

ЗАХИСТ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОБУТОВИХ ПРИЛАДІВ ВІД СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ФАЗНОГО СТРУМУ

Теоретично досліджена можливість розширення переліку реалізованих захистів в електронних реле максимального струму на основі результатів цифрової обробки сигналів від датчиків струму шляхом гармонійного аналізу спектру фазного струму за наявності нелінійних спотворень. Розроблено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегрівання обмоток при струмах перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, мікропроцесорний пристрій захисту, електронні реле максимального струму.

Теоретически исследована возможность расширения перечня реализуемых защит в электронных реле максимального тока на основе результатов цифровой обработки сигналов от датчиков тока путем гармонического анализа спектра фазного тока при наличии нелинейных искажений. Разработан алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты асинхронных электродвигателей от недопустимого перегрева обмоток при токах перегрузки с учетом нелинейных искажений фазного тока. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, микропроцессорное устройство защиты, электронные реле максимального тока.

Постановка проблеми. В електропобутових приладах, таких як холодильники, кондиціонери, побутові вентилятори, настільні свердлильні й точильні верстати, соковижималки тощо, застосовуються однофазні асинхронні електродвигуни (ЕД) з пусковою обмоткою, що відключається й використовується тільки при пуску ЕД [1, 2].

Застосування в електричних мережах тиристорних перетворювачів частоти та інших нелінійних навантажень призводить до виникнення вищих гармонійних складових напруги [3-5]. При частотному регулюванні швидкості обертання асинхронного ЕД найбільш значущими за величиною будуть 3-а та 5-а гармоніки струму. Зростають втрати в обмотках за рахунок поверхневого ефекту й ефекту близькості [3]. Хоч і меншою мірою, виникає додаткове нагрівання від додаткових втрат в сталі.

Таким чином, підвищення чутливості теплового захисту від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень є важливим засобом забезпечення тривалого терміну служби асинхронних ЕД.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомі [6] способи теплового захисту однофазних асинхронних електричних двигунів від теплових впливів струмів перевантаження I_L , в яких формується захисна часоштовмова характеристика, що забезпечує зворотну залежність часу спрацювання захисного пристрою t_L від величини фазного струму I_{ph} :

$$t_L = f(I_{ph}), \quad (1)$$

де I_{ph} – середньоквадратичне (діюче) значення фазного струму, t_L – час спрацювання захисту при струмах перевантаження.

Оптимальним способом теплового захисту ЕД від перегріву обмоток і феромагнітних елементів при протіканні надструму та створених ним електромагнітних полів є формування такої залежності (1), яка б повторювала перевантажувальну часоштовмову характеристику ЕД та при поданні її в координатах струму I_{ph} й часу t проходила б дещо нижче перевантажувальної характеристики ЕД [6].

Таким захисним пристроєм, що реалізує описаний спосіб формування необхідної захисної часост-

рмової характеристики, є реле максимального струму [1]. Часоштовмова характеристика (1) реле має дві зони, в яких характер залежності часу спрацювання захисту t_L від величини I_{ph} істотно відрізняються. Перша зона L (зона перевантаження) – діапазон зміни струму від величини $I_{ph} = 1,1I_r$, де I_r – номінальний струм ЕД, до величини $I_{sd} = (3\div 12)I_r$ уставки струму короткого замикання (КЗ). В цій зоні залежність часу спрацювання t_L від струму I_{ph} повторює перевантажувальну характеристику ЕД. При цьому «інтегральна» уставка $Q_L = I_{ph}^2 t_L = \text{const}$ забезпечує зворотну залежність $t_L = f(I_{ph})$ часу спрацювання захисту t_L від величини фазного струму I_{ph} .

Використовуваний в реле спосіб захисту ЕД від струмів перевантаження є загальновідомим і широко застосовуваним. Згідно з (1) визначається діюче значення I_{ph} фазного струму фази методом інтегрування квадратів миттєвих значень i_j^2 струму і формується час спрацювання захисту t_L у відповідність із заданою залежністю часу t_L від діючого значення I_{ph} синусоїдального струму.

Недоліком розглянутого способу захисту ЕД від струмів перевантаження є той факт, що надійний захист гарантується лише за відсутності нелінійних спотворень синусоїдальної форми зміни фазного струму. Тобто відсутні гармоніки струму крім 1-ої основної. У нормативно-технічній документації на електронні реле теплового захисту зазначено, що реле призначене для захисту трифазних ЕД від теплових впливів синусоїдальних струмів, що не містять вищих гармонійних складових.

У той же час в схемах живлення електропобутової техніки все більш широкого поширення набувають системи плавного регулювання швидкості обертання асинхронних ЕД за допомогою тиристорних перетворювачів. Також присутні й інші нелінійні навантаження, що спотворюють синусоїдальний характер зміни фазної напруги: люмінесцентні енергозберігаючі лампи, феромагнітні матеріали. Тому нехтування впливом на нагрівання ЕД вищих гармонік напруги знижує надійність захисту.

Мета. Теоретичне обґрунтування, розробка та реалізації у вигляді алгоритму функціонування мікро-процесорного пристрою способу захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму, який враховує додаткове нагрівання внаслідок наявності вищих гармонійних складових у фазному струмі і, тим самим, підвищує надійність теплового захисту.

Матеріали дослідження. Причинами появи вищих гармонік є підключення до електромережі споживачів, які мають нелінійні вхідні кола і внаслідок цього споживають імпульсний струм. Нелінійний характер кола визначається наявністю в ньому напівпровідникових нелінійних елементів – тиристорів. Частотно-регульований тиристорний електропривод є нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення синусоїди фазних напруг в мережі живлення [3-5]. Крива зміни напруги в часі містить увесь спектр непарних гармонік, з яких найбільш значущими, з точки зору побудови мережевих захистів, є перша (основна) та дві вищі – третя та п'ята. Тому з'являється необхідність в гармонійному аналізі спектру фазного струму.

З метою врахування впливу 3-ої і 5-ої гармоніки струму на додаткове нагрівання ЕД необхідне коригування вихідної захисної часо-струмової характеристики (1), яка відповідає синусоїдальному фазному струму і не враховує додаткових втрат і нагрівання ЕД від струмів вищих гармонік, зокрема, струмів 3-ої і 5-ої гармоніки. Обґрунтуємо необхідність зазначеного коригування.

При роботі асинхронних електродвигунів в умовах несинусоїдальної напруги виникають додаткові втрати потужності в обмотках статора і ротора, зумовлені вищими гармоніками струму. З'являються також додаткові втрати в сталі статора і ротора, однак ці втрати малі і ними можна знехтувати [3]. Якщо виразити струм n -ої гармоніки через номінальний струм ЕД та кратність k_{st} пускового струму, то формула для визначення потужності сумарних втрат $\Delta P_{\Sigma k}$ від вищих гармонік виглядає так [3]:

$$\Delta P_{\Sigma k} = \Delta P_r k_{st}^2 \sum_{n=2}^k \left(\frac{U_n}{nU_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = \Delta P_r k_{st}^2 \sum_{n=2}^k k_{dn}, \quad (2)$$

де ΔP_r – номінальні втрати в обмотках статора при синусоїдальному фазному струмі; k – порядок (номер) останньої з врахованих вищих гармонік; U_1 – напруга першої (основної) гармоніки; U_n – напруга n -ої гармоніки; k_{dn} – коефіцієнт, що враховує зростання втрат в обмотках від n -ої гармоніки:

$$k_{dn} = \left(\frac{U_n}{nU_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2 \frac{\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}}{n^2}. \quad (3)$$

Величина $n \pm 1$ дозволяє враховувати напрямок обертання вектору n -ої гармоніки напруги в порівнянні з напрямком обертання вектору 1-ої основної гармоніки напруги. Знак « \rightarrow » відповідає однаковому напрямку обертання, знак « \leftarrow » – протилежному. Для розглянутого випадку, коли враховуються додаткові втрати від 3-ої і 5-ої гармонік струму, вирази для додаткових втрат в обмотках ЕД матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta P_3 &= \Delta P_r \cdot k_{d3} = \Delta P_r \left(\frac{U_3}{U_1} \right)^2 \frac{\sqrt{3} + \sqrt{3-1}}{9} = \\ &= 0,3496 \cdot \Delta P_r \left(\frac{U_3}{U_1} \right)^2 \approx 0,35 \cdot \Delta P_r \left(\frac{U_3}{U_1} \right)^2; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_5 &= \Delta P_r \cdot k_{d5} = \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2 \frac{\sqrt{5} + \sqrt{5+1}}{25} = \\ &= 0,1874 \cdot \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2 \approx 0,2 \cdot \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

При побудові струмового захисту ЕД, що працюють в електропобутовій техніці, величини напруг використовувати важко. Тому рівняння (4), (5) доцільно перетворити таким чином, щоб у ньому використовувалися значення струмів. Для такого перетворення приймаємо наступні припущення. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ електричних кіл навантажених асинхронними електродвигунами з нормальним коефіцієнтом корисної дії дорівнює 0,8 ($\cos\varphi = 0,8$) [7]. Збільшення індуктивного опору X обмотки ЕД на частоті 3-ї гармоніки струму становить 300%: $X_3 = 3\omega L$, а на частоті 5-ї гармоніки – 500%: $X_5 = 5\omega L$, де ω – кутова частота 1-ої основної гармоніки струму; L – індуктивність обмотки. Збільшення активного опору R обмотки ЕД від впливу поверхневого ефекту на частоті 3-ої та 5-ої гармоніки струму становить близько 20%. Тому збільшення повного опору Z обмотки ЕД на частоті 3-ої та 5-ої гармоніки буде визначатися реактивною складовою, а збільшенням R за рахунок поверхневого ефекту та ефекту близькості можна знехтувати.

З урахуванням прийнятих припущень визначається залежність підвищувальних коефіцієнтів k_{d3} і k_{d5} залежно від величин струмів 3-ої і 5-ої гармонік, тобто залежність k_{dn} у функції співвідношення I_n/I_1 :

$$k_{d3} = f(I_3/I_1), \quad (6)$$

$$k_{d5} = f(I_5/I_1), \quad (7)$$

де I_1 – діюче значення струму 1-ої гармоніки; I_3 – діюче значення струму 3-ої гармоніки; I_5 – діюче значення струму 5-ої гармоніки.

Рівняння (3) перетворюється наступним чином:

$$U_1 = I_1 \cdot Z_1 = I_1 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \quad (8)$$

$$U_3 = I_3 \cdot Z_3 = I_3 \sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}; \quad (9)$$

$$U_5 = I_5 \cdot Z_5 = I_5 \sqrt{R^2 + (5\omega L)^2}; \quad (10)$$

$$k_{d3} = 0,35 \cdot \left(\frac{U_3}{U_1} \right)^2 = 0,35 \cdot \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 9\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2}; \quad (11)$$

$$k_{d5} = 0,2 \cdot \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2 = 0,2 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2}; \quad (12)$$

$$\omega L = R \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad (13)$$

$$k_{d3} = 0,35 \cdot \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 9R^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{R^2 + R^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} = 0,35 \cdot \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{1 + 9 \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}; \quad (14)$$

$$k_{d5} = 0,2 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25R^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{R^2 + R^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} = 0,2 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{1 + 25 \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}; \quad (15)$$

де Z_1 , Z_3 та Z_5 – опори обмотки ЕД на частоті 1-ої, 3-ої та 5-ої гармонік відповідно.

При $\cos\varphi = 0,8$ отримуємо:

$$k_{dn} |_{\cos\varphi=0,8} = 1,27 \cdot (I_3/I_1)^2 + 1,74 \cdot (I_5/I_1)^2. \quad (16)$$

Додаткові втрати ΔP_n , зумовлені наявністю гармонік струму, визначаються підвищувальним коефіцієнтом k_{dn} , на який слід помножити номінальні втрати

ΔP_r (4). Якщо знайдено підвищувальний коефіцієнт k_{dn} , то еквівалентний фазний струм I'_{ph} , що враховує додаткове нагрівання ЕД від впливу гармонік струму визначається з виразу:

$$I'_{ph} = I_{ph} \sqrt{1 + k_{d3} + k_{d5}}. \quad (17)$$

Діюче значення I_{ph} фазного струму визначаються методом інтегрування квадратів миттєвих значень i_j^2 :

$$I_{ph} = \sqrt{\sum_{j=1}^p i_j^2 \Delta t_j} / T_1, \quad (18)$$

де $p = T_1/\Delta t_j$; $T_1 = 20$ мс – період зміни 1-ої основної гармоніки струму для робочої частоти мережі 50 Гц; Δt_j – інтервал дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph} = f(t)$ фазного струму i_{ph} в часі t .

Принцип визначення діючих значень струмів 1-ої, 3-ої та 5-ої гармонік [8] з аналізу суми квадратів дискретних значень струмів i_{j3}^2, i_{j5}^2 , пояснюється діаграмами, наведеними на рис. 1. На рис. 1 подана аналогова залежності $i_{ph} = f(t)$ фазного струму i_{ph} в часі t і що входять до складу i_{ph} перша $i_1 = f(t)$, третя $i_3 = f(t)$ та п'ята $i_5 = f(t)$ гармоніки.

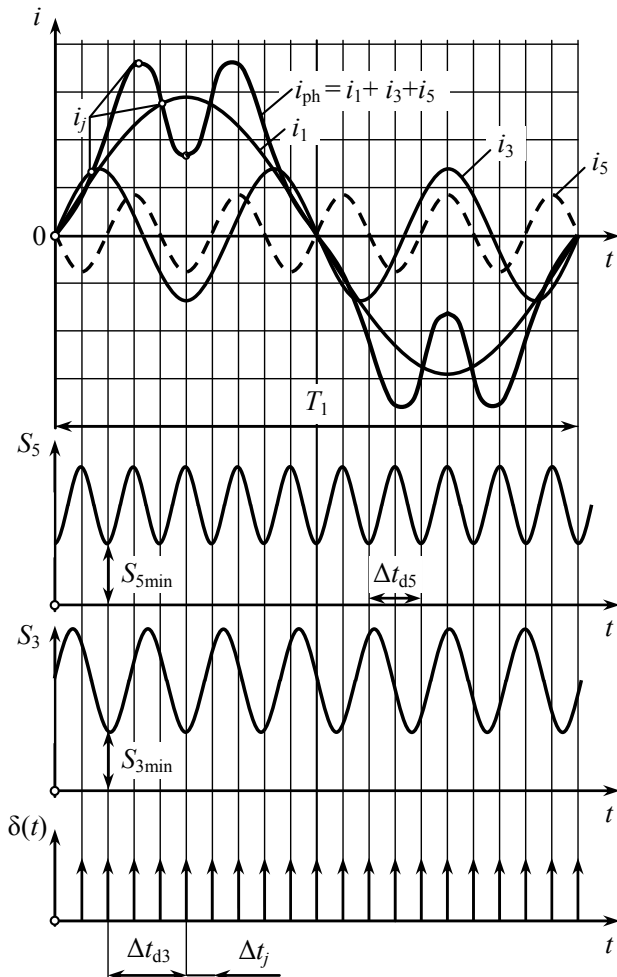


Рис. 1. Дискретизація вихідної аналогової залежності фазного струму в часі

В кожному режимі через часовий інтервал Δt_j в 10 і більше разів менший періоду T_1 зміни струму 1-ої гармоніки: $\Delta t_j \leq 0,1T_1$, шляхом заміни використаного

миттєвого значення i_j струму новим здійснюють безперервний моніторинг суми S_3 і S_5 квадратів дискретних значень струмів i_{j3}^2 і i_{j5}^2 , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph} = f(t)$ з частотою дискретизації $f_{d3} = 2f_3$ та $f_{d5} = 2f_5$ (відповідно інтервал дискретизації Δt_{d3} та Δt_{d5}) гратчастої дельта-функції $\delta(t)$ в 2 рази більшою частоти f_3 та f_5 зміни струму i_3 та i_5 3-ої та 5-ої гармоніки відповідно:

$$S_3 = \sum_0^{T_1} i_{j3}^2, \quad (19)$$

$$S_5 = \sum_0^{T_1} i_{j5}^2. \quad (20)$$

Суми S_3 та S_5 визначається за час, що дорівнює періоду T_1 зміни струму i_1 1-ої гармоніки. Після формування залежностей $S_3 = f(t)$ та $S_5 = f(t)$ (рис. 1), визначають їх мінімальні значення S_{3min} та S_{5min} .

Величини S_3 та S_5 розраховують за дискретними значеннями струмів i_{j3}, i_{j5} , що відповідають частоті дискретизації $f_{d3} = 300$ Гц, $f_{d5} = 500$ Гц в два рази більшої частоти 3-ї та 5-ї гармоніки $f_3 = 150$ Гц, $f_5 = 250$ Гц. Частота f_{dn} перевищує значення, регламентовані теоремою Котельникова [9] та держстандартом [10] для точного відновлення за дискретними значеннями вихідної аналогової залежності в часі 1-ої гармоніки струму. Згідно [9] частота дискретизації повинна бути строго більшою двократною частоти найбільш високої гармоніки у вихідному аналоговому сигналі. Згідно [10] мінімальна частота дискретизації f_d повинна дорівнювати або бути більшою трикратною частоти найвищої гармоніки струму. Діюче значення 1-ї гармоніки струму I_1 розраховане за дискретними значеннями струму, що відповідають частоті дискретизації $f_{d3} = 300$ Гц, $f_{d5} = 500$ Гц, буде правильним і не залежатиме від часу початку інтегрування. При кожному черговому кроці ковзання Δt_j діюче значення 1-ої гармоніки струму буде величиною постійною $I_1 = \text{const}$.

В той же час частота $f_{d5} = 500$ Гц не забезпечує точного розрахунку діючого значення I_5 струму 5-ої гармоніки. Згідно [10] мінімальна частота дискретизації повинна дорівнювати 750 Гц. Тому значення I_5 , розраховане шляхом інтегрування квадратів дискретних значень, що відповідають частоті f_{d5} не може бути визначене правильно, а сума квадратів дискретних значень струму i_{j5}^2 і розрахована за цим значенням величина I_5 буде залежати від моменту часу початку інтегрування. Це означає, що при кожному черговому кроці ковзання Δt_j врахування струму 5-ої гармоніки при підрахунку величини S_5 буде неоднаковим. Наприклад, в моменти часу, коли залежність $i_5 = f(t)$ проходить через нуль, розраховане значення S_5 прийматиме своє мінімальне значення S_{5min} (рис. 1). Вочевидь, що в зазначені моменти часу сума квадратів дискретних значень струму i_{j5}^2 , тобто значення S_{5min} не містить дискретні значення 5-ої гармоніки струму. Це означає, що в діючому значенні фазного струму I_{ph5} , визначеному за величиною S_{5min} не врахований струм 5-ої гармоніки. Отже, діюче значення 5-ї гармоніки струму I_5 визначається з виразу:

$$I_{1+3} = \sqrt{S_{5min} \cdot \Delta t / T_1}, \quad (21)$$

$$I_5 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_{1+3}^2} . \quad (22)$$

Тоді діючі значення 1-ої та 3-ої гармонік струму:

$$I_1 = \sqrt{(S_{3min} - 2I_5^2 \sin^2(5\omega t)) \cdot \Delta t / T_1} , \quad (23)$$

$$I_3 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_1^2 - I_5^2} . \quad (24)$$

Перевага описаного способу полягає в тому, що для визначення величин вищих гармонік струму використовується традиційно застосовуваний при побудові струмових захистів математичний апарат інтегрування квадратів дискретних значень струму. Відмінна особливість полягає у використанні додаткової частоти дискретизації вихідної аналогової залежності фазного струму в часі.

З використанням наведеного алгоритму визначення величини I_{ph}' були розраховані залежності значень підвищувального коефіцієнту k_{dn} від коефіцієнту δ_n , подані на рис. 2.

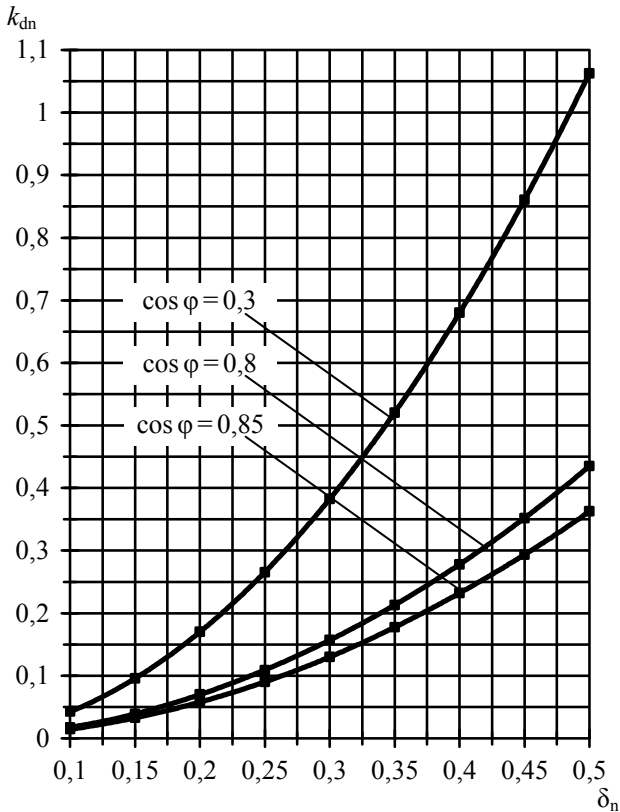


Рис. 2. Залежності підвищувального коефіцієнту k_{dn} від коефіцієнту δ_n

Залежність $k_{dn} = f(\delta_n)$ використовується для коригування часу t_L спрацьовування захисту з урахуванням додаткового нагрівання ЕД при нелінійних спотвореннях синусоїди фазних струмів.

Суть коригування часу t_L з урахуванням додаткового нагрівання ЕД від впливу 3-ої та 5-ої гармонік струму пояснюється графіком рис. 3, на якому наведена часострумове захисна характеристика реле теплового захисту.

Згідно вихідної залежності $t_L = f(I_{ph})$, заданої для реле теплового захисту та справедливої при відсутності нелінійних спотворень (вищих гармонік струму), деякому значенню струму I_{ph1} відповідає час спрацьо-

вування захисту t_{L1} . Якщо фазний струм несинусоїдальний, то значення I_{ph1} необхідно помножити на підвищувальний коефіцієнт $\sqrt{1 + k_{d3} + k_{d5}}$. В результаті отримують еквівалентне значення фазного струму I_{ph}' , яке за своєю тепловою дією на ЕД буде еквівалентним дії струму 1-ої гармоніки. У цьому випадку час спрацьовування захисту необхідно зменшити до значення t_{L1}' , як показано на рис. 3. Аналогічне коригування часу спрацьовування t_L здійснюють при інших значеннях струму I_{ph} .

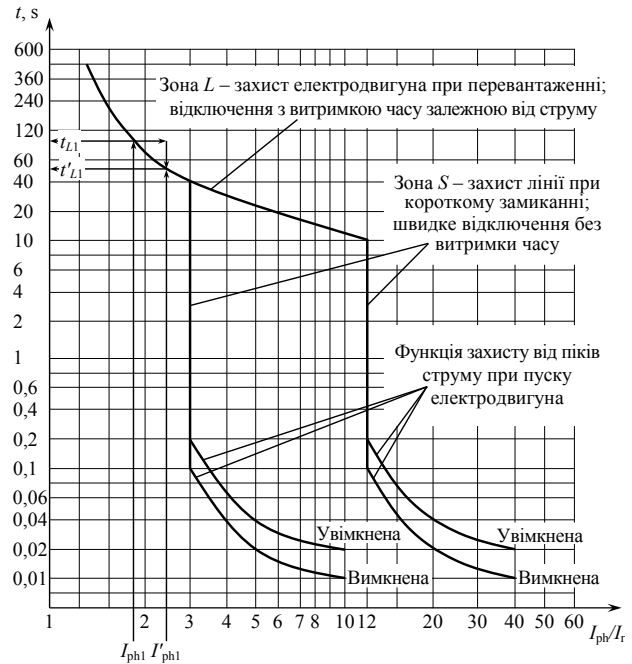


Рис. 3. Часострумове захисна характеристика реле теплового захисту

Описаний спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів реалізований у вигляді алгоритму функціонування електронних реле максимального струму або іншого апарата захисту. Блок-схема алгоритму, що ілюструє функціонування мікропроцесорного пристрою захисту (МПЗ) при реалізації розробленого способу захисту ЕД наведена на рис. 4. Окремі арифметичні й логічні операції, які виробляє мікропроцесор, умовно подані у вигляді модулів. Фізично вказаних модулів не існує, їх зображення необхідне для зручності викладання функціонування МПЗ.

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб:

1. У модулі 1 вихідну залежність фазного струму в часі $i_{ph} = f(t)$ в фазі шляхом множення на гратчасту дельта-функцію $\delta(t)$ (рис. 1) перетворюють у три дискретні залежності з різною частотою дискретизації $i_j(t)$, $i_3(t)$ і $i_5(t)$. Залежність $i_j(t)$ отримують з частотою дискретизації $f_d = 1000$ Гц, більшою потрібної частоти 5-ої гармоніки [10]. Залежність $i_3(t)$ отримують з частотою дискретизації $f_{d3} = 300$ Гц, що дорівнює подвійній частоті 3-ої гармоніки. Залежність $i_5(t)$ отримують з частотою дискретизації $f_{d5} = 500$ Гц, що дорівнює подвійній частоті 5-ої гармоніки.

2. У модулі 2 методом чисельного інтегрування квадратів дискретних значень i_j залежності $i_j(t)$ визначають діюче значення фазного струму I_{ph} за формулою (18).

3. У модулі 3 за дискретними значеннями залежності $i_{j3}(t)$ формують залежність $S_3 = f(t)$ суми квадратів дискретних значень струмів i_{j3}^2 за виразом (19).

4. У модулі 4 визначають мінімальне значення S_{3min} залежності $S_3 = f(t)$.

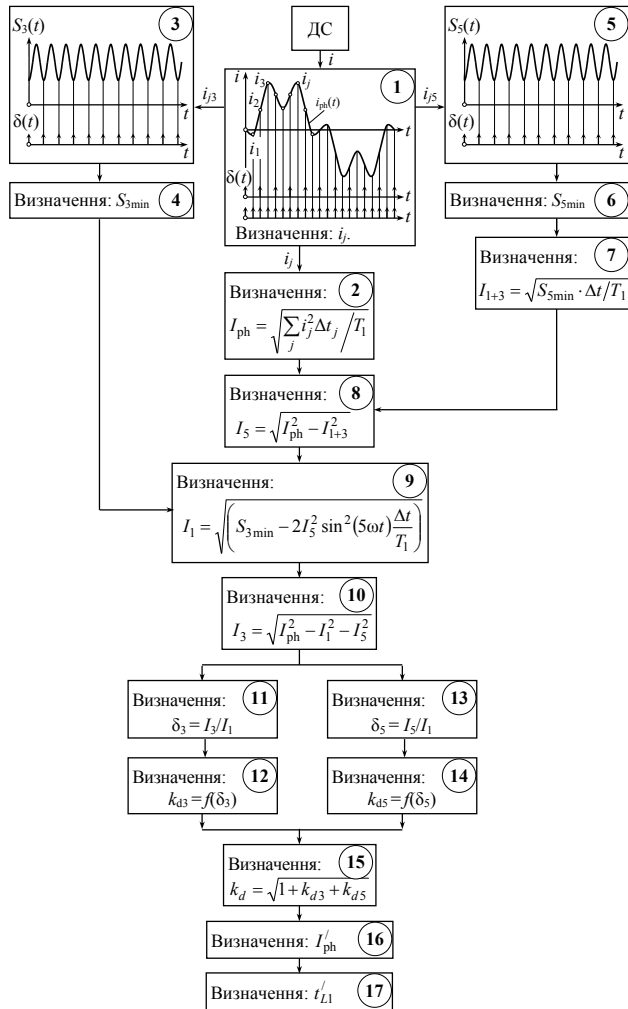


Рис. 4. Схема алгоритму спрацьовування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегріву обмоток

5. У модулі 5 за дискретними значеннями залежності $i_{j5}(t)$ формують залежність $S_5 = f(t)$ суми квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 за виразом (20).

6. У модулі 6 визначають мінімальне значення S_{5min} залежності $S_5 = f(t)$.

7. У модулі 7 визначають діюче значення I_{1+3} сумарної 1-ї та 3-ї гармонік фазного струму за формулою (21).

8. У модулі 8 визначають діюче значення I_5 5-ї гармоніки фазного струму за формулою (22).

9. У модулі 9 визначають діюче значення I_1 1-ї гармоніки фазного струму за формулою (23).

10. У модулі 10 визначають діюче значення I_3 3-ї гармоніки фазного струму за формулою (24).

11. У модулі 11 визначають значення δ_3 як відношення діючих значень 3-ї та 1-ї гармонік фазного струму: $\delta_3 = I_3/I_1$.

12. У модулі 12 з залежності $k_{d3} = f(\delta_3)$ визначають значення коефіцієнта k_{d3} , що враховує збільшення нагрівання ЕД від впливу струму 3-ї гармоніки.

13. У модулі 13 визначають значення δ_5 як відношення діючих значень 5-ї та 1-ї гармонік фазного струму: $\delta_5 = I_5/I_1$.

14. У модулі 14 з залежності $k_{d5} = f(\delta_5)$ визначають значення коефіцієнта k_{d5} , що враховує збільшення нагрівання ЕД від впливу струму 5-ї гармоніки.

15. У модулі 15 визначають значення коефіцієнта k_d , що враховує збільшення нагрівання ЕД від впливу струму 3-ї та 5-ї гармонік.

16. У модулі 16 визначають еквівалентне значення струму I'_{ph} , що враховує додаткове нагрівання ЕД від впливу 3-ї та 5-ї гармонік струму за формулою (17).

17. У модулі 17 за значенням I'_{ph} визначають скоригований час спрацьовування захисту t'_{L1} .

Запропонований алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою захисту ЕД від струмових перевантажень враховує додаткове нагрівання, обумовлене наявністю у фазному струмі крім 1-ї основної більш високих 3-ї та 5-ї гармонік струму. При цьому використовують простий математичний апарат, який широко застосовується при реалізації струмових захистів.

Висновки. Доведена необхідність підвищення чутливості теплового захисту однофазних асинхронних електродвигунів побутових приладів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму.

Розроблено та теоретично обґрунтовано метод визначення гармонійного складу фазного струму мереж електропостачання побутових електроприладів з нелінійними видами навантажень і, як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми зміни фазного струму, шляхом множення аналогових залежностей струму в часі на ґратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації, в якій застосування простих і широко використовуваних в пристроях релейного захисту, зокрема в електронних реле максимального струму, математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень струму дозволяє найбільш гармонійно поєднатись з математичним апаратом побудови інших видів мережних захистів.

Запропоновано та реалізовано у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою захисту нове технічне рішення, яке дозволяє в режимі ковзного моніторингу сформулювати час спрацьовування апаратів релейного захисту для надійного захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лозинський А.О., Копчак Б.Л., Бушер В.В. Системи керування електропобутовими приладами: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 304 с.
2. Белоусов А.А., Саликов М.П. Повышение энергоэффективности однофазного асинхронного двигателя с отключаемой пусковой обмоткой // Вестник ОГУ. – 2013. – №1(150). – С. 171-175.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

4. Барутсков И.Б., Вдовенко С.А., Цыганков Е.В. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты // Главный энергетик. – 2011. – №6. – С. 5-15.
5. Collombet C., Lupin J.M., Schonek J. Harmonic disturbances in networks, and their treatment // Schneider Electric Technical collection. Cahier technique. – 2000. – no.152. – 29 p.
6. Чернобровов Н.А., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
7. ГОСТ Р 51677-2000. Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности. – Введ. 2001-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – III, 4 с.
8. Кобозев О.С., Серeda О.Г., Моргуn В.В. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №5. – С. 21-26.
9. Басараб М.А., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Яковлев В.П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. – М.: Радиотехника, 2004. – 72 с.
10. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 1999-01-01. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. – III, 32 с.

REFERENCES

1. Lozyns'kyj A.O., Kopchak B.L., Busher V.V. *Systemy keruvannja elektropobutovomu pryladamy* [Control systems of electrical household appliances]. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 2010. 304 p. (Ukr).
2. Belousov A.A., Salikov M.P. Increase of power efficiency of the single-phase asynchronous engine with the disconnected starting winding. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta – Vestnik of OSU*, 2013, no.1(150), pp. 171-175, (Rus).
3. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektro-snabzheniia prompredpriiatii* [Higher harmonics in power systems, industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 331 p. (Rus).
4. Barutskov I.B., Vdovenko S.A., Tsygankov E.V. Harmonic distortion at the frequency converter. *Glavnyi energetik – Chief Power Engineer*, 2011, no.6, pp. 5-15. (Rus).
5. Collombet C., Lupin J.M., Schonek J. Harmonic disturbances in networks, and their treatment, *Schneider Electric Technical collection, Cahier technique*, 2000, no.152, 29 p.
6. Chernobrovov N.A., Semenov V.A. *Releynaya zaschita energeticheskikh sistem: Ucheb. posobie dlya tehnikumov* [Power systems relay protection: Textbook for technical], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998, 800 p. (Rus).
7. *GOST R 51677-2000. Mashiny elektricheskie asinhronnye moschnost'yu ot 1 do 400 kW vlyuchitel'no. Dvigateli. Pokazateli energoeffektivnosti* [State Standard R 51677-2000. Induction electric machines ranging from 1 to 400 kW. Motors. Energy efficiency indicators]. Moscow, IPK Standards Publ., 2001. 7 p. (Rus).
8. Kobozev A.S., Sereda O.G., Morgun V.V. Determination of effective values of periodic nonsinusoidal current and its odd harmonics through discrete values of continuous time dependence of the current. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.5, pp. 21-26. (Ukr).
9. Basarab M.A., Zelkin E.G., Kravchenko V.F., Yakovlev V.P. *Cifrovaya obrabotka signalov na osnove teoremy Uittekera-Kotel'nikova-Shennona* [Digital signal processing based on the Whittaker-Kotelnikov-Shannon theorem]. Moscow, Radio Engineering Publ., 2004. 72 p. (Rus).
10. *GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektro-snabzheniya obshego*

naznacheniya [State Standard 13109-97. Electrical energy. Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems]. Minsk, IPK Standards Publ., 1998. 35 p. (Rus).

Надійшла (received) 17.02.2015

*Sereda Olexsandr Grigorovich¹, к.т.н., доц.,
Varshamova Irina Sergeevna¹, асистент,
¹Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076864,
e-mail: lexus_suba@mail.ru, varshamova_i@rambler.ru*

*O.G. Sereda¹, I.S. Varshamova¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.*

Protection of household appliances induction motors against overcurrent taking into account nonlinear distortion of phase current.

***Purpose.** Theoretical justification and engineering of induction motors heat protection method from overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase current and implementation as a microprocessor device functioning algorithm.*

***Methodology.** To solve the problem used the theory of the representing complex harmonic oscillations analog signals expansion into the oscillation spectrum forming elementary harmonic components in order to compare their properties by applying the theory of discrete signals and systems, as well as methods of spectral analysis and discrete signals filtering. The harmonic analysis versatility is that any periodic signal may be synthesized from harmonic oscillation of certain amplitude, frequency and initial phase. A mathematical model for determining the phase current harmonic content of power supply networks with isolated neutral and non-linear loads types and, as a consequence, the distortion of sinusoidal phase current change is developed by multiplying the analog current in time dependency on the grate delta-function with different sampling intervals, in which the use of simple and widely used in relay protection units, in particular electronic overcurrent relays, mathematical operations of integration squares instantaneous current allows the most in harmony with the mathematical tools to build other network protection types. **Findings.** The necessity to increase the sensitivity of the induction motors heat protection from overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase currents is proved. By nonlinear distortion harmonic analysis of the phase currents the motor protection reliability increasing provided by taking into account the higher harmonic components of the phase currents, which causes to additional losses and heating of the stator winding. It uses the simplest and widely used in protective relaying mathematical apparatus determining of most significant higher harmonics currents RMS. **Originality.** A possibility of extending the implemented protection list of electronic overcurrent relays based on the digital processing of signals from the current sensors is theoretical research by the harmonious analysis of phase current spectrum with the nonlinear distortions presence. A new technical solution is proposed that allows in online sliding monitoring mode to form response time of electronic overcurrent relays for reliable protection of induction motors from overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase current. **Practical value.** A microprocessor protection functioning algorithm of induction motors is designed against impermissible heating coils with overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase current. References 10, figures 4.*

Key words: induction motors, microprocessor protection, electronic overcurrent relay.