



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **105560** (13) **C2**  
(51) МПК (2014.01)  
**H02H 3/08** (2006.01)  
**H02H 7/00**  
**H01H 73/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

- (21) Номер заявки: **а 2012 10691**  
(22) Дата подання заявки: **12.09.2012**  
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **26.05.2014**  
(41) Публікація відомостей про заявку: **25.04.2013, Бюл.№ 8**  
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **26.05.2014, Бюл.№ 10**  
(72) Винахідник(и):  
**Кобозєв Олександр Сергійович (UA),  
Середа Олександр Григорійович (UA),  
Моргун Вадим Віталійович (UA)**  
(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),  
Моргун Вадим Віталійович,  
вул. Тобольська, 46-в, кв. 26, м. Харків-072,  
61072 (UA)**

- (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:  
Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. – С. 144-146.  
Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля [Интернет-публікація], URL: <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html> (збережено WayBack Machine 25.01.2012, знайдено 19.03.2014).  
Минин Г.П. Несинусоидальные токи и их измерение. - М.: Энергия, 1979. – С. 1-22.  
ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. введен в действие постановлением Госстандарта РФ от 28.08.1998 г. № 338.  
UA 81981 C2; 25.02.2008  
EP 0561210 B1; 27.11.1996  
RU 2168824 C1; 10.06.2001  
UA 74452 C2; 15.12.2006  
UA 86078 C2; 25.03.2009

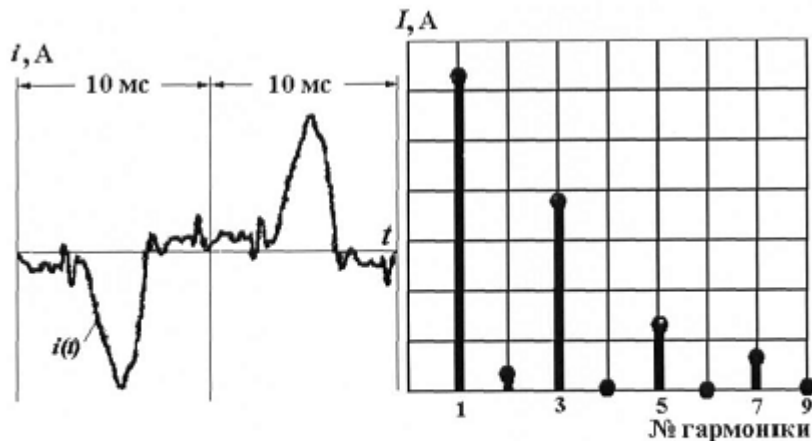
**(54) СПОСІБ ЗАХИСТУ ВІД ОБРИВУ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВІДНИКА В БУДЬ-ЯКОМУ МІСЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З РОЗПОДІЛЕНИМ ВЗДОВЖ ЛІНІЇ НАВАНТАЖЕННЯМ**

**(57) Реферат:**

Винахід належить до способів релейного захисту електричних мереж, зокрема мереж електропостачання з нелінійними видами навантажень, від обриву нейтрального провідника на будь-якій ділянці довгої лінії. Спосіб захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням полягає в тому, що визначають очікуваний струм в нейтральному провіднику враховують гармонійний склад фазних струмів, для чого за допомогою фільтра вилучають 7-му гармоніку струму, при цьому, в ковзному режимі з часовим інтервалом ковзання на порядок або більше меншим за період зміни струму 5-ої гармоніки, визначають залежність в часі діючих значень струмів у всіх трьох фазах за дискретними значеннями струму, що відповідають частоті дискретизації, що дорівнює подвійній частоті струму 5-ої гармоніки, потім визначають мінімальне значення струму, визначають діючі значення струмів 5-ої гармоніки в кожній фазі, в ковзному режимі з тим же інтервалом ковзання визначають залежність в часі діючих значень струмів у всіх трьох фазах за дискретними значеннями струму, що відповідають частоті дискретизації, що дорівнює

UA 105560 C2

подвійній частоті струму 3-ої гармоніки, потім визначають мінімальне значення  $I_{\phi 3(\min)}$  функції  $I_{\phi 3}(t)$ , після чого визначають діючі значення струмів 1-ої гармоніки в кожній фазі, визначають діюче значення струму 3-ої гармоніки з виразу, після чого визначають геометричні суми зрушених між собою на кут  $120^\circ$  векторів струмів 1-ої та 5-ої гармонік від усіх трьох фаз, знаходять арифметичну суму струмів 3-ої гармоніки, після чого визначають величину очікуваного струму в нейтральному провіднику й порівнюють з фактичним значенням струму в нейтральному провіднику  $i$ , якщо різниця між величинами очікуваного й фактичного струму в нейтральному провіднику більша за задане значення  $\delta_N$ , виробляється сигнал на спрацьовування захисту. Технічним результатом, що досягається даним винаходом, є підвищення швидкодії захисту електричної мережі з нелінійними навантаженнями за рахунок спрощеного спектрального аналізу гармонійного складу фазних струмів.



**Форма залежності струму в часі  $i(t)$  та амплітудний спектр гармонік струму, що споживає системний блок ПК**

**Фіг. 1**

Винахід належить до способів релейного захисту електричних мереж, зокрема мереж електропостачання 0,4 кВ з нелінійними видами навантажень, від обриву нейтрального провідника (N-провідника) на будь-якій ділянці довгої лінії. Необхідність визначення факту обриву N-провідника обумовлена тим, що за наявності несиметрії значень фазних струмів і обриву N-провідника можливі небезпечні перенапруги в однофазних споживачів внаслідок перекосу фаз.

Відоме технічне рішення [1] з визначення факту обриву N-провідника, яке є найближчим аналогом до винаходу, що заявляється. Суть відомого технічного рішення [1] полягає в тому, що здійснюють порівняння очікуваного значення струму в N-провіднику  $I'_N$ , яке визначають як

геометричну суму зрушених на  $120^\circ$  векторів фазних струмів  $\vec{I}_\phi$ , з фактичним значенням струму в N-провіднику  $I_N$ . По суті, здійснюють порівняння "штатного" й аварійного образів електричного кола. При цьому під фізичним еквівалентом "штатного" образу розуміють очікуваний струм в нейтральному провіднику  $I'_N$ , а, відповідно, під аварійним образом - фактичний струм  $I_N$  в N-провіднику при його обриві в будь-якому місці розгалуженої електричної мережі.

В неушкодженій електроустановці кути між векторами фазних струмів  $\vec{I}_\phi$  практично дорівнюють  $120^\circ$  навіть за наявності несиметрії навантаження. У зв'язку з цим при лінійних навантаженнях в електричному колі, коли фазні струми змінюються за синусоїдою, визначення величини очікуваного струму  $I'_N$  в N-провіднику не становить труднощів. Проте при нелінійних навантаженнях визначення очікуваного струму  $I'_N$ , як струму розбалансу фазних навантажень, некоректне, оскільки навіть в симетричному режимі в N-провіднику підсумовуватимуться 3-я та кратні нею гармоніки фазних струмів. Тому для електричних мереж з нелінійними навантаженнями для формування "штатного" образу кола спочатку потрібно провести гармонійний аналіз спектру фазних струмів. Лише після цього, можливо, коректно визначити величину очікуваного струму  $I'_N$  в N-провіднику, а саме, з урахуванням особливостей струмів різних гармонік формувати струм в N-провіднику.

Більша частина комп'ютерного та офісного устаткування є нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення в мережі живлення. Крива зміни струму в часі містить увесь спектр непарних гармонік, з яких найбільш значущими, з точки зору побудови мережових захистів, є перша (основна) та дві вищі - третя та п'ята. Тому в разі нелінійних навантажень при визначенні очікуваного струму  $I'_N$  в N-провіднику, окрім геометричної суми векторів струму основної 1-ої гармоніки всіх трьох фаз (a, b, c) необхідно враховувати вклад 3-ої та 5-ої гармонік. Таким чином, з'являється необхідність в гармонійному аналізі спектра фазних струмів.

Для вирішення прикладних завдань визначення гармонійного спектра сигналу широко використовується дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Проте для його реалізації потрібний значний об'єм обчислень, оскільки визначення параметрів (амплітуди й фази) навіть однієї гармоніки призводить до необхідності розрахунку повного спектра. В зв'язку з цим розроблені альтернативні методи, що дозволяють визначити параметри окремих гармонік швидше, наприклад алгоритм Герцеля [2]. При його використанні за рахунок реалізації ДПФ у вигляді рекурсивного фільтра (фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою) помітно зменшується кількість математичних операцій. Проте і в цьому випадку для моніторингу гармонійного складу спектра несинусоїдального струму потрібна відносно висока швидкодія процесора. Вживання ж модифікованого алгоритму Герцеля [3] дозволяє провести динамічний перерахунок спектральних відліків на кожному такті дискретизації й тим самим зменшити об'єм і час обчислень за рахунок використання параметрів гармонік, знайдених на попередньому часовому кроці ковзання та їх перерахунку на наступному часовому кроці.

Вищезгадані й аналогічні [2] методи спектрального аналізу струмів є універсальними й можуть застосовуватися для вирішення широкого кола проблем, а не лише для визначення трьох найбільш низьких гармонік струму. Проте недоліком використання будь-яких з відомих універсальних методів спектрального аналізу різного вигляду сигналів є те, що вони виявляються надмірно складними й надлишковими для застосування їх в пристроях релейного захисту.

Як показав аналіз, результати якого наводяться нижче, вирішення конкретної задачі визначення гармонійного спектра фазних струмів з реальними нелінійними фазними навантаженнями є таким окремим випадком проблеми спектрального аналізу сигналу, для якого можуть бути використані простіші математичні операції. Розглянемо, чим окремий випадок

спектрального аналізу, яким є спектральний аналіз фазних струмів для побудови захисту від обриву N-провідника, відрізняється від загальних, універсальних.

5 Як вже відзначалося, для побудови захисту від обриву N-провідника найбільш значущими є три нижні гармоніки струму (1, 3 та 5-а). Така порівняно мала кількість гармонік сигналу, яку потрібно визначити, може вважатися першою обмежувальною умовою для розробки альтернативного, простішого способу спектрального аналізу. Другою обмежувальною умовою даного окремого випадку спектрального аналізу, що дозволяє його спростити, слід вважати те, що форма фазних струмів при реальних нелінійних навантаженнях близька до форми періодичної функції, симетричної відносно початку координат. З літератури, зокрема [4], витікає, що, якщо крива несинусоїдального струму симетрична відносно початку координат, то всі гармонійні складові такого струму мають однакову початкову фазу  $\psi$ , яка дорівнює нулю ( $\psi = 0$ ).

15 Розглянемо, наскільки форми струмів при різних типах нелінійного навантаження близькі до функцій, симетричних відносно початку координат. Проаналізуємо з цієї точки зору форми струмів, що утворюються комп'ютерним і тиристорним навантаженнями, які є основним чинником формування несинусоїдального струму.

20 На фіг. 1-4 наведені залежності струму в часі  $i(t)$  та гармонійні спектри струмів, що споживаються різними видами нелінійних навантажень. На фіг. 1 та 2 наведені, узяті з літературних джерел [5] та [6], залежності струму в часі  $i(t)$ , а також амплітудний спектр гармонік струму, що споживається системним блоком персонального комп'ютера (фіг. 1) та SCR тиристорним перетворювачем (фіг. 2). Аналогічні залежності струму в часі  $i(t)$  й амплітудний спектр гармонік струму, що споживається джерелом живлення 208 В та джерелом безперервного живлення (ДБЖ) для персонального комп'ютера (ПК), узяті з [7], наведені на фіг. 3 та 4.

25 З наведених на фіг. 1-4 залежностей можна зробити наступні висновки:

не зважаючи на істотну відмінність форм кривих струму споживання різних нелінійних навантажень, загальним для всіх часових залежностей струму  $i(t)$  є те, що, з певними припущеннями, коректними для вирішення завдань побудови мережевих захистів, всі вони є функціями, симетричними відносно початку координат;

30 в фазних струмах, в яких підсумовуються струми всіх нелінійних навантажень, найбільш значущими є перші три непарні гармоніки струму (1, 3 й 5-а), а 9-а гармоніка практично відсутня; внаслідок симетрії залежностей  $i(t)$  відносно початку координат залежності в часі струмів усіх гармонік  $i_1(t)$ ,  $i_3(t)$  й  $i_5(t)$  в усіх фазах (а, б, с) мають однаковий початковий кут  $\psi$ , що дорівнює нулю:  $\psi = 0$ , іншими словами, в усіх фазах вказані залежності проходять через своє нульове значення в один і той же момент часу;

35 вектор струму 5-ої гармоніки  $\bar{I}_5$  має протилежний напрям обертання відносно напрямку обертання вектора струму 1-ої гармоніки  $\bar{I}_1$ , оскільки лише в цьому випадку може бути забезпечений однаковий початковий кут, що дорівнює нулю ( $\psi = 0$ ) для гармонік струму в усіх фазах.

40 Таким чином, щоб визначити гармонійний спектр фазних струмів для організації релейного захисту мереж електропостачання 0,4 кВ з реальними нелінійними навантаженнями, достатньо обмежитися трьома нижніми непарними гармоніками (1, 3 та 5-ою). При цьому зазначені гармоніки мають однакове нульове початкове фазове зрушення  $\psi = 0$ , а напрям обертання вектора  $\bar{I}_5$  струму 5-ої гармоніки протилежний напрямку обертання вектора  $\bar{I}_1$  струму 1-ої гармоніки.

45 В основу винаходу поставлена задача розробки та реалізації у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою такого способу захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням, в якому спектральний аналіз гармонійного складу фазних струмів здійснюють за рахунок простих і широко використовуваних в пристроях захисту, зокрема в мікропроцесорних розчеплювачах автоматичних вимикачів, математичних операцій інтегрування квадратів оцифрованих миттєвих значень струму, що спрощує спектральний аналіз гармонійного складу фазних струмів в пристроях релейного захисту, прискорює швидкодію захисту мережі з нелінійними навантаженнями, а також дозволяє найбільш гармонійно поєднувати його з математичним апаратом для побудови інших видів мережевих захистів.

Поставлена задача вирішується в способі захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням, в якому

визначають діючі значення струмів  $I_{\phi}$  всіх трьох фаз (a, b, c) методом інтегрування квадратів дискретних значень струму  $i_i$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_d$  вихідної аналогової залежності струму в часі  $i(t)$  в три або більше разів більшої частоти 5-ої гармоніки фазного струму  $f_5$  ( $f_d \geq 3f_5$ ), потім визначають величину очікуваного струму в нейтральному провіднику  $I'_N$

- 5 як геометричну суму зрушених між собою на кут  $120^\circ$  векторів  $\vec{I}_{\phi}$  струмів всіх трьох фаз (a, b, c) та порівнюють її з фактичним значенням струму в нейтральному провіднику  $I_N$ , за рахунок того, що при визначенні очікуваного струму в нейтральному провіднику враховують гармонійний склад фазних струмів, для чого за допомогою фільтра вилучають 7-му гармоніку струму, при цьому, в ковзному режимі з часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_{ck}$  на порядок або більше меншим за
- 10 період зміни струму 5-ої гармоніки ( $\Delta t_{ck} \leq T_5/10$ ), визначають залежність в часі діючих значень  $I_{\phi 5}(t)$  струмів у всіх трьох фазах (a, b, c) за дискретними значеннями струму  $i_{i5}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{d5}$ , що дорівнює подвійній частоті струму 5-ої гармоніки ( $f_{d5} = 2f_5$ ), потім визначають мінімальне значення струму  $I_{\phi 5(\min)}$  функції  $I_{\phi 5}(t)$ , після чого визначають діючі значення струмів 5-ої гармоніки  $I_5$  в кожній фазі (a, b, c) з виразу  $I_5 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_{\phi 5(\min)}^2}$ , після чого, в
- 15 ковзному режимі з тим же інтервалом ковзання  $\Delta t_{ck}$  визначають залежність в часі діючих значень  $I_{\phi 3}(t)$  струмів у всіх трьох фазах (a, b, c) за дискретними значеннями струму  $i_{i3}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{d3}$ , що дорівнює подвійній частоті струму 3-ої гармоніки ( $f_{d3} = 2f_3$ ), потім визначають мінімальне значення  $I_{\phi 3(\min)}$  функції  $I_{\phi 3}(t)$ , після чого визначають діючі значення струмів 1-ої гармоніки  $I_1$  в кожній фазі (a, b, c) з виразу  $I_1 = I_{\phi 3(\min)} - I_5$ , потім визначають
- 20 діюче значення струму 3-ої гармоніки з виразу  $I_3 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_1^2 - I_5^2}$ , після чого визначають геометричні суми зрушених між собою на кут  $120^\circ$  векторів струмів 1-ої ( $\vec{I}_{N1}$ ) та 5-ої ( $\vec{I}_{N5}$ ) гармонік від усіх трьох фаз (a, b, c), потім знаходять арифметичну суму струмів 3-ої гармоніки ( $I_{N3}$ ), після чого визначають величину очікуваного струму в нейтральному провіднику з виразу  $I'_N = \sqrt{I_{N1}^2 + I_{N3}^2 + I_{N5}^2}$  й порівнюють з фактичним значенням струму в нейтральному провіднику  $I_N$
- 25 і, якщо різниця між величинами очікуваного й фактичного струму в нейтральному провіднику більша за задане значення  $\delta_N$  ( $I'_N - I_N \geq \delta_N$ ), виробляється сигнал на спрацьовування захисту.

- Саме за рахунок того, що при визначенні очікуваного струму в нейтральному провіднику враховують гармонійний склад фазних струмів, для чого за допомогою фільтра вилучають 7-му гармоніку струму, при цьому, в ковзному режимі з часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_{ck}$  на порядок або більше меншим за період зміни струму 5-ої гармоніки ( $\Delta t_{ck} \leq T_5/10$ ), визначають залежність в часі діючих значень  $I_{\phi 5}(t)$  струмів у всіх трьох фазах (a, b, c) за дискретними значеннями струму  $i_{i5}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{d5}$ , що дорівнює подвійній частоті струму 5-ої гармоніки ( $f_{d5} = 2f_5$ ), потім визначають мінімальне значення струму  $I_{\phi 5(\min)}$  функції  $I_{\phi 5}(t)$ , після чого визначають діючі значення струмів 5-ої гармоніки  $I_5$  в кожній фазі (a, b, c) з виразу
- 30  $I_5 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_{\phi 5(\min)}^2}$ , після чого, в ковзному режимі з тим же інтервалом ковзання  $\Delta t_{ck}$  визначають залежність в часі діючих значень  $I_{\phi 3}(t)$  струмів у всіх трьох фазах (a, b, c) за дискретними значеннями струму  $i_{i3}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{d3}$ , що дорівнює подвійній частоті струму 3-ої гармоніки ( $f_{d3} = 2f_3$ ), потім визначають мінімальне значення  $I_{\phi 3(\min)}$  функції  $I_{\phi 3}(t)$ , після чого визначають діючі значення струмів 1-ої гармоніки  $I_1$  в кожній фазі (a, b, c) з виразу
- 35  $I_1 = I_{\phi 3(\min)} - I_5$ , потім визначають діюче значення струму 3-ої гармоніки з виразу  $I_3 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_1^2 - I_5^2}$ , після чого визначають геометричні суми зрушених між собою на кут  $120^\circ$  векторів струмів 1-ої ( $\vec{I}_{N1}$ ) та 5-ої ( $\vec{I}_{N5}$ ) гармонік від усіх трьох фаз (a, b, c), потім знаходять арифметичну суму струмів 3-ої гармоніки ( $I_{N3}$ ), після чого визначають величину очікуваного струму в нейтральному провіднику з виразу  $I'_N = \sqrt{I_{N1}^2 + I_{N3}^2 + I_{N5}^2}$  й порівнюють з фактичним значенням струму в
- 40 нейтральному провіднику  $I_N$  і, якщо різниця між величинами очікуваного й фактичного струму в нейтральному провіднику більша за задане значення  $\delta_N$  ( $I'_N - I_N \geq \delta_N$ ), виробляється сигнал на спрацьовування захисту і забезпечується при реалізації в мікропроцесорних пристроях захисту від обриву N-провідника використання простих математичних операцій інтегрування квадратів оцифрованих миттєвих значень струму, характерних для побудови й інших видів мережевих
- 45 захистів.
- 50

Дійсно, математичні операції інтегрування квадратів дискретних значень струму є нескладними та необхідними для побудови струмових захистів електричних кіл при коротких замиканнях (КЗ), у тому числі при струмах віддалених КЗ. Це пояснюється тим, що, по-перше, всі струмові уставки  $I_{sd}$  задаються саме діючими значеннями струму, а тому необхідно безперервно проводити моніторинг саме діючих значень струму у фазах  $I_{\phi}$ . По-друге, для ідентифікації струму віддаленого КЗ необхідно безперервно проводити моніторинг квадратів дискретних значень струмів у фазах для визначення екстремальних значень силової функції кола  $S(t)$ , яка є залежністю в часі суми квадратів дискретних значень струмів у фазах. Детальніше про силову функцію й необхідність визначення екстремальних значень ( $S_{min}$  і  $S_{max}$ ) силової функції викладено в [8]. Слід зазначити, що для забезпечення необхідної точності визначення екстремальних значень силової функції кола  $S(t)$ , яка, по суті, є квадратичною функцією, потрібен досить малий часовий інтервал ковзання  $\Delta t_{ck}$ . Тому в мікропроцесорному пристрої мережевого захисту, в якому реалізують як струмові захисти, так і захист від обриву нейтрального провідника, математичні операції з моніторингу діючих значень фазного струму, з досить малим часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_{ck}$  і частотою дискретизації  $f_d$  вихідної аналогової залежності  $i(t)$ , в 3 рази більшої частоти найвищої значущої гармоніки струму, наприклад, 5-ої гармоніки ( $f_d \geq 3f_5$ ) є спільними. А це означає, що для реалізації захисту від обриву N-провідника додатково потрібен моніторинг залежності зміни в часі діючих значень фазних струмів  $I_{\phi 5}(t)$  та  $I_{\phi 3}(t)$  для частот дискретизації  $f_{d5}$  й  $f_{d3}$ , відповідно, визначення мінімальних значень  $I_{\phi 5(min)}$  й  $I_{\phi 3(min)}$  та проведення трьох нескладних алгебраїчних операцій.

Суть способу захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням, що заявляється, пояснюється ілюстраціями, наведеними на фіг. 5-7.

На фіг. 5 наведені залежності зміни в часі синусоїдальних струмів 1-ої, 3-ої та 5-ої гармонік - гармонік  $i_1(t)$ ,  $i_3(t)$ ,  $i_5(t)$  відповідно, а також залежність зміни в часі несинусоїдального струму  $i(t)$ , який є сумою струмів трьох вказаних вище гармонік.

На фіг. 6 наведені часові залежності діючого значення фазного струму  $I_{\phi}$ , обчисленого за дискретними значеннями, отриманими при різних частотах дискретизації.

На фіг. 7 наведена блок-схема алгоритму, що ілюструє функціонування мікропроцесорного пристрою мережевого захисту.

Наведена на фіг. 5 залежність  $i(t)$  за своїм характером і гармонійним складом відповідає фазним струмам при нелінійних навантаженнях, розглянутим раніше (фіг. 1-4). Дійсно, залежність  $i(t)$  містить в собі три нижні непарні гармоніки (1, 3 та 5-ту), початкові фази  $\psi$  яких однакові й дорівнюють нулю ( $\psi = 0$ ), а напрям обертання вектора струму 5-ої гармоніки направлений в протилежний бік відносно напрямку обертання вектора струму 1-ої гармоніки.

Покажемо, яким чином для даного окремого випадку зміни в часі несинусоїдального струму, можливо визначити гармонійний спектр за рахунок використання різних частот дискретизації аналогової залежності  $i(t)$ .

Як відомо, при цифровій обробці сигналів, необхідно аналоговий сигнал перетворити в дискретний. Таке перетворення здійснюють за рахунок множення вихідної аналогової функції, наприклад функції струму  $i(t)$ , на гратчасту  $\delta$ -функцію, яка має дійсні значення лише в моменти часу, через кожен часовий інтервал дискретизації  $\Delta t_d$ . Чим вища частота дискретизації  $f_d$ , тим менший часовий інтервал дискретизації, оскільки ці величини жорстко зв'язані співвідношенням:  $\Delta t_d = 1/f_d$ .

Очевидно, що точно відновити вихідну функцію  $i(t)$  можливо лише в тому випадку, якщо інтервал  $\Delta t_d$  буде досить малим, а частота дискретизації  $f_d$ , навпаки, буде досить великою. Коли тривалість періодичного сигналу прагне до нескінченності, мінімальне значення частоти дискретизації  $f_d$  регламентується теоремою Котельникова [9]. Частота дискретизації  $f_d$  має бути більш ніж в 2 рази більшою частоти  $f_k$  найбільш високої k-ої гармоніки вихідного сигналу. Якщо сигналом є крива струму, для якого тривалість періодичного сигналу невелика й дорівнює періоду зміни 1-ої гармоніки струму  $T_1 = 20$  мс, то регламентуючим документом для мінімальної припустимої частоти дискретизації  $f_d$  є Держстандарт [10]. Згідно до вимог [10] мінімальна частота дискретизації  $f_d$  має дорівнювати або бути більшою трикратної частоти найвищої гармоніки  $f_k$ . Для вибраного випадку зміни фазного струму з трьома непарними гармоніками, коли 5-та гармоніка є найвищою, вимога до частоти дискретизації  $f_d$  виражається наступною нерівністю:  $f_d \geq 3f_5$ , де  $f_5$  - частота 5-ої гармоніки.

Суть вказаної вимоги до частоти дискретизації  $f_d$  можна пояснити, скориставшись фіг. 5. Якщо вихідна аналогова залежність  $i(t)$  множиться на гратчасту  $\delta$ -функцію з частотою дискретизації  $f_d = 3f_5 = 750$  Гц, то діюче значення  $I_{\phi}$  вказаної функції, обчислене по отриманих дискретних значеннях струму  $i_j$ , завжди буде величиною постійною  $I_{\phi} = \text{const}$ , незалежно від

початкової фази вихідної функції. На фіг. 5 показана часова залежність споживаного струму  $i(t)$ , початкова фаза якого дорівнює  $\psi_k=0$ . Проте і при інших значеннях початкової фази, відмінних від нуля ( $\psi_k \neq 0$ ), величина діючого значення струму буде незмінною  $I_\phi = \text{const}$ . Це означає, що якщо проводити обчислення діючого значення  $I_\phi$  струму в режимі ковзання, через кожен часовий інтервал ковзання  $\Delta t_{\text{ок}}$ , то часова залежність величини  $I_\phi(t)$  матиме вигляд прямої лінії, паралельної осі часу  $t$ . На фіг. 6 наведені часові залежності діючого значення фазного струму  $I_\phi$ , обчисленого за дискретними значеннями, отриманими при різних частотах дискретизації. Як випливає з фіг. 6, залежність  $I_\phi(t)$  для частоти дискретизації  $f_d=3f_5=750$  Гц, має вигляд прямої лінії, паралельної осі часу  $t$ .

Далі проаналізуємо характер зміни залежності  $I_\phi(t)$  для наступних частот дискретизації  $f_{d5}=2f_5=500$  Гц та  $f_{d3}=2f_3=300$  Гц.

Якщо звернемося до фіг. 5, то, очевидно, що у момент переходу 5-ої та 3-ої гармонік через нуль їх доля в миттєвому значенні кривої струму  $i(t)$  буде відсутня. Тому, якщо точки перетинання гратчастої  $\delta$ -функції з кривою залежності струму  $i(t)$  від часу будуть у момент проходження струмів  $i_5(t)$  й  $i_3(t)$  (5-ої та 3-ої гармонік відповідно) через нуль, то в діючих значеннях  $I_{\phi5}$  й  $I_{\phi3}$  фазного струму не будуть враховані струми 5-ої та 3-ої гармонік, відповідно. Тоді очевидно, що залежності діючих значень струмів  $I_{\phi5}$  й  $I_{\phi3}$  від часу будуть не постійними за величиною, а змінуватися з часом від свого максимального ( $I_{\phi5\text{max}}$  й  $I_{\phi3\text{max}}$ ) до мінімального ( $I_{\phi5\text{min}}$  й  $I_{\phi3\text{min}}$ ) значень. Ілюстрація цього випадку наведена на фіг. 6. Зазначимо, що в мінімальних величинах діючого значення струмів  $I_{\phi5\text{min}}$  й  $I_{\phi3\text{min}}$  не будуть враховані струми відповідних гармонік.

Розглянемо складові величин струмів  $I_{\phi5\text{min}}$  й  $I_{\phi3\text{min}}$ .

При обчисленні діючого значення  $I_{\phi5}$  використовують миттєві значення струму  $i_{i5}$ , отримані при частоті дискретизації  $f_{d5}=2f_5=500$  Гц, яка більш ніж втричі більша за частоту 3-ої та 1-ої гармонік (150 і 50 Гц, відповідно). Через те, що в цій частині вимоги держстандарту виконуються, то діючі значення струмів 1-ої та 3-ої гармонік ( $I_1$  та  $I_3$ , відповідно) будуть визначені без спотворень в будь-який момент часу, включаючи моменти часу, що відповідають мінімальному значенню  $I_{\phi5\text{min}}$ . З урахуванням викладеного може бути записане наступне рівняння:

$$I_{\phi5\text{min}} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} \quad (1)$$

Величина фазного струму  $I_\phi$  з урахуванням трьох гармонік (1-ої, 3-ої та 5-ої) визначають з виразу:

$$I_\phi = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} \quad (2)$$

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

$$I_5 = \sqrt{I_\phi^2 - I_{\phi5(\text{min})}^2} \quad (3)$$

При розгляді складових струму  $I_{\phi3\text{min}}$  слід врахувати, що частота дискретизації  $f_{d3}=2f_3=300$  Гц відповідає вимогам визначення діючого значення струму 1-ої гармоніки без спотворень, тоді як для правильного визначення діючого значення струму 5-ої гармоніки частота дискретизації повинна дорівнювати 750 Гц. Це означає, що за дискретними значеннями, отриманими при частоті дискретизації  $f_{d3}$ , без спотворень визначити величину струму 5-ої гармоніки у будь-який момент часу неможливо. Тому величина  $I_{\phi3\text{min}}$  містить, як складові, величину струму 1-ої гармоніки  $I_1$  та ту частину струму 5-ої гармоніки, яка може бути відновлена за дискретними значеннями  $i_{i5(3)}$  струму 5-ої гармоніки, які відповідають моментам часу проходження струму 3-ої гармоніки  $i_3(t)$  через нульове значення.

На фіг. 5 наведені миттєві значення  $i_{i5(3)}$  струму 5-ої гармоніки, а також відновлена за цими дискретними значеннями синусоїда струму  $i_{5(3)}(t)$ . Як видно з фіг. 5, відновлена залежність  $i_{5(3)}(t)$  є синусоїдою струму з частотою 1-ої гармоніки. При цьому, як показали розрахунки, діюче значення  $I_{5(3)}$  синусоїди струму  $i_{5(3)}(t)$  за своєю величиною дорівнює діючому значенню струму 5-ої гармоніки  $I_5$ . З урахуванням викладеного, і того факту, що вектор струму 5-ої гармоніки має

зворотне обертання по відношенню до вектора струму 1-ої гармоніки, вираз для  $I_{\phi 3\min}$  має наступний вигляд:

$$I_{\phi 3\min} = I_1 + I_5 \cdot \quad (4)$$

5 Таким чином, якщо визначена величина струму 5-ої гармоніки  $I_5$ , то величину струму 1-ої гармоніки  $I_1$  визначають з виразу:

$$I_1 = I_{\phi 3\min} - I_5 \cdot \quad (5)$$

10 Величину струму 3-ої гармоніки  $I_3$ , якщо знайдені діючі значення струмів 5-ої та 1-ої гармонік, визначають, з врахуванням рівняння (2), з виразу:

$$I_3 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_5^2 - I_1^2} \cdot \quad (6)$$

Після того, як знайдені діючі значення струмів 1-ої, 3-ої та 5-ої гармонік в кожній фазі (a, b, c) визначають величину  $I_N$  очікуваного струму в N-провіднику. Величину  $I_N$  визначають за умови цілісності N-провідника, а відповідно й рівності кутів між векторами фазних струмів 1-ої та 5-ої гармонік ( $\bar{I}_{1(a,b,c)}$  й  $\bar{I}_{5(a,b,c)}$ , відповідно). Через те, що в неушкодженому N-провіднику синфазні струми 3-ої гармоніки всіх фаз  $I_{3(a,b,c)}$  підсумовують арифметично, величину очікуваного струму в N-провіднику  $I_N$  визначають як сукупність геометричних сум струмів 1-ої та 5-ої гармонік в кожній фазі (a, b, c) та арифметичної суми струмів 3-ої гармоніки:

$$I_N = \sqrt{\left(\sum_{a,b,c} \bar{I}_{N1}\right)^2 + \left(\sum_{a,b,c} I_{N3}\right)^2 + \left(\sum_{a,b,c} \bar{I}_{N5}\right)^2} \cdot \quad (7)$$

Критерієм обриву нейтрального провідника в будь-якому місці розгалуженого електричного кола є невідповідність значень очікуваного  $I_N$  і фактичного  $I_N$  значень струму в N-провіднику. Фактичне значення струму в N-провіднику може бути визначене або прямим виміром за допомогою датчика струму, або непрямим способом, шляхом знаходження дискретних значень струму в N-провіднику  $i_N$  як суми дискретних значень фазних струмів  $i_{\phi(a, b, c)}$  з урахуванням їх знаку і подальшого інтегрування квадратів отриманих дискретних значень. Останній спосіб визначення фактичного струму в N-провіднику доцільніше використовувати при реалізації захисту від обриву нейтрального провідника в мікропроцесорному розчеплювачі триполюсного автоматичного вимикача.

Спосіб захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням, що пропонується, реалізовано у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного розчеплювача автоматичного вимикача. Блок-схема алгоритму, що ілюструє функціонування мікропроцесорного розчеплювача (або іншого пристрою захисту) при реалізації розробленого способу захисту від обриву N-провідника за рахунок визначення діючих значень періодичного несинусоїдального фазного струму та його непарних (1, 3 та 5-ої) гармонік за дискретними значеннями, отриманими при різних частотах дискретизації, наведена на фіг. 7. Окремі обчислювальні та логічні операції, які проводить мікропроцесор, на фіг. 7 умовно представлені у вигляді модулів. Фізично вказані модулі не існують, їх зображення необхідне для зручності викладення функціонування мікропроцесорного пристрою при реалізації у вигляді алгоритму запропонованого способу захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням.

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб.

45 1. У модулі 1 вихідні аналогові залежності фазних струмів  $i_{\phi}(t)$  в кожній фазі (a, b, c) перетворюють в дискретні залежності з різними частотами дискретизації:  $f_d=300, 500, 750$  Гц.

2. У модулі 2 в режимі ковзання шляхом заміщення використаних дискретних значень новими дискретними значеннями, що відповідають частоті дискретизації  $f_d=750$  Гц, з часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_{ок} \leq T_g/10$  визначають залежність зміни в часі діючих значень струмів  $I_{\phi}(t)$  в

кожній фазі (a, b, c). При частоті дискретизації  $f_d=750$  Гц діючі значення  $I_{\phi}(t)$  фазних струмів з часом не змінюються, оскільки без спотворень враховані всі три гармоніки струму (1, 3 та 5-та).

3. У модулі 3 за дискретними значеннями, що відповідають частоті дискретизації  $f_d=500$  Гц, в режимі ковзання з часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_{ck} \leq T_5/10$  визначають залежності зміни в часі діючих значень 5-ої гармоніки  $I_{\phi 5}(t)$  струму в фазах a, b, c.

4. У модулі 4 за дискретними значеннями, що відповідають частоті дискретизації  $f_d=300$  Гц, в режимі ковзання з часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_{ck} \leq T_5/10$  визначають залежності зміни в часі діючих значень 3-ої гармоніки  $I_{\phi 3}(t)$  струму в фазах a, b, c.

5. У модулі 5 визначають мінімальне значення  $I_{\phi 5 \min}$  функції  $I_{\phi 5}(t)$

6. У модулі 6 визначають діюче значення 5-ої гармоніки фазних струмів  $I_5$  з виразу:

$$I_5 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_{\phi 5(\min)}^2}.$$

7. У модулі 7 визначають мінімальне значення  $I_{\phi 3 \min}$  функції  $I_{\phi 3}(t)$ .

8. У модулі 8 визначають діюче значення 1-ої гармоніки фазних струмів  $I_1$  з виразу:

$$I_1 = I_{\phi 3 \min} - I_5.$$

9. У модулі 9 визначають діюче значення 3-ої гармоніки фазних струмів  $I_3$  з виразу:

$$I_3 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_5^2 - I_1^2}.$$

10. У модулі 10 визначають частку очікуваного струму в N-провіднику, яка створюється струмами 3-ої гармоніки  $I_{N3}$ , як арифметичну суму струмів 3-ої гармоніки  $I_3$  у фазах (a, b, c):

$$I_{N3} = \sum_{a,b,c} I_{N3} = I_{3a} + I_{3b} + I_{3c}.$$

11. У модулі 11 визначають частку очікуваного струму в N-провіднику, яка створюється струмами 1-ої гармоніки  $I_{N1}$ , як геометричну суму векторів струмів 1-ої гармоніки  $I_1$  у фазах (a, b,

$$c): I_{N1} = \sum_{a,b,c} \bar{I}_{N1} = \bar{I}_{1a} + \bar{I}_{1b} + \bar{I}_{1c}.$$

12. У модулі 12 визначають частку очікуваного струму в N-провіднику, яка створюється струмами 5-ої гармоніки, як геометричну суму векторів струмів 5-ої гармоніки  $I_5$  у фазах (a, b, c):

$$I_{N5} = \sum_{a,b,c} \bar{I}_{N5} = \bar{I}_{5a} + \bar{I}_{5b} + \bar{I}_{5c}.$$

13. У модулі 13 визначають величину очікуваного струму в N-провіднику  $I_N$  з виразу:

$$I_N = \sqrt{\left( \sum_{a,b,c} \bar{I}_{N1} \right)^2 + \left( \sum_{a,b,c} I_{N3} \right)^2 + \left( \sum_{a,b,c} \bar{I}_{N5} \right)^2}.$$

14. У модулі 14 визначають фактичне значення струму в N-провіднику  $I_N$ . В залежності від конкретного виконання мікропроцесорного пристрою значення  $I_N$  визначають одним із способів:

за допомогою датчика струму, встановленого в N-провіднику;

шляхом обчислення миттєвих значень струму в N-провіднику  $i_{iN}$  як суми миттєвих значень струмів у фазах  $i_{i\phi(a, b, c)}$  з урахуванням знаку.

15. У логічному модулі 15 проводять порівняння величин очікуваного  $I_N$  і фактичного  $I_N$  струмів в N-провіднику, і якщо різниця між величиною очікуваного  $I_N$  і фактичного  $I_N$  струму виявиться більше заданого значення  $\delta_N$  ( $|I_N - I_N| \geq \delta_N$ ), виробляється сигнал "Так" на спрацьовування захисту.

Як впливає з алгоритму роботи мікропроцесорного пристрою, необхідні для побудови захисту від обриву N-провідника критерії спрацьовування, що формують на підставі гармонійного аналізу спектра фазних струмів, визначають за допомогою простих формул, в яких використовують діючі значення фазних струмів. Визначення діючих значень струмів є типовими математичними операціями для пристроїв захисту, у тому числі і для електронних розчеплювачів автоматичних вимикачів. Відмінність способу побудови захисту, що пропонується, полягає в тому, що дискретні значення струмів, що використовують при визначенні діючих значень фазних струмів, відповідають різним частотам дискретизації вихідної аналогової залежності струму від часу. З досить малим часовим інтервалом ковзання, ковзний моніторинг діючих значень фазних струмів, які використовують при побудові захисту від обриву N-провідника, може бути застосовано при побудові й інших видів захистів, зокрема захисту від віддалених КЗ.

Таким чином, поставлена при розробці способу захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаження задача визначення гармонійного спектру фазних струмів за рахунок простих і широко використовуваних в електронних розчеплювачах автоматичних вимикачів математичних операцій інтегрування

5

джерела інформації:

10

1. Райнин В.Е., Кобозев А.С. Выключатели с новыми защитными характеристиками для повышения качества защиты электрических сетей низкого напряжения / Электротехника. - 2010. - № 11. - С. 18-24.

2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 448 с.

15

3. Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля [Электронный ресурс] / Dsplib.ru. Теория и практика цифровой обработки сигналов. – Электрон. дан. - 2012. - Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>, вільний. - Загл. з екрану. - Текст на екрані російськ.

20

4. Минин Г.П. Несинусоидальные токи и их измерение. - М.: Энергия, 1979. - 112 с.

5. Григорьев О.А., Петухов В.С., Соколов В.А., Красилов И.А. Компьютерные нечистоты. Статья не для всех [Электронный ресурс] / Ferru.ru. Центр электромагнитной безопасности. – Электрон. дан. - 2012. - Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/cascool/s22319>, вільний. - Загл. з екрану. - Текст на екрані російськ.

25

6. Гармоники тока и напряжения в электросетях [Электронный ресурс] / Матик-Электро. - Электрон. дан. - 2012. - Режим доступа: <http://www.matic.ru/index.php?pages=735>, вільний. - Загл. з екрану. - Текст на екрані російськ.

7. Philip J. A. Ling, Cyril J. Eldridge. Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion In A Pc-Rich Environment [Электронный ресурс] / POWERSMITHS INTERNATIONAL CORP 416-439-1077. - Электрон. дан. - 2012. Режим доступа: [www.powerstudies.com/content/resources/pg000163.pdf](http://www.powerstudies.com/content/resources/pg000163.pdf), вільний. - Загл. з екрану. - Текст на екрані англ.

30

8. Пат. 81981 України МПК Н 02 Н 7/00, Н 01 Н 73/00 Система захисту розгалужених трифазних електричних кіл від струмів віддалених коротких замикань / Г.М. Гапоненко, В.В. Омельченко, О.С. Кобозев. - № а200604596. Заявлено 25.04.2006; Опубл. 25.02.2008, Бюл. № 4.

35

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

10. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

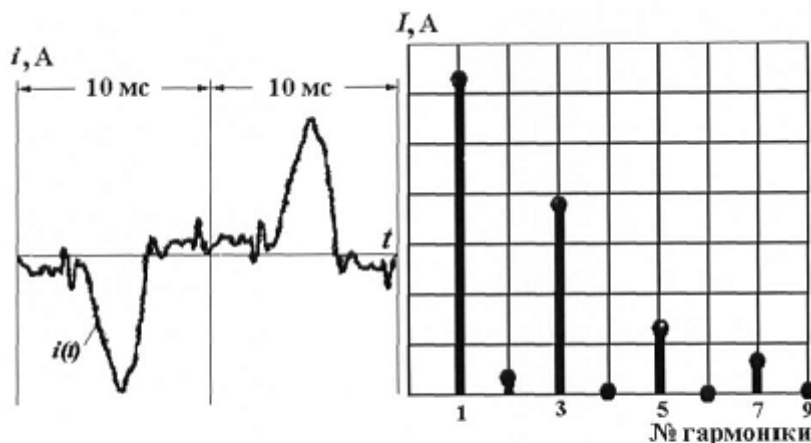
40

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаження, в якому визначають діючі значення струмів  $I_{\phi}$  всіх трьох фаз (a,b,c) методом інтегрування квадратів дискретних значень струму  $i_j$  за допомогою мікропроцесорного розчеплювача автоматичного вимикача, що відповідають частоті дискретизації  $f_d$  вихідної аналогової залежності  $i(t)$  струму в часі в три або більше разів більшої частоти 5-ої гармоніки фазного струму  $f_5$  ( $f_d \geq 3f_5$ ), потім визначають величину очікуваного струму в нейтральному провіднику  $I_N$  як геометричну суму зрушених між собою на кут  $120^\circ$  векторів  $\vec{I}_{\phi}$  струмів всіх трьох фаз (a,b,c) та порівнюють її з фактичним значенням струму в нейтральному провіднику  $I_N$ , який **відрізняється** тим, що при визначенні очікуваного струму в нейтральному провіднику враховують гармонійний склад фазних струмів, для чого за допомогою фільтра вилучають 7-му гармоніку струму, при цьому, в ковзному режимі з часовим інтервалом ковзання  $\Delta t_{СК}$  на порядок або більше меншим за період зміни струму 5-ої гармоніки ( $\Delta t_{СК} \leq T_5/10$ ), визначають залежність в часі діючих значень  $I_{\phi 5}(t)$  струмів у всіх трьох фазах

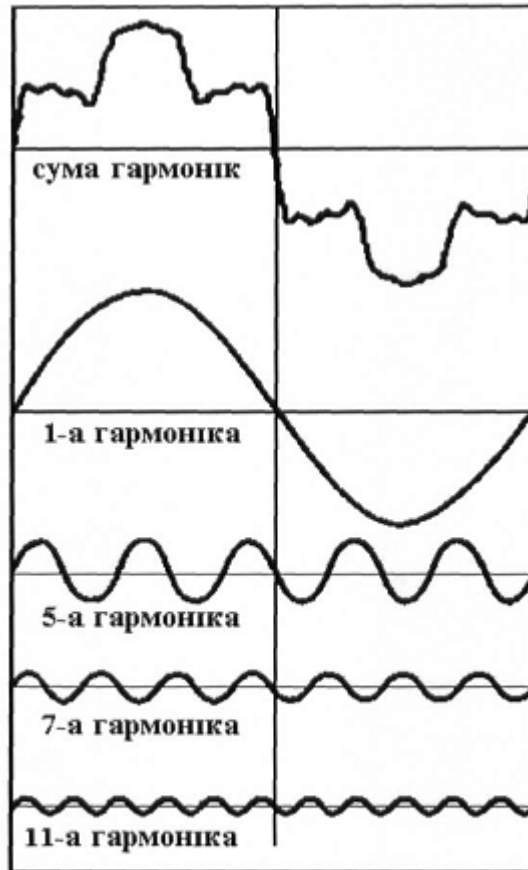
55

- (a,b,c) за дискретними значеннями струму  $i_{j5}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{д5}$ , що дорівнює подвійній частоті струму 5-ої гармоніки ( $f_{д5} = 2f_5$ ), потім визначають мінімальне значення струму  $I_{ф5(\min)}$  функції  $I_{ф5}(t)$  після чого визначають діючі значення струмів 5-ої гармоніки  $I_5$  в кожній фазі (a,b,c) з виразу  $I_5 = \sqrt{I_{ф}^2 - I_{ф5(\min)}^2}$ , після чого, в кожному режимі з тим же інтервалом ковзання  $\Delta t_{ск}$ , визначають залежність в часі діючих значень  $I_{ф3}(t)$  струмів у всіх трьох фазах (a,b,c) за дискретними значеннями струму  $i_{j3}$ , що відповідають частоті дискретизації  $f_{д3}$ , що дорівнює подвійній частоті струму 3-ої гармоніки ( $f_{д3} = 2f_3$ ), потім визначають мінімальне значення  $I_{ф3(\min)}$  функції  $I_{ф3}(t)$ , після чого визначають діючі значення струмів 1-ої гармоніки  $I_1$  в кожній фазі (a,b,c) з виразу  $I_1 = I_{ф3(\min)} - I_5$ , потім визначають діюче значення струму 3-ої гармоніки з виразу  $I_3 = \sqrt{I_{ф}^2 - I_1^2 - I_5^2}$ , після чого визначають геометричні суми зрушених між собою на кут  $120^\circ$  векторів струмів 1-ої ( $\bar{I}_{N1}$ ) та 5-ої ( $\bar{I}_{N5}$ ) гармонік від усіх трьох фаз (a,b,c), потім знаходять арифметичну суму струмів 3-ої гармоніки ( $\bar{I}_{N3}$ ), після чого визначають величину очікуваного струму в нейтральному провіднику з виразу  $I'_N = \sqrt{\bar{I}_{N1}^2 + \bar{I}_{N3}^2 + \bar{I}_{N5}^2}$  й порівнюють з фактичним значенням струму в нейтральному провіднику  $I_N$  і, якщо різниця між величинами очікуваного й фактичного струму в нейтральному провіднику більша за задане значення  $\delta_N$  ( $|I'_N - I_N| \geq \delta_N$ ), виробляється сигнал на спрацювання захисту.



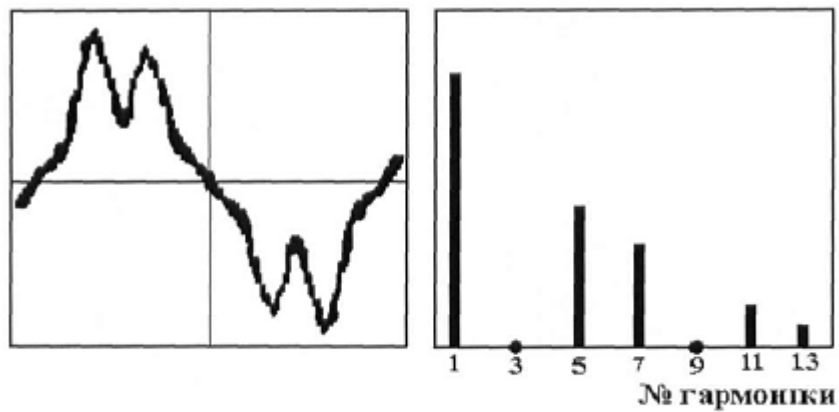
Форма залежності струму в часі  $i(t)$  та амплітудний спектр гармонік струму, що споживає системний блок ПК

Фіг. 1



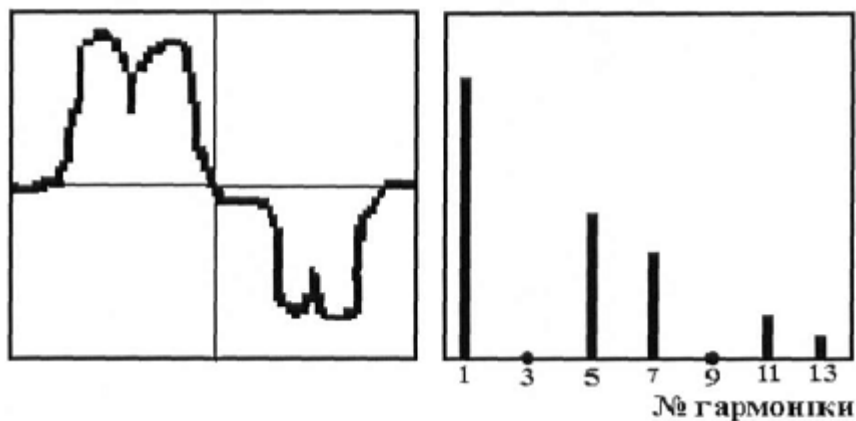
Форма залежності струму в часі  $i(t)$  та амплітудний спектр гармонік струму, що споживає тиристорний SCR випрямляч

Фіг. 2



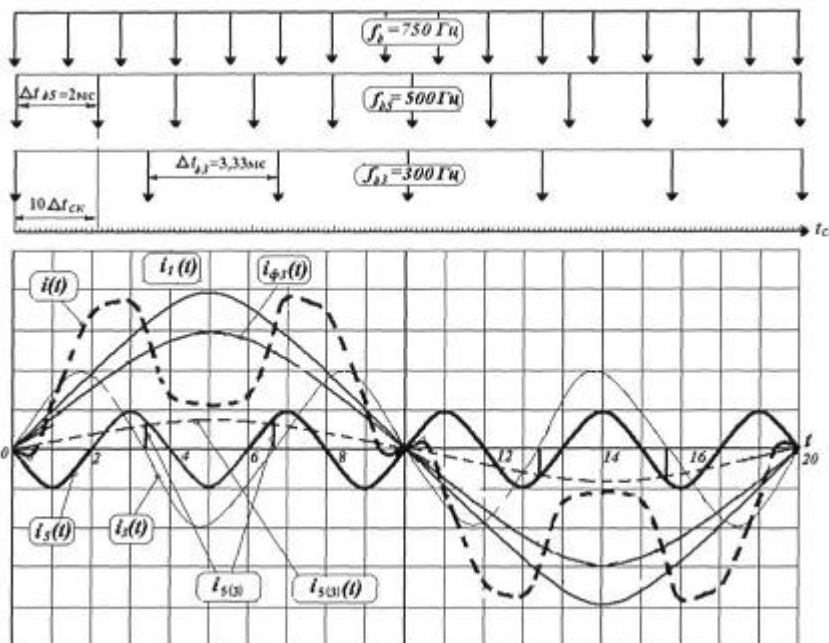
Форма залежності струму в часі  $i(t)$  та амплітудний спектр гармонік струму, що споживає джерело живлення 208 В

Фіг. 3

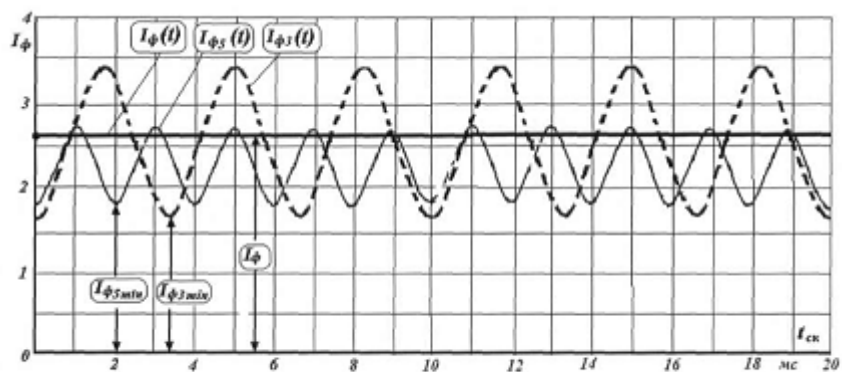


Форма залежності струму в часі  $i(t)$  та амплітудний спектр гармонік струму, що споживає джерело безперервного живлення

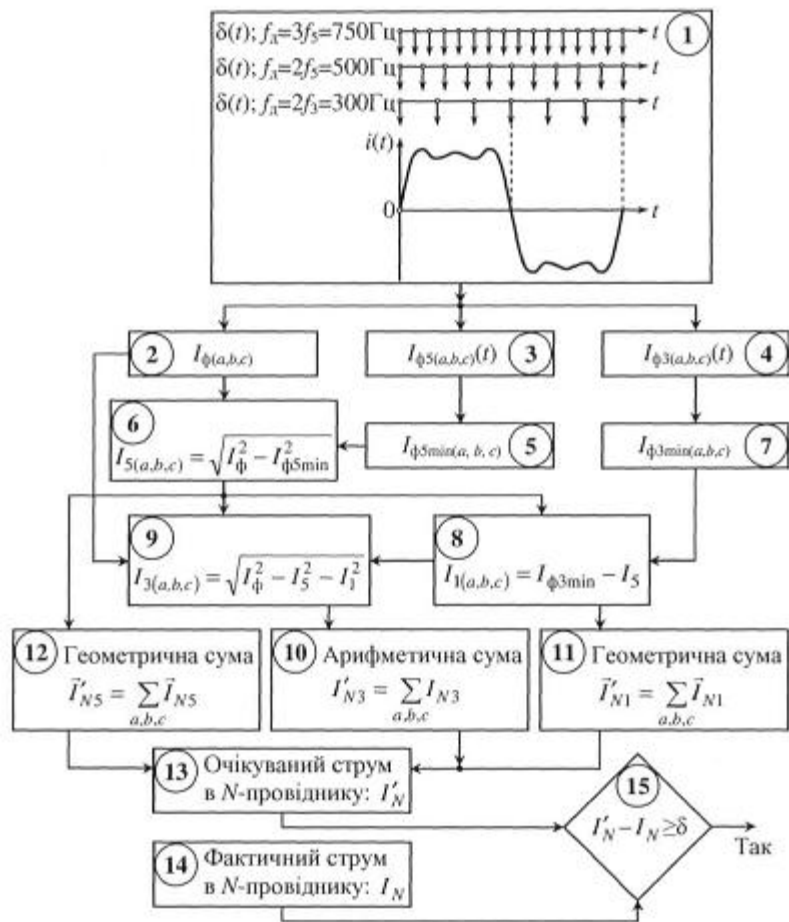
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фіг. 7