

навантаження. Система є простою в налагодженні і не вимагає спеціальних методів розрахунку, окрім традиційних для систем підпорядкованого регулювання.

1. Шапарев Н.К. Автоматизация типовых технологических процессов металлообработки. Расчет и проектирование/ Н.К. Шапарев.– К.; Одесса: Вища школа, 1984. – 312с. 2. Воронов А.А. Теория автоматического управления. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. –367 с. 3. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / [Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін.]; за ред. М.Г.Поповича, О.Ю.Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. 4. Рудаков В.В. Синтез электроприводов с последовательной коррекцией / В.В Рудаков. Р.П, Мартикайнен.. – Л.: Энергия, 1972. 5. Eisele H. Parallel control system regulates motor torque/ H. Eisele, A. Vance. – Westinghouse Engr., 1966, vol. 26, № 4. 6. Лозинський О.Ю. Система підпорядкованого керування з селективною корекцією / О.Ю. Лозинський, Б.Я. Панченко, Л.Ф. Карплюк // Вісн. нац. техн. ун-ту "ХПІ". – 2010. – № 30. – С. 518–519. 7. Емельянов С.В. Теория систем с переменной структурой / С.В.Емельянов. – М.: Наука, 1970. – 590 с.

УДК 621.3.064.2: 621.316.925.1: 621.316.96

О.Г. Серета

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",  
кафедра ЕА

## ЗАХИСТ РОЗГАЛУЖЕНОЇ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З РОЗПОДІЛЕНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ВІД ОБРИВУ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВІДНИКА

© Серета О.Г., 2014

Обґрунтовано можливість розширення переліку реалізованих захистів у розчіплювачах автоматичних вимикачів на основі результатів цифрової обробки сигналів від датчиків струму. Запропоновано нове технічне рішення, яке дозволяє в режимі ковзного моніторингу сформувавши критерій спрацьовування автоматичних вимикачів під час захисту однофазних споживачів електроенергії від обриву нейтралі. Доведена можливість ідентифікації факту обриву нейтралі за допомогою гармонійного аналізу спектра фазних струмів за наявності нелінійних спотворень.

*Ключові слова: мікропроцесорний пристрій, релейний захист.*

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 justified. The new technical solution allowing in a sliding monitoring mode to create of circuit breakers operation criterion at single-phase electric power consumers protection from neutral failures is proposed. Feasibility of neutral failures fact identification by the harmonious analysis of phase currents spectrum with the nonlinear distortions presence is proved.

*Key words: microprocessor device, current relay protection.*

### Постановка проблеми

Необхідність визначення факту обриву нейтрального провідника (N-провідника) на будь-якій ділянці довгої лінії мереж електропостачання 0,4 кВ з нелінійними видами навантажень обумовлена

тим, що за наявності несиметрії значень фазних струмів і обриві  $N$ -провідника можливі небезпечні перенапруги в однофазних споживачів внаслідок перекосу фазних напруг [1].

Більша частина комп'ютерного та офісного устаткування є нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення синусоїди фазних струмів у мережі живлення [2]. Крива зміни струму в часі містить увесь спектр непарних гармонік, з яких найзначущішими, з погляду побудови мережесих захистів, є перша (основна) та дві вищі – третя та п'ята. Тому при визначенні очікуваного струму  $I'_N$  в  $N$ -провіднику, окрім геометричної суми векторів струму основної 1-ї гармоніки трьох фаз  $a, b, c$  необхідно враховувати вклад 3-ї та 5-ї гармонік. Отже, з'являється необхідність в аналізі гармонійного спектра фазних струмів.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У роботах [3, 4] факт обриву  $N$ -провідника визначають порівнянням очікуваного значення струму в  $N$ -провіднику  $I'_N$ , яке визначають як геометричну суму з'єднаних на  $120^\circ$  векторів фазних струмів  $\dot{I}_{ph(a,b,c)}$ , з фактичним значенням струму  $I_N$  в  $N$ -провіднику при його обриві в будь-якому місці розгалуженої електричної мережі. У неушкодженій електроустановці кути між векторами  $\dot{I}_{ph(a,b,c)}$  практично дорівнюють  $120^\circ$  навіть за наявності несиметрії навантаження. Тому під час лінійних навантажень в електричному колі, коли фазні струми змінюються за синусоїдою, визначення величини  $I'_N$  не становить труднощів. Проте при нелінійних навантаженнях визначення  $I'_N$ , як струму незбалансу фазних навантажень, некоректне, оскільки навіть у симетричному режимі в  $N$ -провіднику підсумовуватимуться третя та кратні до неї гармоніки фазних струмів. Тому для мереж з нелінійними навантаженнями для формування очікуваного («штатного») образу електричного кола спочатку потрібно провести гармонійний аналіз спектра фазних струмів. Лише після цього, можливо, коректно, з урахуванням особливостей зміни струмів різних гармонік, визначити величину  $I'_N$ .

### **Формулювання мети статті**

Теоретичне обґрунтування, розробка та реалізація у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою способу захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці розгалуженої електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням, в якому за наявності нелінійних навантажень спектральний аналіз гармонійного складу фазних струмів здійснюють за рахунок простих і широко використовуваних в пристроях релейного захисту, зокрема в мікропроцесорних розчіплювачах автоматичних вимикачів, математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень струму, що спрощує спектральний аналіз гармонійного складу фазних струмів у пристроях релейного захисту, прискорює швидкодію захисту, а також дозволяє найгармонійніше поєднувати його з математичним апаратом побудови інших видів мережесих захистів.

### **Виклад основного матеріалу**

Для виконання прикладних завдань визначення гармонійного спектра сигналу широко використовується дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) [5]. Проте для його реалізації потрібний значний обсяг обчислень, оскільки визначення параметрів (амплітуди й фази) навіть однієї гармоніки призводить до необхідності розрахунку повного спектра. У зв'язку з цим розроблені альтернативні методи, що дозволяють визначити параметри окремих гармонік швидше, наприклад, алгоритм Герцеля. Під час його використання за рахунок реалізації ДПФ у вигляді рекурсивного фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою помітно зменшується кількість обчислень. Проте і в цьому випадку для моніторингу гармонійного складу несинусоїдального струму потрібна висока швидкодія процесора. Модифікація алгоритму Герцеля додаванням нерекурсивної гілки дає змогу провести динамічний перерахунок спектральних відліків на кожному такті дискретизації в ковзному режимі, врахувати проміжні результати під час розрахунку заданої гармоніки й тим самим зменшити обсяг і час обчислень за рахунок використання параметрів гармонік, знайдених на попередньому кроці.

Вищезгадані й аналогічні методи є універсальними і застосовуються для вирішення широкого кола проблем, а не лише для визначення амплітуди трьох гармонік струму. Проте загальним недоліком універсальних методів спектрального аналізу різного вигляду сигналів є те, що вони виявляються надлишковими для застосування в апаратах релейного захисту. Як показав аналіз, результати якого наводяться нижче, розв'язання конкретної задачі визначення гармонійного спектра фазних струмів з реальними нелінійними навантаженнями є таким окремим випадком, для якого можливе використання простіших математичних операцій. Розглянемо, чим окремий випадок спектрального аналізу фазних струмів під час побудови захисту від обриву  $N$ -провідника, відрізняється від загальних.

Для побудови захисту від обриву  $N$ -провідника найбільш значущими є 1, 3 та 5-та гармоніки струму. Таку порівняно малу кількість гармонік, яку потрібно визначити, будемо вважати першою обмежувальною умовою для розробки простішого способу гармонійного аналізу. Другою обмежувальною умовою спрощення гармонійного аналізу, необхідно вважати те, що форма фазних струмів під час реальних нелінійних навантажень близька до форми періодичної функції, симетричної відносно початку координат [6, 7]. Якщо крива несинусоїдального струму симетрична відносно початку координат, то постійна і всі косинусні складові дорівнюватимуть нулю, а всі синусні гармонійні складові матимуть однакову нульову початкову фазу  $\psi = 0$  [2]. Проаналізовані форми зміни в часі фазних струмів  $i_{ph}(t)$  та амплітудний спектр гармонік, утворені різним типом нелінійного навантаження, що є головним чинником спотворень синусоїдальної форми струму, дозволяють зробити висновки:

- не зважаючи на істотну відмінність струму споживання різного нелінійного навантаження, спільним для всіх часових залежностей  $i_{ph}(t)$  є те, що, з незначними припущеннями, коректними для побудови мережевих захистів, всі вони являють функції, симетричні відносно початку координат;
- в фазних струмах, розглянутих нелінійних навантажень, найбільш значущими є 1, 3 та 5-та непарні гармоніки струму, а 9-та гармоніка практично відсутня;
- внаслідок симетрії залежностей  $i_{ph}(t)$  відносно початку координат залежності в часі  $i_1(t)$ ,  $i_3(t)$  й  $i_5(t)$  струмів 1-ї, 3-ї та 5-ї гармонік в кожній фазі a, b, c мають однаковий початковий кут  $\psi$ , що дорівнює нулю:  $\psi_1 = \psi_3 = \psi_5 = 0$ , інакше кажучи, в кожній фазі залежності  $i_1(t)$ ,  $i_3(t)$  й  $i_5(t)$  проходять через своє нульове значення в один і той же момент часу;
- вектор  $\underline{I}_5$  струму 5-ї гармоніки має напрям обертання, протилежний до напрямку обертання вектору  $\underline{I}_1$  струму 1-ї гармоніки, оскільки лише в цьому випадку забезпечується умова  $\psi_1 = \psi_3 = \psi_5 = 0$ .

Отже, щоб визначити гармонійний спектр фазних струмів для організації релейного захисту мереж електропостачання 0,4 кВ з реальними нелінійними навантаженнями, достатньо обмежитися 1, 3 та 5-ю нижніми непарними гармоніками, які мають однаковий нульовий початковий фазовий зсув, а напрям обертання вектора  $\underline{I}_5$  протилежний до напрямку обертання вектора  $\underline{I}_1$ .

Операції інтегрування квадратів дискретних значень струму  $i_j^2$  є нескладними та необхідними під час захисту електричних кіл від струмів коротких замикань (КЗ), зокрема при віддалених КЗ. По-перше, струмові уставки  $I_{sd}$  та  $I'_{sd}$  розчіплювачів автоматичних вимикачів задаються середньоквадратичними (діючими) значеннями струму. Тому необхідно безперервно визначати саме діючі значення  $I_{ph(a,b,c)}$  фазних струмів. По-друге, для ідентифікації віддаленого КЗ необхідний безперервний моніторинг силової функції  $S(t)$  електричного кола, яка є залежністю в часі суми квадратів дискретних значень струму  $\sum_{a,b,c} i_j^2$ . Детальніше про функцію  $S(t)$  й необхідність

визначення її екстремальних значень  $S_{\max}$  і  $S_{\min}$  викладено в [3, 4, 8]. Зазначимо, що для забезпечення необхідної точності визначення значень  $S_{\max}$  і  $S_{\min}$ , по суті, квадратичної функції  $S(t)$ , потрібен доволі малий часовий інтервал дискретизації  $\Delta t_j$  вихідної аналогової залежності  $i_{ph}(t)$ . Тому в мікропроцесорному пристрої релейного захисту, в якому реалізують як струмові захисти,

так і захист від обриву  $N$ -провідника, математичні операції з визначення діючих значень струму з доволі малим інтервалом дискретизації  $\Delta t_j$  залежності  $i_{ph}(t)$  повинні бути спільними, адже для реалізації захисту від обриву  $N$ -провідника додатково потрібен моніторинг діючих значень  $I_{ph3}$  та  $I_{ph5}$ , відповідно струмів 3-ї та 5-ї гармонік.

На рис. 1 наведені залежності  $i_1(t)$ ,  $i_3(t)$ ,  $i_5(t)$  в часі синусоїдальних струмів 1, 3 та 5-ї гармонік, відповідно, а також залежність в часі несинусоїдального струму  $i_{ph}(t)$  в одній з фаз  $a, b, c$ , який є сумою струмів трьох зазначених вище гармонік. Наведена залежність  $i_{ph}(t)$  за своїм характером і гармонійним складом відповідає фазним струмам, розглянутим в [2, 6, 7]. Залежність  $i_{ph}(t)$  містить 1, 3 та 5-ту гармоніки, початкові фази яких однакові й дорівнюють нулю. Покажемо, як для даного випадку зміни в часі несинусоїдального струму визначити гармонійний спектр за рахунок використання різних частот дискретизації  $f_d$  вихідної аналогової залежності  $i_{ph}(t)$  струму в часі [9].

Під час цифрової обробки сигналів, необхідно аналоговий сигнал перетворити в дискретний. Таке перетворення здійснюють множенням вихідної аналогової залежності  $i_{ph}(t)$  струму в часі, на гратчасту  $\delta$ -функцію з часовим інтервалом дискретизації  $\Delta t_d$  (рис. 1). Чим вища частота дискретизації  $f_d$ , тим менший часовий інтервал дискретизації, оскільки ці величини жорстко зв'язані співвідношенням:  $\Delta t_d = 1/f_d$ . Точно відновити вихідну функцію  $i_{ph}(t)$  можливо лише в тому випадку, якщо інтервал  $\Delta t_d$  буде достатньо малим, а частота дискретизації  $f_d$ , навпаки, буде достатньо великою. Коли тривалість періодичного сигналу прагне до нескінченності, мінімальне значення частоти дискретизації  $f_d$  регламентується теоремою Котельникова [5]: частота  $f_d$  має бути понад два рази більшою від частоти  $f_k$  найвищої  $k$ -ї гармоніки вихідного сигналу. Якщо тривалість вихідного сигналу невелика й дорівнює одному періоду  $T_1$  зміни 1-ї гармоніки, то регламентуючим документом для мінімально припустимої частоти дискретизації  $f_d$  є держстандарт [10]: мінімальна частота  $f_d$  має дорівнювати або бути більшою від трикратної частоти  $f_k$ . Для вибраного випадку зміни фазного струму з трьома непарними гармоніками, коли п'ята гармоніка є найвищою, вимога до частоти дискретизації  $f_d$  виражається нерівністю:  $f_d \geq 3f_5 = 750$  Гц, де  $f_5 = 250$  Гц – частота 5-ї гармоніки.

Суть вимоги [10] до частоти  $f_d$  можна пояснити, скориставшись рис. 1–2.

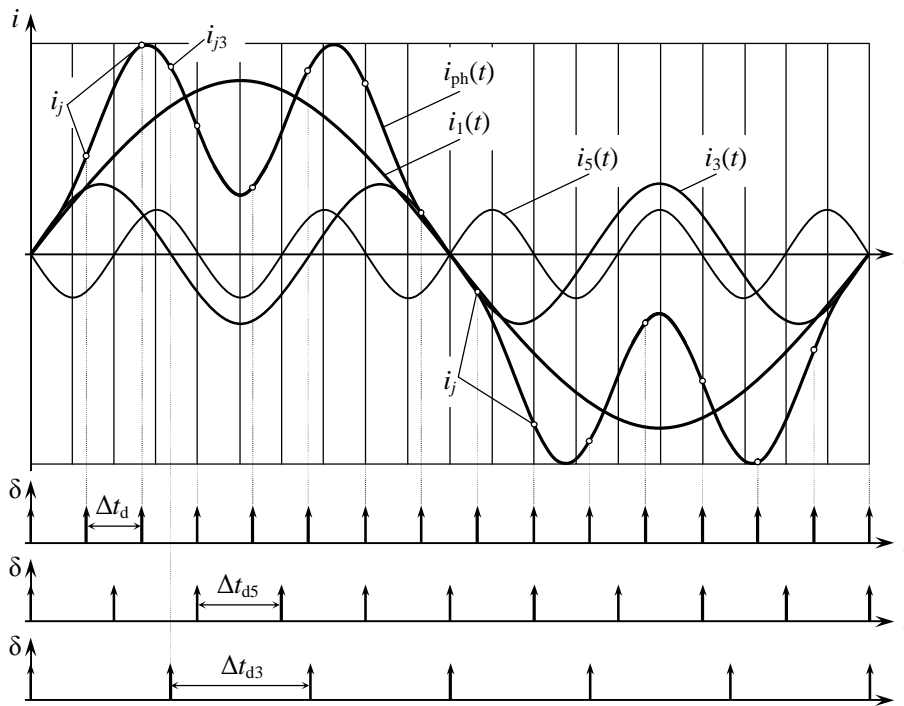


Рис. 1. Дискретизація вихідної аналогової залежності фазного струму в часі

Якщо залежність  $i_{ph}(t)$  множиться на  $\delta$ -функцію з частотою дискретизації  $f_d = 3f_5 = 750$  Гц, то її діюче значення  $I_{ph}$ , обчислене за отриманими дискретними відліками  $i_j$ , завжди буде величиною постійною  $I_{ph} = \text{const}$ , незалежно від початкової фази вихідної функції (рис. 2). Залежність  $i_{ph}(t)$ ,

наведена на рис. 1, побудована для випадку  $\psi_k = \psi_1 = \psi_3 = \psi_5 = 0$ . Проте і за інших значень початкової фази  $\psi_k \neq 0$ , відмінних від нуля, величина  $I_{ph}$  буде незмінною  $I_{ph} = \text{const}$ . Це означає, що якщо обчислювати діючі значення  $I_{ph}$  струму в режимі ковзання, через кожен часовий інтервал ковзання  $\Delta t_j$ , то часова залежність  $I_{ph}(t)$  матиме вигляд прямої лінії, паралельної до осі часу  $t$  (рис. 2).

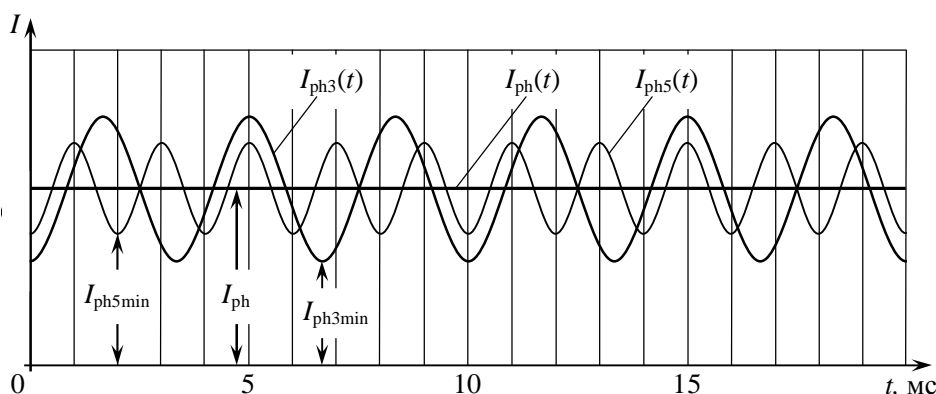


Рис. 2. Визначення діючого значення фазного струму

Проаналізуємо характер зміни залежності  $I_{ph}(t)$  для частот  $f_{d5} = 2f_5 = 500$  Гц та  $f_{d3} = 2f_3 = 300$  Гц. У моменти переходу 3-ї та 5-ї гармонік фазного струму через нуль їхня частка в миттєвому значенні  $i_j$  струму  $i_{ph}(t)$  буде відсутня. Тому, якщо перетинання  $\delta$ -функції з залежністю  $i_{ph}(t)$  буде у моменти протікання струмів  $i_3(t)$  та  $i_5(t)$  через нуль, то в діючих значеннях  $I_{ph3}$  та  $I_{ph5}$  не будуть враховані струми 3-ї та 5-ї гармонік, відповідно. Тоді часові залежності  $I_{ph3}(t)$  й  $I_{ph5}(t)$  будуть змінюватися в часі від максимального  $I_{ph3max}$  та  $I_{ph5max}$  до мінімального  $I_{ph3min}$  та  $I_{ph5min}$  значень з кожним кроком ковзання  $\Delta t_j$  (рис. 2). Вочевидь, що в мінімальних значеннях  $I_{ph3min}$  та  $I_{ph5min}$  не будуть враховані струми відповідних гармонік.

Розглянемо складові струмів  $I_{ph3min}$  та  $I_{ph5min}$ . Під час обчислення значення  $I_{ph5}$  використовують миттєві значення струму  $i_{j5}$ , отримані з частотою дискретизації  $f_{d5}$ , яка більше ніж втричі більша за частоту 3-ї та 1-ї гармонік (150 і 50 Гц, відповідно). В цій частині вимоги [10] виконуються і діючі значення  $I_1$  та  $I_3$  струмів 1-ї та 3-ї гармонік відповідно будуть визначені без спотворень в будь-який момент часу, а також моменти часу, що відповідають значенню  $I_{ph5min}$ .

З урахуванням викладеного справедливе рівняння:

$$I_{ph5min} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} . \quad (1)$$

Величину  $I_{ph}$  з урахуванням 1-ї, 3-ї та 5-ї гармонік струму визначають як:

$$I_{ph} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \sum_{j=1}^p i_j^2 \Delta t_j} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} , \quad (2)$$

де  $p = T_1/\Delta t_j$ ;  $T_1$  – період зміни 1-ї основної гармоніки струму;  $\Delta t_j = 1/f_d$ .

Перетворення рівнянь (1) і (2) дає вираз для визначення діючого значення 5-ї гармоніки:

$$I_5 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_{ph5min}^2} . \quad (3)$$

Під час обчислення значення  $I_{ph3}$  використовують миттєві значення струму  $i_{j3}$ , отримані з частотою дискретизації  $f_{d3}$  (рис. 1). Вимоги [10] виконуються тільки для значення  $I_1$ . Відповідно складова  $I_{ph3min}$  містить діюче значення струму 1-ї гармоніки, визначене без спотворень, та частину струму 5-ї гармоніки, відновлену за дискретними значеннями  $i_{j3}$ , які відповідають моментам часу протікання струму  $i_3(t)$  через нуль. Відновлена за значеннями  $i_{j3}$  синусоида струму  $i_{5(3)}(t)$  змінюється з частотою 1-ї гармоніки, і, як показали розрахунки, діюче значення  $I_{5(3)}$  синусоїди  $i_{5(3)}(t)$  дорівнює  $I_5$ .

З урахуванням викладеного для  $I_{ph3min}$  отримаємо вираз:

$$I_{ph3min} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} . \quad (4)$$

Отже, якщо визначена величина  $I_5$ , то величину  $I_1$  визначають як:

$$I_1 = \sqrt{I_{\text{ph3min}}^2 - I_5^2}. \quad (5)$$

Величину  $I_3$  визначають з урахуванням рівняння (2):

$$I_3 = \sqrt{I_{\text{ph}}^2 - I_5^2 - I_1^2}. \quad (6)$$

Після визначення діючих значень  $I_1$ ,  $I_3$ ,  $I_5$  струмів у кожній фазі необхідно визначити величину  $I'_N$  за умови цілісності  $N$ -провідника, а відповідно й рівності кутів між векторами фазних струмів 1-ї та 5-ї гармонік:  $\dot{I}_{1(a,b,c)}$  й  $\dot{I}_{5(a,b,c)}$ , відповідно. У неушкодженому  $N$ -провіднику струми 3-ї гармоніки всіх фаз  $I_{3(a,b,c)}$  синфазні, тому величину  $I'_N$  визначають як сукупність геометричних сум струмів 1-ї та 5-ї гармонік кожної фази  $a, b, c$  та арифметичної суми струмів 3-ї гармоніки:

$$I'_N = \sqrt{\left(\sum_{a,b,c} \dot{I}_{N1}\right)^2 + \left(\sum_{a,b,c} I_{N3}\right)^2 + \left(\sum_{a,b,c} \dot{I}_{N5}\right)^2}. \quad (7)$$

Критерієм обриву нейтрального провідника в будь-якому місці розгалуженого електричного кола є невідповідність очікуваного  $I'_N$  і фактичного  $I_N$  значень струму в  $N$ -провіднику. Фактичне значення струму в  $N$ -провіднику може бути визначене або прямим вимірюванням за допомогою датчика струму, або непрямим способом, знаходженням дискретних значень струму в  $N$ -провіднику  $i_{jN}$  як суми дискретних значень фазних струмів  $i_{j(a,b,c)}$  з урахуванням їх знака і подальшого інтегрування квадратів отриманих дискретних значень:

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{T_1} \sum_{j=1}^p i_{jN}^2 \Delta t_j} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \sum_{j=1}^p (i_{ja} + i_{jb} + i_{jc})^2 \Delta t_j}. \quad (8)$$

Останній спосіб визначення  $I_N$  доцільніше використовувати під час реалізації захисту від обриву  $N$ -провідника в мікропроцесорному розчіплювачі триполюсного автоматичного вимикача.

Блок-схема алгоритму функціонування мікропроцесорного розчіплювача автоматичного вимикача у разі захисту електричної мережі від обриву  $N$ -провідника, наведена на рис. 3.

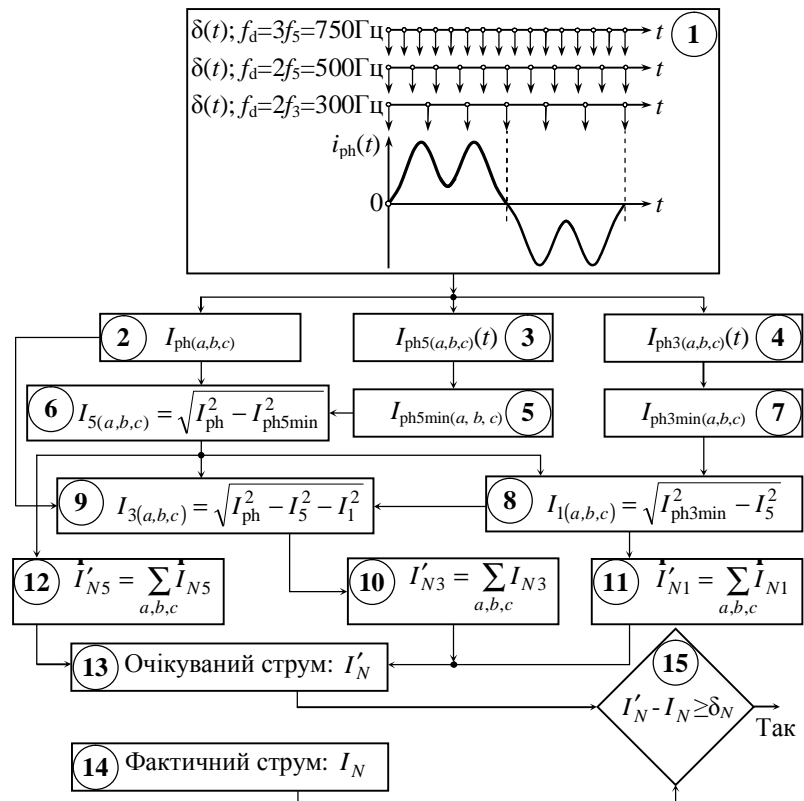


Рис. 3. Блок-схема функціонування мікропроцесорного пристрою захисту

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб. У модулі 1 вихідні аналогові залежності фазних струмів  $i_{ph(a,b,c)}(t)$  в кожній фазі  $a, b, c$  перетворюють в дискретні залежності з частотами дискретизації:  $f_{d3} = 300$  Гц,  $f_{d5} = 500$  Гц,  $f_d \geq 750$  Гц. У модулі 2 в режимі ковзання шляхом заміщення використаних дискретних значень новими, з частотою  $f_d \geq 750$  Гц визначають залежність зміни в часі значень  $I_{ph(a,b,c)}(t)$  в кожній фазі  $a, b, c$ . У модулі 3 за дискретними значеннями  $i_{j5}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{d5}$ , в режимі ковзання з часовим інтервалом  $\Delta t_j$  визначають залежності зміни в часі діючих значень  $I_{ph5(a,b,c)}(t)$  5-ї гармоніки струму в кожній фазі  $a, b, c$ . У модулі 4 за дискретними значеннями  $i_{j3}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{d3}$ , в режимі ковзання з часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_j$  визначають залежності зміни в часі діючих значень  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  3-ї гармоніки струму в кожній фазі  $a, b, c$ . У модулі 5 визначають мінімальне значення  $I_{ph5min}$  функції  $I_{ph5}(t)$ . У модулі 6 визначають значення  $I_5$  з виразу (3). У модулі 7 визначають мінімальне значення  $I_{ph3min}$  функції  $I_{ph3}(t)$ . У модулі 8 визначають значення  $I_3$  з виразу (5). У модулі 9 визначають значення  $I_3$  з виразу (6). У модулі 10 визначають частку  $I'_{N3}$  струму  $I'_N$ , яка створюється струмами 3-ї гармоніки, як арифметичну суму струмів  $I_{3(a,b,c)}$  у фазах  $a, b, c$ : 
$$I'_{N3} = \sum_{a,b,c} I_{N3} = I_{3a} + I_{3b} + I_{3c}.$$
 У модулі 11 визначають частку  $I'_{N1}$  струму  $I'_N$ , яка створюється струмами 1-ї гармоніки, як геометричну суму векторів струмів  $\dot{I}_{1(a,b,c)}$  у фазах  $a, b, c$ : 
$$\dot{I}'_{N1} = \sum_{a,b,c} \dot{I}_{N1} = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1b} + \dot{I}_{1c}.$$
 У модулі 12 визначають частку  $I'_{N5}$  струму  $I'_N$ , яка створюється струмами 5-ї гармоніки, як геометричну суму векторів струмів  $\dot{I}_{5(a,b,c)}$  у фазах  $a, b, c$ : 
$$\dot{I}'_{N5} = \sum_{a,b,c} \dot{I}_{N5} = \dot{I}_{5a} + \dot{I}_{5b} + \dot{I}_{5c}.$$
 У модулі 13 визначають величину очікуваного струму в  $N$ -провіднику  $I'_N$  з виразу (7). У модулі 14 визначають фактичне значення струму в  $N$ -провіднику  $I_N$  залежно від конкретного виконання мікропроцесорного пристрою одним із способів: за допомогою датчика струму, встановленого в  $N$ -провіднику, або шляхом обчислення миттєвих значень струму в  $N$ -провіднику  $i_{jN}$  як суми миттєвих значень струмів у фазах  $i_{jph(a,b,c)}$  з урахуванням знака. У логічному модулі 15 порівнюють величини очікуваного  $I'_N$  і фактичного  $I_N$  струмів в  $N$ -провіднику, і якщо різниця між ними виявиться більшою за задане значення  $\delta_N$  ( $I'_N - I_N \geq \delta_N$ ), виробляється сигнал «Так» на спрацьовування захисту.

### Висновки

Теоретично обґрунтована необхідність формування критерію спрацьовування захисту від обриву нейтрального провідника на підставі гармонійного аналізу спектра фазних струмів, який здійснюється за допомогою простих формул, що потребують зменшеного ресурсу мікропроцесора.

Спрощення спектрального аналізу гармонійного складу фазних струмів у пристроях релейного захисту прискорює швидкодію захисту мережі з нелінійними навантаженнями, а також дозволяє гармонійно поєднувати його з математичним апаратом побудови інших видів мережевих захистів.

Розроблено алгоритм функціонування мікропроцесорного розчіплювача автоматичних вимикачів при обриві нейтрального провідника в будь-якому місці розгалуженої електричної мережі з розподіленим навантаженням, в якому за наявності нелінійних спотворень спектральний аналіз гармонійного складу фазних струмів здійснюють за рахунок широко використовуваних в пристроях релейного захисту математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень струму.

1. Selkirk D. *The dangers of grounding resistor failure* / D. Selkirk, M. Savostianik, K. Crawford // *IEEE Industry Applications Magazine*. – 2010. – Vol. 16. – Iss. 5. – P. 53–58. 2. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий* / И.В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с. 3. Райнин В.Е. *Выключатели с новыми защитными характеристиками для повышения качества защиты электрических сетей низкого напряжения* /

В.Е. Райнин, А.С. Кобозев // *Электротехника*. – 2010. – № 11. – С. 18–24. 4. Сосков А.Г. Модернизация системы защиты городских электрических сетей 0,4 кВ за счет использования микропроцессорной техники в расцепителях выключателей / А.Г.Сосков, А.С. Кобозев // *Світлотехніка та електроенергетика*. – 2010. – № 2. – С. 53–63. 5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие / А.Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с. 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. 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. 8. Серета О.Г. Підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених коротких замикань / О.Г. Серета, О.С. Кобозев // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2013. – № 09 (85). – С. 57–64. – 9. Кобозев О.С. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі / Кобозев О.С., Серета О.Г., Моргун В.В. // *Электротехника і електро механіка*. – 2012. – № 5. – С. 21–26. 10. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87; введ. 1999-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – III, 32 с.

УДК 621.313

М.Тверд, Л.С. Копчак, В.Б. Цяпа  
Фірма “ZE TWERD”, Торунь, Польща  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕПК

## ЗАСТОСУВАННЯ ЧОТИРИКВАДРАНТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРСТАТНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

© Тверд М., Копчак Л.С., Цяпа В.Б., 2014

Запропоновано для живлення перетворювачів частоти електроприводів верстатів, які працюють у режимах інтенсивного генераторного гальмування, застосовувати перетворювачі MSI на IGBT і наведено результати їх лабораторних досліджень.

*Ключові слова: металорізальний верстат, електропривод, чотириквadrantний перетворювач частоти.*

For a supply of frequency converters for electric machines, working as intense generator braking it has been suggested to apply a MSI IGBT converter and the results of laboratory tests have been provided.

*Key words: metal-cutting machine, electrical drive, fourquadrant frequency converter.*

### Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими завданнями

Застосуванням сучасних автоматизованих систем керування електроприводами металорізальних верстатів підвищує термін роботи різального інструмента, у 2–4 рази збільшує точність оброблення, значно підвищує продуктивність, оскільки оброблення металу відбувається за максимально допустимих силових режимів.