



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **106030** (13) **C2**
(51) МПК (2014.01)
H02H 3/08 (2006.01)
H02H 7/085 (2006.01)
H01H 73/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2013 12986</p> <p>(22) Дата подання заявки: 08.11.2013</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.07.2014</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 11.03.2014, Бюл.№ 5</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.07.2014, Бюл.№ 13</p>	<p>(72) Винахідник(и): Кобозєв Олександр Сергійович (UA), Середа Олександр Григорійович (UA), Заратуйко Анатолій Вікторович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): 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, 61204 (UA), Заратуйко Анатолій Вікторович, вул. Грозненська, 44, кв. 87, м. Харків-124, 61124 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: Реле электронное максимального тока LH86. URL:http://www.hansen-electric.cz/ru/ovladaci-a-jistici-pristroje. Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения. Электричні машини і апарати. - Вісник КДПУ ім. М. Островського. - Випуск 3/2009(56). - Частина 2. - С. 74-78. Середа О.Г., Кобозєв О.С. Підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених коротких замикань // Електротехнічні та комп'ютерні системи, № 9 (85), 2013. - С. 57-64. UA 102741 C2; 10.08.2012 UA 65113 U; 25.11.2011 SU 1728919 A1; 23.04.1992 SU 1816333 A3; 15.05.1993</p>
--	--

UA 106030 C2

(54) СПОСІБ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

(57) Реферат:

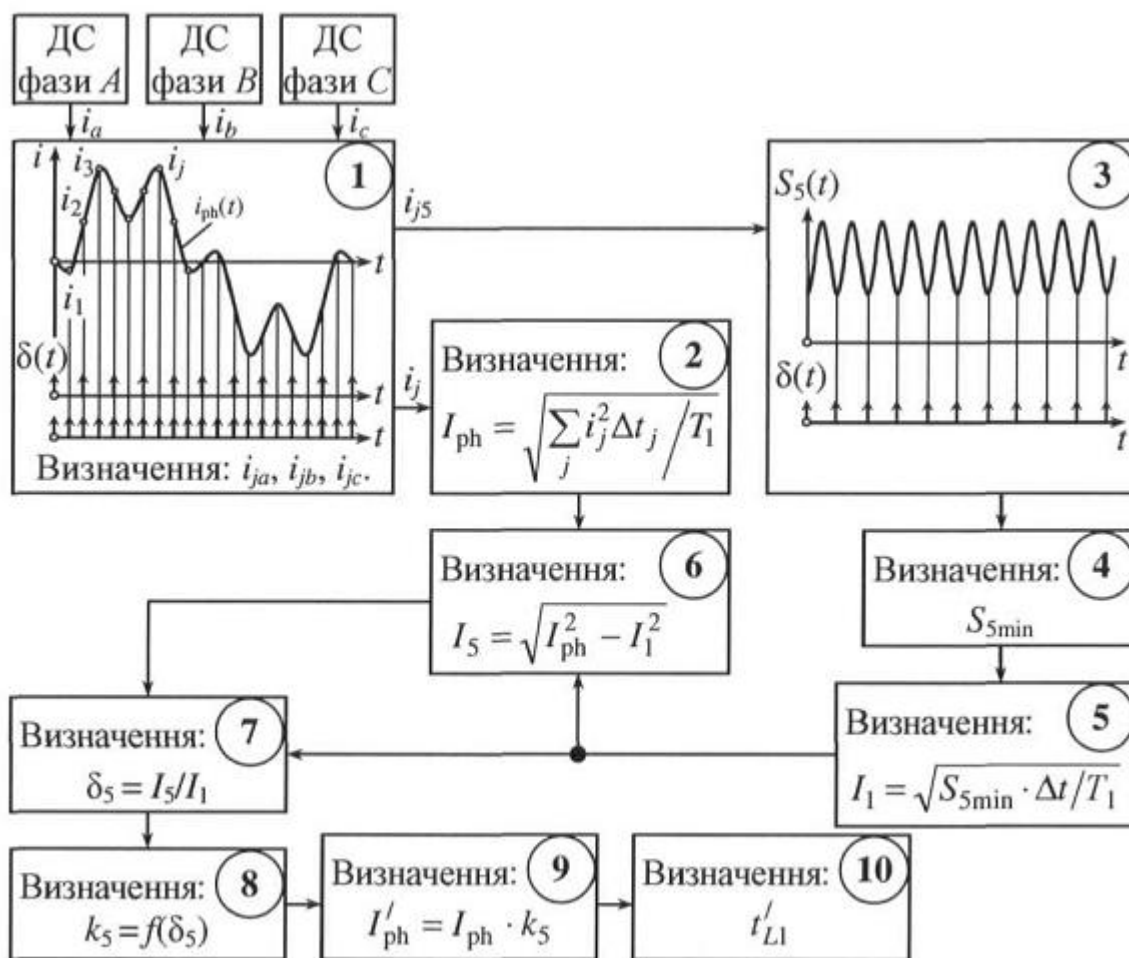
Винахід належить до електричних апаратів і може бути використаний в пристроях (як спосіб) теплового захисту трифазних електричних двигунів (ЕД) від теплових впливів надструмів, зокрема асинхронних електродвигунів, що працюють в шахтних електричних мережах з ізольованою нейтраллю, з нелінійними видами навантажень, і як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми зміни фазних струмів. Розроблено такий спосіб струмового захисту електричних двигунів, який враховує додаткове нагрівання обмоток внаслідок наявності вищих гармонійних складових у фазних струмах і, тим самим, підвищена надійність теплового захисту.

В кожному режимі через часовий інтервал Δt_j виробляють безперервний моніторинг суми

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

квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 за період T_1 зміни струму 1-ої гармоніки.

Значення i_{j5}^2 відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph} = f(t)$ фазного струму i_{ph} в часі t з частотою дискретизації f_{d5} , в 2 рази більшою за частоту f_5 зміни струму 5-ої гармоніки. За мінімальним значенням S_{5min} залежності S_5 в часі визначають середньоквадратичні значення I_1 струму 1-ої та I_5 струму 5-ої гармоніки. За відношенням I_5/I_1 визначають коефіцієнт додаткових втрат k_{d5} , який враховує теплову дію струму 5-ої гармоніки та дозволяє скорегувати час спрацьовування захисту t_L і підвищити надійність захисту електричних двигунів за рахунок врахування вищих гармонійних складових у фазних струмах, а саме 5-ої гармоніки струму, яка призводить до додаткових втрат і нагріванню обмоток електродвигунів.



Фіг. 4

Винахід належить до електричних апаратів і може бути використаний в пристроях (як спосіб) теплового захисту трифазних електричних двигунів (ЕД) від теплових впливів надструмів, зокрема асинхронних електродвигунів, що працюють в шахтних електричних мережах з ізольованою нейтраллю, з нелінійними видами навантажень, і як наслідок, зі спотворенням

5 синусоїдальної форми зміни фазних струмів.
Відомі [1] способи теплового захисту ЕД від струмів перевантаження I_L , в яких формується захисна часострумova характеристика, що забезпечує зворотну залежність часу спрацьовування захисного пристрою t_L від величини фазного струму I_{ph} :

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

10 де I_{ph} - середньоквадратичне (діюче) значення фазного струму, t_L - час спрацьовування захисту при струмовому перевантаженні.

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

Одним із захисних пристроїв, що застосовують в рудникових вибухозахищених трансформаторних підстанціях з комплектними розподільними пристроями та реалізують наведений спосіб формування необхідної захисної часострумova характеристики, є реле максимального струму LH86AC виробництва Чеської фірми "Hansen Electric" [2, 3]. Часострумova характеристика $t_L = f(I_{ph})$ реле LH86AC має дві зони, в яких характер залежності часу спрацьовування захисту t_L від величини I_{ph} істотно відрізняється. 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). У цій зоні залежність часу спрацьовування 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 спрацьовування захисту t_L від величини фазного струму I_{ph} .

Недоліком розглянутого способу захисту ЕД від струмових перевантажень 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 LH86AC зазначено, що реле призначене для захисту трифазних ЕД від теплових впливів синусоїдальних струмів, що не містять вищих гармонійних складових.

У той же час в шахтних електромережах все більш широке поширення 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 нагрівання ЕД вищих гармонік струму знижує надійність захисту [4].

40 Використовуваний в реле LH86AC спосіб захисту ЕД від струмових перевантажень є загальновідомим і широко застосовуваним. Цей спосіб, в якому визначають діючі значення $I_{ph(a,b,c)}$ фазних струмів усіх трьох фаз a, b, c методом інтегрування квадратів миттєвих значень $I_{j(a,b,c)}^2$ струмів усіх трьох фаз a, b, c і формують час спрацьовування захисту t_L у відповідність із заданою залежністю $t_L = f(I_{ph})$ часу t_L , від діючого значення I_{ph} синусоїдального струму, є найбільш близьким (прототипом) по суті до способу захисту ЕД, що заявляється.

В основу винаходу поставлена задача розробити такий спосіб струмового захисту ЕД, який враховував би додаткове нагрівання ЕД внаслідок наявності вищих гармонійних складових у фазних струмах і, тим самим, підвищити надійність теплового захисту. При цьому необхідно використовувати максимально простий і широко застосовуваний в релейно-струмових захистах математичний апарат визначення середньоквадратичних (діючих) значень струмів найбільш значущих для побудови захисту вищих гармонік.

Поставлена задача реалізується в способі захисту електродвигунів від струмів перевантаження, в якому визначають діючі значення $I_{ph(a,b,c)}$ фазних струмів усіх трьох фаз a, b, c методом інтегрування квадратів миттєвих значень $i_{j(a,b,c)}^2$ струмів усіх трьох фаз a, b, c і формують час спрацьовування захисту t_L у відповідність із заданою залежністю $t_L = f(I_{ph})$ часу t_L від діючого значення I_{ph} синусоїдального струму, за рахунок того, що враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів, для чого додатково в ковзному режимі через часовий інтервал Δt_j , в 10 і більше разів менший за період T_1 зміни струму 1-ої гармоніки: $\Delta t_j \leq 0,1T_1$ шляхом заміни використаного миттєвого значення i_j струму новим виробляють безперервний моніторинг суми S_5 квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph} = f(t)$ фазного струму i_{ph} в часі t з частотою дискретизації f_{d5} , в 2 рази більшою за частоту f_5 зміни струму 5-ої гармоніки: $f_{d5} = 2f_5$, при цьому суму S_5 квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 визначають за період T_1 зміни струму 1-ої гармоніки: $S_5 = \sum_0^{T_1} i_{j5}^2$, після чого формують залежність $S_5 = f(t)$ суми S_5 від часу t , потім визначають мінімальне значення S_{5min} залежності $S_5 = f(t)$ після чого визначають середньоквадратичне значення I_1 струму 1-ої гармоніки з виразу $I_1 = \sqrt{S_{5min} \cdot \Delta t / T_1}$ та I_5 струму 5-ої гармоніки з виразу $I_5 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_1^2}$, потім визначають коефіцієнт додаткових втрат з виразу $k_{d5} = 1,74 (I_5 / I_1)^2$, після чого визначають підвищувальний коефіцієнт k_5 , з наступної табличної залежності:

k_{d5}	0,017	0,039	0,07	0,109	0,157	0,213	0,278	0,352	0,435
k_5	1,0085	1,019	1,034	1,053	1,076	1,101	1,13	1,163	1,2,

на який необхідно помножити величину I_{ph} , щоб отримане в результаті множення значення $I'_{ph} = I_{ph} \cdot k_5$, що містить в собі струм 5-ої гармоніки, за своєю тепловою дією на електродвигун було еквівалентним дії струму 1-ої гармоніки, потім визначають час спрацьовування захисту t_L у відповідність з потрібною залежністю $t_L = f(I_{ph})$ часу t_L від величини I_{ph} , з підставленням замість величини I_{ph} знайденого значення I'_{ph} .

Саме за рахунок того, що враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів, для чого додатково в ковзному режимі через часовий інтервал Δt_j , в 10 і більше разів менший за період T_1 зміни струму 1-ої гармоніки: $\Delta t_j \leq 0,1T_1$, шляхом заміни використаного миттєвого значення i_j струму новим виробляють безперервний моніторинг суми S_5 квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph} = f(t)$ фазного струму i_{ph} в часі t з частотою дискретизації f_{d5} , в 2 рази більшою за частоту f_5 зміни струму 5-ої гармоніки $f_{d5} = 2f_5$, при цьому суму S_5 квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 визначають за період T_1 зміни струму 1-ої гармоніки: $S_5 = \sum_0^{T_1} i_{j5}^2$ після чого формують залежність $S_5 = f(t)$ суми S_5 від часу t , потім визначають мінімальне значення S_{5min} залежності $S_5 = f(t)$, після чого визначають середньоквадратичне значення I_1 струму 1-ої гармоніки з виразу $I_1 = \sqrt{S_{5min} \cdot \Delta t / T_1}$ та I_5 струму 5-ої гармоніки з виразу $I_5 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_1^2}$, потім визначають коефіцієнт додаткових втрат з виразу $k_{d5} = 1,74 (I_5 / I_1)^2$, після чого визначають підвищувальний коефіцієнт k_5 , з наступної табличної залежності:

k_{d5}	0,017	0,039	0,07	0,109	0,157	0,213	0,278	0,352	0,435
k_5	1,0085	1,019	1,034	1,053	1,076	1,101	1,13	1,163	1,2

на який необхідно помножити величину I_{ph} , щоб отримане в результаті множення значення $I'_{ph} = I_{ph} \cdot k_5$, що містить в собі струм 5-ої гармоніки, за своєю тепловою дією на електродвигун було еквівалентним дії струму 1-ої гармоніки, потім визначають час спрацьовування захисту t_L у відповідність з потрібною залежністю $t_L = f(I_{ph})$ часу t_L від величини I_{ph} , з підставленням замість величини I_{ph} знайденого значення I'_{ph} , і забезпечується підвищення надійності захисту ЕД за рахунок врахування вищих гармонійних складових у фазних струмах, а саме 5-ої гармоніки струму, яка призводить до додаткових втрат і нагріванню обмоток електричних двигунів.

Перевага способу, що заявляється, полягає в тому, що для визначення величини 5-ої гармоніки струму використовують традиційно застосований при побудові струмових захистів математичний апарат інтегрування квадратів дискретних значень струму. Відмінна особливість застосовуваного математичного апарату полягає у використанні додаткової частоти дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph} = f(t)$ фазного струму в часі.

Відомо [4-9], що застосування в трифазних електричних мережах тиристорних перетворювачів частоти та інших нелінійних навантажень призводить до виникнення вищих гармонійних складових струму. При частотному регулюванні швидкості обертання асинхронного ЕД найбільш значущою за величиною буде 5-а гармоніка струму. При цьому обертання вектора 5-ої гармоніки струму при тих спотвореннях синусоїди фазних струмів, які 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 відносно до ротора ЕД з підвищеною частотою 250 Гц. В силу цієї особливості 5-а гармоніка струму має найбільший вплив на додаткове нагрівання ЕД. Зростають втрати в обмотках за рахунок поверхневого ефекту й ефекту близькості [4]. Хоч і меншою мірою, виникає додаткове нагрівання від додаткових втрат в сталі.

У трифазних електричних мережах без нейтрального провідника, до яких належать шахтні електромережі, у фазних струмах немає 3-ої гармоніки. Немає 3-ої гармоніки і в фазних струмах трифазних ЕД. Тому визначення нижнього спектра гармонік, необхідного для побудови захисту ЕД від струмових перевантажень може бути обмежене двома 1-ою та 5-ою найбільш значущими за величиною гармоніками струму.

Фіг. 1-4 ілюструють суть способу захисту електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

Принцип визначення середньоквадратичних (діючих) значень струмів 1-ої та 5-ої гармонік з

аналізу суми $S_5 = \sum_0^{T_1} i_{j5}^2$ квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 , що відповідають

дискретизації вихідної аналогової залежності зміни фазного струму в часі $i_{ph} = f(t)$ з частотою в 2 рази більшою за частоту зміни струму 5-ої гармоніки f_5 , пояснюється діаграмами, наведеними на фіг. 1. На фіг. 1 показані залежності $i_{ph} = f(t)$ і першої $i_1 = f(t)$ та п'ятої $i_5 = f(t)$ гармонік, що входять до складу i_{ph} . Також на фіг. 1 наведена залежність $S_5 = f(t)$ суми S_5 від

часу t . Величину S_5 розраховують за дискретними значеннями струму i_{j5} , що відповідають частоті дискретизації $f_{d5}=500$ Гц, в два рази більшої за частоту 5-ої гармоніки $f_5=250$ Гц, що в 10 разів більша за частоту 1-ої основної гармоніки струму $f_1=50$ Гц. Частота f_{d5} перевищує значення, регламентовані теоремою Котельникова [10] та Держстандартом [11] для точного відновлення за дискретними значеннями вихідної аналогової залежності в часі 1-ої гармоніки струму. Згідно з теоремою Котельникова частота дискретизації повинна бути строго більшою за двократну частоту найбільш високої гармоніки у вихідному аналоговому сигналі. Згідно з [11] мінімальною частотою дискретизації f_d повинна дорівнювати або бути більшою за трикратну частоту найвищої гармоніки струму. Діюче значення 1-ої гармоніки струму I_1 , розраховане за дискретними значеннями струму, що відповідають частоті дискретизації $f_{d5}=500$ Гц, буде

правильним і не залежатиме від моменту 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 з [11] мінімальною частотою 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 $S_{5\text{min}}$ (фіг. 1). Вочевидь, що в зазначені моменти часу сума квадратів дискретних значень струму i_{j5}^2 , тобто значення $S_{5\text{min}}$ не містить дискретні значення 5-ої гармоніки струму. Це означає, що в діючому значенні фазного струму I_{ph5} , визначеному за величиною $S_{5\text{min}}$, не врахований струм 5-ої гармоніки. Отже, величину 1-ої гармоніки струму I_1 визначають з виразу:

$$I_1 = \sqrt{S_{5\text{min}} \cdot \Delta t / T_1} \quad (2)$$

Значення 5-ої гармоніки струму визначають з виразу:

$$I_5 = \sqrt{I_{ph5}^2 - I_1^2} \quad (3)$$

З метою врахування впливу 5-ої гармоніки струму на додаткове нагрівання ЕД необхідне корегування вихідної захисної часошумової характеристики (1), яка відповідає синусоїдальному фазному струму і не враховує додаткових втрат і нагрівання ЕД від струмів вищих гармонік, зокрема струму 5-ої гармоніки. Обґрунтуємо необхідність зазначеного корегування вихідної захисної характеристики $t_L = f(I_{ph})$.

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 [4]. 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 [4]:

$$\Delta P_{\Sigma k} = \Delta P_r k_{st}^2 \sum_{n=2}^k \left(\frac{U_n}{nU_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = \Delta P_r k_{st}^2 \sum_{n=2}^k k_{dn} \quad (4)$$

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.

Величина $n \pm 1$ дозволяє враховувати напрямок обертання вектора n -ої гармоніки напруги в порівнянні з напрямком обертання вектора 1-ої основної гармоніки напруги. Знак «-» відповідає однаковому напрямку обертання, знак «+» - протилежному. Для розглянутого випадку, коли враховуються додаткові втрати лише від 5-ої гармоніки струму, вектор якої обертається в протилежному напрямку відносно до обертання вектора 1-ої гармоніки, вираз для додаткових втрат в обмотках ЕД буде мати вигляд:

$$\Delta P_5 = \Delta P_r \cdot k_{d5} = \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2 \frac{\sqrt{5} + \sqrt{5 \pm 1}}{25} = 0,1874 \cdot \Delta P_r \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2 \Delta P_r \quad (6)$$

45

При побудові струмового захисту ЕД, що працюють в шахтних електромережах, величини напруг використовувати важко внаслідок відсутності нейтрального проводу. Тому рівняння (6) доцільно перетворити таким чином, щоб у ньому використовувалися значення струмів.

Для такого перетворення приймають наступні припущення:

5 - Коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) електричних кіл навантажених асинхронними електродвигунами з нормальним коефіцієнтом корисної дії дорівнює 0,8 ($\cos\varphi = 0,8$) [12].

- Збільшення індуктивного опору X обмотки ЕД на частоті 5-ї гармоніки струму становить 500 %: $X_5 = 5\omega L$, де ω - кутова частота 1-ої основної гармоніки струму; L - індуктивність обмотки.

10 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 визначають реактивною складовою, а збільшенням R за рахунок поверхневого ефекту та ефекту близькості можна знехтувати.

З урахуванням прийнятих припущень визначають залежність підвищувального коефіцієнта k_{d5} залежно від величини струму 5-ої гармоніки, тобто у функції співвідношення I_5 / I_1 .

15 Рівняння (5) перетворюють наступним чином:

$$U_1 = I_1 \cdot Z_1 = I_1 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \quad (7)$$

$$U_5 = I_5 \cdot Z_5 = I_5 \sqrt{R^2 + (5\omega L)^2}; \quad (8)$$

$$k_{d5} = 0,1874 \cdot \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2 = 0,1874 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2}; \quad (9)$$

$$\omega L = R \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad (10)$$

$$k_{d5} = 0,1874 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R^2 + 25R^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{R^2 + R^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} = 0,1874 \cdot \left(\frac{I_5}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{1 + 25 \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}, \quad (11)$$

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

При $\cos\varphi = 0,8$ отримують:

20

$$k_{d5} \Big|_{\cos\varphi=0,8} = 1,74 \left(\frac{I_5}{I_1} \right)^2. \quad (12)$$

Додаткові втрати ΔP_5 , зумовлені наявністю 5-ої гармоніки струму, визначають підвищувальним коефіцієнтом k_{d5} (6), на який слід помножити номінальні втрати ΔP_r (6). Якщо

знайдено підвищувальний коефіцієнт k_{d5} , то еквівалентний фазний струм I'_{ph} , що враховує

25 додаткове нагрівання ЕД від впливу 5-ої гармоніки струму, визначають з виразу:

$$I'_{ph} = I_{ph} \sqrt{1 + k_{d5}}. \quad (13)$$

З використанням наведеного алгоритму визначення величини I'_{ph} , були розраховані залежності $k_{d5} = f(\delta_5)$ значень підвищувального коефіцієнта k_{d5} від коефіцієнта $\delta_5 = I_5 / I_1$ (фіг.

30 2). Величина δ_5 характеризує співвідношення струмів 5-ої та 1-ої гармонік. Залежність $k_{d5} = f(\delta_5)$ використовують для корегування часу t_L спрацьовування захисту з урахуванням

додаткового нагрівання ЕД при нелінійних спотвореннях синусоїди фазних струмів. Суть корегування часу t_L з урахуванням додаткового нагрівання ЕД від впливу 5-ої гармоніки струму

пояснюється графіком (фіг. 3), на якому наведена часострумова захисна характеристика, що

35 ілюструє, яким чином визначають час t_L з урахуванням додаткового нагрівання ЕД від впливу 5-ої гармоніки струму I_5 .

Згідно з вихідною залежністю $t_L = f(I_{ph})$, заданої для реле LH86AC та справедливої при відсутності нелінійних спотворень (вищих гармонік струму), деякому значенню струму I_{ph1}

відповідає час спрацьовування захисту t_{L1} . Якщо фазний струм несинусоїдальний, то значення I_{ph1} необхідно помножити на підвищувальний коефіцієнт $\sqrt{1+k_{d5}}$. В результаті отримують еквівалентне значення фазного струму I'_{ph1} . У цьому випадку час спрацьовування захисту необхідно зменшити до значення t'_{L1} , як показано на фіг. 3. Аналогічне корегування часу спрацьовування t_L здійснюють при інших значеннях струму I_{ph} .

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

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб:

1. У модулі 1 вихідну залежність фазного струму в часі $i_{ph} = f(t)$ перетворюють у дві дискретні залежності з різною частотою дискретизації $i_j(t)$ і $i_{j5}(t)$. Залежність $i_j(t)$ отримують з частотою дискретизації $f_d=1000$ Гц, більшою за потрібну частоту 5-ої гармоніки [11]. Залежність $i_{j5}(t)$ 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:

$$I_{ph} = \sqrt{\sum_{j=1}^p i_j^2 \Delta t_j} / T_1, \quad (14)$$

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

3. У модулі 3 за дискретними значеннями залежності $i_{j5}(t)$ визначають залежність $S_5 = f(t)$ суми квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 , як:

$$S_5 = \sum_0^{T_1} i_{j5}^2. \quad (15)$$

4. У модулі 4 визначають мінімальне значення S_{5min} залежності $S_5 = f(t)$.
 5. У модулі 5 визначають діюче значення I_1 1-ої гармоніки фазного струму за формулою (2).
 6. У модулі 6 визначають діюче значення I_5 5-ої гармоніки фазного струму за формулою (3).
 7. У модулі 7 визначають значення δ_5 як відношення діючих значень 5-ої та 1-ої гармонік фазного струму: $\delta_5 = I_5 / I_1$.

8. У модулі 8 з табличної залежності $k_5 = f(\delta_5)$:

δ_5	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
k_5	1,0085	1,019	1,034	1,053	1,076	1,101	1,13	1,163	1,2

визначають значення коефіцієнта k_5 , що враховує збільшення нагрівання ЕД від впливу струму 5-ої гармоніки.

9. У модулі 9 визначають еквівалентне значення струму I'_{ph} , що враховує додаткове нагрівання ЕД від впливу 5-ої гармоніки струму, як

$$I'_{ph} = I_{ph} \cdot k_5, \quad (16)$$

10. У модулі 10 за значенням I'_{ph} визначають скорегований час спрацьовування захисту t'_{L1} .

Запропонований алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою захисту ЕД від струмових перевантажень враховує додаткове нагрівання, зумовлене наявністю у фазному струмі, крім 1-ої основної, більш високою 5-ої гармоніки струму.

Таким чином, поставлена в основу винаходу задача врахування впливу вищих гармонік на струмові перевантаження електродвигунів вирішена. При цьому використано максимально простий математичний апарат, який широко застосовують при реалізації струмових захистів.

Джерела інформації:

1. Чернобровое Н.А. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.А. Чернобровое, В.А. Семенов - М.: Энергоатомиздат, 1998. - 800 с.
2. Басов Н.М. Новое направление в создании рудничных взрывозащищенных трансформаторных подстанций на низшее напряжение до 3300 В / Н.М. Басов, В.С. Дзюбан, В.В. Кардаш, В.Е. Кошкин, Т.В. Швецова // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научных трудов. - Донецк: ООО "АИР", 2010. - С. 61-71.
3. Реле электронное максимального тока Lh86 [Электронный ресурс] // Hansen Electric. Режим доступа: <http://www.hansen-electric.cz/ru/ovladaci-a-jistici-pristroje>, вільний. - Загл. с екрану. - Текст на екрані російський. (Дата звернення 20.09.2013).
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - 4-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 331 с.
5. Климов В.П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания [Электронный ресурс] / В.П. Климов, А.Д. Москалев // Тэнси Плюс. - Режим доступа: <http://www.tensy.ru/article01.html>, вільний. - Загл. с екрану. - Текст на екрані російський. (Дата звернення 20.09.2013).
6. Барутсков И.Б. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты / И.Б. Барутсков, С.А. Вдовенко, Е.В. Цыганков // Главный энергетик. - 2011. - № 06. - С. 5-15.
7. Григорьев О.А. Компьютерные нечистоты. Статья не для всех [Электронный ресурс] / О.А. Григорьев, В.С. Петухов, В.А. Соколов, И.А. Красилов // Ferra.ru. Центр электромагнитной безопасности. - Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/casecool/s22319>, вільний. - Загл. с екрану. - Текст на екрані російський. (Дата звернення 20.09.2013).
8. Гармоники тока и напряжения в электросетях [Электронный ресурс] / Матик-Электро. - Режим доступа: <http://www.matic.ru/index.php?pages=735>, вільний. - Загл. с екрану. - Текст на екрані російський. (Дата звернення 20.09.2013).
9. 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.
10. 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.
11. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
12. ГОСТ Р 51677-2000. Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели энергоэффективности.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження, в якому визначають діючі значення $I_{ph(a,b,c)}$ фазних струмів усіх трьох фаз a, b, c методом інтегрування квадратів миттєвих значень $I_{j(a,b,c)}^2$ струмів усіх трьох фаз a, b, c і формують час спрацьовування захисту t_L у відповідності із заданою залежністю $t_L = f(I_{ph})$ часу t_L , від діючого значення I_{ph} синусоїдального струму, який **відрізняється** тим, що враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів, для чого додатково в ковзному режимі через часовий інтервал Δt_j , в 10 і більше разів менший за період T_1 зміни струму 1-ої гармоніки: $\Delta t_j \leq 0,1T_1$, шляхом заміни використаного миттєвого значення i_j струму новим виробляють безперервний моніторинг суми

S_5 квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph} = f(t)$ фазного струму i_{ph} в часі t з частотою дискретизації f_{d5} , в 2 рази більшою за частоту f_5 зміни струму 5-ої гармоніки: $f_{d5} = 2f_5$, при цьому сума S_5 квадратів дискретних значень струмів i_{j5}^2 визначають за період T_1 зміни струму 1-ої гармоніки:

5 $S_5 = \sum_0^{T_1} i_{j5}^2$, після чого формують залежність $S_5 = f(t)$ суми S_5 від часу t , потім визначають мінімальне значення S_{5min} залежності $S_5 = f(t)$ після чого визначають середньоквадратичне значення I_1 струму 1-ої гармоніки з виразу $I_1 = \sqrt{S_{5min} \cdot \Delta t / T_1}$ та I_5 струму 5-ої гармоніки з виразу $I_5 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_1^2}$, потім визначають коефіцієнт додаткових втрат з виразу $k_{d5} = 1,74(I_5 / I_1)^2$, після чого визначають підвищувальний коефіцієнт k_5 , з наступної табличної залежності:

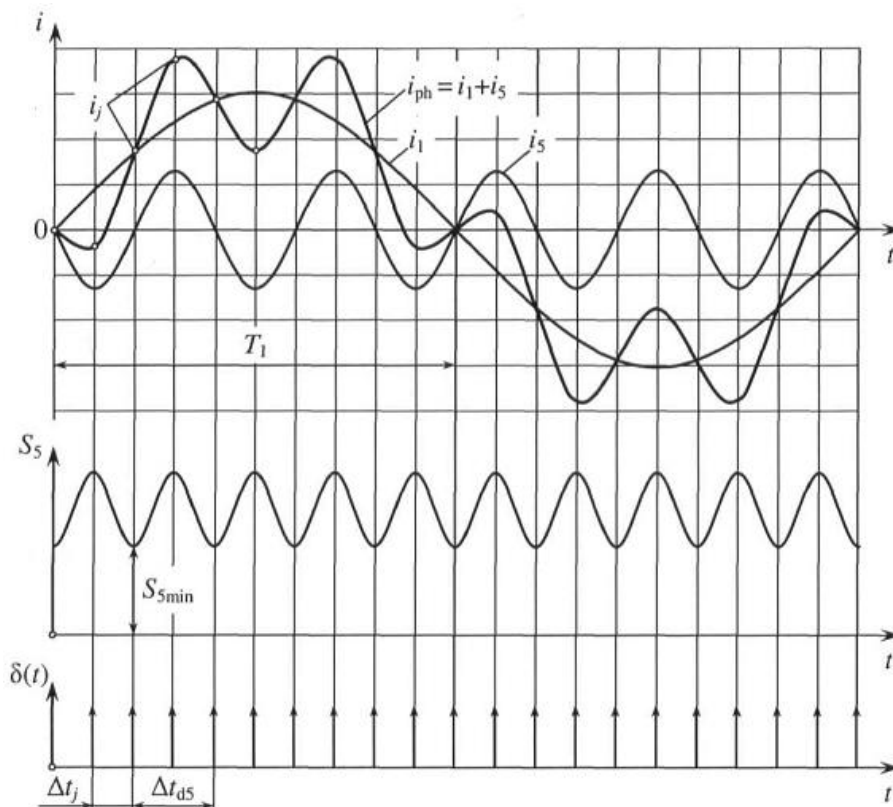
10

k_{d5}	0,017	0,039	0,07	0,109	0,157	0,213	0,278	0,352	0,435
k_5	1,0085	1,019	1,034	1,053	1,076	1,101	1,13	1,163	1,2

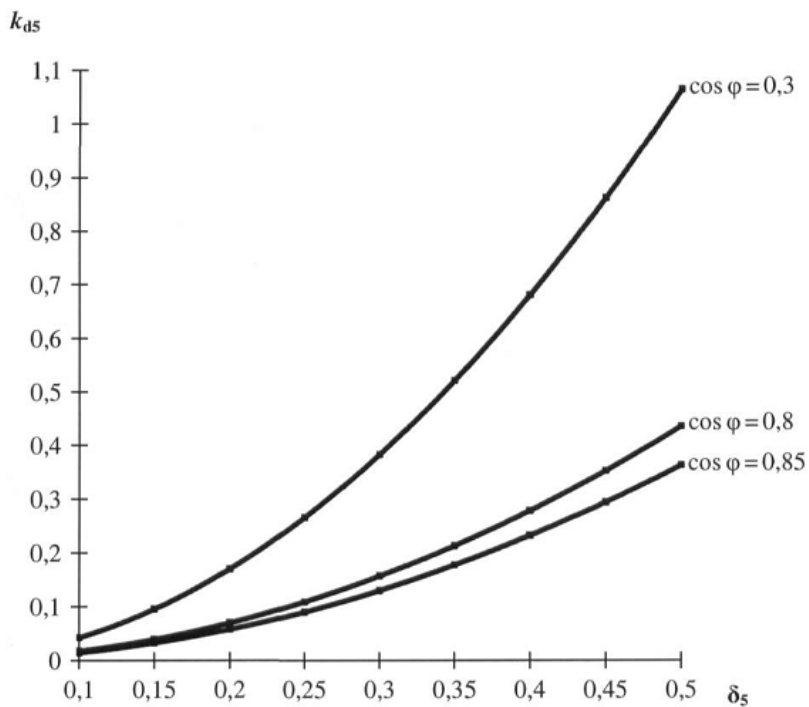
на який необхідно помножити величину I_{ph} , щоб отримане в результаті множення значення $I'_{ph} = I_{ph} \cdot k_5$, що містить в собі струм 5-ої гармоніки, за своєю тепловою дією на електродвигун було еквівалентним дії струму 1-ої гармоніки, потім визначають час спрацьовування захисту t_L у відповідність з потрібною залежністю $t_L = f(I_{ph})$ часу t_L від величини I_{ph} , з підставленням

15

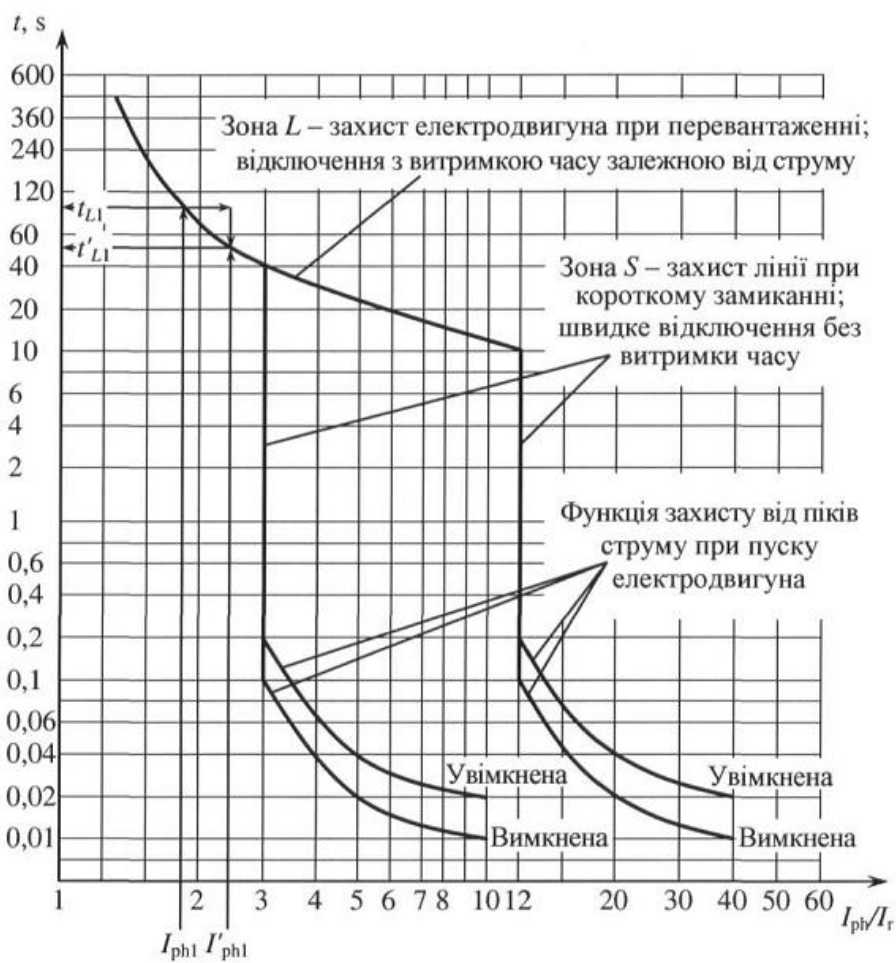
замість величини I_{ph} знайденого значення I'_{ph} .



Фиг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

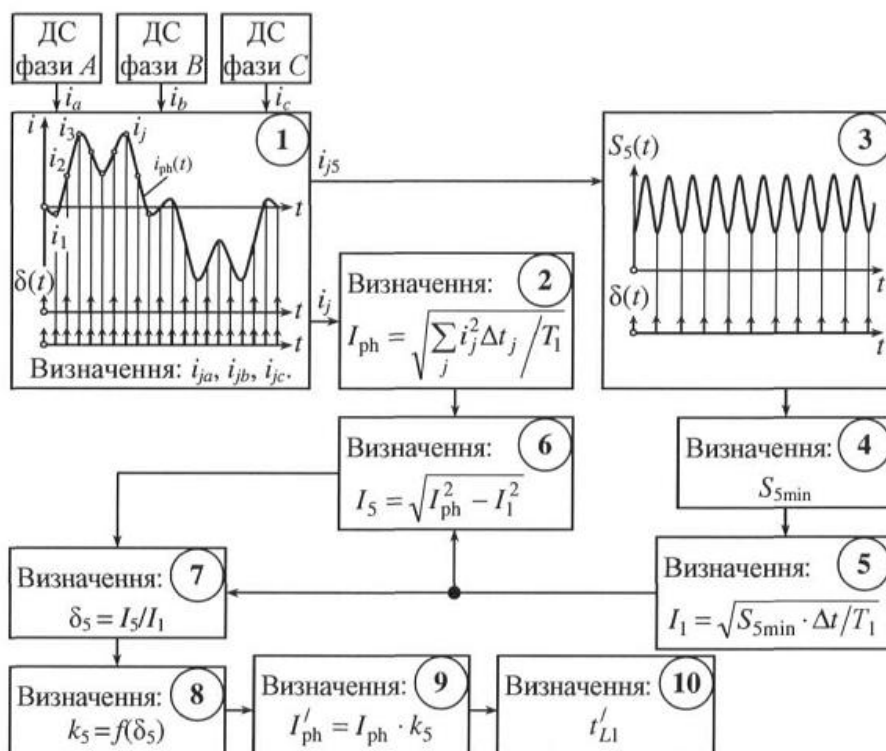


Fig. 4