



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **105141** (13) **C2**  
(51) МПК

*H02H 5/04* (2006.01)

*H02H 7/085* (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2013 08219</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>01.07.2013</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>10.04.2014</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: <b>25.11.2013, Бюл.№ 22</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.04.2014, Бюл.№ 7</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Кобозєв Олександр Сергійович (UA), Середа Олександр Григорійович (UA), Заратуйко Анатолій Вікторович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>Кобозєв Олександр Сергійович, пр. Перемоги, 78-б, кв. 62, м. Харків-204, 61204 (UA), Середа Олександр Григорійович, пр. Перемоги, 66, кв. 491, м. Харків-204, 61024 (UA), Заратуйко Анатолій Вікторович, вул. Грозненська, 44, кв. 87, м. Харків-124, 61124 (UA)</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: RU 2227354 C2, 20.04.2004 RU 2355090 C1, 10.05.2009 SU 824360 A1, 23.04.1981 SU 886131 A1, 30.11.1981 UA 101084 C2, 12.12.2011 UA 33607 C2, 15.05.2002 UA 40488 U 10.04.2009 Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения. найдено в Internet [24.12.2013] URL:<a href="http://www.kdu.edu.ua/statti/2009-3-2(56)/74.PDF">http://www.kdu.edu.ua/statti/2009-3-2(56)/74.PDF</a> . Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. Електричні машини і апарати. Випуск 3/2009 (56). Частина 2.</p>
---	--

**(54) СПОСІБ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ З БЕЗПОСЕРЕДНІМ КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТКИ**

**(57) Реферат:**

Спосіб захисту електродвигунів (ЕД) від струмів перевантаження, в якому визначення величини активного опору  $R_{ед}$  і подальшого розрахунку температури  $T_{\theta}$  обмотки ЕД здійснюється при кожному пуску ЕД тільки за рахунок аналізу залежності миттєвої потужності в часі шляхом порівняння екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається ЕД в початковий момент часу після пуску. При цьому аналізі піддається лише залежність суми добутків дискретних значень струму  $i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}$  на дискретні значення фазних напруг  $u_{ja}, u_{jb}, u_{jc}$ , відповідно.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що при кожному пуску електродвигуна отримують залежність в часі  $p_{ед} = f(t)$  миттєвої потужності  $p_{ед}$ , що споживається

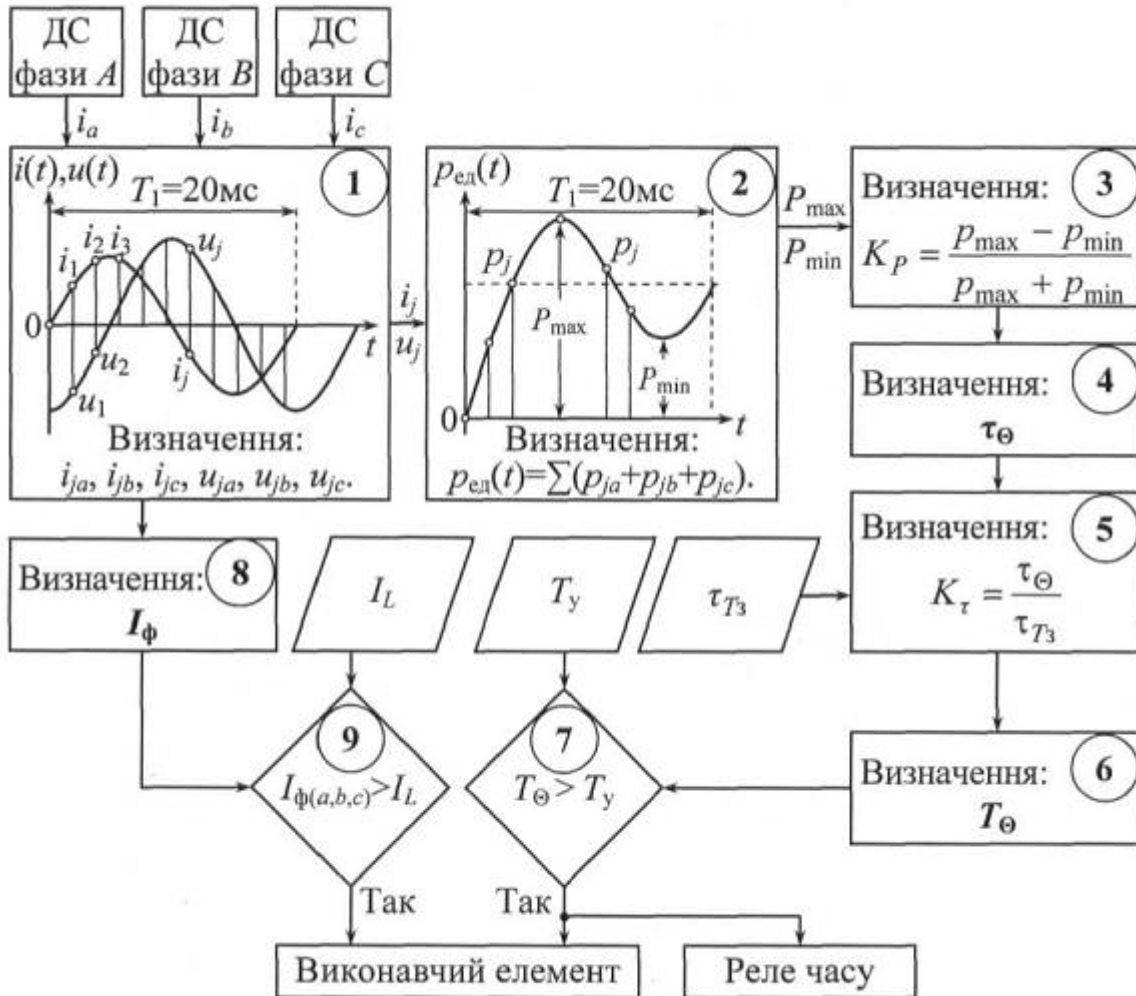
UA 105141 C2

електродвигуном за час  $t$ , що дорівнює першому періоду зміни пускового струму, з якої визначають максимальне  $p_{\max}$  й мінімальне  $p_{\min}$ , екстремальні значення та коефіцієнт

$$K_P = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max} + p_{\min}},$$

за величиною якого визначають температуру нагрітої обмотки  $T_{\Theta}$ . Знайдене

значення  $T_{\Theta}$  порівнюють з температурною уставкою  $T_y$  і, у випадку, якщо  $T_{\Theta} \geq T_y$ , виробляють два керуючих сигнали: один на спрацьовування захисту і другий на формування часу блокування повторного вмикання  $t_{\text{бл}}$ .



Фіг. 3

Винахід належить до електричних апаратів і може бути використаний в пристроях (як спосіб) теплового захисту трифазних електричних двигунів (ЕД) від струмів перевантаження, зокрема від неприпустимого перевищення температури обмоток асинхронних ЕД, що працюють в повторно-короткочасному режимі.

5 Відомі способи захисту ЕД від струмів перевантаження  $I_L$ , в яких захисна часострумова характеристика формується з використанням так званої "інтегральної" уставки  $Q_L$ :

$$Q_L = I_\phi^2 t_L, (1)$$

де  $I_\phi$  - середньоквадратичне значення фазного струму,  $t_L$  - час спрацьовування захисту при струмовому перевантаженні.

10 Використання інтегральної уставки при струмовому перевантаженні забезпечує зворотну залежність часу спрацьовування захисту  $t_L$  від квадрата величини фазного струму  $I_\phi^2 : t_L = f(I_\phi^2)$ . 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  $t_{ПВ}$ . Величина  $t_{ПВ}$  вибирається з умови охолодження ЕД до регламентованого [1] значення температури. Це дозволяє здійснювати хоча б опосередкований, з використанням математичної моделі охолодження, 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, що працює в складі вказаного обладнання, уповільнює роботу останнього й 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, величина якої порівняно невелика (10-30) с, істотно знижує час існування струму перевантаження й тим самим дозволяє швидше провести повторне вмикання ЕД.

20 Прикладом захисного пристрою ЕД від струмів перевантаження є реле перевантаження за струмом TeSys LR97D і LT47 фірми "Schneider electric" [2]. Реле LR97D і LT47 розроблені для найбільш повного забезпечення захисту саме в повторно-короткочасному режимі роботи електродвигунів з підвищеним моментом навантаження, таких механізмів як конвеєри, дробарки та змішувачі, вентилятори, насоси та компресори, центрифуги й сушарки, преси, підйомники, обробні верстати тощо.

Серед захисних функцій реле LR97D і LT47 відзначають наступні:

35 - захист ЕД при блокуванні ротора або зникненні фази при зatoryному пуску зі зростаючим моментом або частих вмиканнях механізмів, що мають велику інерцію та високу ймовірність заклинювання в сталому режимі;  
 - швидке виявлення перевантаження в порівнянні з пристроями теплового захисту на основі інтегральної уставки  $Q_L$ ;  
 - захист двигуна при частих пусках: 30-50 за годину.

40 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, яких зазнають ЕД, не оснащені термісторами. У випадку досить агресивного режиму частих пусків без зниження навантаження на технологічне обладнання нагрів обмотки ЕД може значно перевищити припустимий рівень. Слід зазначити, що в повторно-короткочасному режимі значному нагріванню може піддаватися не весь ЕД в цілому, а лише його обмотки, зокрема, їх ізоляція. Саме від величини перевищення температури ізоляції обмоток залежить термін служби ізоляції та ЕД в цілому. Вважають, що перегрів понад допустимого на кожні 8-10 °С скорочує термін служби ізоляції в 2 рази (правило "восьми градусів" Монтзігера) [3].

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

Оскільки в динамічних захистах ЕД без інтегральної уставки  $Q_L$  відсутня можливість опосередкованого контролю температури обмотки ЕД, який здійснюється шляхом розрахунку температури за термічним впливом від струму, що протікає, виявляється доцільним використовувати спосіб безпосереднього контролю температури за допомогою вимірювання активного опору обмотки електродвигуна  $R_{ед}$ .

Існує декілька технічних рішень безпосереднього контролю за температурою обмотки ЕД. Одним з таких рішень, що використовує фірма "ABB" [4], є вмонтовані в обмотки двигунів термістори та захист таких електродвигунів відповідними електронними реле типу CM-MSE,

CM-MSS та CM-MSN. Термістори (температурні датчики з позитивним температурним коефіцієнтом опору) дозволяють напряду вимірювати ступінь нагріву обмотки двигуна, що дає можливість безпосередньо контролювати й оцінювати різні експлуатаційні умови: перегрів внаслідок недостатнього охолодження, важкий пуск, часті вмикання та вимикання. Аналогічні технічні рішення використовуються при захисті електродвигунів з вбудованими термісторами за допомогою електронних реле Moeller ZEV [5] та Siemens Sirius 3RB20/21 [6]. 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.

Тому більш універсальними є такі технічні рішення, в яких перевищення температури обмотки ЕД від струмових навантажень контролюють 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.

Таким технічним рішенням, що за постановкою та вирішенням відповідає проблемі використання самої обмотки ЕД як датчик температури, є спосіб захисту ЕД при перевантаженні та пристрій для його реалізації, описані в [7]. Технічне рішення [7] передбачає вимірювання активного опору обмотки електродвигуна  $R_{ед}$  з метою визначення її температури. Вимірювання  $R_{ед}$  здійснюють спеціальним пристроєм, який підключають до обмотки ЕД перед вмиканням останнього. Для під'єднання вузла вимірювання  $R_{ед}$  та його відключення перед пуском ЕД, використовують проміжне реле, контакти якого з'єднують вимірювальний вузол з колом живлення обмотки ЕД.

Але такий спосіб вимірювання активного опору  $R_{ед}$  обмотки ЕД і подальшого визначення температури, незважаючи на перевагу, що полягає в можливості застосовувати його для електродвигунів без вбудованих термісторів, все ж має досить серйозні недоліки. По-перше, введення додаткового вузла вимірювання опору з проміжним реле, обумовлює підвищені габарити й вартість захисного пристрою та знижує надійність його роботи. По-друге, при використанні цього способу вимірювання  $R_{ед}$  при захисті ЕД, що працюють в повторно-короткочасному режимі, знижується динамічність роботи технологічного обладнання. Адже перед черговим пуском ЕД необхідно здійснювати всі описані вище операції під'єднання, вимірювання та від'єднання вузла виміру  $R_{ед}$ .

З урахуванням вищевикладених міркувань, виявляється доцільним розробити такий спосіб визначення величини активного опору  $R_{ед}$  обмотки ЕД з метою контролю її температури, в якому визначення  $R_{ед}$  проводиться без застосування будь-яких додаткових вузлів вимірювання. Таке технічне рішення дозволить досить точно визначити збільшення опору обмотки тільки за рахунок аналізу тих параметрів процесу пуску ЕД, які можна отримати від відповідних датчиків (струму, напруги, потужності) в колі живлення ЕД.

Визначити збільшення активного опору нагрітої обмотки за рахунок відповідного зменшення величини пускового струму не виявляється можливим внаслідок малої значимості збільшення повного опору обмотки ЕД  $Z_{ед}$  при збільшенні тільки активного опору  $R_{ед}$ . Це обумовлено тим, що при пуску ЕД коефіцієнт потужності кола становить  $\cos\varphi=(0,2-0,3)$ . У цьому випадку навіть при помітному збільшенні величини активного опору обмотки  $R_{ед}$  величина повного опору  $Z_{ед}$  зміниться дуже незначно. Наприклад, при нагріванні на  $\Delta T=125^\circ\text{C}$  опір мідної обмотки  $Z_{ед}$  збільшиться всього на 2,5 %. На стільки ж знизиться величина пускового струму. Така мала величина зміни діючого значення пускового струму, по-перше, порівнянна зі статистичною похибкою вимірювання, а по-друге, вона менше за величину можливих коливань напруги кола, що призводять до відповідної зміни струму. Тому очевидно, що при такій малій зміні діючого значення пускового струму від підвищення температури й активного опору обмотки, цей параметр, що контролюється при пуску ЕД, не може бути використаний для застосування самої обмотки в якості датчика її температури.

Для вирішення проблеми використання самої обмотки в якості датчика температури необхідно знайти інший контрольований параметр процесу пуску ЕД, який був би більш значущим для контролю зміни опору обмотки. Як показав аналіз, результати якого наведені нижче, такими параметрами можуть служити не діючі, а миттєві (дискретні) значення параметрів процесів пуску, а саме дискретні значення струму й напруги, точніше їхні добутки: миттєві значення потужності. Іншими словами 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.

Найближчим (прототипом) за технічною суттю до винаходу, що заявляється: аналіз миттєвих (дискретних) значень параметрів процесу збурення електричного кола (зокрема пуск ЕД), є спосіб, описаний в [8], в якому аналіз дискретних значень струму використовують для швидкого в перший період перехідного процесу визначення сталого середньоквадратичного значення струму при реалізації максимального струмового захисту, у відповідності з яким у кожній з трьох фаз a, b, c здійснюють вимір струмів та їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення  $i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}$ , потім визначають діючі значення фазних струмів  $I_a, I_b, I_c$  методом інтегрування квадратів знайдених дискретних значень  $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$ , після чого, якщо величина  $I_a, I_b$ , або  $I_c$  виявляється більшою за значення струмової уставки перевантаження  $I_{sd}$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_{sd}$ . Недоліком вказаного способу визначення параметрів електричного кола на підставі аналізу дискретних значень струму є те, що значення постійної часу електричного кола вважається заданим, тоді як для вирішення задачі визначення температурного режиму обмотки електродвигуна постійну часу слід визначити.

В основу винаходу, що заявляється, поставлена задача розробити такий спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження, при якому за рахунок додаткового аналізу екстремальних значень сумарної для всіх трьох фаз миттєвої потужності, що споживається ЕД в початковий момент часу після пуску, досягається спрощення функціонального складу пристрою захисту та забезпечується динамічність роботи як самого ЕД, так і технологічного устаткування, що працюють в повторно-короткочасному режимі. При цьому, як і в прототипі, аналіз дискретних значень струму здійснюється в перший період зміни струму збурення електричного кола (пускового струму ЕД).

Контроль температури обмотки ЕД шляхом аналізу екстремальних значень сумарної для усіх трьох фаз миттєвої потужності, що споживається ЕД у момент пуску, дозволяє:

- спростити функціональний склад пристрою захисту, тим самим зменшити фінансові витрати на його виготовлення, тому що не потрібні додаткові вузли вимірювання опору й пристрої керування ними;

- забезпечити динамічність роботи як самих ЕД, так і технологічного устаткування, що працюють в умовах повторно-короткочасного режиму, за рахунок того, що вимір перевищення температури обмотки ЕД здійснюється дуже швидко, за час, що не перевищує 20 мс.

Поставлена задача реалізується в способі захисту електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається при пуску, у відповідності з яким у кожній з трьох фаз a, b, c електродвигуна здійснюють вимір струмів та їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення  $i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}$ , потім визначають діючі значення фазних струмів  $I_a, I_b, I_c$  методом інтегрування квадратів знайдених дискретних значень  $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$ , після чого, якщо величина  $I_a, I_b$ , або  $I_c$  виявляється більшою за значення струмової уставки перевантаження  $I_L$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ , за рахунок того, що додатково, при кожному повторному пуску електродвигуна 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  $p_{ед}=f(t)$  миттєвої потужності електродвигуна  $p_{ед}$  в часі  $t$  за відрізок часу, що дорівнює першому періоду зміни пускового струму ( $T_1$ ), потім визначають максимальне  $p_{max}$  й мінімальне  $p_{min}$  екстремальні значення залежності  $p_{ед}=f(t)$ , після чого визначають коефіцієнт, що дорівнює відношенню різниці й суми екстремальних значень миттєвої потужності в перехідному режимі як  $K_p = \frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max} + p_{min}}$ , потім за

величиною  $K_p$  визначають значення електромагнітної постійної часу  $\tau_{\Theta}$  електричного кола, що відповідає нагріванню обмотки в момент поточного пуску електродвигуна, яка пов'язана з величиною  $K_p$  наступною табличною залежністю  $\tau=f(K_p)$ :

$K_p$	1,51	1,4	1,28	1,17	1,05	0,92	0,81	0,69	0,58	0,47
$\tau, \text{мс}$	16,0	15,0	14,0	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0

після чого визначають коефіцієнт  $K_{\tau}=\tau_{\Theta}/\tau_{T_3}$ , який характеризує наскільки величина постійної часу обмотки  $\tau_{T_3}$  при заданій температурі  $T_3$  більша за величину постійної часу  $\tau_{\Theta}$  нагрітої

обмотки, після чого визначають температуру нагрітої обмотки  $T_{\Theta}$  з виразу  $T_{\Theta} = \frac{1-K_{\tau}}{0,004K_{\tau}} + T_3$  °C,

потім знайдене значення температури  $T_{\Theta}$  порівнюють з температурною уставкою  $T_v$  і у випадку, якщо  $T_{\Theta} \geq T_v$ , виробляють два керуючих сигнали: один на спрацьовування захисту і другий на формування часу блокування повторного вмикання  $t_{\text{бл}}$ .

5 Саме за рахунок того, що додатково, при кожному повторному пуску електродвигуна здійснюють вимір лінійних напруг  $U_{iab}, U_{ibc}, U_{iac}$  у разі вимірювання потужності за схемою з двома ватметрами або фазних напруг  $U_{ia}, U_{ib}, U_{ic}$  у разі вимірювання потужності за схемою з одним ватметром і штучною нейтральною точкою, після чого визначають залежність  $p_{\text{ед}}=f(t)$  миттєвої потужності електродвигуна  $p_{\text{ед}}$  в часі  $t$  за відрізок часу, що дорівнює першому періоду зміни пускового струму ( $T_1$ ), потім визначають максимальне  $p_{\text{max}}$  й мінімальне  $p_{\text{min}}$  екстремальні значення залежності  $p_{\text{ед}}=f(t)$ , після чого визначають коефіцієнт, що дорівнює відношенню різниці

й суми екстремальних значень миттєвої потужності в перехідному режимі як  $K_p = \frac{p_{\text{max}} - p_{\text{min}}}{p_{\text{max}} + p_{\text{min}}}$ ,

потім за величиною  $K_p$  визначають значення електромагнітної постійної часу  $\tau_{\Theta}$  електричного кола, що відповідає нагріванню обмотки в момент поточного пуску електродвигуна, яка пов'язана з величиною  $K_p$  наступною табличною залежністю  $\tau=j(K_p)$ :

$K_p$	1,51	1,4	1,28	1,17	1,05	0,92	0,81	0,69	0,58	0,47
$\tau$ , мс	16,0	15,0	14,0	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0

після чого визначають коефіцієнт  $K_{\tau}=\tau_{\Theta}/\tau_{T_3}$ , який характеризує наскільки величина постійної часу обмотки  $\tau_{T_3}$  при заданій температурі  $T_3$  більша за величину постійної часу  $\tau_{\Theta}$  нагрітої

20 обмотки, після чого визначають температуру нагрітої обмотки  $T_{\Theta}$  з виразу  $T_{\Theta} = \frac{1-K_{\tau}}{0,004K_{\tau}} + T_3$  °C,

потім знайдене значення температури  $T_{\Theta}$  порівнюють з температурною уставкою  $T_v$  і у випадку, якщо  $T_{\Theta} \geq T_v$ , виробляють два керуючих сигнали: один на спрацьовування захисту і другий на формування часу блокування повторного вмикання  $t_{\text{бл}}$  забезпечується динамічність роботи як самих ЕД, так і технологічного устаткування, що працюють в повторно-короткочасному режимі, а також знижуються фінансові витрати на виготовлення захисного пристрою.

25 Можливість контролю температури обмотки ЕД за рахунок аналізу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається ЕД в початковий момент часу його пуску (перші 20 мс), обумовлена виявленими особливостями залежності миттєвої потужності в часі. За допомогою математичного моделювання процесу пуску ЕД була проаналізована залежність зміни в часі сумарної миттєвої активної потужності всіх трьох фаз, тобто потужності:

$$p_{\text{ед}}=f(t)=p_a(t)+p_b(t)+p_c(t), (2)$$

де  $p_a(t), p_b(t), p_c(t)$  - миттєві значення потужностей, що споживаються електродвигуном у фазах а, b, с, відповідно.

35 Як відомо, миттєві значення потужності, що споживається електродвигуном, в кожній з фаз змінюються в часі за синусоїдальним законом, тому характер зміни фазної потужності  $p_{\text{ф}}=f(t)$  в перший момент пуску та її екстремальні значення залежатимуть і від моменту виникнення пускового струму, і від значення постійної часу кола. Оскільки момент виникнення пускового струму є величиною випадковою, то з аналізу характеру зміни фазної потужності  $p_{\text{ф}}=f(t)$  неможливо отримати достовірну інформацію про величину постійної часу кола. Проте, як показали результати математичного моделювання процесу пуску ЕД, таку інформацію про

40 величину постійної часу кола можливо отримати з аналізу характеру залежності в часі сумарної для трьох фаз потужності  $p_{\text{ед}}$  (2).

Було встановлено, що стале значення залежності сумарної для усіх трьох фаз миттєвої потужності, що споживається електродвигуном в часі  $p_{\text{ед}}(t)$ , є величина постійна:  $p_{\text{ст}}=\text{const}$ . У відповідність із цим, як і підтвердили результати математичного моделювання, характер залежності  $p_{\text{ед}}(t)$  в перехідному режимі не залежить від моменту виникнення пускового струму. А це означає, що характер зміни функції  $p_{\text{ед}}(t)$ , зокрема її екстремальні значення  $p_{\text{min}}$  і  $p_{\text{max}}$ , залежать виключно тільки від величини електромагнітної постійної часу електричного кола  $\tau$ . Тому з аналізу характеру зміни сумарної миттєвої потужності ЕД в початковий момент часу його

50 пуску можна здобути інформацію про зміну постійної часу обмотки при її нагріванні.

На фіг. 1 наведені графіки зміни миттєвої потужності, що споживається ЕД при пуску, для двох випадків:  $\tau_1=16$  мс ( $\cos\varphi=0,2$ ), відповідає значенню для холодної обмотки та  $\tau_2=7$  мс

( $\cos\varphi=0,41$ ), відповідає значенню для нагрітою обмотки, що ілюструють розглянуті властивості функції  $p_{эд}(t)$  в перехідному режимі.

Для зручності порівняння, амплітудні значення струму  $I_m$  й напруги  $U_m$  прийняті рівними 1. Як видно з графіків, в обох випадках зміна величини миттєвої потужності відбувається з коливанням від екстремального максимального значення  $p_{max}$  до мінімального  $p_{min}$ . При цьому величини миттєвої потужності між значеннями  $p_{max}$  та  $p_{min}$  при різних значеннях  $\tau$  суттєво відрізняються один від одного. Так "розмах" екстремальних значень потужності  $\Delta p^{16} = p_{max}^{16} - p_{min}^{16}$  для кола з постійною часу  $\tau_1$  виходить приблизно в 2 рази більше, ніж аналогічний "розмах"  $\Delta p^7 = p_{max}^7 - p_{min}^7$  для кола з  $\tau_2$ . Таким чином, можна констатувати, що за екстремальними значеннями  $p_{max}$  й  $p_{min}$  миттєвої потужності дійсно можна здійснювати оцінку зміни електромагнітної постійної часу  $\tau_{\ominus}$  при нагріванні обмотки ЕД, а, отже, і вимір її температури.

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

Як показав аналіз, більш зручним і більш вагомим коефіцієнтом, що характеризує зміну екстремальних значень миттєвої потужності при зміні постійної часу  $\tau$ , є співвідношення різниці екстремальних значень миттєвої потужності до їх суми:

$$K_p = \frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max} + p_{min}} \quad (4)$$

На фіг. 2 наведена залежність коефіцієнта  $K_p$  у функції електромагнітної постійної часу електричного кола  $\tau$ .

Щоб оцінити значимість коефіцієнта  $K_p$  для визначення величини зміни опору обмотки ЕД при її нагріванні, приймемо, що електромагнітна постійна часу обмотки ЕД при навколишній температурі  $T_{nc}=25$  °С дорівнює  $\tau_{25}=15,6$  мс (відповідає  $\cos\varphi=0,2$ ). Допустимою температурою обмотки для ізоляції класу "В", при якій зберігається регламентований термін служби цієї ізоляції [1], є температура  $T_B=155$  °С. Оцінимо, як зміниться значення коефіцієнта  $K_p$  при нагріванні обмотки до вказаної 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  $\tau$  нагрітій до  $T_B=155$  °С обмотки знизиться в 1,5 рази:  $\tau_{155}=0,645\tau_{25}=10,06$  мс.

Якщо проаналізувати залежність  $\tau=f(K_p)$ , наведену на фіг. 2, то неважко перекоонатися, що при зміні величини  $\tau$  в 1,55 рази, значення коефіцієнта  $K_p$  зміниться в 1,66 рази. Тим самим підтверджується значимість коефіцієнта  $K_p$  для оцінки постійної часу  $\tau$ , а відповідно й опору  $R_{ед}$ , та, в остаточному підсумку, температури обмотки ЕД. На підставі викладених вище результатів порівняльного аналізу можна констатувати, що коефіцієнт  $K_p$ , що характеризує співвідношення екстремальних значень миттєвої потужності, дійсно, є досить значущим параметром для аналізу температурного режиму ЕД перед кожним його черговим пуском.

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

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

Перед кожним пуском ЕД визначають співвідношення екстремальних значень сумарної для трьох фаз миттєвої потужності, що споживається ЕД в перехідному режимі пуску та характеризується коефіцієнтом  $K_p$ . За величиною  $K_p$  визначають значення електромагнітної постійної часу  $\tau_{\ominus}$  електричного кола, що відповідає нагріванню обмотки в момент чергового поточного пуску електродвигуна. Величини  $\tau$  і  $K_p$  пов'язані між собою табличною залежністю  $\tau=f(K_p)$ . Порівняння значення постійної часу обмотки  $\tau_{\ominus}$ , відповідного її нагрітого стану, із заданим значенням  $\tau_{T_3}$  та визначення коефіцієнта зниження величини постійної часу нагрітої обмотки  $K_{\tau}=\tau_{\ominus}/\tau_{T_3}$ , дозволяє легко визначити відповідне збільшення величини активного опору нагрітої обмотки, а отже і температуру обмотки  $T_{\ominus}$  в момент чергового пуску.

На фіг. 3 наведена блок-схема, що ілюструє роботу мікропроцесорного пристрою захисту при реалізації способу захисту ЕД від струмів перевантаження, що заявляється. Окремі обчислювальні та логічні операції, які виробляє мікропроцесорний пристрій, умовно представлені у вигляді модулів. Фізично зазначені модулі не існують, їх використання необхідне для зручності викладення функціонування мікропроцесорного пристрою при реалізації запропонованого способу струмового захисту.

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб:

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

2. У модулі 2 визначають залежність миттєвих значень потужності у функції часу  $p_{ед}(t)$  и находять екстремальні значення цієї функції:  $p_{max}$  й  $p_{min}$ .

3. У модулі 3 визначають коефіцієнт співвідношення екстремальних значень миттєвої потужності як  $K_p = \frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max} + p_{min}}$ .

4. У модулі 4 за величиною  $K_p$  визначають значення електромагнітної постійної часу  $\tau_{\Theta}$  електричного кола, що відповідає нагріванню обмотки в момент чергового поточного пуску електродвигуна з табличної залежності.

5. У модулі 5 визначають коефіцієнт  $K_t = \tau_{\Theta} / \tau_{T_3}$ , що характеризує збільшення постійної часу  $\tau_{\Theta}$  нагрітої обмотки в порівнянні з заданим значенням  $\tau_{T_3}$ , яке відповідає температурі обмотки, при якій термін служби ізоляції відповідає нормованому терміну служби ЕД.

6. У модулі 6 визначають температуру обмотки ЕД за виразом:  $T_{\Theta} = \frac{1 - K_t}{0,004 K_t} + T_3 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

7. У модулі 7 знайдене значення температури  $T_{\Theta}$  порівнюють з температурною уставкою  $T_v$  і у випадку, якщо  $T_{\Theta} \geq T_v$ , виробляють два керуючих сигнали:

- "Так" на виконавчий елемент (ВЕ) захисного пристрою;

- "Так" на формування витримки часу повторно пуску ЕД.

8. У модулі 8 визначають діючі значення фазних струмів  $I_a, I_b, I_c$  в 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.

Мікропроцесорний захисний пристрій при роботі за наведеним алгоритмом формує нову, більш досконалу, в порівнянні з існуючими, захисну характеристику від струмів перевантажень електродвигунів, які працюють в 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.

У способі, що заявляється, контроль температури здійснюється за рахунок аналізу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається ЕД при пуску. При цьому аналіз температури проводиться дуже швидко, менш ніж за 20 мс.

Таким чином, запропонований спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності в момент пуску, вирішує поставлену в основу винаходу задачу:

- за рахунок аналізу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається ЕД в перші 20 мс після виникнення пускового струму, без додаткових вузлів вимірювання опору й пристроїв їхнього керування, контролюють збільшення опору, а отже й температуру нагрітої обмотки електродвигуна перед кожним його пуском, що значно спрощує конструкцію захисного пристрою та зменшує фінансові витрати на його виготовлення.

- за рахунок того, що аналіз екстремальних значень потужності проводиться дуже швидко, за час менший 20 мс, забезпечується динамічність роботи як самих електродвигунів, так і технологічного устаткування, що працюють в повторно-короткочасному режимі.

Джерела інформації:

1. ГОСТ Р МЭК 60085-2011 Электрическая изоляция. Классификация и обозначение по термическим свойствам. Введен 01.06.2012.

2. Пускорегулирующая аппаратура TeSys / Каталог Schneider Electric. - 2007. - 567 с.

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



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

5. Пуск и защита электродвигателей / Каталог продукции Moeller. - 2009. - 176 с.

6. Low-Voltage Controls and Distribution Siemens. SIRIUS-SENTRON-SIVACON / Catalog Siemens LV 1. - 2007. - 1270 с.

7. Пат. № 2227354 Российской Федерации МПК H02H 5/04, H02H 7/06. - № 2002108251/092002108251/09. Заявлено 01.04.2002; Опубл. 20.04.2004.

8. Пат. № 2355090 Российской Федерации МПК H02H 3/08. - № 2007134556/09. Заявлено 17.09.2007; Опубл. 10.05.2009.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається при пуску, у відповідності з яким у кожній з трьох фаз а, b, с електродвигуна здійснюють вимір струмів та їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення  $i_{ja}$ ,  $i_{jb}$ ,  $i_{jc}$ ,

потім визначають діючі значення фазних струмів  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  методом інтегрування квадратів знайдених дискретних значень  $i_{ja}^2$ ,  $i_{jb}^2$ ,  $i_{jc}^2$ , після чого, якщо величина  $I_a$ ,  $I_b$  або  $I_c$  виявляється

більшою за значення струмової уставки перевантаження  $I_L$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ , який **відрізняється** тим, що

додатково при кожному повторному пуску електродвигуна 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  $p_{ед} = f(t)$  миттєвої потужності електродвигуна  $p_{ед}$  в часі  $t$  за відрізок часу, що дорівнює першому періоду зміни пускового

струму ( $T_1$ ), потім визначають максимальне  $p_{max}$  й мінімальне  $p_{min}$  екстремальні значення залежності  $p_{ед} = f(t)$ , після чого визначають коефіцієнт, що дорівнює відношенню різниці й суми

екстремальних значень миттєвої потужності в перехідному режимі як  $K_p = \frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max} + p_{min}}$ , потім за величиною  $K_p$  визначають значення електромагнітної постійної часу  $\tau_{\Theta}$  електричного кола, що

відповідає нагріванню обмотки в момент поточного пуску електродвигуна, яка пов'язана з величиною  $K_p$  наступною табличною залежністю  $\tau = f(K_p)$ :

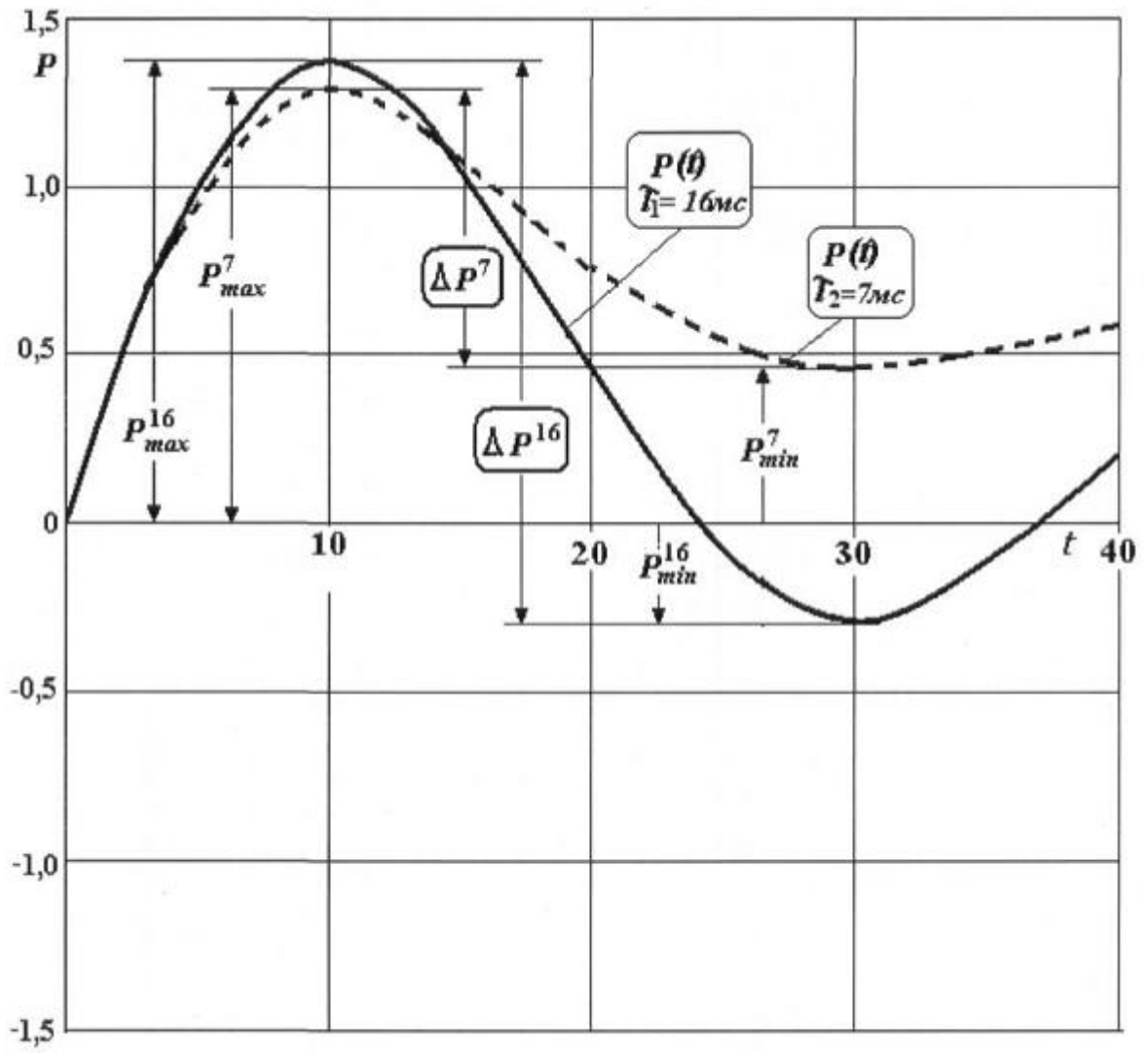
$K_p$	1,51	1,4	1,28	1,17	1,05	0,92	0,81	0,69	0,58	0,47
$\tau$ , мс	16,0	15,0	14,0	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0

після чого визначають коефіцієнт  $K_{\tau} = \tau_{\Theta} / \tau_{T_3}$ , який характеризує наскільки величина постійної часу обмотки  $\tau_{T_3}$  при заданій температурі  $T_3$  більша за величину постійної часу  $\tau_{\Theta}$  нагрітої

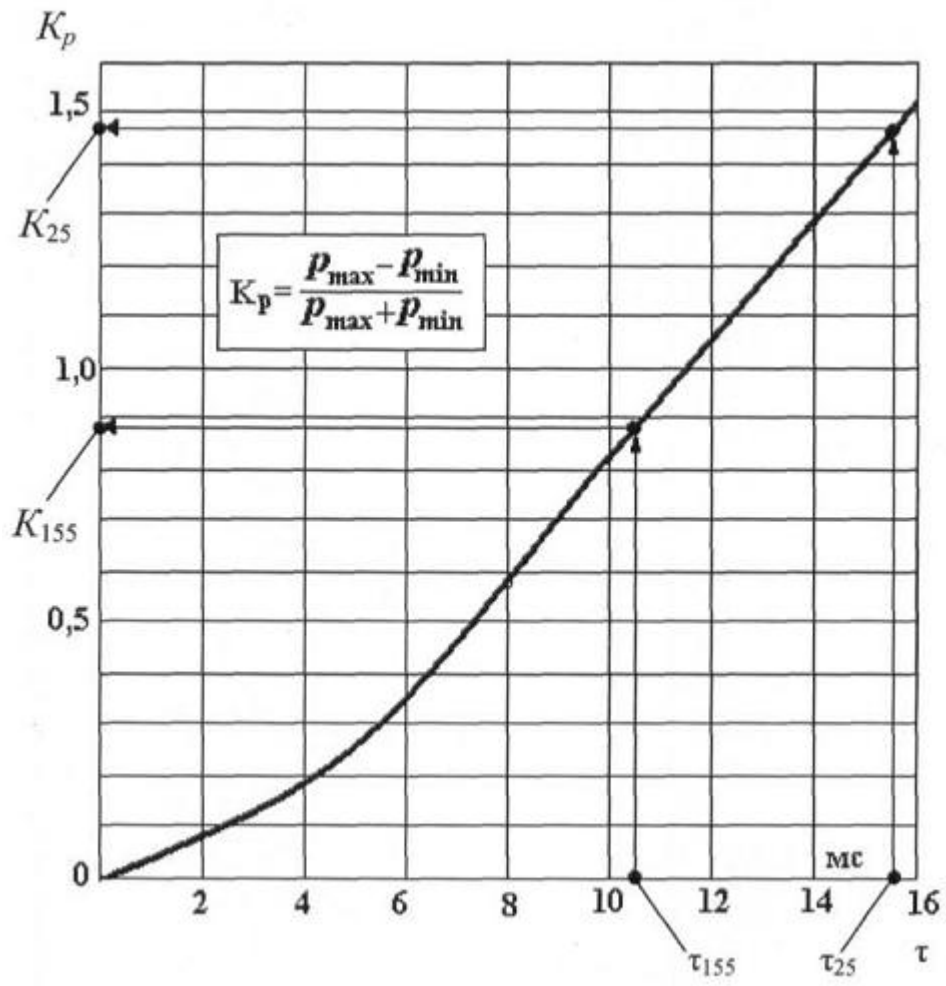
обмотки, після чого визначають температуру нагрітої обмотки  $T_{\Theta}$  з виразу

$T_{\Theta} = \frac{1 - K_{\tau}}{0,004 K_{\tau}} + T_3$ , °C, потім знайдене значення температури  $T_{\Theta}$  порівнюють з температурною

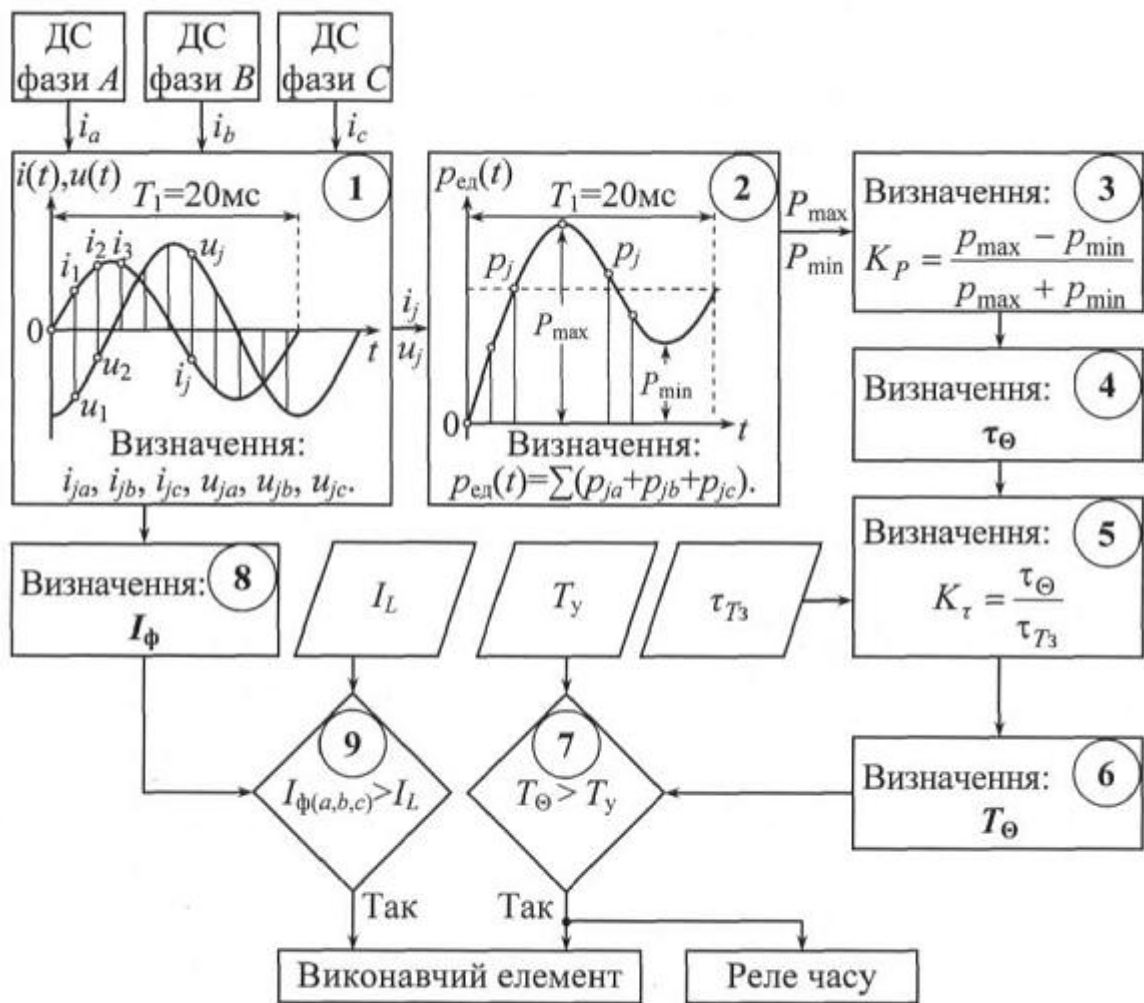
уставкою  $T_y$  і, у випадку, якщо  $T_{\Theta} \geq T_y$ , виробляють один керуючий сигнал на спрацьовування захисту і другий - на формування часу блокування повторного вмикання  $t_{бл}$ .



Фиг. 1



Фиг. 2



Фіг. 3