



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **113596** (13) **C2**

(51) МПК (2016.01)

**H02H 3/08** (2006.01)

**H02H 7/00**

**H01H 73/00**

**H02H 7/10** (2006.01)

**H02H 3/16** (2006.01)

**H02M 1/32** (2007.01)

**G01R 31/02** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2016 00564</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>25.01.2016</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>10.02.2017</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: <b>10.06.2016, Бюл.№ 11</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.02.2017, Бюл.№ 3</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Кобозєв Олександр Сергійович (UA), Середа Олександр Григорійович (UA), Агабабов Артур Юрійович (UA), Юхно Олександр Дмитрович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>Кобозєв Олександр Сергійович,</b> пр. Перемоги, 78-б, кв. 62, м. Харків-204, 61204 (UA), <b>Середа Олександр Григорійович,</b> пр. Перемоги, 66, кв. 491, м. Харків-204, 61204 (UA), <b>Агабабов Артур Юрійович,</b> пр. Тракторобудівників, 65, кв. 143, м. Харків-120, 61120 (UA), <b>Юхно Олександр Дмитрович,</b> вул. Кривомазова, 39, кв. 1, м. Харків-124, 61157 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: WO 2015074620 A1, 28.05.2015 DE 4006163 C1, 29.08.1991 AU 2010221299 A1, 01.09.2011 CN 104466938 A, 25.03.2015 CN 104965136 A, 07.10.2015 RU 2251775 C2, 10.05.2005 RU 2355090 C1, 10.05.2009</p>
---	---

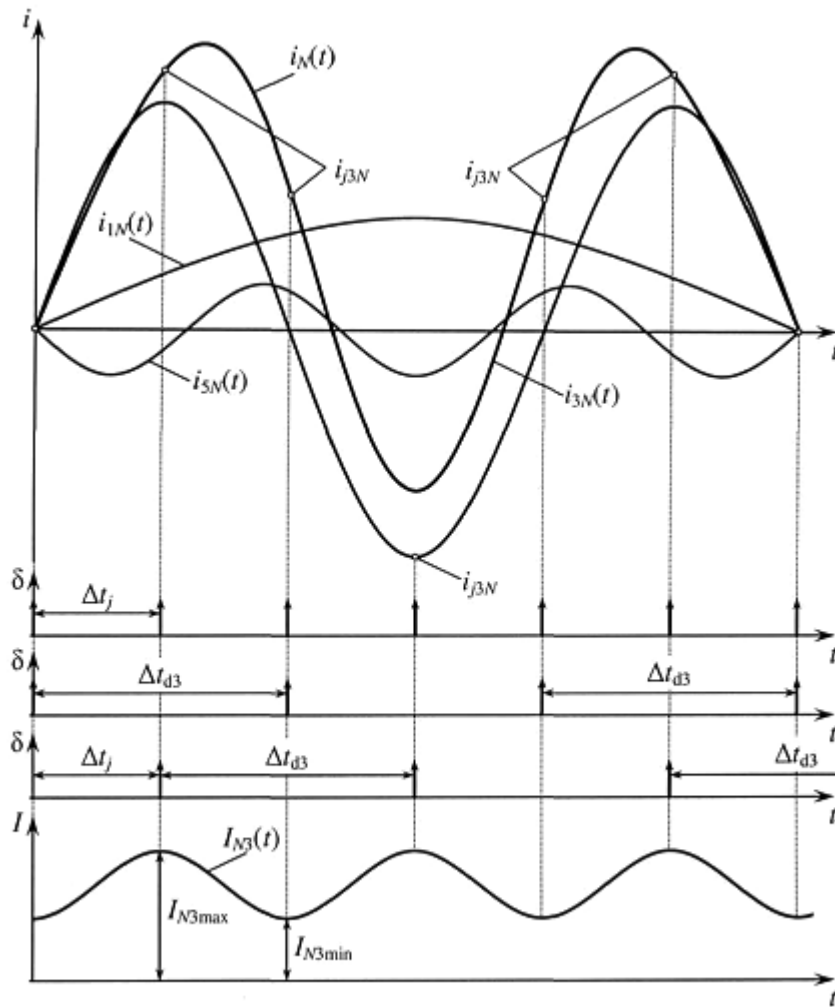
## (54) СПОСІБ ЗАХИСТУ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВІДНИКА ВІД СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ТА СТРУМІВ ОДНОФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З НЕЛІНІЙНИМИ ВИДАМИ НАВАНТАЖЕНЬ

### (57) Реферат:

Винахід належить до способів релейного захисту електричних мереж, зокрема захисту нейтрального провідника 4-х провідних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ з нелінійними видами навантажень, від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань. Спосіб захисту N-провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань, полягає в тому, що за рахунок вибору відповідної частоти дискретизації, цілеспрямовано створюються спотворення в розрахунку середньоквадратичного значення струму, при яких величина струму третьої гармоніки вибірково враховується при побудові захисту від струмів перевантаження і не враховується при побудові захисту від струмів

UA 113596 C2

однофазних коротких замикань. Технічним результатом, що досягається даним винаходом, є підвищення надійності захисту провідника для мереж з лінійними та нелінійними навантаженнями.



Фиг. 1

Винахід належить до способів релейного захисту електричних мереж, зокрема захисту нейтрального провідника (N-провідника) чотирьох (4-х) провідних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ з нелінійними видами навантажень, від струмів перевантаження (захист  $I_N$ ) та струмів однофазних коротких замикань (КЗ).

- 5 Проблема захисту від струмів  $I_{k(1)}$  однофазних КЗ (захист G) в трифазній електроенергетичній системі з глухо або ефективно заземленими нейтраліями силових елементів (КЗ на землю [1]) полягає в тому, що величина  $I_{k(1)}$  може бути меншою за величину робочого струму  $I_r$  фази. У розподільних мережах низької напруги (НН) з глухим заземленням нейтралі (система TN) однофазне КЗ на землю, по суті, є замиканням на N-провідник. Величина
- 10 струму  $I_{k(1)}$  визначається опором контуру  $Z_{ph-N}$  "фаза-N-провідник" й опором  $Z_{NT}$  заземлення нейтралі трансформатора. У певних випадках сума опорів  $Z_{NT}$  і  $Z_{ph-N}$  може бути більшою опору фази  $Z_{ph}$  через значний опір петлі "фаза-N-провідник", а також через опір нульової послідовності силових трансформаторів, особливо із з'єднанням обмоток "зірка-зірка з виведеною нейтраллю", тому величина струму  $I_{k(1)}$  може бути порівнянна і навіть менша струму  $I_r$  [2].
- 15 Вочевидь, що внаслідок такого співвідношення струмів  $I_{k(1)}$  та  $I_r$  будувати захист за величиною фазного струму немає сенсу.

- При лінійних навантаженнях і синусоїдальному фазному струмі як критерій аварії використовується очікуваний струм  $I_N$  в N-провіднику, так як у справній мережі струм  $I_N$  викликаний (визначається) несиметрією фазних струмів і не перевищує 20 % робочого струму  $I_r$  фази [3]. Слід враховувати, що величина  $I_N$  визначається сукупністю декількох споживачів, тому якщо захист G будувати не за повним (сумарним) струмом  $I_N$ , а за його збільшенням  $\Delta I_N$ , викликаним підключенням або відключенням одного споживача, то різниця між струмом  $\Delta I_N$  (струмом збурення) від навантаження і струмом  $I_{k(1)}$  буде значнішою. Це дає можливість
- 20 вибирати струмову уставку розчіплювача автоматичного вимикача (АВ) значно меншою струму  $I_r$ . Максимально припустимий в нормальному режимі струм в заземленій нейтралі обмотки НН для трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток "зірка-зірка з виведеною нейтраллю" дорівнює  $0,25I_r$ , для трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток "трикутник-зірка з виведеною нейтраллю" -  $0,75I_r$ .

- Вищевикладене належить до електричних кіл із синусоїдальними фазними струмами, тобто
- 30 за наявності тільки лінійних фазних навантажень. У випадку ж появи нелінійних навантажень, коли в результаті спотворення фазних струмів з'являються вищі гармонійні складові струму, побудова захисту G за контролем струму в N-провіднику значно ускладнюється. Головна причина цього полягає в особливостях поведінки струмів третьої (3-ї) гармоніки в 4-х провідних мережах з N-провідником. Струми 3-ї гармоніки усіх фаз алгебраїчно додаються в N-провіднику, навіть при симетричному навантаженні. Тому навіть у номінальному режимі роботи електричного кола з нелінійними навантаженнями величина  $I_N$  може бути більшою струму  $I_r$ . Таким чином, для побудови захисту G додатково необхідна ідентифікація виду струму в N-провіднику: струм  $I_{k(1)}$  або номінальний робочий струм навантаження  $I_r$ .

- На відміну від робочого режиму струм  $I_{k(1)}$  дорівнює струму пошкодженої фази і при
- 40 синусоїдальній напрузі містить тільки струм першої (1-ї) основної гармоніки. Тому для побудови захисту G при наявності у фазах струмів 3-ї та інших вищих гармонік необхідно з сумарного струму в N-провіднику ці гармоніки виключити. Іншими словами доцільно як критерій спрацьовування захисту G використовувати не повний струм в N-провіднику, а струм тільки 1-ї основної гармоніки. У той же час, для захисту нейтрального провідника від струмів
- 45 перевантаження, які, внаслідок алгебраїчного додавання струмів 3-ї гармоніки можуть виявитися більшими за робочий  $I_r$  струм фази, необхідно враховувати усі гармонійні складові в фазних струмах. Тобто, необхідний гармонійний аналіз спектра фазних струмів.

- Таким чином, при визначенні середньоквадратичного (діючого) значення струму в N-провіднику при побудові захисту G необхідно виключити негативний вплив струмів 3-ї гармоніки, а у випадку захисту  $I_N$  необхідно враховувати усі гармонійні складові, отже використовувати фільтр 3-ї гармоніки на вході мікропроцесорного пристрою захисту не можна.

Одне з рішень проблеми виключення струмів 3-ї гармоніки є використання алгоритму Герцеля [4], який дозволяє простіше, в порівнянні з дискретним перетворенням Фур'є, визначити величини усіх гармонік струму, зокрема величину 3-ї гармоніки. Для безперервного

моніторингу гармонійного спектра фазних струмів застосовується модифікований алгоритм Герцеля [5]. Проте ці методи використовують математичний апарат, що істотно відрізняється від традиційно використовованого в пристроях релейного захисту. Перш за все, це використання величини середньоквадратичного значення струму як критерій спрацьовування захисту.

З урахуванням вищевикладеного, є доцільним розробити таке технічне рішення визначення середньоквадратичного значення струму в N-провіднику, при якому математичні операції дозволяють в одних випадках виключити 3-тю гармоніку струму, а в інших випадках враховувати увесь гармонійний спектр.

Найближчим (прототипом) за технічною суттю до винаходу, що заявляється: аналіз миттєвих (дискретних) значень параметрів процесу збурення електричного кола (зокрема однофазне КЗ), є спосіб, описаний в [6], в якому аналіз дискретних значень струму використовують для швидкого в перший період перехідного процесу визначення сталого середньоквадратичного значення струму при реалізації максимального струмового захисту, у відповідності з яким у кожній з трьох фаз a, b, c здійснюють вимір струмів та їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення  $i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}$ , потім визначають середньоквадратичні значення фазних струмів  $I_a, I_b, I_c$  методом інтегрування квадратів, знайдених дискретних значень  $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$ .

При використанні способу [6] для правильного визначення середньоквадратичних значень струмів в фазах a, b, c ( $I_a, I_b, I_c$ ) за дискретними значеннями  $i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}$  необхідно виконання теореми Котельникова [7] та Держстандарту [8]. Згідно з [7], якщо безперервний сигнал  $i(t)$  має спектр, в якому є k вищих гармонік, обмежений частотою  $f_k$ , то він може бути однозначно і без втрат відновлений за дискретними відліками  $i_j = f(\Delta t_d)$ , узятими в діапазоні  $0 < \Delta t_d < 1/(2f_k)$ , де  $\Delta t_d = 1/f_d$  - інтервал дискретизації;  $f_d$  - частота дискретизації. Теорему Котельникова також можна сформулювати зворотним чином. Для того, щоб за дискретними значеннями відновити сигнал на прийомі без втрат, тобто без втрат (без спотворень) визначити середньоквадратичне значення, необхідно частоту дискретизації  $f_d$  вибирати строго більшою подвоєної максимальної частоти спектра, тобто більшою за подвоєну частоту  $f_k$ , k-ї, найбільш високої гармоніки струму:  $f_d > 2f_k$ .

Вимога Держстандарту [8] щодо частоти дискретизації жорсткіша - частота дискретизації  $f_d$  має бути, як мінімум, в 3 рази більшою за частоту  $f_k$ :

$$f_d \geq 3f_k \cdot (1)$$

Вказана розбіжність у вимогах до частоти  $f_d$  пояснюється наступним. Теорема Котельникова розглядає теоретичну можливість (ідеальний випадок) відновлення початкового сигналу за його дискретними значеннями, коли сигнал почався нескінченно давно і ніколи не закінчиться, а також не має в часовій характеристиці точок розриву. Саме це має на увазі поняття "спектр, обмежений частотою  $f_k$ ". Це означає, що для визначення середньоквадратичного значення сигналу період інтегрування квадратів дискретних значень  $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$  може виявитись неприпустимо великим. В аварійних випадках вказаний діапазон інтегрування має бути мінімізований. Наприклад, якщо як сигнал мати аналогову залежність зміни несинусоїдального фазного струму в часі  $i_{ph(a,b,c)}(t)$ , то максимальним діапазоном інтегрування буде період  $T_1$  зміни 1-ї основної гармоніки струму. Для такого, порівняно невеликого інтервалу інтегрування, вимоги до частоти дискретизації мають бути жорсткішими, що й відображено в [8].

Таким чином, мінімальна необхідна кількість миттєвих значень синусоїди струму найвищої k-ї гармоніки з частотою, що дорівнює  $kf_1$ , має бути не менше трьох за її період, де  $f_1$  - частота першої гармоніки. Це означає, що співвідношення частоти  $f_d$  вимірювань миттєвих значень струму  $i_{ph(a,b,c)}(t)$  з частотою  $f_k$  найбільш високої k-ї гармоніки визначається виразом:

$$f_d \geq 3f_k \cdot f_1 \cdot (2)$$

Більша частина комп'ютерного та офісного устаткування є нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення синусоїди фазних струмів в мережі живлення. В літературі [9-11] наведені залежності струму в часі та гармонійні спектри струмів, що споживаються різними видами нелінійних навантажень: системним блоком персонального комп'ютера, SCR тиристорним перетворювачем, джерелом живлення 208 В та джерелом безперервного живлення (ДБЖ) для персонального комп'ютера (ПК). Крива зміни струму в часі містить увесь спектр непарних гармонік, з яких найбільш значущими, з точки зору побудови струмових захистів, є перша (основна) та дві вищі - третя та п'ята. Тому для правильного визначення середньоквадратичного значення струму за [8] частоту дискретизації слід вибирати в 3 рази більшою за частоту 5-ї гармоніки:  $f_d \geq 750$ . У цьому випадку, незалежно від моменту часу початку визначення середньоквадратичного значення фазного струму, завжди коректно будуть враховані всі три непарні гармоніки.

Саме в тому, що при використанні способу [6] завжди будуть враховані всі три вищі гармоніки струму, полягає недолік способу прототипу, що знижує надійність захисту G.

В основу винаходу, що заявляється, поставлено задачу розробити такий спосіб захисту N-провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань, в якому, за рахунок вибору відповідної частоти дискретизації, цілеспрямовано створюються спотворення в розрахунку середньоквадратичного значення струму, при яких величина струму третьої гармоніки вибірково враховується при побудові захисту від струмів перевантаження і не враховується при побудові захисту від струмів однофазних коротких замикань. У разі відсутності в мережі вищих гармонік струму спотворень в розрахунку середньоквадратичного значення струму в N-провіднику відбуватися не повинно. Таким чином, забезпечується висока надійність захисту N-провідника як для мереж з лінійними, так і з нелінійними навантаженнями.

Поставлена задача вирішується в способі захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень, в якому середньоквадратичне значення фактичного струму  $I_N$  в нейтральному провіднику визначають методом чисельного інтегрування в діапазоні часу, що дорівнює періоду зміни струму першої гармоніки  $T_1$ , квадратів тих миттєвих значень струму  $i_{Nj}^2$ , які відповідають дискретним значенням  $i_{Nj}$  результату множення безперервної залежності  $i_N(t)$  зміни в часі струму в нейтральному провіднику на ґратчасту дельта-функцію  $\delta(t - \Delta t_d)$ , де інтервал дискретизації  $\Delta t_d$  ґратчастої функції в 3 і більше разів менший за період  $T_k$  зміни струму найвищої k-ї непарної гармоніки струму ( $3\Delta t_d \leq T_k$ ), після чого, якщо величина  $I_N$  виявляється більшою за значення струмової уставки  $I_g$  однофазного короткого замикання, виробляють керуючий сигнал на миттєве спрацьовування захисту, а якщо більшою за значення  $I_{NL}$  струмової уставки перевантаження виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ , за рахунок того, що враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів, для чого додатково в ковзному режимі через часовий інтервал  $\Delta t_j$ , в 12 разів менший за період  $T_1$  зміни струму 1-ої гармоніки:

$\Delta t_j = 0,0833T_1 = 1,667$  мс, шляхом заміни використаного миттєвого значення  $i_{Nj}$  струму новим  $i_{N(j+1)}$ , здійснюють безперервний моніторинг залежності в часі середньоквадратичного значення струму  $I_{3N}(t)$  в нейтральному провіднику, розрахованої за дискретними значеннями струмів  $i_{j3N}$ , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності  $i_N(t)$  в часі t струму в нейтральному провіднику з частотою дискретизації  $f_{d3}$ , в 2 рази більшою за частоту  $f_3$  зміни струму 3-ої гармоніки  $i_{3N}(t) : f_{d3} = 2f_3$ , потім визначають мінімальне  $I_{3Nmin}$  й максимальне  $I_{3Nmax}$  значення залежності  $I_{3N}(t)$  й дійсне неспотворене середньоквадратичне значення

струму в N-провіднику  $I_N = \sqrt{\frac{I_{3Nmax}^2 + I_{3Nmin}^2}{2}}$ , після чого здійснюють порівняння значення  $I_{3Nmin}$

зі струмовою уставкою  $I_g$  однофазного короткого замикання, а значення  $I_N$  зі струмовою уставкою перевантаження  $I_{NL}$ , і у випадку, якщо  $I_{3Nmin} \geq I_g$ , виробляють керуючий сигнал на миттєве спрацьовування захисту, а у випадку, якщо  $I_N \geq I_{NL}$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ .

Саме за рахунок того, що враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів, для чого додатково в ковзному режимі через часовий інтервал  $\Delta t_j$ , в 12 разів менший за період  $T_1$  зміни струму 1-ої гармоніки:  $\Delta t_j = 0,0833T_1 = 1,667 \text{ мс}$ , шляхом заміни використаного миттєвого значення  $i_{Nj}$  струму новим  $i_{N(j+1)}$  здійснюють безперервний моніторинг залежності в часі середньоквадратичного значення струму  $I_{3N}(t)$  в нейтральному провіднику, розрахованої за дискретними значеннями струмів  $i_{j3N}$ , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності  $i_N(t)$  в часі  $t$  струму в нейтральному провіднику з частотою дискретизації  $f_{d3}$ , в 2 рази більшою за частоту  $f_3$  зміни струму 3-ої гармоніки  $i_{3N}(t) : f_{d3} = 2f_3$ , потім визначають мінімальне  $I_{3Nmin}$  й максимальне  $I_{3Nmax}$  значення залежності  $I_{3N}(t)$  й дійсне неспотворене середньоквадратичне значення струму в N-провіднику

$$I_N = \sqrt{\frac{I_{3Nmax}^2 + I_{3Nmin}^2}{2}}, \text{ після чого здійснюють порівняння значення } I_{3Nmin} \text{ зі струмовою уставкою}$$

$I_g$  однофазного короткого замикання, а значення  $I_N$  зі струмовою уставкою перевантаження  $I_{NL}$ , і у випадку, якщо  $I_{3Nmin} \geq I_g$  виробляють керуючий сигнал на миттєве спрацьовування захисту, а у випадку, якщо  $I_N \geq I_{NL}$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ , і забезпечують високу надійність захисту нейтрального N-провідника як для мереж з лінійними, так і з нелінійними навантаженнями, за рахунок того, що величина струму 3-ї гармоніки вибірково враховується при побудові захисту від струмів перевантаження і не враховується при побудові захисту від струмів однофазних коротких замикань.

Дійсно, виключення з сумарного струму в N-провіднику струму 3-ї гармоніки дозволяє усунути помилкове спрацьовування захисту внаслідок підсумовування струмів 3-ї гармоніки усіх фаз в N-провіднику і, тим самим, підвищити надійність захисту G. Врахування ж струму 3-ї гармоніки в N-провіднику, коли струми 3-ї гармоніки усіх фаз алгебраїчно підсумовуються, забезпечує надійність функціонування захисту від струмів перевантаження.

Фіг. 1-4 пояснюють суть способу захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень.

На фіг. 1 наведені вихідні залежності в часі струмів перших 3-х непарних гармонік що протікають в N-провіднику:  $i_{1N}(t)$ ;  $i_{3N}(t)$ ;  $i_{5N}(t)$ , а також залежність в часі середньоквадратичного значення струму  $I_{3N}(t)$  в нейтральному провіднику, розрахованої за дискретними значеннями струмів  $i_{j3N}$ , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності  $i_N(t)$  в часі  $t$  струму в нейтральному провіднику з частотою дискретизації  $f_{d3}$ , в 2 рази більшою за частоту  $f_3$  зміни струму 3-ої гармоніки  $i_{3N}(t) : f_{d3} = 2f_3$ .

На фіг. 2 наведені вихідні залежності в часі струмів перших 3-х непарних гармонік, що протікають в N-провіднику:  $i_{1N}(t)$ ;  $i_{3N}(t)$ ;  $i_{5N}(t)$ , а також залежності струмів 1-ї  $i_1''(t)$  та 5-ї  $i_5''(t)$  гармонік, відновлені шляхом зворотного перетворення за дискретними значеннями  $i_{j3N}$ . При цьому початок дискретизації відповідає моменту часу проходження струму 3-ї гармоніки через нуль.

Вихідні середньоквадратичні значення перших 3-х непарних гармонік струму, що протікають в N-провіднику, виражені у відносних одиницях, прийняті наступними -  $I_1=0,14$ ;  $I_3=0,71$ ;  $I_5=0,07$ . Середньоквадратичне значення струму  $I_N$ , в N-провіднику при прийнятих значеннях перших 3-х непарних гармонік струму дорівнює:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} = 0,727. \quad (3)$$

На фіг. 3 наведені вихідні залежності в часі струмів перших 3-х непарних гармонік що протікають в N-провіднику:  $i_1(t)$ ;  $i_3(t)$ ;  $i_5(t)$ , а також залежності струмів 1-ї  $i_1''(t)$ , 3-ї  $i_3''(t)$  та 5-ї  $i_5''(t)$  гармонік, відновлені шляхом зворотного перетворення за дискретними значеннями  $i_{j3N}$ . При цьому початок дискретизації відповідає моменту часу проходження струму 3-ї гармоніки через максимальне значення.

На фіг. 4 наведена схема алгоритму роботи мікропроцесорного пристрою при реалізації захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень.

5 Доведемо, що цілеспрямоване спотворення середньоквадратичного значення струму в N-провіднику дозволяє виключити негативний вплив 3-ї гармоніки струму на функціонування захисту G від струмів  $I_k(t)$ .

Як зазначалося раніше, щоб вихідний сигнал  $i_N(t)$  при відновленні не мав спотворень за величиною, частотою і напрямком обертання векторів струму, частота дискретизації  $f_d$  повинна бути більшою подвійної частоти найвищої гармоніки струму [7]. У разі порушення вимоги [7] 10 неминучі спотворення у визначенні середньоквадратичного значення залежності  $i_N(t)$ , викликані неврахованими вищими гармоніками. При цьому найбільші спотворення будуть при частоті дискретизації вихідної залежності  $i_N(t)$ , що дорівнює подвоєній частоті певної гармоніки. При такій частоті дискретизації за певних умов в середньоквадратичному значенні струму будуть відсутні дискретні значення цієї гармоніки, а відповідно і не буде враховано 15 середньоквадратичне значення струму цієї гармоніки. Для 3-ї гармоніки "критична" частота дискретизації дорівнює 300 Гц. При цьому щоб виключити дискретні значення струму 3-ї гармоніки в N-провіднику початок дискретизації вихідної залежності  $i_N(t)$  повинен відповідати моменту часу проходження струму 3-ї гармоніки через нульове значення. Якщо ж момент початку дискретизації буде іншим, зокрема, в момент проходження струму 3-ї гармоніки через 20 своє максимальне значення, то струм 3-ї гармоніки буде врахований. Це означає, що обчислення середньоквадратичних значень струму за дискретними значеннями  $i_{j3N}$ , отриманим при частоті дискретизації  $f_{d3}=300$  Гц і при різних моментах початку дискретизації вихідної залежності  $i_N(t)$ , буде виборчим математичним фільтром 3-ї гармоніки струму. Аналогова залежність  $i_N(t)$  може бути отримана безпосереднім виміром датчиком струму або через миттєві 25 значення фазних струмів.

Суть описаного вище виборчого математичного фільтра 3-ї гармоніки полягає в наступному.

Через досить малий часовий інтервал ковзання  $\Delta t_j$  здійснюються визначення середньоквадратичного значення струму  $I_{3N}$  за дискретними значеннями, що відповідають частоті дискретизації  $f_{d3}=300$  Гц вихідної залежності  $i_N(t)$ . Таким чином, здійснюються 30 безперервний моніторинг функції  $I_{3N}(t)$ . З отриманої залежності  $I_{3N}(t)$  визначають екстремальні значення  $I_{3Nmin}$  й  $I_{3Nmax}$ . Вочевидь, що в мінімальному значенні  $I_{3Nmin}$  не буде врахований струм 3-ї гармоніки (фіг. 1).

Розглянемо, як у струмі  $I_{3Nmin}$  будуть враховані 1-а та 5-а гармоніки. Частота  $f_{d3}=300$  Гц є коректною для відновлення 1-ї гармоніки струму без втрат. Що ж стосується 5-ї гармоніки, то частота  $f_{d3}=300$  Гц є меншою необхідної 750 Гц для відновлення цієї гармоніки без втрат. Тому, 35 при такому зворотному перетворенні 5-ї гармоніки неминучі її спотворення. Як показано на фіг. 2, відновлена залежність  $i'_5(t)$  змінюється з частотою  $f_1$  1-ї основної гармоніки. Середньоквадратичне ж значення  $I'_5$  струму  $i'_5(t)$  виявилось рівним вихідному середньоквадратичному значенню  $I_5$  5-ї гармоніки:  $I'_5 = I_5$ .

40 Так як частоти обох гармонік 1-ї та  $i'_5(t)$  після зворотного перетворення збігаються, значення струму  $I_{3Nmin}$  можна подати як арифметичну суму:

$$I_{3Nmin} = I_1 + I'_5 = I_1 + I_5, \quad (4)$$

45 де  $I_1$  - середньоквадратичне значення 1-ї гармоніки струму;  $I_5$  - середньоквадратичне значення 5-ї гармоніки струму;  $I'_5$  - середньоквадратичне значення спотвореної 5-ї гармоніки струму  $i'_5(t)$ .

З урахуванням прийнятих вихідних значень  $I_1=0,14$  й  $I_5=0,07$  за (4) отримуємо  $I_{3Nmin}=0,21$ , значно менше за повне значення  $I_N=0,727$  за (3). Таким чином, цілеспрямовано спотворене значення  $I_{3Nmin}$ , в якому відсутня сума 3-їх гармонік, і є тим значенням струму в N-провіднику, яке доцільно порівнювати з величиною  $I_q$  уставки КЗ на землю при побудові захисту G.

Для побудови ж захисту  $L_N$  від струмів перевантаження, як вказувалося раніше, необхідно використовувати таке значення струму  $I_N$ , в якому враховані всі гармоніки. Покажемо, що

отримати величину  $I_N$  можна зі спільного аналізу екстремальних значень  $I_{3Nmin}$  й  $I_{3Nmax}$  залежності  $I_{3N}(t)$ .

У максимальному значенні  $I_{3Nmax}$  3-я гармоніка буде врахована, хоча і з певним спотворенням. Як показано на фіг. 3, при визначенні  $I_{3Nmax}$  в дискретних значеннях  $i_{3N}$  миттєві значення струму 3-ї гармоніки будуть завжди дорівнювати амплітудному значенню  $I_{3m}$ . Тому середньоквадратичне значення  $I_3$  відновленого  $i_3(t)$  спотвореного струму 3-ї гармоніки буде в  $\sqrt{2}$  разів більше дійсного середньоквадратичного значення  $I_3$  струму 3-ї гармоніки:  $I_3 = \sqrt{2}I_{3m}$ . Перша гармоніка струму  $i_1(t)$ , як і у випадку визначення  $I_{3Nmin}$  буде відновлена без втрат. Що ж до 5-ї гармоніки, як показано на фіг. 3, відновлена залежність  $i_5(t)$  так само як і у випадку визначення  $I_{3Nmin}$  змінюється з частотою  $f_1$  1-ї основної гармоніки. Середньоквадратичне ж значення  $i_5$  струму  $i_5(t)$  також виявилось рівним істинному середньоквадратичному значенню  $I_5$  5-ї гармоніки струму:  $I_5 = I_5$ . Відмінність від випадку визначення  $I_{3Nmin}$  полягає в полярності відновленої 5-ї гармоніки (напрямок обертання вектора цієї гармоніки). Залежність  $i_5(t)$  змінюється в протифазі відносно до залежності  $i_5(t)$  і відносно до зміни струму 1-ї гармоніки, відповідно. Тому результирующим середньоквадратичним значенням струмів  $i_1(t)$  і  $i_5(t)$  буде не сума, як у випадку з  $I_{3Nmin}$ , а різниця середньоквадратичних значень  $I_1 - I_5$ .

З урахуванням того, що частоти 3-ї та 1-ї гармонік різняться, а  $I_3 = \sqrt{2}I_{3m}$  й  $I_5 = I_5$ , то для струму  $I_{3Nmax}$  отримаємо:

$$I_{3Nmax} = \sqrt{(I_1 - I_5)^2 + 2I_3^2} \quad (5)$$

Для визначення середньоквадратичного значення струму в N-провіднику, в якому будуть правильно враховані величини усіх трьох гармонік, розглянемо суму квадратів значень  $I_{3Nmax}$  й  $I_{3Nmin}$ :

$$I_{3Nmax}^2 + I_{3Nmin}^2 = (I_1 - I_5)^2 + 2I_3^2 + (I_1 + I_5)^2 = I_1^2 - 2I_1I_5 + I_5^2 + 2I_3^2 + I_1^2 + 2I_1I_5 + I_5^2 = 2(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2) \quad (6)$$

В дужках правої частині виразу (6) маємо квадрат середньоквадратичного значення струму в N-провіднику  $I_N^2$  з урахуванням усіх трьох гармонік (3).

Тому з рівняння (6) значення струму в N-провіднику з урахуванням усіх трьох гармонік може бути представлено наступним виразом:

$$I_N = \sqrt{\frac{I_{3Nmax}^2 + I_{3Nmin}^2}{2}} \quad (7)$$

Таким чином, значення  $I_N$  розраховане за виразом (7) в ковзному режимі при дискретизації вихідної безперервної залежності  $i_N(t)$  з частотою  $f_{дз}=300$  Гц дійсно можна розглядати як значення, яке необхідно порівнювати з величиною уставки  $I_{NL}$  при побудові захисту N-провідника від струмів перевантаження (захист  $L_N$ ).

Для розглянутого випадку, коли  $I_{3Nmin}=0,21$  й  $I_{3Nmax}=1,0065$ , за виразом (7) отримуємо значення  $I_N=0,727$ , яке дорівнює початковому значенню  $I_N=0,727$ , розрахованому за виразом (3) з урахуванням усіх трьох гармонік.

Слід зазначити, що у разі відсутності вищих гармонік значення  $I_{3Nmax}$  та  $I_{3Nmin}$  дорівнюють середньоквадратичному значенню струму 1-ї гармоніки в N-провіднику:  $I_{3Nmax} = I_{3Nmin} = I_{1N}$ .

Алгоритм роботи мікропроцесорного розчіплювача АВ (фіг. 4) при реалізації способу захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень шляхом цілеспрямованого



спотворення середньоквадратичного значення струму не вимагає спеціального математичного апарата визначення гармонійного складу струму і зводиться до традиційного для струмових захистів методу визначення середньоквадратичного значення струму, особливістю якого є вибір певної частоти дискретизації вихідної аналогової залежності. Моніторинг спотвореного середньоквадратичного значення  $I_{3N}(t)$  при різних моментах початку розрахунку дозволяє визначити мінімальне й максимальне значення  $I_{3Nmax}$  й  $I_{3Nmin}$  залежності  $I_{3N}(t)$ . Перше використовується при побудові захисту  $G$ , а сукупність обох екстремальних значень використовується для побудови захисту  $L_N$ .

Прийнято, що спеціального датчика струму в TV-провіднику немає, тому аналогову залежність зміни струму  $i_N(t)$  отримують шляхом підсумовування миттєвих значень фазних струмів  $i_{a,b,c}(t)$ .

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 мікропроцесорного розчіплювача автоматичного вимикача.

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб:

1. На вхід модуля 1 мікропроцесорного розчіплювача АВ від датчиків струму (ДС) надходять аналогові залежності в часі фазних струмів  $i_{a,b,c}(t)$ , які перетворюють у дискретні залежності  $i_{i(a,b,c)}(t)$  з частотою дискретизації  $f_d=600$  Гц.

2. У модулі 2 за дискретними значеннями фазних струмів  $i_{i(a,b,c)}$  в ковзному режимі, з часовим кроком ковзання  $\Delta t_j = 1,667$  мс, визначають масив дискретних значень струму в N-провіднику що за період часу, що дорівнює 20 мс. Відразу ж за дискретними значеннями  $i_N(t)$  формують аналогову залежність в часі  $i_N(t)$  струму в N-провіднику.

3. У модулі 3, використовуючи кожне друге дискретне значення зі сформованого в модулі 2 масиву дискретних значень, які відповідають частоті дискретизації  $f_{d3}=300$  Гц, здійснюють безперервний моніторинг середньоквадратичних значень  $I_{3N}$  струму в N-провіднику й визначають залежність в часі  $I_{3N}(t)$ .

4. У модулі 4 визначають екстремальні значення  $I_{3Nmax}$  й  $I_{3Nmin}$  функції  $I_{3N}(t)$ .

5. У модулі 5 здійснюють порівняння мінімального значення  $I_{3Nmin}$  з токовою уставкою  $I_g$  однофазного короткого замикання і у випадку, якщо  $I_{3Nmin} \geq I_g$ , виробляють керуючий сигнал на виконавчий елемент на миттєве спрацьовування захисту.

6. У модулі 6 визначають середньоквадратичне значення  $I_N$  струму в N-провіднику з урахуванням усіх трьох гармонік за виразом (7).

7. У модулі 7 здійснюють порівняння значення  $I_N$  зі струмовою уставкою перевантаження  $I_{NL}$ , і у випадку, якщо  $I_N \geq I_{NL}$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ .

8. У модулі 8 формують час  $t_L$  спрацьовування захисту  $L_N$ .

Таким чином, цілеспрямоване спотворення середньоквадратичного значення струму в N-провіднику шляхом вибору відповідної частоти дискретизації аналогової залежності  $i_N(t)$ , дозволяє не враховувати величину струму 3-ї гармоніки при побудові захисту від однофазного КЗ і враховувати при побудові захисту від перевантаження. За відсутності вищих гармонік значення  $I_N$  автоматично дорівнює значенню  $I_{3Nmin}$ , яке в свою чергу, дорівнює струму 1-ї основної гармоніки. Тим самим вирішується поставлена задача забезпечення високої надійності захисту N-провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах як з нелінійними, так і з лінійними навантаженнями.

Джерела інформації:

1. ГОСТ 26522-85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. - Введ. 1986-07-01. - М.: Издательство стандартов, 1987. - 18 с.

2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов / В.А. Андреев. - 4-е изд. перераб. и доп. - М: Высшая школа, 2006. - 639 с. - ISBN 5-06-004826-8.

3. Райнин В.Е. Комплексные критерии срабатывания автоматических выключателей низкого напряжения / В.Е. Райнин, А.С. Кобозев // Электротехника: Ежемесячный научно-техн. журнал. - М.: ЗАО "Знак", 2012. - №5. - С. 2-8. - ISSN 0013-5860.

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

5. Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля [Электронный ресурс] / Dsplib.ru. Теория и практика цифровой обработки сигналов. - Режим доступа:

<http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>, свободный. - Загл. с экрана. - Текст на экране русский (Дата обращения 06.09.2013).

6. Пат. № 2355090 Российской Федерации МПК H02H3/08. Способ быстродействующей максимальной токовой защиты электрических цепей (варианты) / Г.М. Гапоненко, В.В. Омельченко, О.С. Кобозев. - № 2007134556/09, заявл. 17.09.2007; опублик. 10.05.2009.

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

8. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Введ. 2015-01-01.-М.: Стандартиформ, 2015. - III, 42 с.

9. Климов В.П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания [Электронный ресурс] / В.П. Климов, А.Д. Москалев // Тэнси Плюс. - Электрон. дан. - Режим доступа: <http://www.tensy.ru/articleOI.html>, свободный. - Загл. с экрана. - Текст на экране русский (Дата обращения 31.08.2015).

10. Григорьев О.А. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О.А. Григорьев, В.С. Петухов, В.А. Соколов, И.А. Красилов. - Новости электротехники. - 2002. - №6(18). - 2003. - №1(19). - Режим доступа: [http://www.news.elteh.ru/arh/2003/18\\_19/14.php](http://www.news.elteh.ru/arh/2003/18_19/14.php), свободный. - Загл. с экрана. - Текст на экране русский (Дата обращения 25.03.2015).

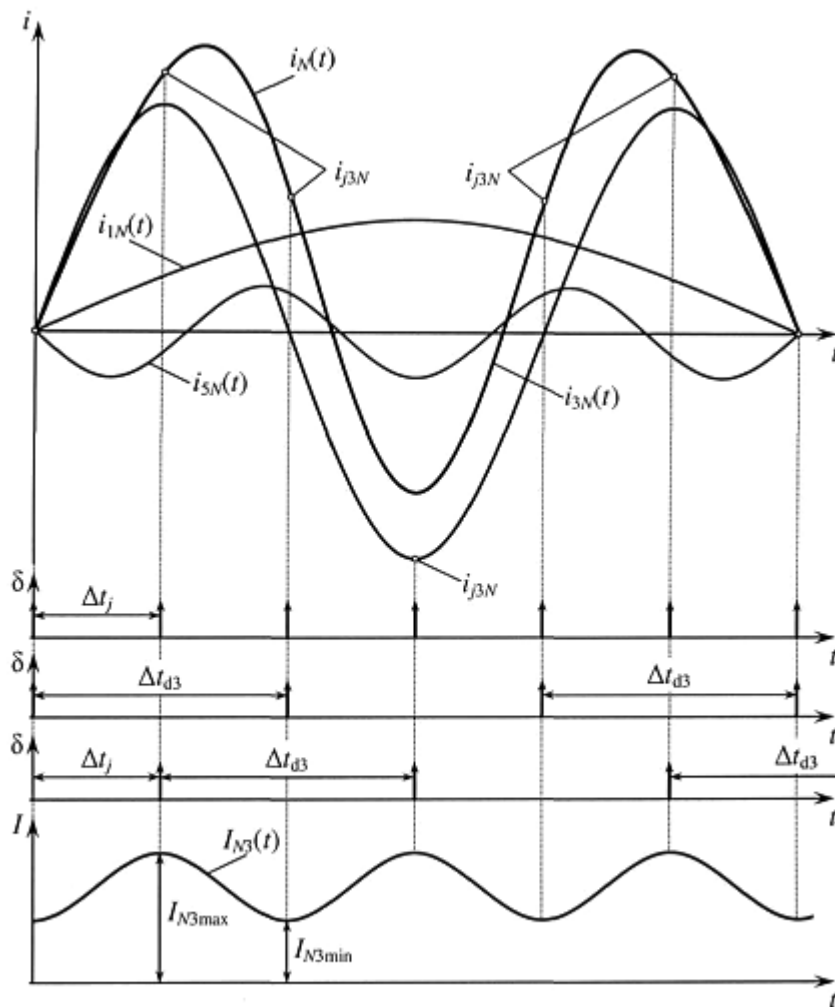
11. Philip J. A. Ling. Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion In A Pc-Rich Environment [Электронный ресурс] / Philip J. A. Ling, Cyril J. Eldridge // Designing next generation electrical systems. - Режим доступа: <http://www.powerstudies.com/sites/www.powerstudies.com/files/DesigningModern.pdf>, свободный. - Загл. с экрана. - Текст на экране англ. (Дата обращения 12.01.2015).

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

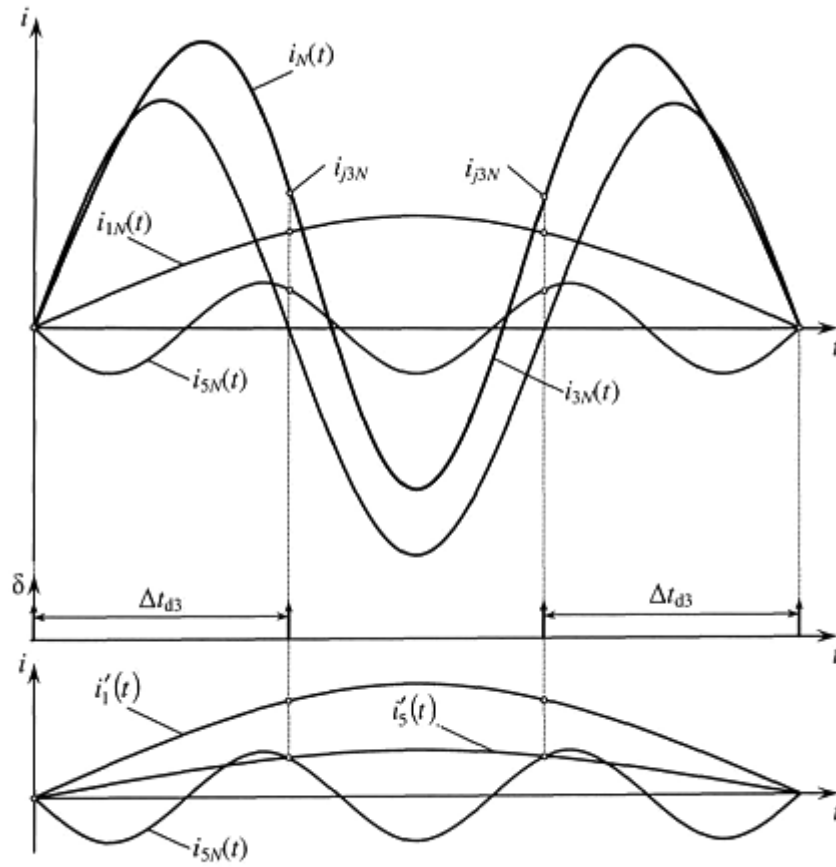
Спосіб захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень, в якому середньоквадратичне значення фактичного струму  $I_N$  в нейтральному провіднику визначають методом чисельного інтегрування в діапазоні часу, що дорівнює періоду зміни струму першої гармоніки  $T_1$ , квадратів тих миттєвих значень струму  $i_{Nj}^2$ , які відповідають дискретним значенням  $i_{Nj}$  результату множення безперервної залежності  $i_N(t)$  зміни в часі струму в нейтральному провіднику на ґратчасту дельта-функцію  $\delta(t - \Delta t_d)$ , де інтервал дискретизації  $\Delta t_d$  ґратчастої функції в 3 і більше разів менший за період  $T_k$  зміни струму найвищої k-ї непарної гармоніки струму ( $3\Delta t_d \leq T_k$ ), після чого, якщо величина  $I_N$  виявляється більшою за значення струмової уставки  $I_g$  однофазного короткого замикання виробляють керуючий сигнал на миттєве спрацьовування захисту, а якщо більшою за значення  $I_{NL}$  струмової уставки перевантаження виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ , який **відрізняється** тим, що враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів, для чого додатково в ковзному режимі через часовий інтервал  $\Delta t_j$ , в 12 разів менший за період  $T_1$  зміни струму 1-ої гармоніки:  $\Delta t_j = 0,0833T_1 = 1,667$  мс, шляхом заміни використаного миттєвого значення  $i_{Nj}$  струму новим  $i_{N(j+1)}$  здійснюють безперервний моніторинг залежності в часі середньоквадратичного значення струму  $I_{3N}(t)$  в нейтральному провіднику, розрахованої за дискретними значеннями струмів  $i_{j3N}$ , що відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності  $i_N(t)$  в часі  $t$  струму в нейтральному провіднику з частотою дискретизації  $f_{d3}$ , в 2 рази більшою за частоту  $f_3$  зміни струму 3-ої гармоніки  $i_{3N}(t): f_{d3} = 2f_3$ , потім визначають мінімальне  $I_{3Nmin}$  й максимальне  $I_{3Nmax}$  значення залежності  $I_{3N}(t)$  й середньоквадратичне значення  $I_N$  струму в N-провіднику

$I_N = \sqrt{\frac{I_{3Nmax}^2 + I_{3Nmin}^2}{2}}$ , після чого здійснюють порівняння значення  $I_{3Nmin}$  зі струмовою уставкою

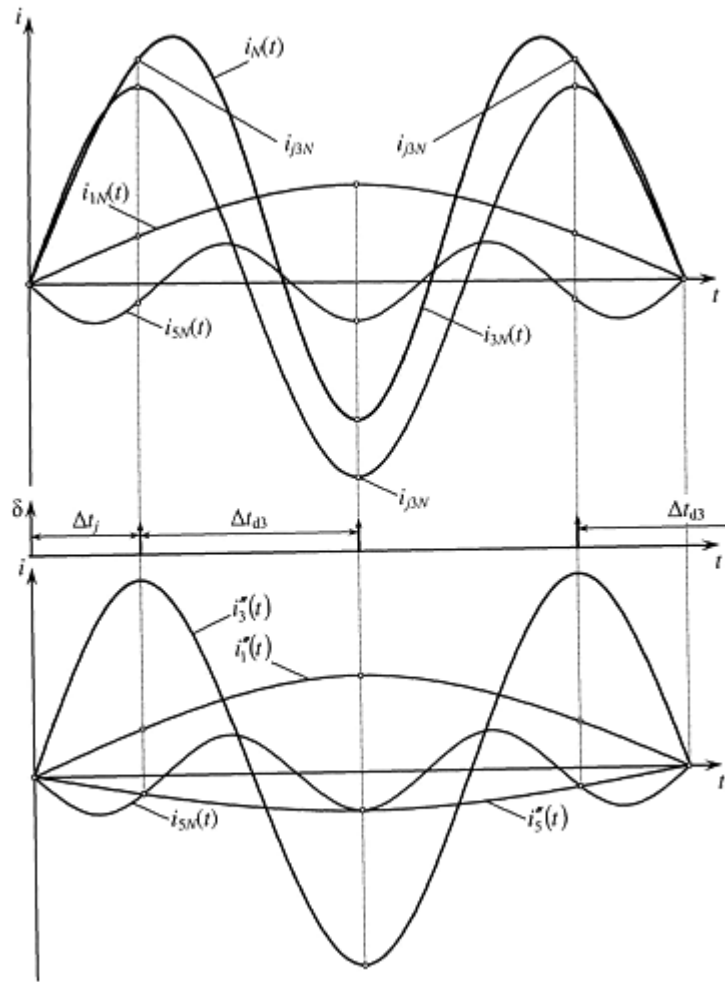
$I_g$  однофазного короткого замыкання, а значення  $I_N$  зі струмовою уставкою перевантаження  $I_{NL}$ , і у випадку, якщо  $I_{3Nmin} \geq I_g$ , виробляють керуючий сигнал на миттєве спрацьовування захисту, а у випадку, якщо  $I_N \geq I_{NL}$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту з визначеною витримкою часу  $t_L$ .



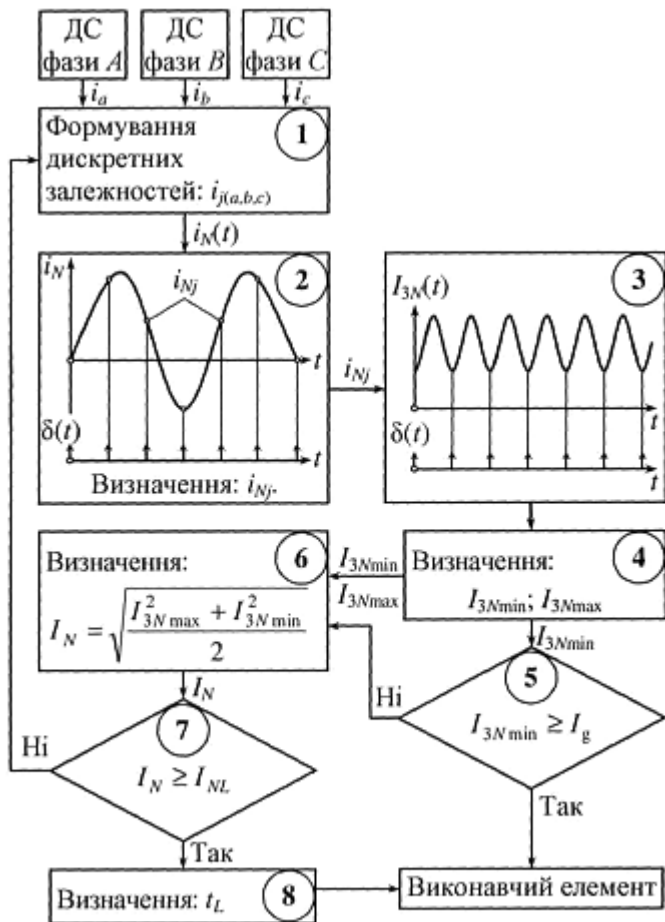
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фіг. 4