

УДК 621.316.91: 621.316.573

О.Г. Серeda, канд. техн. наук, доц.

Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут“, м. Харків, Україна, e-mail: lexus\_suba@mail.ru

## ЗАХИСТ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ФАЗНИХ СТРУМІВ

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

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: lexus\_suba@mail.ru

## INDUCTION MOTORS PROTECTION AGAINST OVERCURRENT TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR DISTORTION OF PHASE CURRENTS

**Мета.** Теоретичне обґрунтування, розробка та реалізація у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою способу теплового захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

**Методика.** Для вирішення поставленого завдання використовувалася теорія розкладання аналогових сигналів, що являють собою складні гармонійні коливання, на елементарні гармонійні складові, що утворюють спектр коливань, з метою порівняння їх властивостей, шляхом застосування теорії дискретних сигналів і систем, а також методів спектрального аналізу та фільтрації дискретних сигналів. Універсальність гармонійного аналізу полягає в тому, що будь-який періодичний сигнал може бути синтезований з гармонійних коливань з певними амплітудами, частотами та початковими фазами. Розроблена математична модель визначення гармонійного складу фазних струмів мереж електропостачання з ізольованою нейтраллю та з нелінійними видами навантажень і, як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми зміни фазних струмів, шляхом множення аналогових залежностей струму в часі на ґратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації. Застосування простих і широко використовуваних у пристроях релейного захисту, зокрема в мікропроцесорних розчіплювачах автоматичних вимикачів, математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень струму гармонійно поєднується з математичним апаратом побудови інших видів мережевих захистів.

**Результати.** Доведена необхідність підвищення чутливості теплового захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів. Шляхом гармонійного аналізу нелінійних спотворень фазних струмів забезпечується підвищення надійності захисту електродвигунів за рахунок урахування вищих гармонійних складових у фазних струмах, а саме п'ятої гармоніки струму, що призводить до додаткових втрат і нагрівання обмоток електричних двигунів. При цьому використовується максимально простий і широко застосовуваний у релейному захисті математичний апарат визначення середньоквадратичних значень струмів найбільш значущих вищих гармонік.

**Наукова новизна.** Теоретично досліджена можливість розширення переліку реалізованих захистів у розчіплювачах автоматичних вимикачів на основі результатів цифрової обробки сигналів від датчиків струму шляхом гармонійного аналізу спектру фазних струмів за наявності нелінійних спотворень. Запропоноване нове технічне рішення, що дозволяє в режимі ковзного моніторингу сформувати час спрацьовування автоматичних вимикачів для надійного захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

**Практична значимість.** Розроблений алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегрівання обмоток при струмах перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

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

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

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

що включають у себе пристрої захисту приєднань, які живлять і керують роботою ЕД гірничих машин.

Застосування у трифазних електричних мережах тиристорних перетворювачів частоти та інших нелінійних навантажень призводить до виникнення вищих гармонійних складових струму [2–4]. При частотному регулюванні швидкості обертання асинхронного ЕД найбільш значущою за величиною буде 5-а гармоніка струму. При цьому обертання вектора 5-ої гармоніки струму за тих спотворень синусоїди фазних струмів, що мають місце в реальних електричних мережах, відбувається в напрямку, протилежному обертанню вектора 1-ої гармоніки. Це означає, що в мережах з робочою частотою 50 Гц магнітне поле, що створюється 5-ою гармонікою, обертається по відношенню до ротора ЕД з підвищеною частотою 250 Гц. У силу цієї особливості 5-та гармоніка струму має найбільший вплив на додаткове нагрівання ЕД. Зростають втрати в обмотках за рахунок поверхневого ефекту й ефекту близькості [2]. Хоч і меншою мірою, виникає додаткове нагрівання від додаткових втрат у 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 [5] способи теплового захисту трифазних асинхронних електричних двигунів (ЕД) від теплових впливів струмів перевантаження  $I_L$ , в яких формується захисна часошумова 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), що би повтоврала перевантажувальну часошумову характеристику ЕД та при поданні її в координатах струму  $I_{ph}$  й часу  $t$  проходила б дещо нижче перевантажувальної характеристики ЕД [5].

Таким захисним пристроєм, що застосовується у вибухозахисних КРП та реалізує описаний спосіб формування необхідної захисної часошумової характеристики, є реле максимального струму ЛН86АС виробництва чеської фірми „Hansen Electric“ [1]. Часошумова характеристика (1) реле ЛН86АС 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  $I_{ph} = 1,1I_T$ , де  $I_T$  – номінальний струм ЕД, до величини  $I_{sd} = (3 \div 12)I_T$  уставки струму короткого замикання (КЗ). У цій зоні залежність часу спрацювання  $t_L$  від струму  $I_{ph}$  повторює перевантажувальну характеристику ЕД. При цьому „інтегральна“ уставка  $Q_L = I_{ph}^2 t_L = \text{const}$  забез-

печує зворотну залежність  $t_L = f(I_{ph})$  часу спрацювання захисту  $t_L$  від величини фазного струму  $I_{ph}$ .

Використовуваний у реле ЛН86АС спосіб захисту ЕД від струмів перевантаження є загальновідомим і широко застосовуваним. Згідно з (1) визначаються діючі значення  $I_{ph(a,b,c)}$  фазних струмів усіх фаз  $a, b, c$  методом інтегрування квадратів миттєвих значень  $i_{j(a,b,c)}^2$  струму й 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 фазних струмів. Тобто відсутні гармоніки струму крім 1-ої основної. У нормативно-технічній документації на реле ЛН86АС зазначено, що реле призначене для захисту трифазних ЕД від теплових впливів синусоїдальних струмів, що не містять вищих гармонійних складових.

У той же час у системах електропостачання підземних гірничих машин усе більш широкого розповсюдження набувають системи плавного пуску й регулювання швидкості обертання асинхронних ЕД за допомогою тиристорних перетворювачів. Також присутні й інші нелінійні навантаження, що спотворюють синусоїдальний характер зміни фазних струмів: люмінесцентні енергозберігаючі лампи, феромагнітні матеріали. Тому нехтування впливом на нагрів ЕД вищих гармонік струму знижує надійність захисту.

**Формулювання мети.** Теоретичне обґрунтування, розробка та реалізації у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою способу захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів, що враховує додаткове нагрівання внаслідок наявності вищих гармонійних складових у фазних струмах і, тим самим, підвищує надійність теплового захисту.

**Матеріали дослідження.** Причинами появи вищих гармонік є підключення до електромережі споживачів, які мають нелінійні вхідні кола та 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 струмів у мережі живлення [2–4]. Крива зміни струму 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 у гармонійному аналізі спектру фазних струмів.

У трифазних електричних мережах без нейтрального провідника, до яких відносяться системи електропостачання підземних гірничих машин і комплексів, у фазних струмах немає 3-ої гармоніки. Немає 3-ої гармоніки й у фазних струмах трифазних ЕД. Тому визначення нижнього спектру гармонік, необхідного для побудови захисту ЕД від струмів перевантаження, може

бути обмежене двома 1-ою та 5-ою найбільш значущими за величиною гармоніками струму.

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

При роботі асинхронних електродвигунів в умовах несинусоїдальної напруги виникають додаткові втрати потужності в обмотках статора та ротора, зумовлені вищими гармоніками струму. З'являються також додаткові втрати у сталі статора й ротора, однак ці втрати малі та ними можна знехтувати [2]. 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 [2]

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

де  $\Delta P_r$  – номінальні втрати в обмотках статора при синусоїдальному фазному струмі;  $k$  – порядок (номер) останньої з урахованих 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  $n \pm 1$  враховує напрямок обертання вектору  $n$ -ої гармоніки напруги в порівнянні з напрямком обертання вектору 1-ої основної гармоніки напруги. Знак „-“ відповідає однаковому напрямку обертання, знак „+“ – протилежному. Для розглянутого випадку, коли враховуються додаткові втрати тільки від однієї 5-ої гармоніки струму, вектор якої обертається у протилежному напрямку по відношенню до напрямку обертання вектору 1-ої гармоніки, вираз (2) для додаткових втрат в обмотках ЕД матиме вигляд

$$\begin{aligned} \Delta P_5 &= \Delta P_r \cdot k_{d5} = \Delta P_r \left( \frac{U_5}{U_1} \right)^2 \frac{\sqrt{5} + \sqrt{5+1}}{25} = \\ &= 0,1874 \cdot \Delta P_r \left( \frac{U_5}{U_1} \right)^2 \approx 0,2 \cdot \Delta P_r \left( \frac{U_5}{U_1} \right)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

При побудові струмового захисту ЕД, що працюють у шахтних електромережах, величини напруг використовувати важко внаслідок відсутності нейтрального проводу. Тому рівняння (4) доцільно перетворити таким чином, щоб у ньому використовувалися значення струмів. Для такого перетворення приймаємо наступні припущення. Коефіцієнт потужності  $\cos \phi$  електричних кіл навантажених асинхронними електродвигунами з нормальним коефіцієнтом корисної дії дорівнює 0,8 ( $\cos \phi =$

0,8) [6]. Збільшення індуктивного опору  $X$  обмотки ЕД на частоті 5-ї гармоніки струму становить 500%:  $X_5 = 5\omega L$ , де  $\omega$  – кутова частота 1-ої основної гармоніки струму;  $L$  – індуктивність обмотки. Збільшення активного опору  $R$  обмотки ЕД від впливу поверхневого ефекту на частоті 5-ої гармоніки струму становить близько 20%. Тому збільшення повного опору  $Z$  обмотки ЕД на частоті 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 підвищувального коефіцієнта  $k_{d5}$  залежно від величини струму 5-ої гармоніки, тобто залежність  $k_{d5}$  у функції співвідношення  $I_5/I_1$

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

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

Рівняння (3) перетворюється наступним чином

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot Z_1 = I_1 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \\ U_5 &= I_5 \cdot Z_5 = I_5 \sqrt{R^2 + (5\omega L)^2}; \\ k_{d5} &= 0,2 \cdot \left( \frac{U_5}{U_1} \right)^2 = 0,2 \cdot \left( \frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2}; \\ \omega L &= R \cdot \operatorname{tg} \phi; \\ k_{d5} &= 0,2 \cdot \left( \frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25R^2 \operatorname{tg}^2 \phi}{R^2 + R^2 \operatorname{tg}^2 \phi} = \\ &= 0,2 \cdot \left( \frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{1 + 25 \operatorname{tg}^2 \phi}{1 + \operatorname{tg}^2 \phi}, \end{aligned}$$

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

При  $\cos \phi = 0,8$  отримуємо

$$k_{d5} |_{\cos \phi = 0,8} = 1,74 \cdot (I_5/I_1)^2.$$

Додаткові втрати  $\Delta P_5$ , зумовлені наявністю 5-ої гармоніки струму, визначаються підвищувальним коефіцієнтом  $k_{d5}$ , на який слід помножити номінальні втрати  $\Delta P_r$  (4). Якщо знайдено підвищувальний коефіцієнт  $k_{d5}$ , то еквівалентний фазний струм  $I'_{ph}$ , що враховує додаткове нагрівання ЕД від впливу 5-ої гармоніки струму, визначається з виразу

$$I'_{ph} = I_{ph} \sqrt{1 + k_{d5}}.$$

Діючі значення  $I_{ph(a,b,c)}$  фазних струмів трьох фаз  $a$ ,  $b$ ,  $c$  визначаються методом інтегрування квадратів миттєвих значень  $i_{j(a,b,c)}$  струмів усіх трьох фаз

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

де  $p = T_1/\Delta t_j$ ;  $T_1 = 20$  мс – період зміни 1-ої основної гармоніки струму для робочої частоти мережі 50 Гц;  $\Delta t_j$  –

інтервал дискретизації вихідної аналогової залежності  $i_{ph} = f(t)$  фазного струму  $i_{ph}$  у часі  $t$ .

Принцип визначення діючих значень струмів 1-ої та 5-ої гармонік [7], з аналізу суми квадратів дискретних значень струмів  $i_{j5}$ , пояснюється діаграмами, наведеними на рис. 1. На рис. 1 подана аналогова залежність  $i_{ph}(t)$  фазного струму  $i_{ph}$  у часі  $t$  і що входять до складу  $i_{ph}$  перша  $i_1(t)$  та п'ята  $i_5(t)$  гармоніки.

У ковзному режимі через часовий інтервал  $\Delta t_j$  у 10 і більше разів менший періоду  $T_1$ :  $\Delta t_j \leq 0,1T_1$ , шляхом заміни використаного миттєвого значення  $i_j$  струму новим здійснюють безперервний моніторинг суми  $S_5$  квадратів дискретних значень струмів  $i_{j5}$ , що відповідають дискретизації залежності  $i_{ph}(t)$  з частотою дискретизації  $f_{d5} = 2f_5$  (відповідно, інтервал дискретизації  $\Delta t_{d5}$ ) гратчастої дельта-функції  $\delta(t)$  у 2 рази більшої частоти  $f_5$  зміни струму  $i_5(t)$

$$S_5 = \sum_0^{T_1} i_{j5}^2 \cdot$$

Сума  $S_5$  визначається за час, що дорівнює періоду  $T_1$ . Після формування залежності  $S_5 = f(t)$  (рис. 1), визначають її мінімальне значення  $S_{5min}$ .

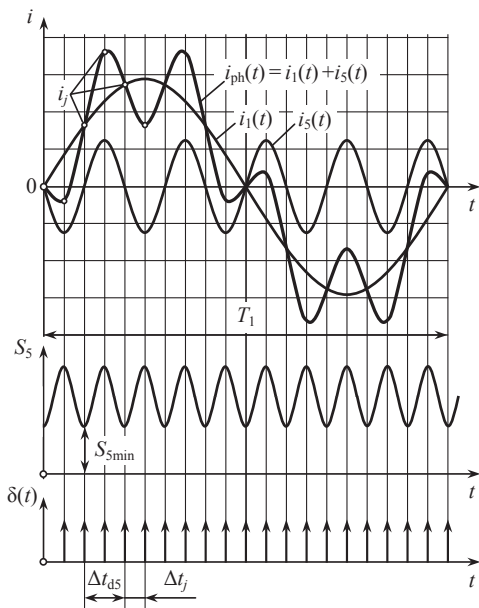


Рис. 1. Дискретизація вихідної аналогової залежності  $i_{ph}(t)$  фазного струму в часі:  $i_j$  – дискретні значення фазного струму;  $T_1$  – період зміни 1-ої гармоніки фазного струму;  $\Delta t_j$  – інтервал дискретизації залежності  $i_{ph}(t)$  з частотою 1000Гц;  $\Delta t_{d5}$  – інтервал дискретизації залежності  $i_{ph}(t)$  з частотою 500Гц;  $S_{5min}$  – мінімальне значення залежності  $S_5(t)$

Величину  $S_5$  розраховують за дискретним значенням струму  $i_{j5}$ , що відповідає частоті дискретизації  $f_{d5} = 500$  Гц у два рази більшої частоти 5-ої гармоніки  $f_5 = 250$  Гц, що в 10 разів більша частоти 1-ої основної гармоніки струму  $f_1 = 50$  Гц. Частота  $f_{d5}$  перевищує значення, регламентовані теоремою Котельникова [8] та держстандартом [9] для точного відновлення за дискретними значеннями вихідної аналогової залежності в часі 1-ої

гармоніки струму. Згідно з [8] частота дискретизації  $f_d$  повинна бути строго більшою двократною частоти найбільш високої гармоніки у вихідному аналоговому сигналі. Згідно з [9] мінімальна частота  $f_d$  повинна дорівнювати або бути більшою трикратною частоти найвищої гармоніки струму.

Діюче значення 1-ої гармоніки струму  $I_1$  розраховане за дискретними значеннями, що відповідають частоті  $f_{d5}$ , буде правильним і не залежатиме від моменту часу початку інтегрування. При кожному черговому кроці ковзання  $\Delta t_j$  діюче значення 1-ої гармоніки струму буде величиною постійною  $I_1 = \text{const}$ .

У той же час частота  $f_{d5} = 500$  Гц не забезпечує точного розрахунку діючого значення  $I_5$  струму 5-ої гармоніки. Згідно з [9], 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  $\Delta t_j$  урахування струму 5-ої гармоніки при підрахунку величини  $S_5$  буде неоднаковим. Наприклад, у моменти часу, коли залежність  $i_5(t)$  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 1-ої гармоніки струму  $I_1$  визначається з виразу

$$I_1 = \sqrt{S_{5min} \cdot \Delta t / T_1}.$$

Тоді діюче значення 5-ої гармоніки струму

$$I_5 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_1^2}.$$

Перевага описаного способу полягає в тому, що для визначення величини 5-ої гармоніки 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  $k_{d5}$  від коефіцієнту  $\delta_5 = I_5/I_1$ , подані на рис. 2. Величина  $\delta_5$  характеризує співвідношення струмів 5-ої та 1-ої гармонік.

Залежність  $k_{d5} = f(\delta_5)$  використовується для коригування часу  $t_L$  спрацьовування захисту з урахуванням додаткового нагрівання ЕД при нелінійних спотвореннях синусоїди фазних струмів.

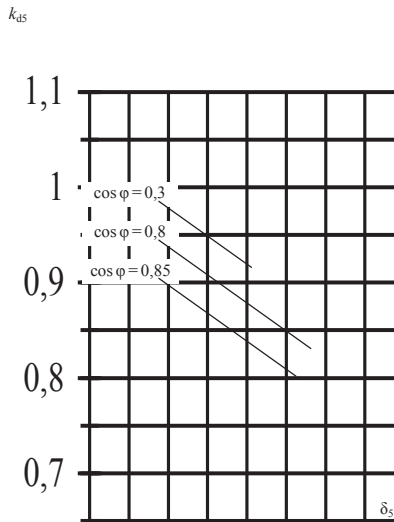


Рис. 2. Залежності підвищувального коефіцієнту  $k_{d5}$  від коефіцієнту  $\delta_5$

Суть коригування часу  $t_L$ , з урахуванням додаткового нагрівання ЕД, від впливу 5-ої гармоніки струму  $I_5$  пояснюється графіком рис. 3, на якому наведена часо-струмова захисна характеристика реле LH86AC.

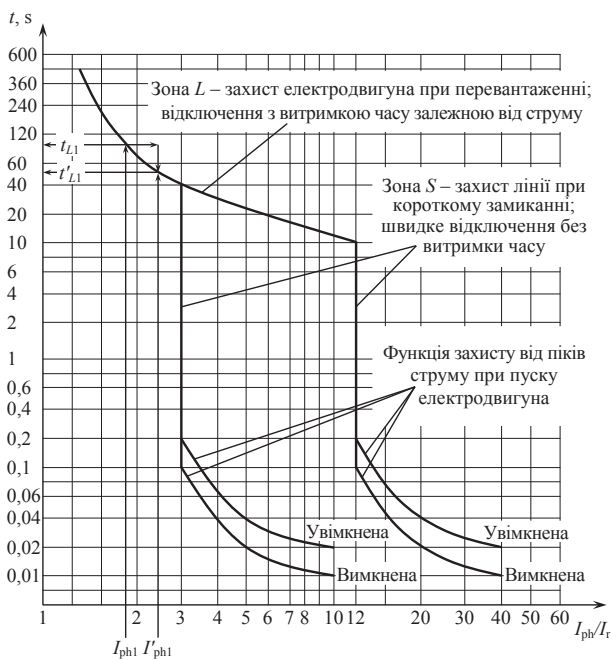


Рис. 3. Часо-струмова захисна характеристика реле LH86AC

Згідно з вихідною залежністю  $t_L = f(I_{ph})$ , заданою для реле LH86AC та справедливою при відсутності нелінійних спотворень (вищих гармонік струму), деякому значенню струму  $I_{ph1}$  відповідає час спрацьовування захисту  $t_{L1}$ . Якщо фазний струм не синусоїдальний, то значення  $I_{ph1}$  необхідно помножити на підвищувальний коефіцієнт  $\sqrt{1+k_{d5}}$ . У результаті отримують еквівалентне значення фазного струму  $I'_{ph1}$ , 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  $I_{ph}$ .

Описаний спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів реалізований у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного розчеплювача автоматичного вимикача 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, що виробляє мікропроцесор, умовно подані у вигляді модулів. Фізично вказаних модулів не існує, їх зображення необхідне для зручності викладання функціонування МПЗ.

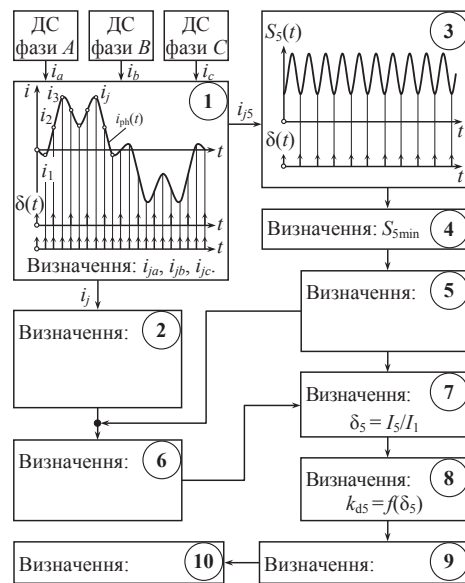


Рис. 4. Схема алгоритму спрацьовування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неупустимого перегріву обмоток

Запропонований алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою захисту ЕД від струмових перевантажень урахує додаткове нагрівання, обумовлене наявністю у фазному струмі крім 1-ої основної більш високої 5-ої гармоніки струму. При цьому використовують простий математичний апарат, що широко застосовується при реалізації струмових захистів.

**Висновки.** Доведена необхідність підвищення чутливості теплового захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

Розроблений та теоретично обґрунтований метод визначення гармонійного складу фазних струмів мереж електропостачання з ізольованою нейтраллю та з нелінійними видами навантажень і, як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми зміни фазних струмів, шляхом множення аналогових залежностей струму в часі на гратчасту дельта-функцію з різними інтерва-

лами дискретизації, в якій застосування простих і широко використовуваних у пристроях релейного захисту, зокрема в мікропроцесорних розчіплювачах автоматичних вимикачів, математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень струму дозволяє найбільш гармонійно поєднуватись з математичним апаратом побудови інших видів мережевих захистів.

Запропоноване та реалізоване у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою захисту нове технічне рішення, що дозволяє в режимі ковзного моніторингу сформулювати час спрацьовування апаратів релейного захисту для надійного захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

### Список літератури / References

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

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

2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий; 4-е изд., перераб. и доп. / Жежеленко И.В. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

Zhezhelenko, I.V. (2000), *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy. 4-e izd* [The Higher Harmonics in Industrial Plants Power Systems], Energoatomizdat, Moscow, Russia.

3. Барутсков И.Б. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты /И.Б. Барутсков, С.А. Вдовенко, Е.В. Цыганков // Главный энергетик. – 2011. – №6. – С. 5–15.

Barutskov, I.B., Vdovenko, S.A. and Tsygankov, Ye.V. (2011), “Harmonic distortion at the frequency converter”, *Glavnyy Elektrik*, no. 6, pp. 5–15.

4. Collombet C. Harmonic disturbances in networks, and their treatment / C. Collombet, J.M. Lupin, J. Schonek // Schneider Electric Technical collection. – 2000. – Cahier technique no. 152. – 29 p.

5. Пат №106030. Україна МПК (2014.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/085 (2006.01), H01H 73/00. Спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження / О.С. Кобозев, О.Г. Середя, А.В. Заратуйко – №а 2013112986; заявл. 08.11.2013; опубл. 10.07.2014. Бюл. №13.

Kobozev, O.S., Sereda O.G. and Zaratuiko, A.V. (2014), *Sposib zahistu elektrodvigniv vid strumiv perevanzhennya* [The Method of Motor Protection from Overload Currents], Pat. 106030 Ukraine, Industrial property. Official Bulletin, Vol. 13, Kyiv, Ukraine.

6. 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.

ISO 51677-2000. (2001), *Mashiny elektricheskie asinkhronnye moshchnostyu ot 1 do 400 kVt vklyuchitelno. Dvigateli. Pokazateli energoeffektivnosti* [Induction Electric Machines Ranging from 1 to 400 kW. Motors. Energy Efficiency Indicators], IPK Izdatelstvo Standartov, Moscow, Russia.

7. Кобозев О.С. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму та його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму в часі / О.С. Кобозев, О.Г. Середя, В.В. Моргун // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №5. – С. 21–26.

Kobozev, O.S., Sereda O.G. and Morgun, V.V. (2012), “RMS periodic non-sinusoidal current determination and its odd harmonics of the continuous time current dependence discrete values”, *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, no. 5, pp. 21–26.

8. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона / Басараб М.А., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Яковлев В.П. – М.: Радиотехника, 2004. – 72 с.

Basarab, M.A., Zelkina, E.G., Kravchenko, V.F. and Yakovlev, V.P. (2004), *Tsyfrovaya obrabotka signalov na osnove teoremy Uittekera-Kotelnikova-Shennona* [Digital Signal Processing Based on the Whittaker-Kotelnikov-Shannon Theorem], Radiotekhnika, Moscow, Russia.

9. 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.

ISO 13109-97. (1998), *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electrical Energy. Technical Equipment Electromagnetic Compatibility. Quality Standards for Electrical Energy in General Use Power Systems], IPK Izdatelstvo standartov, Minsk, Republic of Belarus.

**Цель.** Теоретическое обоснование, разработка и реализация в виде алгоритма функционирования микропроцессорного устройства способа тепловой защиты асинхронных электродвигателей от токов перегрузки с учетом нелинейных искажений фазных токов.

**Методика.** Для решения поставленной задачи использовалась теория разложения аналоговых сигналов, представляющих собой сложные гармонические колебания, на элементарные гармонические составляющие, образующие спектр колебаний, с целью сравнения их свойств путем применения теории дискретных сигналов и систем, а также методов спектрального анализа и фильтрации дискретных сигналов. Универсальность гармонического анализа заключается в том, что любой периодический сигнал может быть синтезирован из гармонических колебаний с определенными амплитудами, частотами и начальными фазами. Разработана математическая модель определения гармонического состава

ва фазных токов сетей электроснабжения с изолированной нейтралью, с нелинейными видами нагрузок и, как следствие, с искажением синусоидальной формы изменения фазных токов, путем умножения аналоговых зависимостей тока во времени на решетчатую дельта-функцию с различными интервалами дискретизации. Применение простых и широко используемых в устройствах релейной защиты, в частности, в микропроцессорных расцепителях автоматических выключателей, математических операций интегрирования квадратов мгновенных значений тока гармонично сочетается с математическим аппаратом построения других видов сетевых защит.

**Результаты.** Доказана необходимость повышения чувствительности тепловой защиты асинхронных электродвигателей от токов перегрузки с учетом нелинейных искажений фазных токов. Путем гармонического анализа нелинейных искажений фазных токов обеспечивается повышение надежности защиты электродвигателей за счет учета высших гармонических составляющих в фазных токах, а именно пятой гармоники тока, которая приводит к дополнительным потерям и нагреву обмоток электродвигателей. При этом используется максимально простой и широко применяемый в релейной защите математический аппарат определения среднеквадратичных значений токов наиболее значимых высших гармоник.

**Научная новизна.** Теоретически исследована возможность расширения перечня реализуемых защит в расцепителях автоматических выключателей на основе результатов цифровой обработки сигналов от датчиков тока путем гармонического анализа спектра фазных токов при наличии нелинейных искажений. Предложено новое техническое решение, которое позволяет в режиме скользящего мониторинга сформировать время срабатывания автоматических выключателей для надежной защиты асинхронных электродвигателей от токов перегрузки с учетом нелинейных искажений фазных токов.

**Практическая значимость.** Разработан алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты асинхронных электродвигателей от недопустимого перегрева обмоток при токах перегрузки с учетом нелинейных искажений фазных токов.

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

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

**Methodology.** To solve the problem the research employed 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 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 currents 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 circuit breakers microprocessor trip, 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 was 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, namely, the fifth harmonic current, which causes 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 circuit breakers trip units based on the digital processing of signals from the current sensors is theoretical research by the harmonious analysis of phase currents spectrum with the nonlinear distortions presence. A new technical solution was proposed that allows in the online sliding monitoring mode to form response time of circuit breakers for the reliable protection of induction motors from overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase currents.

**Practical value.** The microprocessor protection functioning algorithm of induction motors was designed against impermissible heating coils with overload currents taking into account nonlinear distortion of the phase currents.

**Keywords:** *induction motors, microprocessor protection*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.Ф. Болюхом. Дата надходження рукопису 02.04.14.*