



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **119874** (13) **C2**

(51) МПК (2019.01)

**H02H 3/08** (2006.01)

**H02H 3/13** (2006.01)

**H02H 7/00**

**H01H 73/00**

**G01R 31/02** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**

<b>(21)</b> Номер заявки:	<b>а 2016 13655</b>	<b>(56)</b> Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
<b>(22)</b> Дата подання заявки:	<b>30.12.2016</b>	UA 105560 C2, 26.05.2014
<b>(24)</b> Дата, з якої є чинними права на винахід:	<b>27.08.2019</b>	RU 2230415 C1, 10.06.2004
<b>(41)</b> Публікація відомостей про заявку:	<b>10.07.2017, Бюл.№ 13</b>	Кобозев О.С. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі / О.С. Кобозев, О.Г. Середа, В.В. Моргун // Електротехніка і Електромеханіка. - 2012. - № 5. - С. 21-26
<b>(46)</b> Публікація відомостей про видачу патенту:	<b>27.08.2019, Бюл.№ 16</b>	Байда Е.И. Защита однофазных потребителей от перенапряжений при обрыве нулевого провода / Е.И. Байда, А.С. Кобозев, Г.Н. Гапоненко // Електротехніка і Електромеханіка. - 2010. - № 1. - С. 6-10
<b>(72)</b> Винахідник(и):	<b>Кобозев Олександр Сергійович (UA), Середа Олександр Григорійович (UA), Агабабов Артур Юрійович (UA), Юхно Олександр Дмитрович (UA)</b>	UA a201600564, 10.06.2016
<b>(73)</b> Власник(и):	<b>Кобозев 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), Агабабов Артур Юрійович, пр. Тракторобудівників, 65, кв. 143, м. Харків-120, 61120 (UA), Юхно Олександр Дмитрович, вул. Кривомазова, 39, кв. 1, м. Харків-124, 61157 (UA)</b>	RU 2355090 C1, 10.05.2009
		EP 0561210 A2, 22.09.1993
		US 5345377 A, 06.09.1994
		US 8331065 B2, 11.12.2012

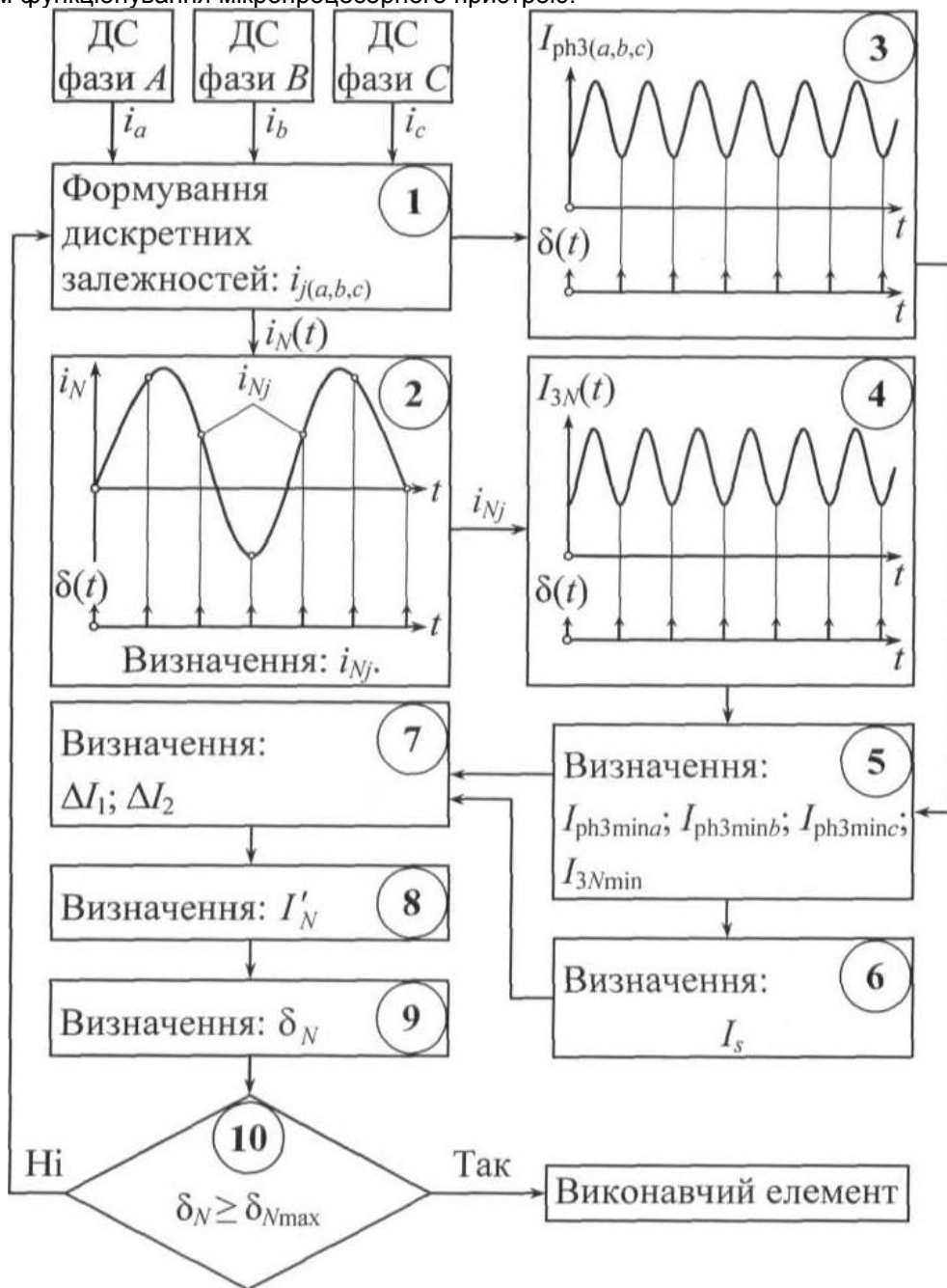
**(54) СПОСІБ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З РОЗПОДІЛЕНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ВІД ОБРИВУ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВІДНИКА З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ФАЗНИХ СТРУМІВ**

**(57) Реферат:**

Спосіб захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень належить до способів релейного захисту електричних мереж, зокрема розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ з нелінійними видами навантажень, від обриву нейтрального провідника (N-провідника) на будь-якій ділянці довгої лінії (захист N). В результаті визначення величин очікуваного й фактичного струмів в N-провіднику проводиться з урахуванням струмів, що змінюються з частотою лише 1-ї основної гармоніки. В заявленому способі враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів. Так як струми 3-ї гармоніки додаються в N-провіднику арифметично, а струми 1-ї та 5-ї гармонік геометрично, частка струму 3-ї гармоніки в N-

UA 119874 C2

провіднику може істотно перевищувати частку струмів 1-ї та 5-ї гармонік. Тому струми 3-ї гармоніки знижують чутливість захисту. Особливість методу полягає у цілеспрямованому спотворенні величини середньоквадратичного значення струму за рахунок вибору такої частоти дискретизації аналогової залежності  $i(t)$  зміни струму в часі, при якій в дискретних значеннях повного струму  $i_j$  не буде дискретних значень  $i_{3j}$  струму 3-ї гармоніки. Тобто струм 3-ї гармоніки не враховують при розрахунку середньоквадратичного значення струму  $i(t)$ . Запропонований спосіб дозволяє підвищити точність й надійність захисту N-провідника, а також спростити алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою.



Фіг. 5

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

Мережі з повітряними лініями електропередачі й розподіленим вздовж лінії навантаженням характерні для сільськогосподарських районів і котеджних селищ. Труднощі в реалізації захисту N споживачів в аварійній частині полягають в тому, що обрив N-провідника внаслідок механічної дії (падіння дерева) може відбутися в будь-якому місці вздовж довгої лінії як на початку лінії, так і між споживачами. Це означає, що величину надмірної несиметрії фазних струмів, при якій виникають небезпечні перенапруги понад 10 %, необхідно визначати саме для аварійної частини мережі, в той час як датчики струму ввідного автоматичного вимикача (АВ) розташовані на початку мережі й гарантовано можуть зафіксувати обрив N-провідника тільки на початку лінії. Вочевидь, що безпосередній вимір струму при обриві N-провідника між споживачами за допомогою датчиків ввідного АВ неможливий. Тому необхідні спеціальні методи аналізу миттєвих значень струму на початку мережі для аналізу процесів в аварійній частині.

Мережі з кабельними лініями електропередачі і зосередженим наприкінці лінії навантаженням характерні для багатоквартирних будинків, торгових та офісних центрів, навчальних закладів. Якщо говорити про ділянку від трансформатора до зосередженого навантаження, то обрив N-провідника в будь-якому місці лінії завжди призводить до повного зникнення струму в N-провіднику. На перший погляд, завдання формування критерію захисту значно спрощується. Необхідно визначити лише відсутність струму в N-провіднику, так як несиметрія фазних струмів присутня завжди. Насправді ж підключене наприкінці лінії навантаження, не можна розглядати як зосереджене. По суті, наприкінці лінії є локальна розподільна мережа з розподіленим навантаженням. У такій мережі, як і в розглянутій раніше мережі з повітряними лініями електропередачі, можливі аварійні режими, при яких обрив N-провідника відбудеться лише для частини споживачів. Тому, якщо говорити про захист мереж з кабельними лініями електропередачі в цілому, то проблема їх захисту від обриву N-провідника є аналогічною проблемі захисту мереж з повітряними лініями.

Контроль цілісності N-провідника може бути здійснений зі співвідношення між струмами, що протікають в N-провіднику й заземленні нейтралі трансформатора живлення, яке залежить від фізичних параметрів лінії та кількості повторних заземлювачів N-провідника на лінії [1]. Принцип дії пристрою оснований на вимірюванні та використанні співвідношення між струмами  $I_{01}$  на початку N-провідника та  $I_3$  в заземленні нейтралі трансформатора. У нормальному режимі роботи мережі в N-провіднику на початку лінії протікає струм  $I_{01}$ , а в заземленні нейтралі трансформатора протікає струм  $I_3$ . Між струмом  $I_{01}$  і струмом  $I_3$  існує певне співвідношення, яке залежить від фізичних параметрів мережі та може бути розраховане для кожної конкретної мережі. Отже, знаючи струм  $I_{01}$ , можна обчислити струм  $I_3$ . За виміряним за допомогою датчика значенням струму  $I_{01}$  визначається розрахункове значення струму  $I_{3p}$ , яке порівнюється з виміряним струмом  $I_3$ , отриманим за допомогою датчика, причому розрахункове значення має збігатися з виміряним. При обриві N-провідника співвідношення між струмами різко змінюється. Якщо значення  $I_{3p}$ , розраховане в обчислювальному блоці, відрізняється від виміряного  $I_3$ , блок прийняття рішення генерує сигнал на виконавчий механізм, який відключає трансформатор живлення. Блок перевірки симетрії запобігає помилковим спрацюванням пристрою в разі симетричного навантаження споживачів, коли можливе порушення співвідношення між струмами в N-провіднику на початку лінії й в заземленні нейтралі трансформатора. Недоліком цього способу є недостатньо висока точність і мала зона контролю, так як пристрій контролю надійно працює на довжинах до 500 м [2]. Згідно з аналізом схем міських розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ довжина окремих ліній не перевищує 300-400 м. Тому в міських умовах зони дії 500 м достатньо, а в сільській місцевості найчастіше ні. Лінії напругою 0,4 кВ в сільській місцевості можуть досягати довжини в 1,5-2 км. Крім того, необхідно мати додатковий датчик в місці заземлення нейтралі трансформатора живлення, яке віддалене від захисного пристрою.

Для контролю стану N-провідника може бути використано співвідношення між іншими струмами, наприклад, між струмом  $I_{01}$  в N-провіднику на початку лінії та струмом  $I_{02}$  в N-провіднику за першим повторним заземлювачем [3]. При обриві N-провідника різниця струмів

$\Delta I = I_{01} - I_{02}$  збільшується, що є ознакою виникнення аварійного режиму електричної мережі.

Якщо значення  $\Delta I$ , що подається в обчислювальний блок, перевищує значення, виміряне для нормального режиму з урахуванням коливання несиметрії навантаження і сезонності коливань опорів повторних заземлювачів, блок прийняття рішення генерує сигнал на відключення. Однак

5 внаслідок малих відмінностей між струмами, що порівнюються, такі запобіжні заходи мають низьку чутливість [4].

В [2] запропоновано спосіб виявлення обриву N-провідника і захисту споживачів електричної енергії від перенапруг, викликаних погіршенням параметрів N-провідника або його обривом, а також для забезпечення електро-, пожежо- й вибухобезпеки. Спосіб і робота пристрою оснований

10 на постійному пропусканні високочастотних прямокутних імпульсів через коло "нульовий провід лінії, що захищається - система повторних заземлювачів - земля" з частотою каналів, що відрізняється від сусідніх каналів не менше ніж на 200 Гц. Потім на живильному кінці лінії здійснюють фільтрацію сигналів, що надходять, дешифрацію, порівняння зі заздалегідь відомою величиною амплітуди імпульсу і при зниженні її більш ніж на 15 % відключають аварійну лінію.

15 Недоліками цього способу є: погіршення якості електроенергії в мережі за рахунок пропускання високочастотних імпульсів через N-провідник і сукупність повторних заземлювачів, необхідність додаткової установки фільтрів, що перешкоджають попаданню високочастотних імпульсів в коло навантаження, досить висока складність пристрою, робота якого залежить від опорів повторних заземлювачів і пристроїв заземлення споживача.

20 Найближчим за технічною суттю до винаходу, що заявляється: аналіз миттєвих (дискретних) значень параметрів процесу збурення електричного кола, зокрема обрив N-провідника, є спосіб [5], в якому для контролю цілісності N-провідника використовують аналіз дискретних значень струму в фазах a, b, c та в N-провіднику за місцем розташування захисного пристрою. Суть технічного рішення [5] полягає в тому, що здійснюють порівняння очікуваного

25 середньоквадратичного значення струму в N-провіднику  $I^N$ , яке визначають як геометричну

суму зрушених на  $120^\circ$  векторів фазних струмів  $I_{ph(a,b,c)}$ , з фактичним середньоквадратичним 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 -

30 фактичний струм  $I^N$  в N-провіднику при його обриві в будь-якому місці розгалуженої електричної мережі. В залежності від конкретного виконання мікропроцесорного пристрою захисту значення  $I^N$  визначають в один спосіб: або за допомогою датчика струму, встановленого в N-провіднику, або шляхом обчислення миттєвих значень струму в N-провіднику  $I_{jN}$  як суми миттєвих значень фазних струмів  $I_{jph(a,b,c)}$  з урахуванням знаку.

35 Перший недолік способу [5] полягає в наступному. Якщо в розподільній мережі електропостачання присутні нелінійні навантаження та обумовлені ними вищі гармоніки струму, в способі [5] передбачають визначення середньоквадратичних значень найбільш значущих перших трьох непарних гармонік струму 1-ї, 3-ї та 5-ї, з урахуванням яких формується величина  $I^N$ . У зв'язку з тим, що струми 3-ї гармоніки додаються в N-провіднику арифметично, а струми

40 1-ї та 5-ї гармонік геометрично, частка струму 3-ї гармоніки в струмі  $I^N$  може істотно перевищувати частку струмів 1-ї та 5-ї гармонік. Корисним сигналом для фіксації обриву N-провідника є геометрична сума струмів 1-ї та 5-ї гармонік, так як струми 3-ї гармоніки не впливають на зміщення "нуля" векторної діаграми фазних струмів та напруг при обриві N-провідника, а отже й на обумовлені цим перенапруги у однофазних споживачів. Тому струми 3-ї

45 гармоніки, по суті, є перешкодами, що знижують чутливість, точність та надійність функціонування захисту N. Для виключення струмів 3-ї гармоніки можна використовувати відповідний фільтр на вході захисного пристрою. Проте в цьому випадку неможливо забезпечити цим же захисним пристроєм захист N-провідника від струмів перевантаження. Саме струми 3-ї гармоніки, які арифметично додаються в N-провіднику, при перевантаженні будуть найбільш значущими за величиною. Переважніше мати таке технічне рішення, в якому 3-ю гармоніку струму виключають вибірково, залежно від виду реалізованого захисту.

50 Другий недолік способу [5] полягає в недостатній точності визначення величини  $I^N$  як

геометричної суми векторів повних фазних струмів  $I_{ph(a,b,c)}$ . В будь-якій 3-х фазній несиметричній векторній діаграмі фазних струмів можна виключити симетричну компоненту, яка

взаємно компенсується і не створює струм в N-провіднику. Величина симетричної компоненти в фазних струмах при аналізі очікуваного струму в N-провіднику також є суттєво перешкодою, що знижує точність аналізу корисного сигналу й, як наслідок, знижує надійність захисту. При аналізі струму в N-провіднику доцільніше оперувати не повними значеннями фазних струмів, в яких існують й симетричні компоненти, а тільки величинами несиметричних компонент фазних струмів. Наприклад, якщо найменше середньоквадратичне значення струму  $I_s$  зафіксовано в фазі c, то середньоквадратичне значення струму симетричної компоненти  $I_s$  дорівнюватиме струму в цій фазі:  $I_s = I_c$ . Відповідно середньоквадратичні значення несиметричних компонент струму дорівнюватимуть:

$$\Delta I_1 = I_a - I_s = I_a - I_c; \quad (1)$$

$$\Delta I_2 = I_b - I_s = I_b - I_c. \quad (2)$$

В основу винаходу поставлено задачу підвищити надійність захисту N шляхом підвищення точності аналізу середньоквадратичного значення струму в N-провіднику й спрощення алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою за рахунок розробки такого методу визначення середньоквадратичних значень струмів, коли при розрахунках вибірково виключають струми 3-ї гармоніки, а струми 5-ї гармоніки трансформують в струми, що змінюються з частотою 1-ї гармоніки зберігаючи їх величину. В результаті визначення величин очікуваного й фактичного струмів в N-провіднику проводиться з урахуванням струмів, що змінюються з частотою лише 1-ї основної гармоніки.

Поставлена задача вирішується в способі захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів, відповідно до якого, в кожній фазі a, b, c здійснюють вимір миттєвих значень струмів  $I_a(t)$ ,  $I_b(t)$ ,  $I_c(t)$  ( $I_{(a,b,c)}(t)$ ) та їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення  $I_{ja}$ ,  $I_{jb}$ ,  $I_{jc}$  ( $I_{j(a,b,c)}$ ) з інтервалом дискретизації  $\Delta t_d$ , потім визначають середньоквадратичні значення фазних струмів  $I_{pha}$ ,  $I_{phb}$ ,  $I_{phc}$  ( $I_{ph(a,b,c)}$ ) усіх трьох фаз a, b, c методом інтегрування квадратів  $I_{ja}^2$ ,  $I_{jb}^2$ ,  $I_{jc}^2$  ( $I_{j(a,b,c)}^2$ ) знайдених дискретних значень  $I_{j(a,b,c)}$ , за рахунок того, що враховують нелінійні спотворення синусоїдальної форми зміни фазних струмів, для чого додатково в кожному режимі через часовий інтервал  $\Delta t_j$ , в 12 разів менший за період  $T_1$  зміни струму 1-ї гармоніки:  $\Delta t_j = 0,0833T_1 = 1,667$  мс, шляхом заміни використаних миттєвих значень  $I_{j(a,b,c)}$  та  $I_{jN}$  струмів в фазах a, b, c та нейтральному провіднику новими  $I_{j+1(a,b,c)}$  та  $I_{(j+1)N}$

здійснюють безперервний моніторинг залежностей в часі середньоквадратичних значень фазних струмів  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  та струму  $I_{3N}(t)$  в нейтральному провіднику, розрахованих за дискретними значеннями струмів  $I_{j3(a,b,c)}$  та  $I_{j3N}$ , що відповідають дискретизації вихідних аналогових залежностей в часі t струмів  $I_{(a,b,c)}(t)$  в фазах a, b, c та  $I_N(t)$  в нейтральному провіднику з частотою дискретизації  $f_{d3}$ , в 2 рази більшою за частоту  $f_3$  зміни струмів 3-ї гармоніки  $I_{3(a,b,c)}(t)$  та  $I_{3N}(t)$ :  $f_{d3} = 2f_3$ , потім визначають мінімальні екстремальні значення  $I_{ph3mina}$ ,  $I_{ph3minb}$ ,  $I_{ph3minc}$  та  $I_{3Nmin}$  залежностей  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  та  $I_{3N}(t)$ , відповідно, після чого визначають середньоквадратичне значення струму симетричної компоненти  $I_s$  векторної діаграми фазних струмів трифазного кола при несиметричному навантаженні, як найменше зі значень  $I_{ph3mina}$ ,  $I_{ph3minb}$ ,  $I_{ph3minc}$ , потім визначають середньоквадратичні значення несиметричних компонент фазних струмів, які формують струм в нейтральному провіднику, як різницю між середньоквадратичними значеннями струмів останніх двох фаз й значенням симетричної компоненти:  $\Delta I_1 = I_1 - I_s$  та  $\Delta I_2 = I_2 - I_s$ , потім визначають середньоквадратичне значення очікуваного струму в нейтральному провіднику з виразу  $I'_N = \sqrt{\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2 - \Delta I_1 \Delta I_2}$ , після чого очікуване значення струму в нейтральному провіднику  $I'_N$  порівнюють з фактичним середньоквадратичним значенням струму в нейтральному провіднику:  $I_N = I_{3Nmin}$  і, у випадку, якщо різниця між значеннями очікуваного і фактичного струмів в нейтральному провіднику,

$$\delta_N = \frac{I_N - I_{3Nmin}}{I_N}$$

виражена у відносних одиницях  $\delta_N$  більша заданого значення  $\delta_{Nmax} : \delta_N \geq \delta_{Nmax}$ ,

виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту.

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

5 менший за період  $T_1$  зміни струму 1-ї гармоніки:  $\Delta t_j = 0,0833T_1 = 1,667$  мс, шляхом заміни

використаних дискретних миттєвих значень  $i_{j(a,b,c)}$  та  $i_{jN}$  струмів в фазах a, b, c та

нейтральному провіднику новими  $i_{j+1(a,b,c)}$  та  $i_{(j+1)N}$  здійснюють безперервний моніторинг

залежностей в часі середньоквадратичних значень фазних струмів  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  та струму  $I_{3N}(t)$  в

10 нейтральному провіднику, розрахованих за дискретними значеннями струмів  $i_{j3(a,b,c)}$  та  $i_{j3N}$ , що

відповідають дискретизації вихідних аналогових залежностей в часі  $t$  струмів  $i_{(a,b,c)}(t)$  в фазах

a, b, c та  $i_N(t)$  в нейтральному провіднику з частотою дискретизації  $f_{d3}$ , в 2 рази більшою за

частоту  $f_3$  зміни струмів 3-ї гармоніки  $i_{3(a,b,c)}(t)$  та  $i_{3N}(t) : f_{d3} = 2f_3$  потім визначають мінімальні

екстремальні значення  $I_{ph3mina}$ ,  $I_{ph3minb}$ ,  $I_{ph3minc}$  та  $I_{3Nmin}$  залежностей  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  та  $I_{3N}(t)$ ,

відповідно, після чого визначають середньоквадратичне значення струму симетричної

15 компоненти  $I_s$  векторної діаграми фазних струмів трифазного кола при несиметричному

навантаженні, як найменше зі значень  $I_{ph3mina}$ ,  $I_{ph3minb}$ ,  $I_{ph3minc}$ , потім визначають

середньоквадратичні значення несиметричних компонент фазних струмів, які формують струм в

нейтральному провіднику, як різницю між середньоквадратичними значеннями струмів останніх

двох фаз й значенням симетричної компоненти:  $\Delta I_1 = I_1 - I_s$  та  $\Delta I_2 = I_2 - I_s$ , потім визначають

20 середньоквадратичне значення очікуваного струму в нейтральному провіднику з виразу

$I'_N = \sqrt{\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2} - \Delta I_1 \Delta I_2$ , після чого очікуване значення струму в нейтральному провіднику  $I'_N$

порівнюють з фактичним середньоквадратичним значенням струму в нейтральному провіднику:

$I'_N = I_{3Nmin}$  і, у випадку, якщо різниця між значеннями очікуваного й фактичного струмів в

нейтральному провіднику, виражена у відносних одиницях  $\delta_N = \frac{I'_N - I_{3Nmin}}{I'_N}$ , більша заданого

25 значення  $\delta_{Nmax} : \delta_N \geq \delta_{Nmax}$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту, і

вирішується поставлена задача підвищення надійності захисту електричної мережі напругою 0,4

кВ з розподіленим нелінійними навантаженням від обриву нейтрального провідника й

спрощення алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою.

30 Покажемо, у чому полягає особливість методу визначення середньоквадратичних значень

струмів, коли при розрахунках вибірково виключають струми 3-ї гармоніки, а струми 5-ї

гармоніки трансформують у струми з частотою 1-ї гармоніки зі збереженням їх величин. Такий

підхід дозволяє підвищити точність й надійність захисту N, а також спростити алгоритм

35 функціонування мікропроцесорного пристрою.

Особливість методу, що заявляється, полягає у цілеспрямованому спотворенні величини

середньоквадратичного значення струму за рахунок вибору такої частоти дискретизації

аналогової залежності  $i(t)$  зміни струму в часі, при якій в дискретних значеннях повного струму

$i_j$  не буде дискретних значень  $i_{3j}$  струму 3-ї гармоніки. Тобто струм 3-ї гармоніки не буде

врахований при розрахунку середньоквадратичного значення струму  $i(t)$ .

40 Найбільше спотворення середньоквадратичного значення певної гармоніки струму буде при

дискретизації вихідної аналогової залежності з частотою, що дорівнює подвоєній частоті цієї

гармоніки. В цьому випадку при розрахунку середньоквадратичного значення сумарного струму

середньоквадратичне значення згаданої гармоніки при певних умовах може дорівнювати нулю і

не бути враховано. Для 3-ї гармоніки струму такою критичною частотою дискретизації є частота

45  $f_{d3} = 2f_3 = 300$  Гц, де  $f_3 = 150$  Гц - частота 3-ї гармоніки струму.

Для правильного визначення середньоквадратичних значень  $I_{pha}$ ,  $I_{phb}$ ,  $I_{phc}$  струмів в

фазах a, b, c за дискретними значеннями  $i_{jpha}$ ,  $i_{jphb}$ ,  $i_{jphc}$  необхідно виконання теореми

Котельникова [6] й Держстандарту [7]. Згідно [6], 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 [7] щодо частоти дискретизації жорсткіша - частота дискретизації  $f_d$  має бути, як мінімум, в 3 рази більшою за частоту  $f_k$ :

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

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 й 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  $i_{jpha}$ ,  $i_{jphb}$ ,  $i_{jphc}$  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 [7].

Таким чином, мінімальна необхідна кількість миттєвих значень синусоїди струму найвищої  $k$ -ї гармоніки з частотою, що дорівнює  $k f_1$ , 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:

$$f_d \geq 3k \cdot f_1 \quad (2)$$

Більша частина комп'ютерного та офісного устаткування є нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення синусоїди фазних струмів в мережі живлення. 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 [8]. Тому для правильного визначення середньоквадратичного значення струму за [7] 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.

Фіг. 1-5 пояснюють суть способу захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів.

На фіг. 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 а, b, c, який є сумою струмів трьох зазначених вище гармонік. Наведена залежність  $i_{ph}(t)$  за своїм характером і гармонійним складом відповідає фазним струмам [8]. Залежність  $i_{ph}(t)$  містить в собі 1, 3 та 5-у гармоніки.

Якщо вихідна залежність  $i_{ph}(t)$  множиться на  $\delta$ -функцію з частотою дискретизації  $f_d \geq 3f_5 \geq 750$  Гц, то середньоквадратичне значення  $i_{ph}$  вказаної функції, обчислене за отриманими дискретними значеннями струму  $i_j$ , завжди буде величиною постійною  $i_{ph} = \text{const}$ , незалежно від початкової фази  $\psi$  вихідної функції. Залежність  $i_{ph}(t)$ , наведена на фіг. 1, побудована для випадку  $\psi_k = \psi_1 = \psi_3 = \psi_5 = 0$ . Проте і при інших значеннях початкової фази

$\psi_k \neq 0$ , відмінних від нуля, величина  $I_{ph}$  буде незмінною  $I_{ph} = \text{const}$ . Це означає, що якщо обчислювати середньоквадратичне значення  $I_{ph}$  струму в режимі ковзання, через часовий інтервал ковзання  $\Delta t_j$ , то часова залежність  $I_{ph}(t)$  матиме вигляд прямої лінії, паралельної осі часу  $t$  [8].

5 Проаналізуємо характер зміни залежності  $I_{ph}(t)$  для частоти дискретизації  $f_{d3} = 2f_3 = 300$  Гц. У момент переходу 3-ї гармоніки  $i_3(t)$  фазного струму  $i_{ph}(t)$  через нуль її частка в миттєвому значенні  $i_j$  струму  $i_{ph}(t)$  буде відсутня  $i_{j3} = 0$ . Тому, якщо точки перетинання  $\delta$ -функції з залежністю  $i_{ph}(t)$  будуть у моменти проходження струму  $i_3(t)$  через нуль, то в середньоквадратичному значенні  $I_{ph3}$  не буде враховано струм 3-ї гармоніки. Тоді часова  
10 залежність  $I_{ph3}(t)$  буде не постійною за величиною, а змінюватися в часі від свого максимального  $I_{ph3max}$  до мінімального  $I_{ph3min}$  значення з кожним кроком ковзання  $\Delta t_j$  (фіг. 1). Вочевидь, що в мінімальному значенні  $I_{ph3min}$  не буде враховано струм 3-ї гармоніки.

Розглянемо складові струму  $I_{ph3min}$ . При обчисленні значення  $I_{ph3}$  використовують миттєві значення струму  $i_{j3}$ , отримані з частотою дискретизації  $f_{d3}$  (фіг. 1). Вимоги [7] виконуються  
15 тільки для середньоквадратичного значення  $I_1$  струму 1-ї гармоніки. Відповідно складова  $I_{ph3min}$  містить середньоквадратичне значення струму 1-ї гармоніки, визначене без спотворень, та частину струму 5-ї гармоніки, відновлену за дискретними значеннями  $i_{j3}$  струму  $i_{ph}(t)$ , які відповідають моментам часу проходження струму  $i_3(t)$  через нульове значення. Відновлена за значеннями  $i_{j3}$  синусоїда струму  $i_5(t)$  змінюється з частотою 1-ї гармоніки, і, як довели  
20 результати розрахунків, середньоквадратичне значення  $I_5$  синусоїди  $i_5(t)$  дорівнює середньоквадратичному значенню струму 5-ї гармоніки  $I_5$ , визначеному без спотворень.

Так як частоти обох гармонік 1-ї та  $i_5(t)$  після зворотного перетворення збігаються, значення струму  $I_{ph3min}$  можна подати як арифметичну суму:

$$I_{ph3min} = I_1 + I_5 = I_1 + I_5, \quad (3)$$

де  $I_1$  - середньоквадратичне значення 1-ї гармоніки фазного струму;  $I_5$  -  
25 середньоквадратичне значення 5-ї гармоніки фазного струму;  $I_5$  - середньоквадратичне значення спотвореної 5-ї гармоніки струму  $i_5(t)$ .

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

На фіг. 3 наведені вихідні залежності в часі  $i_{1N}(t)$ ,  $i_{3N}(t)$ ,  $i_{5N}(t)$  струмів перших 3-х непарних гармонік, що протікають в N-провіднику, а також залежності струмів 1-ї  $i_{1N}(t)$  та 5-ї  $i_{5N}(t)$   
35 гармонік, відновлені шляхом зворотного перетворення за дискретними значеннями  $i_{j3N}$ . При цьому початок дискретизації відповідає моменту часу проходження струму 3-ї гармоніки через нуль.

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  
40 бути більшою подвійної частоти найвищої гармоніки струму [7]. У разі порушення вимоги [7] 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 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 своє максимальне значення, то струм 3-ї гармоніки буде врахований. Це означає, що обчислення середньоквадратичних значень струму за дискретними значеннями  $I_{j3N}$ , отриманими при частоті дискретизації  $f_{d3}=300$  Гц і при різних моментах початку дискретизації вихідної залежності в часі  $i_N(t)$ , буде виборчим математичним фільтром 3-ї гармоніки струму. Аналогова залежність  $i_N(t)$  може бути отримана безпосереднім виміром датчиком струму або через миттєві 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 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. 2).

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 при такому зворотному перетворенні 5-ї гармоніки неминучі її спотворення. Як показано на фіг. 2, відновлена залежність  $i_{5N}(t)$  змінюється з частотою  $f_1$  1-ї основної гармоніки. Середньоквадратичне ж значення  $I_{5N}$  струму  $i_{5N}(t)$  дорівнює вихідному середньоквадратичному значенню  $I_{5N}$  5-ї гармоніки:  $I_{5N} = I_{5N}$ .

Так як частоти обох гармонік 1-ї та  $i_{5N}(t)$  після зворотного перетворення збігаються, значення струму  $I_{3Nmin}$  можна подати як арифметичну суму:

$$I_{3Nmin} = I_{1N} + I_{5N} = I_{1N} + I_{5N}, \quad (4)$$

де  $I_{1N}$  - середньоквадратичне значення 1-ї гармоніки струму в N-провіднику;  $I_5$  - середньоквадратичне значення 5-ї гармоніки струму в N-провіднику;  $I_{5N}$  - середньоквадратичне значення спотвореної 5-ї гармоніки струму  $i_{5N}(t)$ .

Слід зазначити, що коли початок дискретизації відповідає моменту часу проходження струмів 3-ї гармоніки через максимальні значення, тобто коли точки перетинання  $\delta$ -функції з залежностями  $i_{(a,b,c)}(t)$  та  $i_N(t)$  будуть у моменти проходження струмів  $i_{3(a,b,c)}(t)$  та  $i_{3N}(t)$ , відповідно, через максимальні значення, середньоквадратичні значення залежностей  $I_{ph3}(t)$  (фіг. 1) та  $I_{3N}(t)$  (фіг. 2) будуть відповідно  $I_{ph3max}$  та  $I_{3Nmax}$ . За відсутності в мережі струмів 3-ї гармоніки значення  $I_{3max}$  і  $I_{3min}$  дорівнюватимуть. У цих значеннях будуть враховані тільки струми 1-ї та 5-ї гармонік. За відсутності в мережі нелінійних спотворень значення  $I_{3max}$  і  $I_{3min}$  дорівнюватимуть середньоквадратичному значенню струму 1-ї основної гармоніки.

Таким чином, спосіб захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів, що заявляється, придатний для захисту розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ як з нелінійними так і з лінійними видами навантажень.

Відомо, що при симетричному навантаженні трифазного кола струми вищих гармонік не кратних трьом однакові, взаємно компенсуються і не формують струм в N-провіднику. Тому при несиметричному навантаженні трифазного кола немає необхідності аналізувати весь масив значень фазних струмів. Достатньо виділити лише несиметричну компоненту. На фіг. 4 показано, як векторна діаграма струмів трифазного кола при несиметричному навантаженні може бути розділена на симетричну компоненту, в якій фазні струми взаємно компенсуються і не створюють струму в N-провіднику, і несиметричну компоненту, яка й формує струм в N-

провіднику. У представленій на фіг. 4 векторній діаграмі в фазі с найменше середньоквадратичне значення струму  $I_c$ . Це означає, що середньоквадратичне значення струму симетричної компоненти  $I_s$  дорівнюватиме струму в цій фазі:  $I_s = I_c$ . Відповідно середньоквадратичні значення несиметричних компонент струму в фазах a і b, які формують струм в N-провіднику дорівнюватимуть (1)-(2). Для випадку цілісності N-провідника, коли кут між векторами  $\Delta I_1$  і  $\Delta I_2$  дорівнює  $120^\circ$ , величина  $I_N$  визначається наступним виразом:

$$I_N = \sqrt{\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2 - \Delta I_1 \Delta I_2} \quad (5)$$

При обриві N-провідника, навіть частковому, кут між векторами  $\Delta I_1$  і  $\Delta I_2$  не буде дорівнювати  $120^\circ$ . Критерієм обриву N-провідника в будь-якому місці розгалуженого електричного кола є невідповідність очікуваного  $I_N$  і фактичного  $I_N$  значень струму в N-провіднику.

Алгоритмічна схема, що пояснює роботу мікропроцесорного розчеплювача автоматичного вимикача (АВ) при реалізації запропонованого способу захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів, наведена на фіг. 5. Окремі обчислювальні та логічні операції, що виробляє мікропроцесорний пристрій, на фіг. 5 умовно подані у вигляді модулів. Фізично вказаних модулів не існує, їх зображення потрібне для зручності викладу функціонування мікропроцесорного пристрою при реалізації запропонованого способу струмового захисту.

Функціонує мікропроцесорний розчеплювач у такий спосіб:

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

2. У модулі 2 за дискретними значеннями фазних струмів  $i_{j(a,b,c)}(t)$  в ковзному режимі, з часовим кроком ковзання  $\Delta t_j = 1,667$  мс, визначають масив дискретних значень струму в N-провіднику  $i_{Nj}$  за період часу, що дорівнює 20 мс. Відразу ж за дискретними значеннями  $i_{Nj}$  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 1 масиву дискретних значень, які відповідають частоті дискретизації  $f_{d3} = 300$  Гц, здійснюють безперервний моніторинг середньоквадратичних значень струмів  $I_{ph3(a,b,c)}$  фазах a, b, c й визначають залежності в часі  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$ .

4. У модулі 4, використовуючи кожне друге дискретне значення зі сформованого в модулі 2 масиву дискретних значень, які відповідають частоті дискретизації  $f_{d3} = 300$  Гц, здійснюють безперервний моніторинг середньоквадратичного значення струму  $I_{3N}$  в N-провіднику й визначають залежність в часі  $I_{3N}(t)$ .

5. У модулі 5 визначають екстремальні значення  $I_{ph3min}$  функцій  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  в кожній Фазі a, b, c та екстремальне значення  $I_{3Nmin}$  функції  $I_{3N}(t)$ , в яких не враховані струми 3-ї гармоніки. Значення  $I_{3Nmin}$  приймають як фактичне  $I_N$  значення струму в N-провіднику.

6. У модулі 6 визначають величину струму симетричної компоненти  $I_s$ .

7. У модулі 7 визначають середньоквадратичні значення несиметричних компонент струму в фазах. Для випадку  $I_s = I_c$ :

$$\Delta I_1 = I_{ph3mina} - I_{ph3minc}; \quad (7)$$

$$\Delta I_2 = I_{ph3minb} - I_{ph3minc} \quad (8)$$

де  $I_{ph3mina}$ ,  $I_{ph3minb}$ ,  $I_{ph3minc}$  - екстремальні значення функцій  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  в фазах a, b, c відповідно в яких не враховані струми 3-ї гармоніки.

8. У модулі 8 визначають середньоквадратичне значення  $I_N$  очікуваного струму в N-провіднику за виразом (5).

9. У модулі 9 визначають співвідношення між очікуваним  $I_N$  і фактичним  $I_N$  значеннями струму в N-провіднику без урахування струмів 3-ї гармоніки:

$$\delta_N = \frac{I_N - I_{3Nmin}}{I_N} \quad (9)$$

10. У модулі 10 здійснюють порівняння співвідношення  $\delta_N$  з припустимим значенням  $\delta_{Nmax}$  і у випадку, якщо  $\delta_N$  перевищує задане припустиме значення  $\delta_{Nmax}$ , виробляють керуючий сигнал "Так" на спрацьовування захисту.

Таким чином, шляхом цілеспрямованого спотворення середньоквадратичного значення струму, за рахунок вибору частоти дискретизації вихідної аналогової залежності, що дорівнює  $f_{дз} = 3000$  Гц, стало можливим виключити струми 3-ї гармоніки, а струми 5-ї гармоніки трансформувати в струми, що змінюються з частотою 1-ї гармоніки зберігаючи їх величину. На відміну від прототипу, для визначення очікуваного струму в N-провіднику замість аналізу 3-х гармонік струму в фазах і в N-провіднику здійснюється аналіз струму, що змінюється з частотою лише 1-ї основної гармоніки, що істотно спрощує алгоритм роботи захисту N і підвищує його надійність. Струми 3-ї гармоніки, по суті, є перешкодою, яка знижує точність і надійність функціонування захисту.

Джерела інформації:

1. Пат. № 2230415 Российской федерации МПК H02H 5/10, G01R 31/02 Устройство контроля непрерывности нулевого проводника в воздушных линиях 0,4 кВ /Д.А. Апаров, А.И. Сидоров, В.А. Петров, В.В. Дружинин - № 2002127852/282002127852/28; заявл. 17.10.2002; опубл. 10.06.2004. - Бюл. № 16. - 5 с.

2. Пат. № 2295186 Российской федерации МПК H02H 5/00 (2006.01). Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ и устройство для его осуществления /И.Ф. Суворов, К.С. Серёжин, В.В. Гальцев, А.И. Сидоров. - № 2005140871/09; заявл. 26.12.2005; опубл. 10.03.2007. - Бюл. №7. - 7 с.

3. Пат. № 2356151 Российской федерации МПК H02H 5/10 (2006.01). Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ /К.С. Серёжин, И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров. - № 2008105851/09; заявл. 15.02.2008; опубл. 20.05.2009. - Бюл. № 14-8 с.

4. Ершов А.М. Методы и средства защиты электрических сетей напряжением 380 В от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии /А.М. Ершов //Электробезопасность. - 2015. - № 4. - С. 39-53. - Режим доступа: <http://elb.susu.ru/index.php/elb/issue/view/32>.

5. Пат. №105560. України МПК (2014.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. Спосіб захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленням вздовж лінії навантаженням /О.С. Кобозев, О.Г. Серета, В.В. Моргун. - № а201210691; заявл. 12.09.2012; опубл. 26.05.2014. Бюл. №10. - 6 с.

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

7. 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.: Стандартинформ, 2015. - III, 42 с.

8. Серета О.Г. Захист розгалуженої мережі електропостачання з розподіленням навантаженням від обриву нейтрального провідника /О.Г. Серета //Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 2014. - № 785. - С. 66-73. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPEEC\\_2014\\_785\\_13.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPEEC_2014_785_13.pdf).

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів, відповідно до якого, в кожній фазі  $a, b, c$  здійснюють вимір миттєвих значень струмів  $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$  ( $i_{(a,b,c)}(t)$ ) та їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення  $i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}$  ( $i_{j(a,b,c)}$ ) з інтервалом дискретизації  $\Delta t_d$ , потім визначають середньоквадратичні значення фазних струмів  $I_{pha}, I_{phb}, I_{phc}$  ( $I_{ph(a,b,c)}$ ) усіх трьох фаз  $a, b, c$  методом інтегрування квадратів  $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$  ( $i_{j(a,b,c)}^2$ ) знайдених дискретних значень  $i_{j(a,b,c)}$ , який **відрізняється** тим, що для врахування нелінійних спотворень синусоїдальної форми зміни фазних струмів, додатково в кожному режимі через часовий інтервал  $\Delta t_j$ , в 12 разів менший за період  $T_1$  зміни струму 1-ї гармоніки:  $\Delta t_j = 0,0833T_1 = 1,667$  мс, здійснюють заміну використаних миттєвих дискретних значень  $i_{j(a,b,c)}$ ,  $I_{jN}$  струмів в фазах  $a, b, c$  та нейтральному провіднику, на нові  $i_{j+1(a,b,c)}, i_{(j+1)N}$ , здійснюють безперервний моніторинг залежностей в часі середньоквадратичних значень фазних струмів  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  та струму  $I_{3N}(t)$  в нейтральному провіднику, розрахованих за дискретними значеннями струмів  $i_{j3(a,b,c)}$  та  $i_{j3N}$ , що відповідають дискретизації вихідних аналогових залежностей в часі  $t$  струмів  $i_{(a,b,c)}(t)$  в фазах  $a, b, c$  та  $I_N(t)$  в нейтральному провіднику з частотою дискретизації  $f_{d3}$ , в 2 рази більшою за частоту  $f_3$  зміни струмів 3-ї гармоніки  $i_{3(a,b,c)}(t)$  та  $i_{3N}(t) : f_{d3} = 2f_3$ , потім визначають мінімальні екстремальні значення  $I_{ph3mina}, I_{ph3minb}, I_{ph3minc}$  та  $I_{3Nmin}$  залежностей  $I_{ph3(a,b,c)}(t)$  та  $I_{3N}(t)$ , відповідно, після чого визначають середньоквадратичне значення струму симетричної компоненти  $I_s$  векторної діаграми фазних струмів трифазного кола при несиметричному навантаженні, як найменше зі значень  $I_{ph3mina}, I_{ph3minb}, I_{ph3minc}$ , потім визначають середньоквадратичні значення несиметричних компонент фазних струмів, які формують струм в нейтральному провіднику, як різницю між середньоквадратичними значеннями струмів останніх двох фаз й значенням симетричної компоненти:  $\Delta I_1 = I_1 - I_s$  та  $\Delta I_2 = I_2 - I_s$ , потім визначають середньоквадратичне значення очікуваного струму в нейтральному провіднику з виразу  $I'_N = \sqrt{\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2 - \Delta I_1 \Delta I_2}$ , після чого очікуване значення струму в нейтральному провіднику  $I'_N$  порівнюють з фактичним середньоквадратичним значенням струму в нейтральному провіднику:  $I'_N = I_{3Nmin}$  і, у випадку, якщо різниця між значеннями очікуваного і фактичного струмів в нейтральному провіднику, виражена у відносних одиницях  $\delta_N = \frac{I'_N - I_{3Nmin}}{I_{3Nmin}}$ , більша заданого значення  $\delta_{Nmax} : \delta_N \geq \delta_{Nmax}$ , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту.

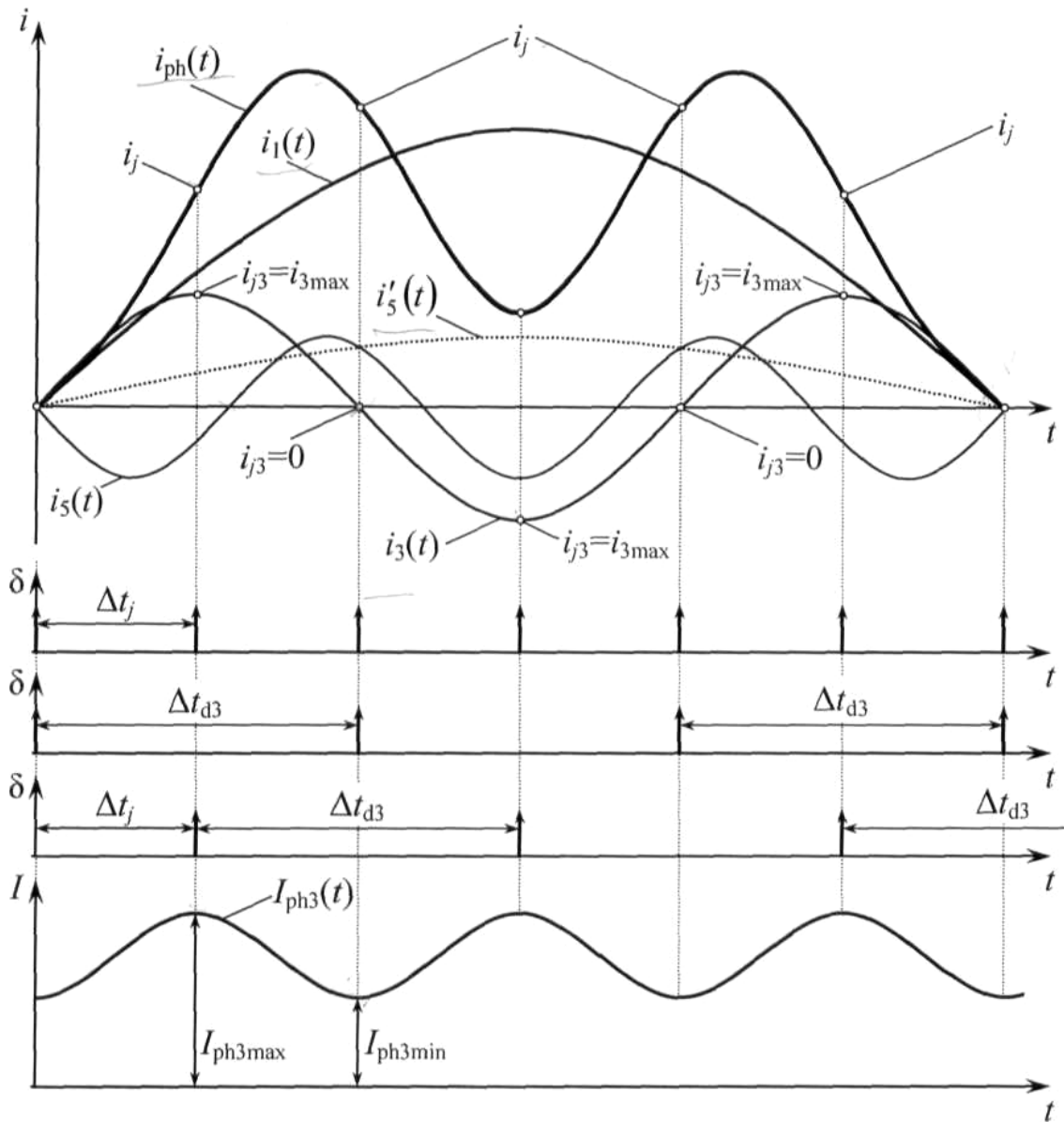
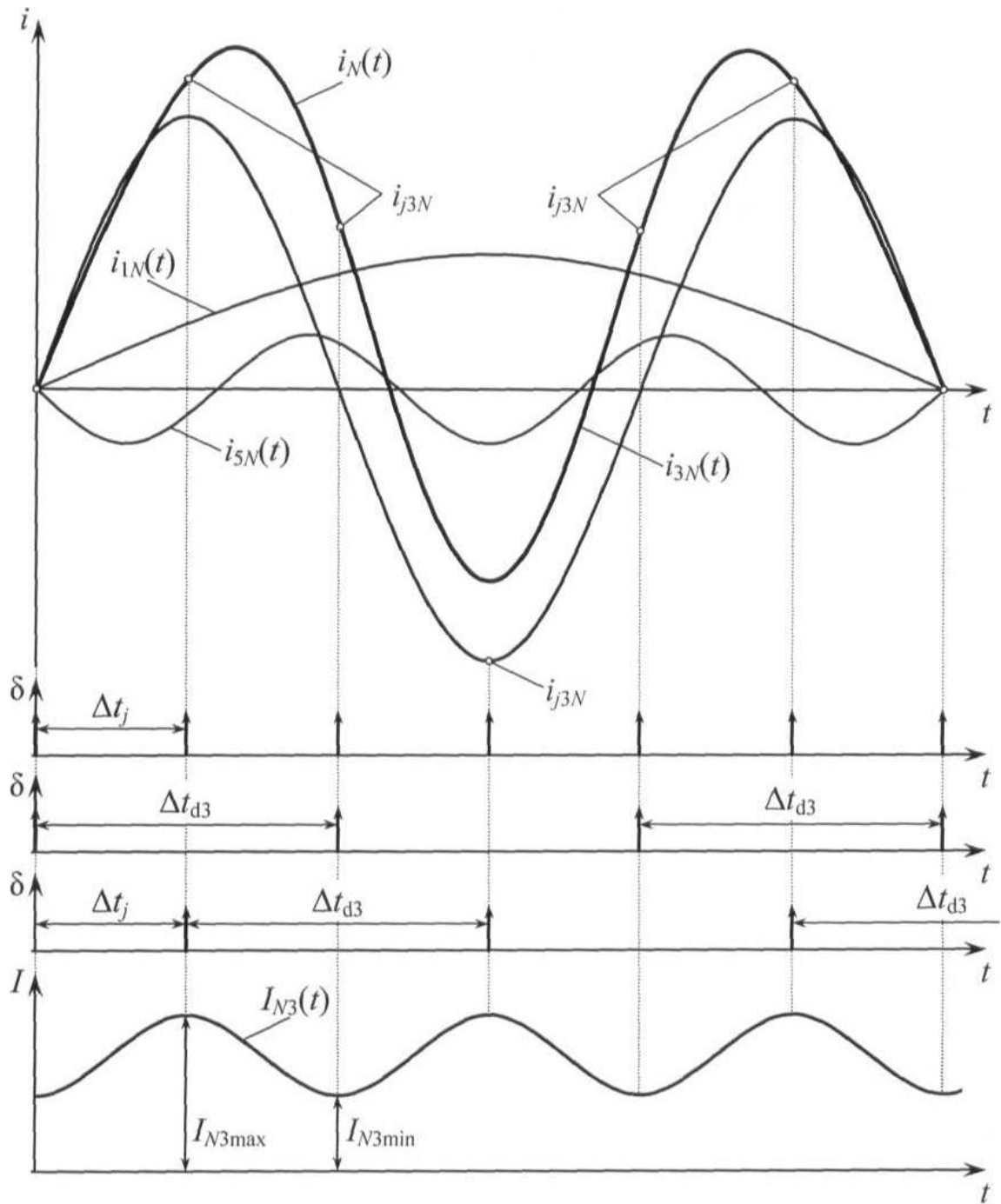
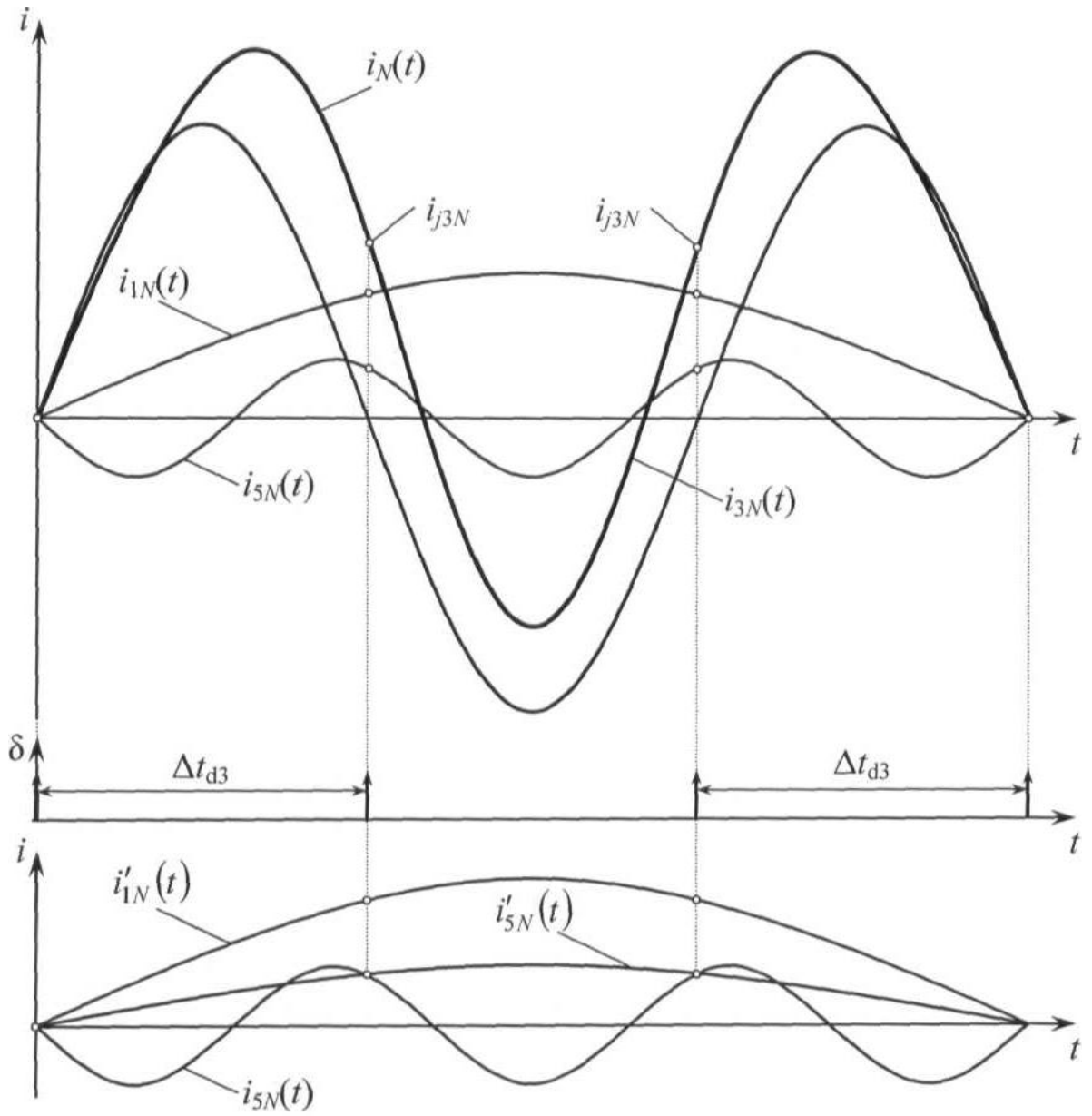


Fig. 1

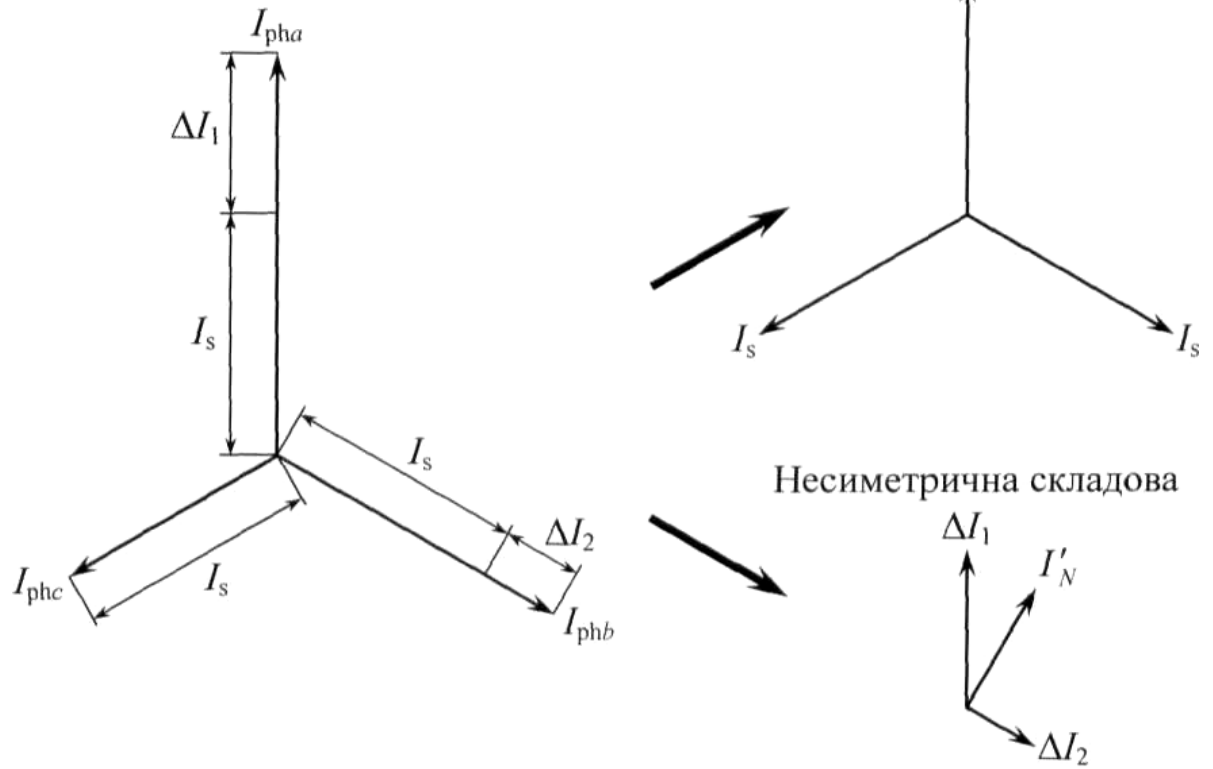


Фиг. 2



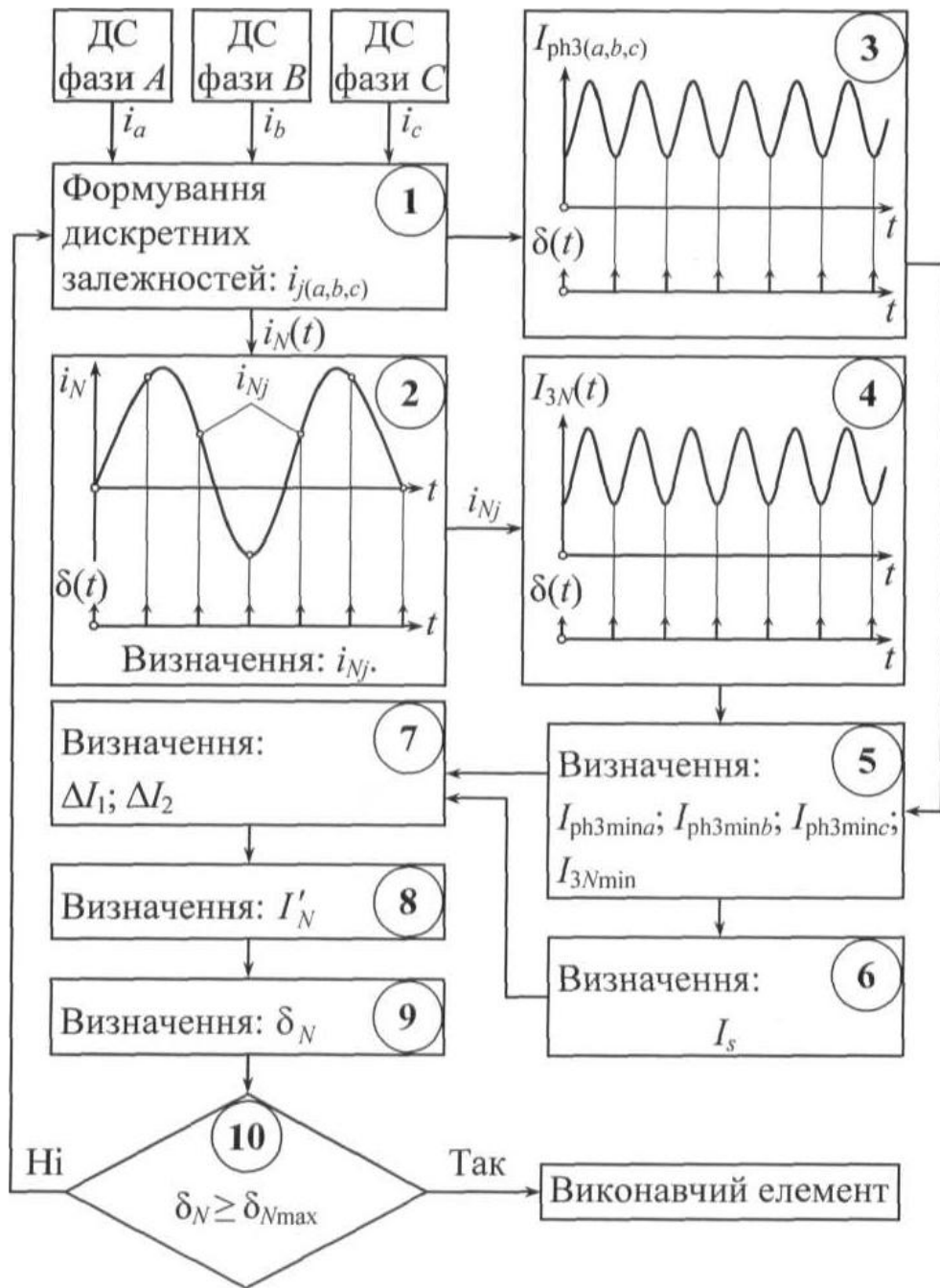
Фиг. 3

Векторна діаграма струмів трифазного кола при несиметричному навантаженні



Фіг. 4





Фіг. 5