} + u_{jb-T/4}i_{jb} +$$

$$+ u_{jc-T/4}i_{jc}) \Delta t; \quad (14)$$

$\Delta t$  — інтервал дискретизації залежностей  $p_{\Sigma}(t)$  і  $q_{\Sigma}(t)$ ;  $j-T/4$  — номер дискретного значення напруги, зрушеного на чверть періоду відносно дискретного значення струму.

На рисунку 2 наведена залежність величини коефіцієнта  $K_W$  від постійної часу  $\tau$ .

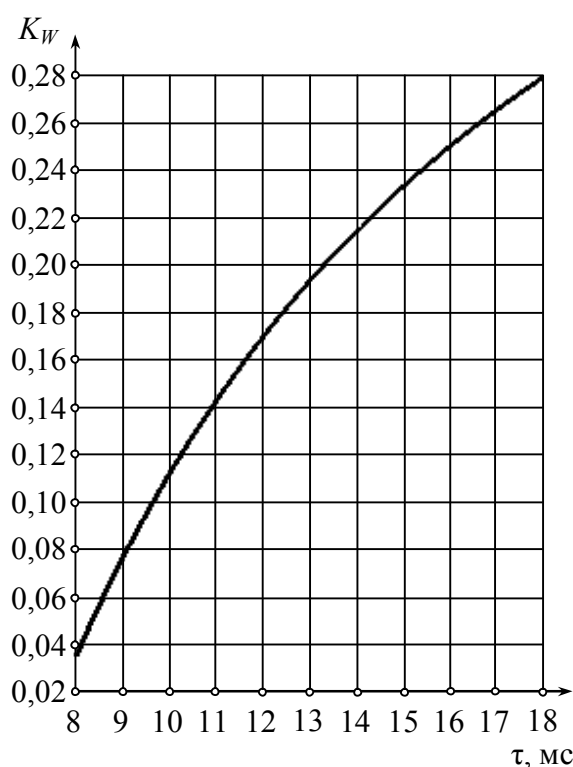


Рисунок 2 — Зміна коефіцієнта  $K_W$  в функції постійної часу  $\tau$

Як видно з наведеної залежності, при зміні постійної часу  $\tau$  від 10,06 мс ( $\cos \varphi = 0,3$ ) до 15,6 мс ( $\cos \varphi = 0,2$ ), тобто

в 1,54 рази, значення коефіцієнта  $K_W$  змінюється від величини 0,113 до значення 0,243, тобто майже в 2,16 рази. Відтак, коефіцієнт  $K_W$  є досить значущим параметром оцінки зміни постійної часу обмотки ЕД при її нагріві, а, в кінцевому рахунку, і для визначення температури обмотки ЕД.

Таким чином, контролювати збільшення опору нагрітої обмотки, а отже і температуру ЕД перед кожним пуском можливо виходячи з аналізу залежності  $\tau = f(K_W)$

постійної часу  $\tau$  від коефіцієнта  $K_W$  співвідношення активної і реактивної енергій без додаткових вузлів вимірювання опору обмотки і пристроїв керування ними. Відтак, спрощується конструкція пристрою захисту і знижуються фінансові витрати на його виготовлення. А за рахунок того, що аналіз співвідношення  $K_W$  проводиться дуже швидко, за час 10 мс, забезпечується динамічність роботи як самих ЕД, так і технологічного устаткування, що працюють в повторно-короткочасному режимі.

Алгоритм побудови захисту ЕД від струмів перевантаження з контролем температури обмотки шляхом аналізу співвідношення активної  $W_P$  та реактивної  $W_Q$  енергій в перші 10 мс зміни пускового струму, полягає в наступному. При кожному пуску ЕД визначається коефіцієнт  $K_W$  співвідношення  $W_P$  та  $W_Q$ . За величиною  $K_W$  визначають електромагнітну постійну часу  $\tau_{\Theta}$  електричного кола, яка відповідає нагріву обмотки ЕД до температури  $T_{\Theta}$  в момент чергового пуску. Величини  $\tau$  і  $K_W$  пов'язані залежністю рисунок 2. Порівняння величини  $\tau_{\Theta}$ , що відповідає нагрітому стану обмотки ЕД, с заданим (відомим) значенням  $\tau_{T_{kn}}$  при заданій температурі  $T_{kn}$  і визначення коефіцієнта зниження постійної часу нагрітої обмотки

$$K_{\tau} = \frac{\tau_{T_{kn}} - \tau_{\Theta}}{\tau_{\Theta}} \quad (15)$$

дозволяє легко визначити відповідне збільшення активного опору нагрітої обмотки, а відтак і температуру обмотки  $T_{\Theta}$  в момент чергового пуску:

$$T_{\Theta} = \frac{K_{\tau}}{\alpha_{\text{cu}}} + T_{\text{kn}}, \quad (16)$$

де  $\alpha_{\text{cu}}$  — температурний коефіцієнт опору міді.

На рисунку 3 наведена схема, що ілюструє роботу мікропроцесорного пристрою при реалізації запропонованого способу захисту ЕД від струмів перевантаження.

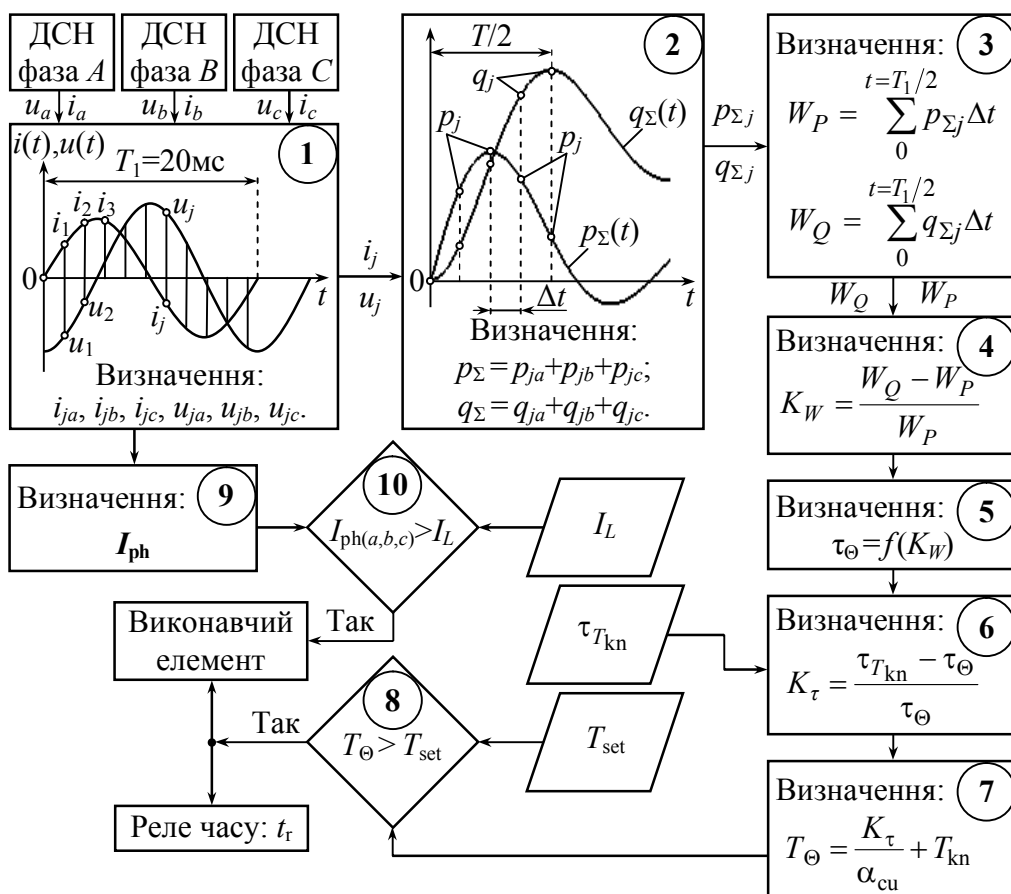


Рисунок 3 — Алгоритмічна схема спрацьовування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегріву обмоток

Окремі обчислювальні та логічні операції, які виробляє мікропроцесор умовно подані як модулі. Фізично зазначених модулів не існує, їх використання необхідно для зручності викладу функціонування мікропроцесорного пристрою при реалізації запропонованого способу захисту.

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб.

В кожній фазі  $a, b, c$  обмотки ЕД здійснюють безперервний вимір фазних стру-

мів, їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення  $i_{j(a,b,c)}$  та 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 уставки струму перевантаження  $I_L$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту із заданою 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 ватметри або фазних напруг  $u_{j(a,b,c)}$  у разі вимірювання потужності за схемою з одним ватметром і штучної нейтральною точкою. Шляхом множення дискретних значень струму  $i_{j(a,b,c)}$  на відповідні дискретні значення напруги визначають залежності в часі  $t$  миттєвих потужностей  $p_{\Sigma}(t)$  і  $q_{\Sigma}(t)$ , що споживаються ЕД при пуску. Значення активної  $W_P$  та реактивної  $W_Q$  енергій визначають за відрізок часу, що дорівнює половині першого періоду  $T_1$  зміни пускового струму. За співвідношенням активної  $W_P$  та реактивної  $W_Q$  енергій визначають температуру  $T_{\Theta}$  нагрітої обмотки ЕД.

1. У модулі 1 (рисунк 3) аналогові сигнали від датчиків струму і напруги ДСН у фазах  $a$ ,  $b$ ,  $c$  перетворюються в дискретні значення  $i_{j(a,b,c)}$  та  $u_{j(a,b,c)}$ .

2. У модулі 2 визначають залежності в функції часу миттєвих значень потужностей  $p_{\Sigma}(t)$  з рівняння (2) та  $q_{\Sigma}(t)$  з рівняння (3), що споживаються ЕД при пуску.

3. У модулі 3 визначають значення активної  $W_P$  за формулою (13) та реактивної  $W_Q$  за формулою (14) електричних енергій, що споживаються ЕД при пуску.

4. У модулі 4 визначають коефіцієнт  $K_W$  з виразу (12).

5. У модулі 5 в момент пуску ЕД з залежності  $\tau = f(K_W)$  за величиною  $K_W$  визначають постійну часу  $\tau_{\Theta}$  нагрітої обмотки.

6. У модулі 6 за рівнянням (15) визначають коефіцієнт  $K_{\tau}$ , що характеризує зменшення постійної часу  $\tau_{\Theta}$  нагрітої обмотки в порівнянні з заданим значенням  $\tau_{T_{kn}}$ , яке відповідає температурі обмотки,

при якій термін служби ізоляції відповідає нормованому терміну служби ЕД.

7. У модулі 7 визначають температуру  $T_{\Theta}$  нагрітої обмотки ЕД за виразом (16).

8. У модулі 8 знайдене значення  $T_{\Theta}$  порівнюють з температурною уставкою  $T_{set}$  і у випадку, якщо  $T_{\Theta} \geq T_{set}$ , виробляють керуючі сигнали на спрацьовування захисту і на формування часу блокування повторного вмикання  $t_r$ .

9. У модулі 9 визначають діючі значення фазних струмів  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ .

10. У модулі 10 виконують порівняння значень  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  з величиною максимальної струмової уставки  $I_L$ . Якщо величина струму в одній з фаз виявиться більшою за  $I_L$ , виробляють керуючий сигнал «Так» на виконавчий елемент захисту (незалежний розчіплювач автоматичного вимикача).

Мікропроцесорний захисний пристрій при роботі за наведеним алгоритмом формує нову, більш досконалу, в порівнянні з існуючими, захисну характеристику від струмів перевантажень ЕД, що працюють в повторно-короткочасному режимі. При цьому передбачений контроль над температурним режимом обмоток ЕД, не оснащених термісторами. У порівнянні з аналогічними захистами відсутні додаткових вузлів вимірювання опору для контролю температури нагрітої обмотки ЕД.

#### Висновки.

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

Розроблений спосіб теплового захисту електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, від неприпустимого перевищення температури обмоток при струмах перевантаження за рахунок безпосереднього контролю температури обмотки статора шляхом розрахунку збільшення її активного опору.

Швидке, в перші 10 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 їхнього керування, дозволяє істотно покращити захисні властивості апаратів захисту електродвигунів, значно спростити конструкцію захисного пристрою та зменшити фінансові витрати на його виготовлення.

### Бібліографічний список

1. Новое направление в создании рудничных взрывозащищенных трансформаторных подстанций на низшее напряжение до 3300 В / Н. М. Басов, В. С. Дзюбан, В. В. Кардаш, В. Е. Кошкин, Т. В. Швецова // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научных трудов. — Донецк : ООО «АИР», 2010. — С. 61–71.
2. Анализ технико-эксплуатационных показателей современных зарубежных взрывозащищенных трансформаторных подстанций / И. Я. Чернов, В. В. Шилов, В. Е. Налбатов, Н. А. Волков, В. Л. Кузнецов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. — Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2006. — С. 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.
4. Данилов И. А. Общая электротехника с основами электроники / И. А. Данилов, П. М. Иванов — М.: Высшая школа, 2005. — 745 с.
5. Электрическая изоляция. Классификация и обозначение по термическим свойствам : ГОСТ Р МЭК 60085-2011. — [Введ. 2012-06-01]. — М.: Стандартинформ, 2012. — III, 8 с.
6. Пускорегулирующая аппаратура TeSys : каталог Schneider Electric. — 2007. — 567 с.
7. Низковольтное оборудование АВВ. Контактторы, реле управления, аппараты защиты электродвигателей / Технический каталог АВВ. — 2010. — 366 с.
8. Пуск и защита электродвигателей : каталог продукции Moeller. — 2009. — 176 с.
9. Низковольтные аппараты управления и распределения Siemens. SIRIUS — SENTRON — SIVACON : каталог LV1 Siemens. — 2007. — 1270 с.
10. Сивокобыленко В. Ф. Способы реализации тепловой защиты асинхронных электродвигателей, основанной на измерении входных сопротивлений / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Збірник наукових праць ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика». — Донецьк, 2008. — Вип. 8 (140). — С. 13–18.
11. Сивокобыленко В. Ф. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. — Кременчук: КДПУ, 2009. — Вип. 3(56). Част. 2. — С. 74–78.
12. 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; заявл. 01.04.2002; опубл. 20.04.2004.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. ДонДТУ Заблодським М.М., д.т.н., проф. НТУ "ХПІ" Болюхом В.Ф.

Стаття надійшла до редакції 10.06.14.

к.т.н. Серета А. Г. (НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: lexis\_suba@mail.ru)

### ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ТОКОВ ПЕРЕГРУЗКИ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ В МОМЕНТ ПУСКА

Доказана необходимость непосредственного контроля температуры обмотки асинхронных электродвигателей. Путем анализа экстремальных значений мгновенной мощности потреб-

ляемой электродвигателем в начальный момент времени после пуска, осуществляется контроль над температурным режимом электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме. Дано теоретическое обоснование возможности получения информации о параметрах электрической цепи в переходном режиме изменения тока возмущения, в частности определения температуры асинхронных электродвигателей путем контроля за изменением активного сопротивления обмотки. Разработан алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты асинхронных электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, от недопустимого перегрева обмоток.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, микропроцессорное устройство защиты.

**Sereda O. G. Candidate of Technical Sciences** (National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: [lexus\\_suba@mail.ru](mailto:lexus_suba@mail.ru))

#### **PROTECTION OF ASYNCHRONOUS MOTORS FROM OVERLOAD CURRENTS WITH DIRECT CONTROL OF THE WINDING TEMPERATURE AT THE TIME OF START**

*The necessity of direct winding temperature monitoring of induction motors is proved. The control of the motor temperature, working in intermittent mode is done by the analysis of extreme values of the motor instantaneous power consumption at the initial time after start-up. The theoretical justification for the possibility of obtaining information about the parameters of the electrical circuit in the transient regime change current perturbations, in particular determining the temperature of induction motors by monitoring the change in active resistance of the winding is given. The algorithm of functioning of induction motors microprocessor protection operating in intermittent mode, against impermissible winding heating is developed.*

**Key words:** induction motor; microprocessor-based protection device.