



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **122365** (13) **C2**

(51) МПК (2020.01)

H02H 3/08 (2006.01)**H02H 7/00****H01H 73/00****H02H 7/26** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

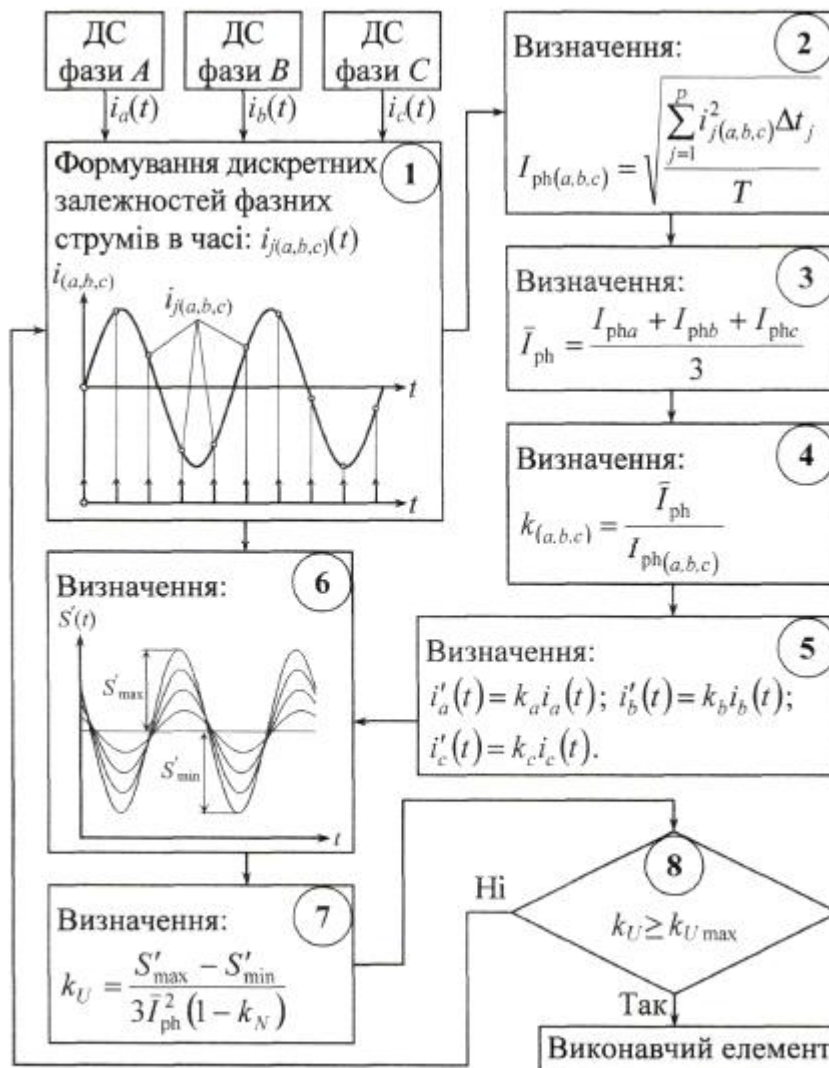
(21) Номер заявки: а 2018 12180	(72) Винахідник(и): Кобозєв Олександр Сергійович (UA), Середа Олександр Григорійович (UA), Прохоренко Андрій Олексійович (UA), Юхно Олександр Дмитрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 10.12.2018	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 27.10.2020	
(41) Публікація відомостей про заявку: 25.04.2019, Бюл.№ 8	(73) Володілець (володільці): 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, 61024 (UA), Прохоренко Андрій Олексійович, пр. Тракторобудівників, 87-б, кв. 138, м. Харків-123, 61123 (UA), Юхно Олександр Дмитрович, вул. Кривомазова, 39, кв. 1, м. Харків-124, 61157 (UA)
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 26.10.2020, Бюл.№ 20	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 105560 C2, 26.05.2014 UA 113596 C2, 10.02.2017 UA 86078 C2, 25.03.2009 UA 81981 C2, 25.02.2008 CN 101860000 A, 13.10.2010 US 2016061873 A1, 03.03.2016 US 5353188 A, 04.10.1994 CN 107706891 A, 16.02.2018

(54) СПОСІБ ЗАХИСТУ ОДНОФАЗНИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД ПЕРЕНАПРУГ, ЩО ВИКЛИКАНІ ОБРИВОМ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВІДНИКА**(57) Реферат:**

Спосіб захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруги, що викликані обривом нейтрального провідника, належить до електрики, а саме до способів релейного захисту розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ від перенапруг (захист UN), що викликані обривом нейтрального провідника (N-провідника). За наявності несиметрії фазних навантажень та обриву N-провідника можливі небезпечні перенапруги в однофазних споживачів електроенергії внаслідок перекосу фаз. Цим обумовлена необхідність визначення факту й місця обриву N-провідника. Задача винаходу - підвищити надійність захисту UN шляхом спрощення алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою захисту. Для цього несиметричну трифазну систему струмів перетворюють в умовно симетричну. Далі формують залежність в часі функції $S'(t)$ перетвореної умовно симетричної трифазної системи струмів,

UA 122365 C2

яка являє собою суму квадратів миттєвих значень струмів усіх трьох фаз, помножених на вирівнювальні коефіцієнти. За екстремальними значеннями функції $S'(t)$ визначають коефіцієнт k_U , що характеризує величину перенапруг в однофазних споживачів електроенергії та умовну частку приєднаної потужності ділянки магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках. Якщо k_U перевищує задане припустиме значення, виробляють керуючий сигнал на відключення аварійної лінії електропостачання. Таким чином, спосіб, що заявляється, забезпечує надійний захист UN однофазних споживачів електроенергії в розподільних мережах електропостачання напругою 0,4 кВ шляхом аналізу миттєвих значень тільки фазних струмів без залучення миттєвих значень струму в N-провіднику, а швидке відключення всієї мережі електропостачання здійснюється тільки в економічно обґрунтованих випадках.



Фіг. 5

Винахід належить до способів релейного захисту електричних мереж, зокрема розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ, від перенапруг (захист UN), що викликані обривом нейтрального провідника (N-провідника) на будь-якій ділянці довгої магістральної лінії електропостачання. За наявності несиметрії значень фазних струмів та обриву N-провідника

можливі небезпечні перенапруги в однофазних споживачів електроенергії внаслідок перекосу фаз. Цим обумовлена необхідність визначення факту й місця обриву N-провідника.

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

Мережі з кабельними лініями електропередачі й зосередженим наприкінці лінії навантаженням характерні для багатоквартирних будинків, торгових та офісних центрів, навчальних та медичних закладів. Якщо говорити про ділянку від трансформаторної підстанції 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 спрацювання захисту значно спрощується. Необхідно визначити лише відсутність струму в N-провіднику, оскільки несиметрія фазних струмів присутня завжди. Насправді ж підключене наприкінці лінії навантаження, не можна розглядати як зосереджене. По суті, це локальна розподільна мережа електропостачання з розподіленим навантаженням. У такій мережі, як і в розглянутій раніше мережі з повітряними лініями електропередачі, можливі аварійні режими, коли обрив N-провідника відбудеться лише для частини споживачів електроенергії. Тому, якщо говорити про захист мереж з кабельними лініями електропередачі в цілому, то проблема їх захисту UN при обриві 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 заснований 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 цього, 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 ΔI , 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 внаслідок малих відмінностей між струмами, що порівнюються, такі запобіжні заходи мають низьку чутливість [4].

В [2] запропоновано спосіб виявлення обриву N-провідника й 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 засновані 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. 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.

Найближчим (прототипом) 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 (захист N) 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 середньоквадратичного значення струму в N-провіднику I'_N , яке визначають як геометричну суму зрушених на 120° ел векторів фазних струмів $\vec{I}_{ph(a,b,c)}$, з фактичним середньоквадратичним значенням струму в N-провіднику I_N . По суті, здійснюють порівняння "штатного" (безаварійного) 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 мережі електропостачання. В залежності від конкретного виконання 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.

Перший недолік способу [5] полягає в необхідності підсумовування векторних величин фазних струмів для визначення величини I'_N . Якщо в розподільній мережі електропостачання присутні нелінійні навантаження та обумовлені ними вищі гармонійні складові 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 . Струми 3-ї гармоніки додаються в N-провіднику арифметично, а струми 1-ї та 5-ї гармонік геометрично, тому 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 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

5 струмів перевантаження (захист I_N) [6]. Саме струми 3-ї гармоніки, які арифметично додаються в N-провіднику, при перевантаженні будуть найбільш значущими за величиною. Таким чином для реалізації алгоритму захисту N, запропонованому в [5], необхідні операції з комплексними величинами, які істотно ускладнюють алгоритм реалізації захисту і підвищують вимоги до мікропроцесора.

10 Другий недолік способу [5] полягає в наступному. В прототипі захист спрацьовує в усіх випадках, якщо зафіксовано обрив N-провідника. Такий підхід з економічної точки зору постачальників електроенергії не є оптимальним. По-перше, при обриві N-провідника небезпека пошкодження побутових електроприладів у однофазних споживачів електроенергії виникне тільки в тому випадку, якщо несиметрія фазних струмів буде достатньою, щоб величина
15 перенапруги ΔU стала більшою за допустимі 10 % від номінального робочого значення напруги $U_e (\Delta U > 0,1U_e)$. В цьому випадку спрацьовування захисту не призведе до невиннованого зниження обсягу поставки електроенергії і прибутків підприємств постачальників електроенергії. По-друге, навіть якщо в аварійній частині розподільної мережі електропостачання дійсно виникнуть небезпечні перенапруги, але приєднана потужність аварійної ділянки невелика (обрив наприкінці магістральної лінії), то витрати на можливий ремонт або навіть заміну пошкодженої електропобутової техніки за рахунок підприємства постачальника електроенергії можуть виявитися істотно меншими втрат від недопоставки електроенергії та відшкодування споживачам збитків та вартості недовідпущеної електричної енергії у разі відключення всієї мережі електропостачання при обриві N-провідника в кінці
20 магістральної лінії. Тому доцільно передбачити компромісне рішення, що дозволяє, за умови, що довжина аварійної ділянки незначна, не відключати всю мережу, поки не визначено місце пошкодження. В цьому випадку з урахуванням економічного фактора відключення всієї мережі буде короточасним, на час необхідний тільки для усунення обриву N-провідника.

Третій недолік способу [5] полягає в недостатній точності визначення величини I'_N як
30 геометричної суми векторів повних фазних струмів $\vec{I}_{ph(a,b,c)}$. В будь-якій трифазній 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 суттєвою перешкодою, що знижує точність аналізу корисного сигналу й, як наслідок, знижує надійність захисту. При аналізі
35 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_{phc} зафіксовано в фазі c, то середньоквадратичне значення струму симетричної компоненти I_s дорівнюватиме струму в цій фазі: $I_s = I_{phc}$. Відповідно середньоквадратичні значення несиметричних
40 компонент дорівнюватимуть:

$$\Delta I_1 = I_{pha} - I_s = I_{pha} - I_{phc}; \quad (1)$$

$$\Delta I_2 = I_{phb} - I_s = I_{phb} - I_{phc}. \quad (2)$$

В основу винаходу поставлена задача підвищити надійність захисту UN шляхом спрощення алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою за рахунок розробки методу аналізу миттєвих (дискретних) значень тільки фазних струмів без залучення миттєвих (дискретних) значень струму в N-провіднику. При цьому швидке відключення всієї мережі електропостачання повинно здійснюватись тільки при величині перенапруг понад 10 % від номінального робочого значення в тій частині мережі, що захищається. Це дозволяє здійснювати відключення всієї мережі тільки в економічно обґрунтованих випадках.

50 Поставлена задача вирішується тим, що в способі захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника, відповідно до якого, в кожній фазі a, b, c здійснюють вимірювання 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 Δt_j , потім визначають середньоквадратичні значення

$$I_{ph(a,b,c)} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^P i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t_j}$$

струмів $I_{pha}, I_{phb}, I_{phc}$ ($I_{ph(a,b,c)}$) в кожній з 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 додатково визначають середнє арифметичне значення

$$\bar{I}_{ph} = \frac{I_{pha} + I_{phb} + I_{phc}}{3}$$

для середньоквадратичних значень фазних струмів $I_{pha}, I_{phb}, I_{phc}$

($I_{ph(a,b,c)}$) в кожній з усіх трьох фаз a, b, c , потім визначають вирівнювальні коефіцієнти

$$k_a = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{pha}}, \quad k_b = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{phb}}, \quad k_c = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{phc}}$$

для перетвореної несиметричної трифазної системи фазних струмів в симетричну, після чого визначають перетворені миттєві значення фазних струмів

$$i'_a(t) = k_a i_a(t), \quad i'_b(t) = k_b i_b(t), \quad i'_c(t) = k_c i_c(t)$$

для перетворення несиметричної трифазної системи фазних струмів в симетричну, потім формують залежність в часі функції $S'(t) = i'^2_a(t) + i'^2_b(t) + i'^2_c(t)$ перетвореної симетричної трифазної системи фазних струмів та

визначають її екстремальні значення $S'_{\max}$ й $S'_{\min}$, після чого визначають коефіцієнт k_N , що характеризує умовну частку приєднаної потужності ділянки магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі електропостачання відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках, потім визначають

$$k_U = \frac{S'_{\max} - S'_{\min}}{3\bar{I}_{ph}^2(1 - k_N)}$$

коефіцієнт, що характеризує перенапруги на ділянці магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках, після чого здійснюють

порівняння отриманого коефіцієнта k_U з припустимим значенням $k_{U\max} = 0,195$ і у випадку, якщо k_U перевищує задане припустиме значення $k_{U\max}$, виробляють керуючий сигнал "Так" на спрацьовування захисту.

Саме за рахунок того, що додатково визначають середнє арифметичне значення

$$\bar{I}_{ph} = \frac{I_{pha} + I_{phb} + I_{phc}}{3}$$

для середньоквадратичних значень фазних струмів $I_{pha}, I_{phb}, I_{phc}$

($I_{ph(a,b,c)}$) в кожній з усіх трьох фаз a, b, c , потім визначають вирівнювальні коефіцієнти

$$k_a = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{pha}}, \quad k_b = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{phb}}, \quad k_c = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{phc}}$$

для перетвореної несиметричної трифазної системи фазних струмів в симетричну, після чого визначають перетворені миттєві значення фазних струмів

$$i'_a(t) = k_a i_a(t), \quad i'_b(t) = k_b i_b(t), \quad i'_c(t) = k_c i_c(t)$$

для перетворення несиметричної трифазної системи фазних струмів в симетричну, потім формують залежність в часі функції

$$S'(t) = i'^2_a(t) + i'^2_b(t) + i'^2_c(t)$$

перетвореної симетричної трифазної системи фазних струмів та визначають її екстремальні значення $S'_{\max}$ й $S'_{\min}$, після чого визначають коефіцієнт k_N , що характеризує умовну частку приєднаної потужності ділянки магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі електропостачання відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках, потім визначають

$$k_U = \frac{S'_{\max} - S'_{\min}}{3\bar{I}_{ph}^2(1 - k_N)}$$

коефіцієнт, що характеризує перенапруги на ділянці магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацювання захисту та відключення всієї мережі відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках, після чого здійснюють порівняння отриманого коефіцієнта k_U з припустимим значенням $k_{U\max} = 0,195$ і у випадку,

- 5 якщо k_U перевищує задане припустиме значення $k_{U\max}$, виробляють керуючий сигнал "Так" на спрацювання захисту, і вирішується поставлена задача підвищення надійності захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника й спрощення алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою.

Покажемо, у чому полягає особливість методу аналізу залежності в часі силової функції

- 10 електричного кола $S(t)$ з метою захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом N-провідника.

Силова функції електричного кола $S(t)$ характеризує сумарні електродинамічні зусилля в трифазній системі струмів і являє собою залежність в часі суми квадратів миттєвих значень струмів усіх трьох фаз [7]:

15
$$S(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t), \quad (3)$$

де $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ - миттєві значення струмів в фазах a, b, c , відповідно.

Відомі аналітичні вирази для зміни в часі струмів в симетричній трифазній системі:

$$i_a(t) = \sqrt{2}I_{ph} \sin(\omega t - \varphi); \quad (4)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I_{ph} \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (5)$$

20
$$i_c(t) = \sqrt{2}I_{ph} \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (6)$$

де I_{ph} - середньоквадратичне значення періодичної складової струму в фазі; φ - кут зрушення, на який періодична складова фазного струму відстає від фазної електрорушійної сили (ЕРС); ω - кутова частота мережі.

Для випадку, коли присутня несиметрія середньоквадратичних значень фазних струмів $I_{pha} \neq I_{phb} \neq I_{phc}$ й симетричні та дорівнюють 120° ел кути між векторами фазних струмів в трифазній системі струмів, що характерно для електричних мереж з непошкодженою нейтраллю, залежність у часі функції $S(t)$ описується наступним виразом:

25
$$S(t) = \left[\sqrt{2}I_{pha} \sin(\omega t - \varphi) \right]^2 +$$

$$+ \left[\sqrt{2}I_{phb} \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2 + \left[\sqrt{2}I_{phc} \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2. \quad (7)$$

- 30 З виразу (7) випливає, що величина й характер зміни в часі функції $S(t)$ при непошкодженному N-провіднику залежить від середньоквадратичних значень фазних струмів I_{pha} , I_{phb} , I_{phc} .

Якщо вихідну несиметричну систему трифазних струмів $I_{pha} \neq I_{phb} \neq I_{phc}$ перетворити в симетричну, в якій середньоквадратичні значення фазних струмів будуть однакові, то величина й характер зміни в часі функції $S'(t)$ перетвореної системи струмів при непошкодженному N-

- 35 провіднику не буде залежати від середньоквадратичних значень фазних струмів I_{pha} , I_{phb} , I_{phc} .

Для цього вводимо вирівнювальні коефіцієнти:

$$k_a = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{pha}}, \quad k_b = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{phb}}, \quad k_c = \frac{\bar{I}_{ph}}{I_{phc}}, \quad (8)$$

$$\bar{I}_{ph} = \frac{I_{pha} + I_{phb} + I_{phc}}{3}$$

де - середнє арифметичне значення для середньоквадратичних значень струмів в фазах a, b, c .

Тоді для перетвореної несиметричної системи струмів в симетричну перетворені миттєві значення фазних струмів дорівнюють:

$$i'_a(t) = k_a i_a(t), \quad i'_b(t) = k_b i_b(t), \quad i'_c(t) = k_c i_c(t). \quad (9)$$

Вираз (7) перетворюється наступним чином:

$$S'(t) = i'^2_a(t) + i'^2_b(t) + i'^2_c(t) = \left[\sqrt{2} \bar{I}_{ph} \sin(\omega t - \varphi) \right]^2 + \left[\sqrt{2} \bar{I}_{ph} \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2 + \left[\sqrt{2} \bar{I}_{ph} \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2. \quad (10)$$

Після перетворення виразу (10) отримаємо:

$$S'(t) = 3\bar{I}_{ph}^2 - \bar{I}_{ph}^2 \left(\cos(2\omega t - 2\varphi) + \cos\left(2\omega t - 2\varphi - \frac{4\pi}{3}\right) + \cos\left(2\omega t - 2\varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \right) = S'_{const} - S'_{var}(t),$$

де $S'_{const} = 3\bar{I}_{ph}^2$ - постійна компонента; $S'_{var}(t)$ - змінна компонента.

Якщо кути між векторами фазних струмів симетричні й дорівнюють 120° ел, отримуємо:

$$S'(t) = 3\bar{I}_{ph}^2 - \bar{I}_{ph}^2 (\cos(2\omega t - 2\varphi) - \cos(2\omega t - 2\varphi)) = S'_{const} - S'_{var}(t); \quad (12)$$

$$S'_{var}(t) = 0$$

$$S'(t) = S'_{const} = 3\bar{I}_{ph}^2. \quad (13)$$

Таким чином, за умови цілісності N-провідника значення функції $S'(t)$ перетвореної трифазної системи струмів є величиною постійною (13). Це значення є очікуваним значенням функції $S'(t)$, тобто тим значенням, яке має бути в разі цілісності N-провідника.

У разі ж обриву N-провідника змінна компонента $S'_{var}(t)$ функції $S'(t)$ вже не буде дорівнювати 0. Миттєве значення функції $S'(t)$ тепер дорівнює:

$$S'(t, \psi) = S'_{const} - S'_{var}(t, \psi) = 3\bar{I}_{ph}^2 - \bar{I}_{ph}^2 (\cos(2\omega t - 2\varphi) - \cos(2\omega t - 2\varphi \pm 2\psi)), \quad (14)$$

де ψ - кут, на який порушується симетрія при обриві N-провідника.

Суть аналізу функції $S'(t)$ перетвореної трифазної системи струмів при побудові захисту UN від перенапруг у однофазних споживачів електроенергії полягає в порівнянні очікуваного

(13) і фактичного (14) миттєвих значень функції $S'(t)$. Відмінність очікуваного значення функції $S'(t)$ і фактичного полягає в наявності змінної компоненти $S'_{var}(t) \neq 0$ у фактичному значенні.

Тому наявність змінної компоненти в функції $S'(t)$ перетвореної трифазної системи струмів є

ознакою обриву N-провідника, а "розмах" $\Delta S'_{var}(t)$ змінної компоненти $S'_{var}(t)$ характеризує величину несиметрії фазних струмів в аварійній частині розподільної мережі електропостачання

та обумовлену такою несиметрією перенапругу ΔU у однофазних споживачів електроенергії.

Фіг. 1-5 ілюструють суть способу захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника.

На Фіг. 1 наведена векторна діаграма несиметричної трифазної системи струмів та векторна діаграма перетвореної симетричної трифазної системи струмів, що відповідає непошкодженішому N-провіднику.

На Фіг. 2 наведена векторна діаграма перетвореної симетричної трифазної системи струмів, що відповідає пошкодженішому N-провіднику, коли симетрія порушується на кут ψ .

На Фіг. 3 наведені залежності в часі функції $S'(t)$ за умови цілісності N-провідника, коли $S'_{var}(t) = 0$, а кути між векторами фазних струмів симетричні й дорівнюють 120° ел ($S'(t) = S'_{const} = 3\bar{I}_{ph}^2$), а також при обриві N-провідника при різних значеннях кута ψ , на який порушується симетрія при обриві супровідника.

На Фіг. 4 наведена залежність амплітуди S'_{max} коливань функції $S'(t, \psi)$ при різних кутах ψ , у відносних одиницях до величини $\bar{I}_{ph}^2$.

На Фіг. 5 наведена алгоритмічна схема, що ілюструє роботу мікропроцесорного розщеплювача автоматичного вимикача (АВ) при реалізації запропонованого способу захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника.

У випадку, якщо кути між векторами фазних струмів однакові, дорівнюють 120° ел (Фіг. 1) і порушення симетрії немає ($\psi = 0$, $S'_{var}(t) = 0$) залежність в часі $S'(t)$ являє собою пряму лінію, паралельну осі часу t , стало значення якої дорівнює $S'(t) = S'_{const} = 3\bar{I}_{ph}^2$ (Фіг. 3). Коли ж кут між вектором $\bar{I}_{pha}$ струму в фазі a і вектором $\bar{I}_{phb}$ струму в фазі b дорівнює 115° ел, а між векторами $\bar{I}_{phc}$ та $\bar{I}_{phc}$ струмів в фазах a і c - 125° ел, тобто $\psi = 5^\circ$ ел, в залежності $S'(t)$ з'являється змінна компонента $S'_{var}(t) \neq 0$, амплітуда якої становить 5,8 % від постійної компоненти $S'_{const} = 3\bar{I}_{ph}^2$. Коли ж симетрія порушується на кут $\psi = 20^\circ$ ел, амплітуда змінної компоненти становить 22,8 % від постійної компоненти.

Таким чином, величина амплітуди змінної компоненти $S'_{var}(t)$ функції $S'(t)$, дійсно, може бути критерієм порушення симетрії кутів між фазними струмами при обриві N-провідника й визначати величину можливих перенапруг ΔU у однофазних споживачів електроенергії.

За допомогою досліджень на ЕОМ різних математичних моделей перехідних процесів в електричних мережах, зокрема в розподільних мережах електропостачання напругою 0,4 кВ, була знайдена емпірична формула, яка зв'язує величину перенапруг ΔU у однофазних споживачів електроенергії, що викликані обривом N-провідника на будь-якій ділянці довгої лінії,

й амплітуду S'_{max} змінної компоненти $S'_{var}(t)$ функції $S'(t)$. Дослідження проводилися для випадків, коли кут між векторами фазних струмів з найбільшим модулем залишався незмінним й таким, що дорівнює 120° ел. На Фіг. 1 це струми в фазах a і b , модулі $\bar{I}_{pha}$ й $\bar{I}_{phb}$, відповідно. Такий вибір кутової несиметрії обґрунтований тим, що, при однаковій несиметрії фазних струмів, що виражається відношенням максимального значення модуля фазного струму до мінімального (на Фіг. 1 це відношення струмів в фазах a і c , $\bar{I}_{pha}$ й $\bar{I}_{phc}$, відповідно), величина перенапруг буде максимальною. Результати розрахунків показали, що величина перенапруги $\Delta U = 0,1U_e$, тобто 10 % від номінальної робочої напруги, досягається при амплітуді S'_{max}

коливань змінної компоненти $S'_{var}(t)$ функції $S'(t)$, яка дорівнює $S'_{max} = 0,0975 \cdot S'_{const}$, тобто 9,75 % від постійної компоненти S'_{const} , що дорівнює $S'_{const} = 3\bar{I}_{ph}^2$.

Слід зауважити, що зазначена величина $S'_{max} = 0,0975 \cdot S'_{const}$ амплітуди коливань змінної компоненти $S'_{var}(t)$ функції $S'(t)$ вказує на перенапругу $\Delta U \geq 0,1U_e$, тобто понад 10 % від

номінальної робочої напруги, при обриві N-провідника на початку магістральної лінії електропередачі. В реальних мережах електропостачання місце обриву N-провідника невідоме. Згідно з розрахунками, при наближенні місця обриву N-провідника до кінця магістральної лінії

електропередачі величина $S'_{\max}$, що вказує на перенапругу у відрізаний частині понад 10 % від номінальної робочої напруги ($\Delta U \geq 0,1U_e$), буде зменшуватись. Якщо прийняти, що величина

$S'_{\max} = 0,0975 \cdot S'_{const}$ вказує на перенапругу $\Delta U \geq 0,1U_e$ при обриві N-провідника в кінці мережі електропостачання, що захищається, то забезпечується безумовний захист всієї мережі електропостачання, в якій не повинно бути перенапруг. Тобто, якщо фактичне місце обриву N-

провідника буде ближче до джерела живлення, то при $S'_{\max} = 0,0975 \cdot S'_{const}$ перенапруги будуть меншими. Якщо довжину магістральної лінії розподільної мережі електропостачання напругою 0,4 кВ прийняти за відносну одиницю приєднаної потужності, то з'являється можливість

змінювати в налаштуваннях пристрою захисту розташованого на початку лінії величину $S'_{\max}$ (уставку спрацьовування), при досягненні якої надходить сигнал на відключення тільки в економічно обґрунтованих випадках. Маються на увазі відшкодування споживачам збитків та вартості недовідпущеної електричної енергії у разі відключення всієї мережі електропостачання при обриві N-провідника в кінці магістральної лінії. Таким чином постачальник електроенергії має можливість самостійно вирішувати відносну приєднану потужність ділянки магістральної

лінії розподільної мережі електропостачання, що характеризується коефіцієнтом k_U , коли не допускаються перенапруги $\Delta U \geq 0,1U_e$ і повинно відбуватись безумовне спрацьовування захисту.

Алгоритмічна схема, що ілюструє роботу мікропроцесорного розщеплювача автоматичного вимикача (АВ) при реалізації запропонованого способу захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника, 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 захисту. Функціонує мікропроцесорний розщеплювач у такий спосіб:

1. На вхід модуля 1 мікропроцесорного розщеплювача АВ від датчиків струму (ДС)

надходять аналогові залежності в часі фазних струмів $i_{a,b,c}(t)$, які перетворюють у дискретні залежності $i_{j(a,b,c)}(t)$ з частотою дискретизації $f_d \geq 3f_k$, де f_k - частота k-ї, найбільш високої гармоніки фазного струму [8].

2. У модулі 2 за дискретними значеннями фазних струмів $i_{j(a,b,c)}$ з часовим інтервалом дискретизації Δt_j , визначають середньоквадратичні значення фазних струмів $I_{ph(a,b,c)}$ усіх трьох фаз a, b, c методом інтегрування квадратів $i_{j(a,b,c)}^2$ знайдених дискретних значень $i_{j(a,b,c)}$:

$$I_{ph(a,b,c)} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^p i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t_j} \quad (15)$$

де $p = T/\Delta t_j$; $\Delta t_j = 1/f_d$ - інтервал дискретизації; T - період зміни фазного струму.

$$\bar{I}_{ph} = \frac{I_{pha} + I_{phb} + I_{phc}}{3}$$

3. У модулі 3 визначають - середнє арифметичне значення для середньоквадратичних значень струмів в фазах a, b, c .

4. У модулі 4 визначають вирівнювальні коефіцієнти (8).

5. У модулі 5 визначають перетворені миттєві значення фазних струмів для перетворення несиметричної системи струмів в симетричну (9).

6. У модулі 6 формують залежність в часі функції $S'(t)$ (10) перетвореної симетричної трифазної системи струмів та визначають її екстремальні значення $S'_{\max}$ й $S'_{\min}$.

7. У модулі 7 визначають коефіцієнт k_U , що характеризує перенапруги на ділянці магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках:

$$k_U = \frac{S'_{\max} - S'_{\min}}{3\bar{I}_{ph}^2(1 - k_N)}, \quad (9)$$

5 де k_N - коефіцієнт, що характеризує умовну частку приєднаної потужності ділянки магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках. $k_N = 0$ - обрив N-провідника на початку магістральної лінії електропередачі.

8. У модулі 8 здійснюють порівняння співвідношення (9) з припустимим значенням $k_{U\max} = 0,195$ і у випадку, якщо k_U перевищує задане припустиме значення $k_{U\max}$, виробляють керуючий сигнал "Так" на спрацьовування захисту.

Таким чином, спосіб захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника, що заявляється, забезпечує захист UN однофазних споживачів електроенергії в розподільних мережах електропостачання напругою 0,4 кВ. При цьому підвищується надійність захисту шляхом спрощення алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою за рахунок аналізу миттєвих (дискретних) значень тільки фазних струмів без залучення миттєвих (дискретних) значень струму в N-провіднику, а швидке відключення всієї мережі електропостачання здійснюється тільки в економічно обґрунтованих випадках.

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. Серeda, В.В. Моргун. - № а201210691; заявл. 12.09.2012; опубл. 26.05.2014. Бюл. № 10. - 6 с.

6. Пат № 113596. України 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). Спосіб захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень /О.С. Кобозев, О.Г. Серeda, А.Ю. Агабабов, О.Д. Юхно. - № а201600564; заявл. 25.01.2016; опубл. 10.02.2017. Бюл. № 3. - 6 с.

7. Райнин В.Е. Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения /В.Е. Райнин, А.С. Кобозев //Электротехника. - 2009. - № 2. - С. 44-51.

8. Кобозев О.С. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі /Кобозев О.С, Серeda О.Г., Моргун В.В. //Електротехніка і електромеханіка. - 2012. - № 5. - С. 21-26. - ISSN 2074272X.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника, відповідно до якого в кожній фазі a, b, c здійснюють вимірювання

- 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} ($i_{j(a,b,c)}$) $\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^3 i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t_j}$ інтервалом дискретизації Δt_j , потім визначають середньоквадратичні значення струмів I_{pha} , I_{phb} , I_{phc} ($I_{ph(a,b,c)}$) в кожній з 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 $i_{j(a,b,c)}$, де T - період зміни фазного струму, який відрізняється тим, що додатково визначають середнє арифметичне значення $I_{ph} = \frac{I_{pha} + I_{phb} + I_{phc}}{3}$ для середньоквадратичних значень фазних струмів I_{pha} , I_{phb} , I_{phc} ($I_{ph(a,b,c)}$) в кожній з усіх трьох фаз a, b, c , потім визначають вирівнювальні коефіцієнти $k_a = \frac{I_{ph}}{I_{pha}}$, $k_b = \frac{I_{ph}}{I_{phb}}$, $k_c = \frac{I_{ph}}{I_{phc}}$ для перетвореної несиметричної трифазної системи фазних струмів в симетричну, після чого визначають перетворені миттєві значення фазних струмів $i_a(t) = k_a i_{ja}(t)$, $i_b(t) = k_b i_{jb}(t)$, $i_c(t) = k_c i_{jc}(t)$ для перетворення несиметричної трифазної системи фазних струмів в симетричну, потім формують залежність в часі функції $S'(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)$ перетвореної симетричної трифазної системи фазних струмів та визначають її екстремальні значення S_{max} й S_{min} , після чого визначають коефіцієнт k_N , що характеризує умовну частку приєднаної потужності ділянки магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі електропостачання відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках, потім визначають коефіцієнт $k_U = \frac{S_{max}}{3I_{ph}^2(1-k_N)}$, що характеризує перенапруги на ділянці магістральної лінії розподільної мережі електропостачання, коли спрацьовування захисту та відключення всієї мережі відбувається тільки в економічно обґрунтованих випадках, після чого здійснюють порівняння отриманого коефіцієнта k_U з припустимим значенням $k_{Umax} = 0,195$ і у випадку, якщо k_U перевищує задане припустиме значення k_{Umax} , виробляють керуючий сигнал "Так" на спрацьовування захисту.

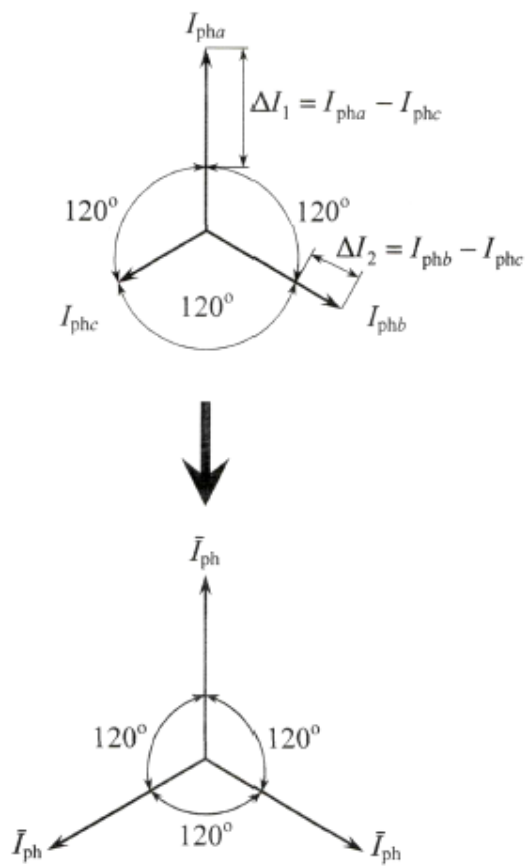


Fig. 1

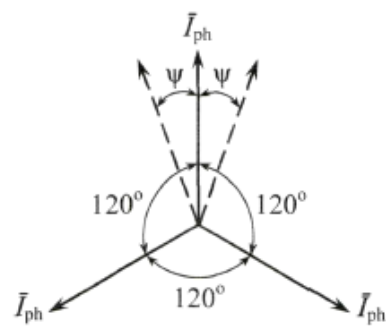


Fig. 2

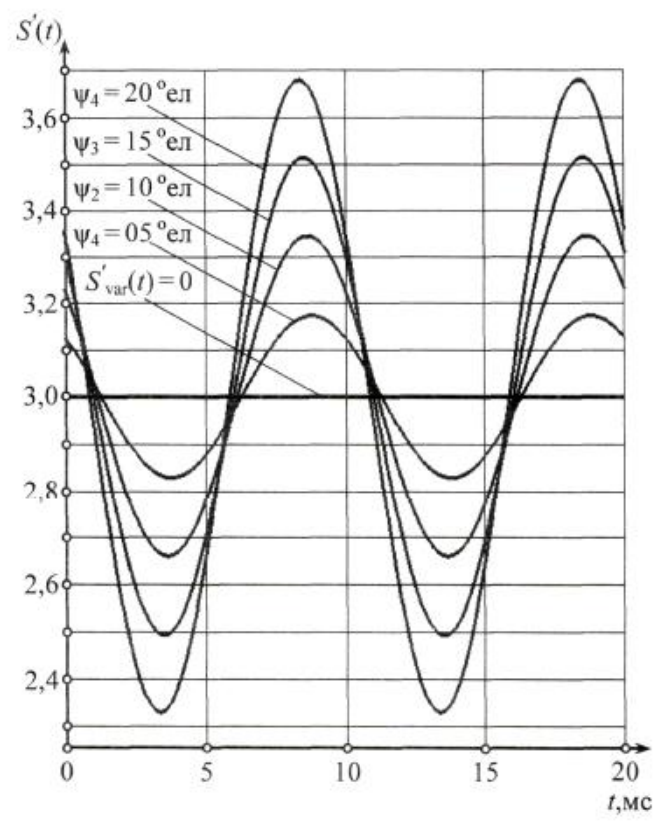


Fig. 3

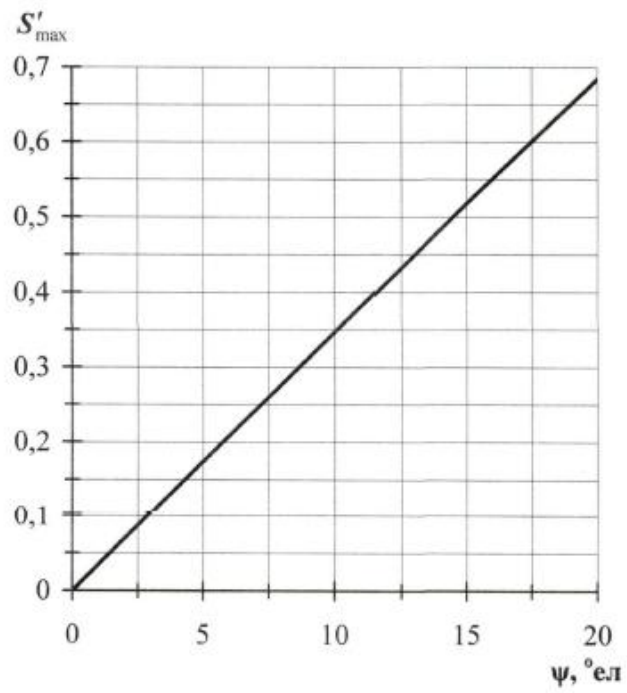
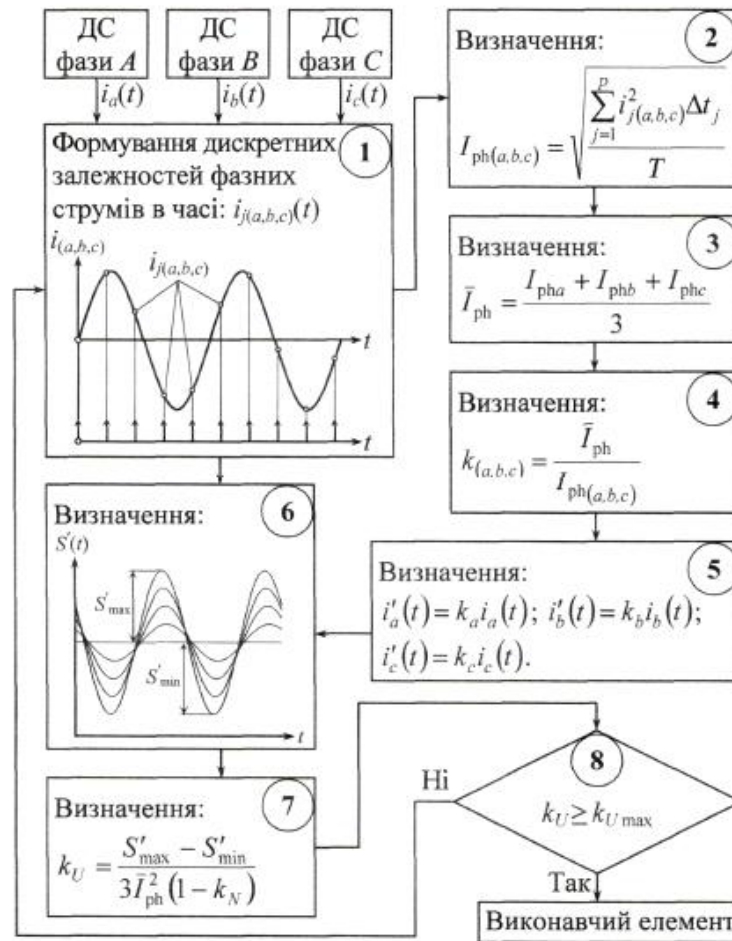


Fig. 4



Фіг. 5