

І.С. ВАРШАМОВА, асистент, НТУ "ХПІ"

О.Г. СЕРЕДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

Н.Г. ФОНТА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖ ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА РАХУНОК
ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ КРИТЕРІЇВ
СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСНИХ АПАРАТІВ**

Показано необхідність і можливість підвищення надійності захисту електричних мереж побутового призначення за рахунок переходу до комплексних критеріїв спрацьовування захисту, сформованим із сукупності декількох параметрів електричного кола, що захищається. Підвищення надійності забезпечується як за рахунок розширення переліку аварійних ситуацій в електричній мережі, на які реагує захист, так і за рахунок підвищення показника безвідмовності роботи системи захисту в результаті реалізації режиму резервування відмов. Проаналізовано нові технічні рішення, що дозволяють формувати в режимі ковзного моніторингу різні типи комплексних критеріїв спрацьовування тих або інших видів захистів шляхом використання однакових, простих для обчислень і широко використовуваних в розцеплювачах вимикачів алгоритмів інтегрування квадратів дискретних значень струму.

Ключові слова: захист, електрична мережа, ковзний моніторинг, критерії спрацьовування.

Вступ. Надійність захисту електричних мереж, якщо розглядати цій термін як більш широке поняття, яке включає в себе декілька критеріїв, визначається не тільки показником безвідмовності роботи при виконанні конкретних захисних функцій, але і кількістю тих захисних функцій, які забезпечує система захисту.

Дійсно, в реальних електричних мережах, зокрема в електричних мережах побутового призначення, виникає досить велике число позаштатних ситуацій, які можуть призводити до тих чи інших негативних наслідків, тому, чим більше захисних функцій, що реагують на нештатні ситуації, має система захисту, тим вище надійність такого захисту. У той же час, очевидно, що якщо показник безвідмовності виконання захисних функцій невисокий, то і надійність захисту не може бути високою. Тому тільки поєднання розширення переліку захисних функцій і підвищення ймовірності безвідмовної роботи системи захисту дозволяє забезпечити сучасні, більш високі,

вимоги надійності захисту електричних мереж побутового призначення.

В даний час при захисті електричних мереж побутового призначення як і раніше широко використовуються автоматичні вимикачі з аналоговими електронними розчеплювачами, в яких, як правило, перелік захисних функцій обмежений захистом від струмів перевантаження і струмів короткого замикання (КЗ). Ні перелік існуючих в зазначених апаратах захистів, ні їх якість не дозволяють вирішити існуючі проблеми підвищення надійності захисту електричних мереж. Слід зазначити, що в нових серіях вимикачів, вже з мікропроцесорними розчеплювачами, в більшості зарубіжного виробництва, можливості мікропроцесорної техніки використовуються, в основному, для розширення інформаційно-вимірювальних і комунікативних функцій: фіксації величини аварійних струмів, кількості спрацьовування та інше. У той же час для більш глибокого аналізу процесів в електричних мережах шляхом безперервного моніторингу параметрів зазначених мереж, що характеризують аварійну ситуацію, можливості мікропроцесорної техніки використовуються не в повному обсязі.

Відсутність в існуючих автоматичних вимикачах всіх необхідних для надійного захисту електричних мереж видів захистів, зумовило розробку та реалізацію в цих мережах додаткових пристроїв з тими видами захистів, яких немає в вимикачах. Так, наприклад, через відсутність в живильних мережах побутового призначення захисту від можливих перенапруг у споживачів при обриві нульового проводу розроблені і застосовуються прилади захисту релейні (ПЗР), в яких передбачено захист конкретного споживача від перенапруги понад 242 В [1].

Через відсутність у вимикачах захисту від віддалених КЗ і можливості реалізації режиму "далекого" резервування в Росії розроблені мікропроцесорні термінали БМРЗ-0,4 [2]. Вони встановлюються в КТП на додаток до вимикачів, в тому числі і з мікропроцесорними розчеплювачами (фірм ABB, Schneider Electric, Siemens), але не мають необхідних видів захистів. За допомогою терміналів БМРЗ-0,4 може бути вирішена проблема захисту від віддалених КЗ і режим далекого резервування. Аварійними параметрами режиму далекого резервування при захисті від віддалених КЗ в терміналах БМРЗ-0,4 є співвідношення між приростами активної і реактивної складових струму прямої послідовності. Ідентифікація за вказаними параметрами пускових струмів і блокування в цьому випадку максимального струмового

захисту, дозволяє підвищити чутливість захисту саме до струмів КЗ, і тим самим виконати одну з необхідних умов надійного резервування вищестоящим вимикачем нижчестоящого при відмові останнього.

Слід зазначити, що одне тільки збільшення чутливості до струмів КЗ розташованого вище у розподільній мережі вимикача, не дозволяє повною мірою використовувати можливості режиму резервування для підвищення надійності захисту. Щоб повною мірою домогтися підвищення надійності, необхідно забезпечити і малий час спрацьовування вищестоящого вимикача. Останнє важко забезпечити без застосування швидкодіючого селективного захисту, в якому немає навмисних затримок спрацьовування. А реалізація швидкодіючої селективного захисту неможлива без вирішення проблеми швидкого, ще на початковому етапі виникнення обурення кола, ідентифікації виду струму збурення за кількома параметрами захищеного кола (діючого значення струму збурення, коефіцієнта потужності, виду струму збурення-2-х або 3-х фазне КЗ). Все вищевикладене відноситься до підвищення якості захистів від струмів міжфазних КЗ (захист "відсічення" – захист I і захист від КЗ – захист S).

Аналогічні проблеми швидкого визначення параметрів кола існують і для ідентифікації аварійних ситуацій в чотирьох провідний мережі з N -провідником. До захистів, які повинні реагувати на аварійні ситуації в колі з N -провідником, відносяться захист від обриву N -проводу (захист N), від однофазних КЗ на землю (захист G), від виникнення перенапруг у однофазних КЗ (захист UN).

Аналіз параметрів кола, необхідних для побудови захисту від обриву N -провідника, вже було розглянуто в роботі [3]. Однак у зазначеній публікації ця проблема розглядалася для електричних мереж з лінійними навантаженнями. Для мереж із значною часткою нелінійних навантажень, а таких з кожним роком стає все більше, побудови захистів без урахування такого параметра кола, як спектр гармонік струму, не може забезпечити високу ефективність таких захистів.

Мета цієї статті – показати, що забезпечення високої надійності захисту електричних мереж можливо тільки при використанні комплексних критеріїв спрацьовування, що враховують сукупність значень ряду параметрів кола, які найбільш повно характеризують ту чи іншу аварійну ситуацію в електричній мережі. До таких параметрів, сукупність значень яких повинні використовуватися при формуванні комплексних критеріїв спрацьовування тих або інших видів захистів, повинні бути не тільки діючі значення струмів збурення у фазах $\Delta I_{\phi(a, b, c)}$

і $\cos\varphi$, а й діючі значення найбільш значущих гармонік струмів у фазах (I_1, I_3, I_5) і в N -проводі (I_{01}, I_{03}, I_{05}).

Інше завдання, яке вирішується у цій статті – дати наукове обґрунтування нових технічних рішень, що дозволяють, шляхом використання простих алгоритмів інтегрування квадратів дискретних значень струму, що відповідають різним частотам дискретизації вихідних аналогових залежностей струму від часу, швидко визначати параметри кола та формувати, на їх основі, комплексні критерії спрацьовування.

Комплексні критерії спрацювання захистів від міжфазних КЗ і методи їх формування. У технічному рішенні [4] визначення значення $\cos\varphi$ пропонується на підставі співвідношення максимального S_{\max} та мінімального S_{\min} значень силової функції кола $S(t)$ – залежно від часу суми квадратів миттєвих значень фазних струмів $i_{j(a,b,c)}^2$ симетричної трифазної системи:

$$S(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t). \quad (1)$$

Вираз силової функції представлений виразом (1) дозволяє визначити зазначену залежність $S(t)$, використовуючи фактичні миттєві значення струмів у фазах, одержувані від датчиків струму на виході АЦП. Аналітичний же вираз силової функції, який отримано в результаті підстановки в вираз (1) відомих залежностей для струмів в 3-х фазній мережі, після всіх перетворень має наступний вигляд:

$$S(t) = 3I_{\phi}^2 \left[1 - 2e^{-\frac{t}{T}} \cos\omega t + e^{-\frac{2t}{T}} \right], \quad (2)$$

де I_{ϕ} – діюче значення періодичної складової фазного струму симетричної трифазної системи, T – постійна часу кола, що визначає $\cos\varphi$.

Зіставлення знайденої по дискретним значенням фазних струмів $i_{j(a,b,c)}^2$ залежності силової функції $S(t)$ з її аналітичним виразом дозволяє, використовуючи особливості силової функції, швидко (не чекаючи завершення перехідного процесу зміни струму) і точно (без похибки, обумовленої впливом випадкової фази виникнення струму збурювання на його величину) визначити значення $\cos\varphi$.

Оскільки мінімальне значення функції S_{\min} досягається тільки протягом другого напівперіоду струму, час визначення значення $\cos\varphi$ становить близько 20 мс. Такий час цілком припустимий для ідентифікації за величиною $\cos\varphi$ віддаленого КЗ – значення $\cos\varphi$ повинно бути не більше 0,5 ($\cos\varphi \leq 0,5$). Але мале значення $\cos\varphi$ можливо і у випадку, якщо КЗ в електричному колі сталося на

відвідних затискачах вимикача, розташованого поблизу живильного трансформатора тобто коли має бути реалізований захист "відсічення" – захист I . Тому, в загальному випадку, для швидкої і надійної ідентифікації різних видів міжфазних КЗ необхідні комплексні критерії спрацьовування, які, враховуючи і реалізацію захисту "відсічення", повинні визначатися досить швидко.

Зменшити час визначення значення $\cos\varphi$ до 10 мс можна, якщо використовувати не обидва екстремальних значень S -функції, а тільки максимальне значення S_{\max} .

На рис. 1 наведені залежності силової функції $S(t)$ для двох значень $\cos\varphi$: 0,3 і 0,7. Як видно з рисунка, графіки залежностей $S(t)$ та їх екстремальні значення найбільшою мірою відрізняються в інтервалі (0-10) мс. Тому, як показав аналіз, співвідношення інтеграла силової функції $S(t)$ в інтервалі часу (0-10) мс до її максимального значення S_{\max} , (див. рис. 1), а це не що інше, як співвідношення суми інтегралів Джоуля всіх фаз до максимального значення вказаної суми, є досить значимим показником для визначення значення $\cos\varphi$.

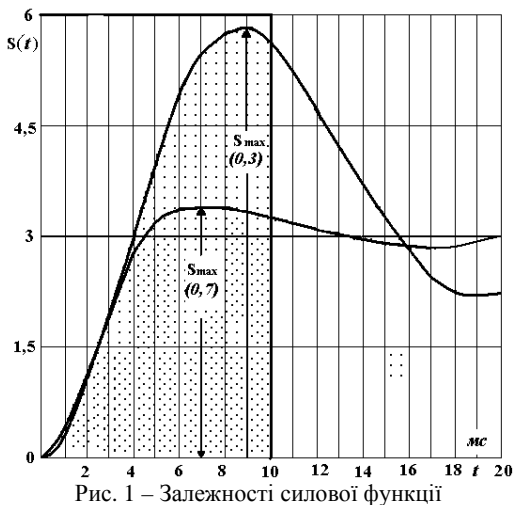


Рис. 1 – Залежності силової функції

Після того, як визначено значення $\cos\varphi$, неважко обчислити і діюче значення струму I_{ϕ} з виразу, яке однозначно пов'язане з коефіцієнтом ударності кола K_y виразом:

$$S_{\max} = 3\Delta I_{\phi}^2 \cdot K_y^2, \quad (3)$$

де K_y – коефіцієнт "ударності" струму в трифазній електричній мережі, залежність якого у функції $\cos\varphi$ наводиться в довідковій літературі.

Наведена методика визначення параметрів мережі має такі переваги:

– дозволяє використовувати один уніфікований, досить простий, математичний апарат для реалізації різних видів захистів, оскільки при побудові захисту від віддалених КЗ (захист S_1) і при побудові швидкодіючої селективного захисту (захист S_2) використовуються інтеграли Джоуля в кожній фазі і їх сума. Як буде показано нижче, такий само не складний математичний апарат інтегрування дискретних значень струму, але для різних інтервалів дискретизації, може бути використаний і при визначенні спектра гармонік струму;

– не потрібні додаткові датчики – напруги, реактивної потужності та інше, а, отже, і додатковий математичний ресурс для обробки додаткових вхідних сигналів;

– не потрібна затримка часу для того, щоб закінчилися перехідні процеси, викликані струмом збурення мережі, з тим, щоб точно визначити діюче (устале) значення струму, реактивну потужність і інше.

За сукупністю значень трьох параметрів кола (ΔI_ϕ , $\cos\varphi$, і тип міжфазного КЗ) можуть бути ідентифіковані наступні види струму обурення:

– пусковий струм, якщо $\cos\varphi = 0,2-0,4$ і $\Delta I_\phi \geq I_{sd}$, де I_{sd} – струмова уставка з урахуванням можливості нормального пуску електродвигунів;

– віддалене трифазне КЗ, якщо $\cos\varphi = 0,6-1,0$ і $\Delta I_\phi \geq I'_{sd}$, де I'_{sd} – струмова уставка віддаленого КЗ або режиму резервування;

– трифазне міжфазне КЗ на відвідних затискачах вимикача, якщо $\Delta I_\phi \geq I_i$, де I_i – струмова уставка "відсічення".

На рис. 2 наведено фрагмент блок-схеми роботи мікропроцесорного пристрою розщеплювача при реалізації захисту від міжфазних КЗ з використанням комплексних критеріїв спрацьовування захисту. Залежно від сукупності значень трьох параметрів електричного кола, що захищається (ΔI_ϕ , $\cos\varphi$ і типу міжфазного КЗ), в логічних модулях "І"- "І" формуються три комплексних критерію, у відповідності з якими виробляються необхідні керуючі сигнали на виконавчий елемент захисту.

У модулі 1 визначаються значення інтегралів Джоуля для струмів збурення у фазах – Q_a ; Q_b і Q_c .

У модулі 2 на основі порівняння поточних значень інтегралів Джоуля в фазах визначається вид струму збурення – 2-х або 3-х фазний.

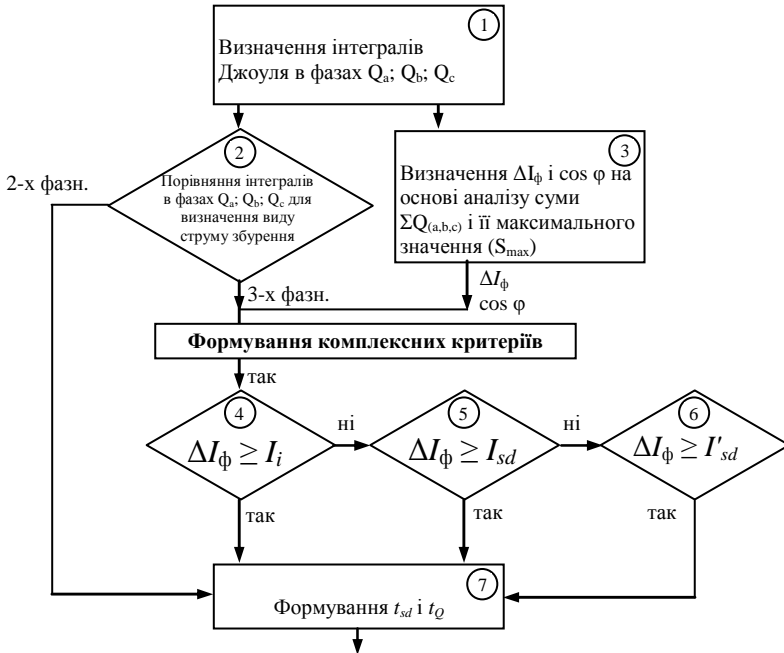


Рис. 2 – Фрагмент блок-схеми роботи мікропроцесорного пристрою розщеплювача

У модулі 3 на підставі аналізу поточних значень суми інтегралів Джоуля $\sum_0^t Q_{(a,b,c)}(t)$, тобто силової функції $S(t)$, і максимального її значення S_{\max} визначаються значення ΔI_{ϕ} , $\cos \varphi$ і тип міжфазного КЗ. У модулях 4, 5 і 6 по сукупності значень трьох параметрів електричного кола, що захищається (ΔI_{ϕ} , $\cos \varphi$ і тип міжфазного КЗ), формуються комплексні критерії спрацювання захисту і відповідний керуючий сигнал на виконавчий елемент.

Оскільки параметри кола при пуску електродвигуна не відповідають жодному з трьох сформованих комплексних критеріїв, захист на пусковий струм не реагує.

Комплексні критерії спрацювання захистів від аварійних ситуацій, зумовлених обривом N-проводу. Крім проблем із захистом від міжфазних КЗ, в реальних мережах побутового призначення існують проблеми із захистом від інших аварійних ситуацій. До захистів, обумовлених обривом N-проводу, відносяться захисти від

обриву N -проводу (захист N) і від можливих перенапруг у однофазних споживачів (захист UN).

При побудові зазначених захистів, як це було розглянуто в [2], критерієм обриву N -проводу, по своїй технічній суті, служить результат порівняння "штатного" та аварійного "образів" електричного кола. При цьому фізичним еквівалентом "штатного образу" кола виступає очікуване значення струму в N -провіднику, а еквівалентом аварійного "образу" кола – фактичне значення струму в N -провіднику – I_0 .

Під очікуваним струмом I'_0 розуміється таке значення струму, яке має бути при непошкодженому N -провіднику. Значення очікуваного струму I'_0 визначається як сума трьох векторів фазних струмів:

$$I'_0 = I_a + I_b + I_c. \quad (4)$$

У непошкодженій електроустановці кути між векторами фазних струмів складають, практично 120° , навіть при наявності несиметрії. Тому, якщо фазні струми синусоїдальні, визначення струму I'_0 з рівняння (4) не становить труднощів.

Але у випадку нелінійних навантажень, коли фазні струми несинусоїдальні і в результаті спотворення кривої фазних струмів, крім першої, з'являються більш високі гармоніки струму, визначення значення очікуваного струму I'_0 , виходячи тільки з несиметрії фазних струмів, неможливо. Обумовлено це тим, що навіть у "штатному" режимі роботи кола (без обриву N -проводу) і при симетрії фазних струмів, в N -проводі будуть протікати, у ряді випадків досить значні, струми 3-ї гармоніки. Тому, при наявності в мережі нелінійних навантажень, а значить, і наявності в фазах струмів 3-ї гармоніки I_3 , при аналізі величини очікуваного струму в N -проводі необхідно, крім геометричної суми гармонік, некратних 3, враховувати і арифметичну суму струмів 3-ї гармоніки і гармонік кратних 3.

У реальних електричних мережах найбільш значущими за впливом на величину загального струму є три перші непарні гармоніки струму. У цьому випадку значення очікуваного струму в N -проводі I'_0 може бути представлено наступною виразом:

$$I'_0 = \sqrt{\left(\sum \bar{I}_{1(a,b,c)}\right)^2 + \left(\sum I_{3(a,b,c)}\right)^2 + \left(\sum \bar{I}_{5(a,b,c)}\right)^2}, \quad (5)$$

де $\bar{I}_{1(a,b,c)}$ и $\bar{I}_{5(a,b,c)}$ – комплекси струмів 1-ї і 5-ї гармонік, а $I_{3(a,b,c)}$ – модулі векторів струмів 3-ї гармоніки.

Таким чином, значення очікуваного струму являє собою досить

складний комплексний критерій, за яким оцінюється цілісність N -провідника в розгалуженій електричній мережі. Для його формування необхідно знати не тільки значення струмів у фазах, але і спектральний гармонійний склад цих струмів.

Існує досить багато методів визначення спектру гармонік будь-якого несинусоїдального сигналу. Найбільш відомим є перетворення Фур'є. Для вирішення прикладних завдань, як правило, використовується дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). При використанні ДПФ безперервна функція, наприклад, залежність струму в часі $i(t)$, множиться на гратчасту дельта-функцію (δ -функцію), значення якої визначені тільки в дискретні моменти часу:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0; \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad (6)$$

В результаті такого множення безперервна функція $i(t)$ перетворюється в дискретну функцію $i_d(t)$:

$$i_d(t) = i(t) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - n \cdot \Delta t_d) = \sum_{n=0}^{N-1} i(t) \cdot \delta(t - n \cdot \Delta t_d), \quad (7)$$

де N – число дискретних відліків, Δt_d – інтервал дискретизації.

Для спектрального аналізу з використанням ДПФ потрібна досить велика кількість математичних операцій множення, додавання і зведення у квадрат, оскільки для визначення величини навіть однієї з гармонік струму потрібно провести розрахунок всього спектру гармонік даного сигналу. Тому розроблені альтернативні методи дискретного перетворення Фур'є, що дозволяють визначати фіксовані гармоніки, без визначення всього гармонійного спектру.

Одним з таких альтернативних методів розкладання в ряди Фур'є є алгоритм Герцеля [6]. При його використанні, за рахунок реалізації ДПФ у вигляді так званого фільтра з безкінечною імпульсною характеристикою (БІХ-фільтра), спрощується розрахунок спектра гармонік, а значить, помітно зменшується число необхідних математичних операцій. Однак, і в разі застосування алгоритму Герцеля, для безперервного моніторингу гармонійного складу струму потрібен досить значний ресурс мікропроцесора по швидкодії, а значить і за вартістю.

Для можливості швидкого ковзного моніторингу спектра гармонік сигналу розроблений метод, який названий модифікованим алгоритмом Герцеля [7]. Метод дозволяє перерахунок значення однієї гармоніки, знайденої на попередньому часовому кроці ковзання, в значення цієї ж гармоніки при наступному кроці ковзання, що знижує

вимоги до ресурсу мікропроцесора за його швидкодії. Однак, як свідчить досвід, вищевказані методи все ж є надто складними і надлишковими для пристроїв захисту. Тому більш доцільним представляється використовувати метод, спеціально розроблений для конкретної задачі визначення значень тільки перших трьох непарних гармонік фазного струму. Суть пропонованого методу визначення спектру гармонік полягає у спільному використанні результатів розрахунків діючих значень струму по дискретним значенням, отриманих при трьох різних частотах дискретизації f_d вихідної аналогової залежності струму від часу – при $f_d = 750$ Гц; 500 Гц і 300 Гц. Для кращого розуміння пропонованого методу на рис. 3 наведені залежності від часу миттєвих дискретних значень несинусоїдального струму $i(t)$, а також залежності зміни в часі значень струмів 1, 3 і 5-ї гармонік – $i_1(t)$, $i_3(t)$, $i_5(t)$, відповідно. Розглянемо, як впливає на величину діючого значення фазного струму I_ϕ частота дискретизації f_d , або відповідний інтервал дискретизації Δt_d .

При частоті дискретизації $f_d = 750$ Гц, яка в 3 рази більше частоти 5-ї гармоніки, відповідно до вимог ГОСТу на якість електроенергії [9], розраховане діюче значення струму буде повністю враховувати всі три гармоніки струму (1, 3 і 5-ю). У нижній частині рис. 3 для наочності обліку всіх 3 гармонік струму (I_1 , I_3 , I_5) у загальному струмі I_ϕ , показано перетин провідника, через який протікають струми всіх трьох гармонік. Для цього випадку, обчислена за дискретним значенням струму, величина діючого фазного струму визначається наступним виразом:

$$I_\phi = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} . \quad (8)$$

Величина діючого фазного струму I_ϕ по (8) включає в себе всі 3 гармоніки струму (I_1 , I_3 , I_5).

При частоті дискретизації $f_d = 500$ Гц, а ця частота в 2 рази більше частоти 5-ї гармоніки, якщо дійсні значення гратчастої δ -функції збігаються з моментом проходження струму п'ятого гармоніки через 0, як це і показано на рис. 3, то в чинному значенні фазного струму $I_{\phi 5}$ не буде врахована 5-а гармоніка струму I_5 . Факт відсутності у фазному струмі п'ятої гармоніки на рис. 3 показаний так, що відповідна 5-й гармоніці частина перетину провідника залита чорним кольором. Для цього випадку, підрахована за дискретними значеннями струму, величина фазного струму $I_{\phi 5}$ включає в себе 2 гармоніки струму 1 і 3-ю (I_1 і I_3).

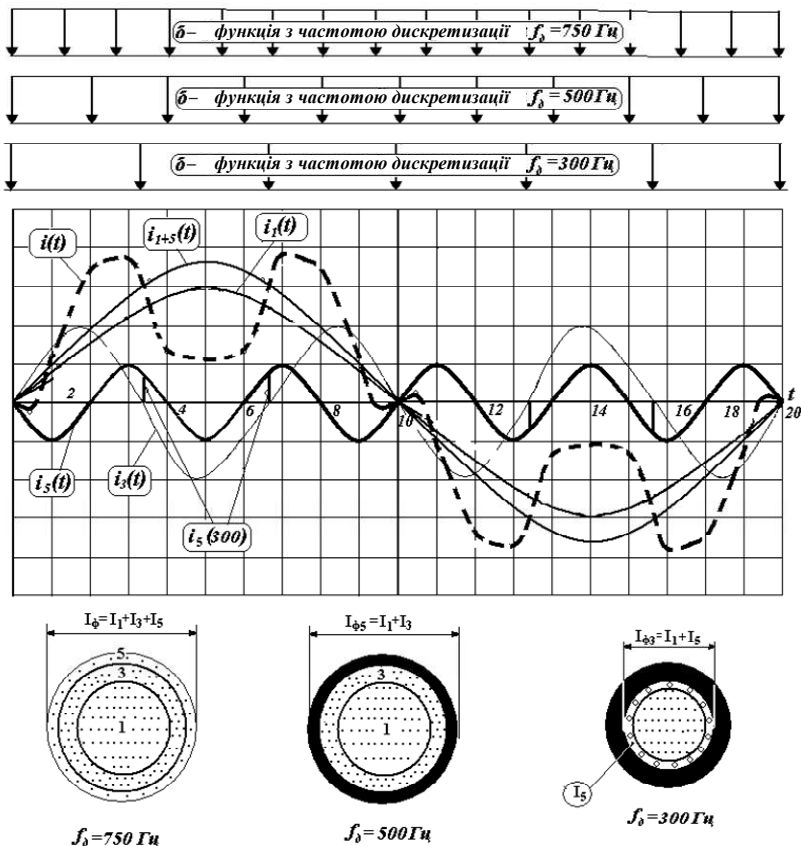


Рис. 3 – Гармоніки струму

При частоті дискретизації $f_d = 300 \text{ Гц}$, яка в 2 рази більшої частоти 3-ї гармоніки, у діючому значенні фазного струму $I_{\phi 3}$ не буде врахована 3-я гармоніка I_3 . Що стосується струму 5-ї гармоніки, то при частоті 300 Гц її точне відновлення по дискретним значенням неможливо, оскільки вказана частота є менше необхідної за ГОСТом на якість електроенергії [9].

На рис. 4 наведено залежності зміни струмів 1 і 5-ї гармонік у часі – $i_1(t)$ і $i_5(t)$, відповідно. Тут же показані дискретні значення струму 5-ї гармоніки, отримані при частоті дискретизації $f_d = 300 \text{ Гц}$ (відповідний інтервал дискретизації $\Delta t_d = 3,33 \text{ мс}$). Як видно з рисунка, в моменти проходження струму 3-й гармоніки через 0, тобто коли гратчаста

δ -функція має дійсні значення, дискретні значення струму 5-ї гармоніки (відрізки 2 і 3) мають той же знак, що і дискретні значення струму 1-ї гармоніки. Це означає, що при частоті дискретизації 300 Гц, відновлена по дискретним значенням, відповідним $\Delta t_d = 3,33$ мс, залежність струму 5-ї гармоніки, по суті, трансформуються в залежність деякого фіктивного струму 1-ї гармоніки, величина якого визначається за дискретним значенням струму 5-ї гармоніки – струм $i_{1(5)}(t)$. Як показали розрахунки, діюче значення цього фіктивного струму дорівнює величині струму п'ятого гармоніки $I_{1(5)} = I_5$. Тому діюче значення струму $I_{\Phi 3}$ слід визначати як суму двох векторів струмів 1-ї гармоніки тобто, якщо перейти до модулів зазначених векторів, то $I_{\Phi 3} = I_1 + I_5$.

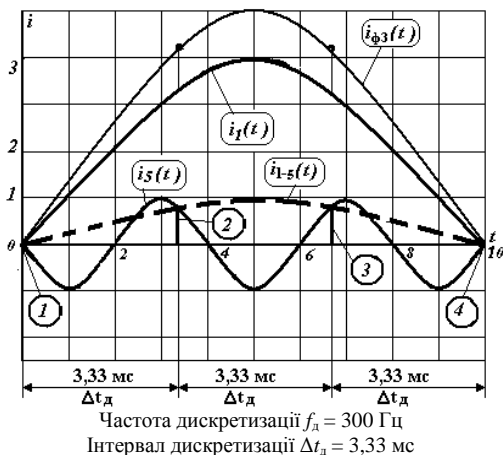


Рис. 4 – Залежності зміни струмів 1 і 5-ї гармонік у часі

Це й відображено на рис. 4, де залежність фазного струму $i_{\Phi 3}(t)$, відновленого за дискретними значеннями, відповідним частоті 300 Гц, показана з більшою амплітудою, ніж залежність струму 1-ї гармоніки $i_1(t)$.

З урахуванням вищевикладеного, метод розрахунку перших трьох гармонік струму зводиться до наступних простих арифметичних операцій з діючим значеннями фазного струму, підрахованих по дискретним значенням струму з частотами дискретизації $f_d = 750, 500$ і 300 Гц – струми $I, I_{\Phi 5}$ і $I_{\Phi 3}$.

Визначення діючого значення струму 5-ї гармоніки:

$$I_5 = \sqrt{I_\phi^2 - I_{\phi 5}^2}. \quad (9)$$

Визначення діючого значення струму 1-ї гармоніки:

$$I_1 = I_{\phi 3} - I_5. \quad (10)$$

Визначення діючого значення струму 3-ї гармоніки:

$$I_3 = \sqrt{I_\phi^2 - I_5^2 - I_1^2}. \quad (11)$$

Розглянутий вище метод спектрального аналізу нижніх, найбільш значущих для побудови захистів, гармонік є лише частиною алгоритму захисту від обриву N -провідника (захисту N) для правильної роботи якого потрібно формування комплексного критерію спрацьовування.

Як зазначалося раніше, при обриві N -провідника в будь-якому місці по довжині лінії з розподіленими навантаженнями ідентифікація аварійної ситуації проводиться по невідповідності фактичного способу мережі її "штатним" образом. Це означає, що для правильного спрацьовування захисту N необхідне формування досить складного комплексного критерію – очікуваного струму в N -провіднику I'_0 .

На рис. 5 наведено алгоритм формування такого критерію.



Рис. 5 – Алгоритм формування критерію

У модулі 1 з масиву дискретних значень фазних струмів $i_{j(a,b,c)}$ отриманих за рахунок множення вихідних аналогових залежностей струму від часу в фазах на гратчасту δ -функцію з частотою дискретизації $f_d = (2-4)$ кГц беруться дискретні значення, відповідні частотам дискретизації $f_d = 750; 500$ і 300 Гц.

У модулі 2 обчислюються діючі значення 1, 3 і 5-ї гармонік фазних струмів.

У модулі 3 обчислюється 1 гармоніка очікуваного значення струму в N -провіднику, як геометрична сума 1-х гармонік фазних струмів – I'_{01} .

У модулі 4 визначається 3-а гармоніка очікуваного струму в N -провіднику, як арифметична сума 3-х гармонік фазних струмів – I'_{03} .

У модулі 5 обчислюється 5-а гармоніка очікуваного струму в N -провіднику, як геометрична сума 5-х гармонік фазних струмів – I'_{05} .

У модулі 6 визначається комплексний критерій спрацьовування захисту – діюче значення очікуваного струму в N -провіднику:

$$I'_0 = \sqrt{(I'_{01})^2 + (I'_{03})^2 + (I'_{05})^2}. \quad (11)$$

У модулі 7 по дискретним значенням фазних струмів визначають фактичний струм в N -провіднику I_0 , який в модулі 8 порівнюється з очікуваним струмом I'_0 і, в разі аварійної ситуації, формується сигнал на спрацьовування захисту.

Слід зазначити, що для побудови іншого захисту, обумовленого пошкодженням N -провідника, а саме захисту від можливих перенапруг у однофазних споживачів (захисту UN) потрібно формування ще більш складного комплексного критерію. Адже для цього, як показано для електричних мереж без нелінійних навантажень [3], необхідно контролювати не тільки цілісність N -провідника, але і співвідношення величин фазних струмів в аварійній частині мережі. А оскільки в фазних струмах аварійної частини мережі, де пошкоджений N -провідник, не буде струмів 3-ї гармоніки, при формуванні комплексного критерію спрацьовування захисту UN без аналізу спектру струмів в аварійній частині обійтися не можна.

Крім того, при побудові захисту мереж з нелінійними навантаженнями від інших аварійних ситуацій, не обумовлених порушенням цілісності N -провідника, потрібно формування комплексних критеріїв, що включають в себе не тільки величини фазних струмів, але і їх спектральний склад. Так, наприклад, при

лінійних навантажень як критерій спрацьовування захисту від однофазних КЗ на землю (захисту G) прийнято використовувати величину струму в N -провіднику, тому у непошкодженій мережі він викликаний несиметрією фазних струмів i , зазвичай, не перевищує (10-20) % робочого фазного струму. Однак, у випадку нелінійних навантажень, захист G , що реагує тільки на величину струму в N -провіднику, не може бути ефективним. Адже третя гармоніка фазних струмів підсумовуються в N -провіднику навіть при симетричному навантаженні. Тому навіть у штатному режимі з нелінійними навантаженнями величина струму в N -провіднику може бути навіть більше величини робочого струму фази [10]. Тому для побудови надійного захисту від однофазних замикань мереж з нелінійними навантаженнями необхідна ідентифікація виду струму в N -провіднику (струм КЗ або струм навантаження). Не заглиблюючись в особливості побудови такого захисту, зазначимо, що для її реалізації необхідно формування комплексних критеріїв, які є певною сукупністю значень різних гармонік струму.

Висновки.

1. Показано, що для підвищення надійності захистів електричних мереж побутового призначення, включаючи мережі з нелінійними навантаженнями, необхідний перехід до комплексних критеріїв спрацьовування захисту, що включають в себе, крім величини струму інші параметри мережі, що захищається – діюче значення струму збурення кола, коефіцієнт потужності, спектральний склад струмів та ін.

2. Розроблено та запропоновано нові технічні рішення по надійному і швидкому формуванню комплексних критеріїв спрацьовування, необхідних для ідентифікації різних видів струму збурення – міжфазного короткого замикання, в тому числі і віддаленого, однофазного короткого замикання на землю, пуску електродвигуна, перевантаження, обриву N -проводу та ін.

3. Ідентифікація виду струму збурення дозволяє забезпечувати підвищення чутливості захисту до струмів КЗ, що, в сукупності з швидкодією захисту, включаючи і селективний захист, дозволяє повною мірою використовувати можливості режиму резервування для підвищення показника безвідмовної роботи захисту. Це вигідно відрізняє пропоновані технічні рішення від тих, в яких підвищення чутливості не сполучається з швидкодією.

5. Перевагою пропонованих технічних рішень є також можливість визначення досить великої кількості параметрів мережі, що захищається, на підставі аналізу інформації тільки від датчиків струму,

без залучення додаткових датчиків напруги, реактивної потужності та інше.

6. Для визначення параметрів мережі, необхідних для формування комплексних критеріїв та ідентифікації з їх допомогою різних видів аварійних ситуацій, запропоновано простий у застосуванні математичний апарат, в основі якого лежить розрахунок квадратів дискретних значень фазних струмів, отриманих при різних частотах дискретизації, а також прості арифметичні операції з величинами, отриманими в результаті чисельного інтегрування зазначених вище дискретних значень струму. Це дозволяє реалізувати пропоновані технічні рішення не тільки в окремих додаткових пристроях до існуючих вимикачів, як, наприклад, в ПЗР або терміналах БМРЗ-0,4, але і в розчеплювачах самих вимикачів, для яких габаритні і вартісні вимоги до мікропроцесорних пристроїв є більш жорсткими.

Список літератури: 1. ПЗР (Приборы защитные, релейные), <http://www.smont.ru/production/pzr.html>. 2. *Езерский В.Г.* Уникальная отечественная защита дальнего резервирования для сетей 0,4 кВ, не имеющая мировых аналогов, http://market.elec.ru/nomer/8/zashita_setei/ "Электротехнический рынок" / № 2 (8) февраль 2007 / Статьи и обзоры оборудования. 3. *Байда Е.И., Гапоненко Г.Н., Кобозев А.С.* Защита однофазных потребителей от перенапряжений при обрыве нулевого провода / *Электротехника і електромеханіка.* – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – №1. 4. Пат. 81981 України МПК Н 02 Н 7/00, Н 01 Н 73/00 Система захисту розгалужених трифазних електричних кіл від струмів віддалених коротких замикань / *Г.М. Гапоненко, В.В. Омельченко, О.С. Кобозев.* – №а200604596. Заявлено 25.04.2006; Опубл. 25.02.2008, Бюл. №4. 5. *Климов В.П., Москалев А.Д.* Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания, <http://www.tensy.ru/article01.html>. 6. Алгоритм Герцеля (Goertzel algorithm). Теория и практика цифровой обработки сигналов, <http://www.dsplib.ru/content/goertzel/goertzel.html>. 7. Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля", <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>. 8. Теорема Котельникова-Шеннона, www.graphicon.ru/oldgr/courses/cg_el00/kotelnikov.pdf. 9. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 10. *Григорьев О.А., Петухов В.С., Соколов В.А., Краснов И.А.* Влияние "компьютерных" нагрузок на работу электрических сетей зданий / *Connect Мир связи!*, 2002. – № 12.

Bibliografy (transliterated): 1. Pribory zashhitnye, relejnye (PZR). ZAO «SPNP «ShhITMONTAZh». 2015. Web. 15 January 2015 <<http://www.smont.ru/production/pzr.html>>. 2. Ezerskiy V.G. Unikal'naja otechestvennaja zashhita dal'nego rezervirovaniya dlja setej 0,4 kV, ne imejushhaja mirovyh analogov. "Jelektrotehnicheskij ryнок". 2 (8) February 2007. Web. 15 January 2015 <http://market.elec.ru/nomer/8/zashita_setei>. 3. Bajda E.I., Gaponenko G.N., Kobozev A.S. "Zashhita odnofaznyh potrebitelej ot perenaprzazhenij pri obryve nulevogo provoda". *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 1 (2010): 6-10. Print. 4. Pat. 81981 UA. *Systema zakhystu roz-haluzhenykh tryfaznykh elektrychnykh kil vid strumiv viddalenykh*

korotkykh zamykan. H.M. Haponenko, V.V. Omel'chenko, O.S. Kobozyev. № a200604596. 25.02.2008. Print. 5. Klimov V.P., Moskalev A.D. Problemy vysshih harmonik v sovremennyh sistemah jelektropitanija. Web. <<http://www.tensy.ru/article01.html>>. 6. Algoritm Gercelja (Goertzel algorithm). Teorija i praktika cifrovoj obrabotki signalov. Web. <<http://www.dsplib.ru/content/goertzel/goertzel.html>>. 7. Dinamicheskij pereschet spektral'nyh otschetov na kazhdom takte diskretizacii. Modificirovannyj algoritm Gercelja. Web. <<http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>>. 8. Teorema Kotel'nikova-Shennona. Web. <http://www.graphicon.ru/oldgr/courses/cg_el00/kotelnikov.pdf>. 9. GOST 13109-97. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskaj jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. 1999. Print. 10. Grigor'ev O.A., Petuhov V.S., Sokolov V.A., Krasilov I.A. "Vlijanie "komp'juternyh" nagruzok na rabotu jelektricheskikh setej zdanij". *Connect Mir svjazi!* 12 (2002).

Надійшла (received) 02.02.2015



Варшамова Ірина Сергіївна, асистент кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Захистила диплом магістра зі спеціальності електричні машини і апарати в 2006 р.

Наукові інтереси пов'язані з дослідженням проблем енергозбереження та фізичними полями електричних апаратів.



Середа Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з дослідженням проблем захисту електричних мереж та енергозбереження в електричних апаратах.



Фонга Наталія Григорівна, кандидат технічних наук зі спеціальності "Інформаційні технології". Доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних систем керування. Стаж викладацької роботи – з 2006 р. Наукових публікацій більше 25.

Наукові інтереси пов'язані з системним аналізом і автоматизацією управління складними об'єктами.