

В.Ф. Сивокобиленко, В.А. Лисенко

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ СТРУМІВ І НАПРУГ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

Для електричних мереж напругою 6-35 кВ, що працюють з компенсованою або ізольованою нейтраллю, розроблено селективний захист від замикань фази на землю, який реагує на напрям реактивної потужності, яка визначається за допомогою коефіцієнтів вейвлет-перетворень струму і напруги нульової послідовності, а також їх похідних, введених для забезпечення фазового зсуву на 90 градусів і підвищення чутливості захисту. Коефіцієнти знаходять шляхом згортки дискретних значень струму, напруги та їх похідних із сигналами материнської функції Морле, обчислення яких проводиться за допомогою квадратної матриці, для якої викладено правила її формування. Реактивна потужність визначається на кожному кроці розрахунку як сума добутків вейвлет-коефіцієнтів струму і похідної від напруги, а також напруги і похідної від струму, тобто коефіцієнтів, що мають однаковий порядковий номер. Пуск захисту відбувається за фактом перевищення амплітудою напруги нульової послідовності заданого значення. За допомогою математичної моделі мережі виконано дослідження поведінки захисту за глухих і дугових замикань фази на землю, для різного ступеня компенсації ємнісних струмів, для різних значень напруги в момент замикання. У всіх режимах отримано надійну роботу захисту, чутливість якого в 5-8 разів перевищує чутливість захисту за алгоритмом, заснованим на перетворенні Фур'є. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: електрична мережа, захист від замикань на землю, струм, напруга, нульова послідовність, вейвлет-перетворення, реактивна потужність.

Для электрических сетей напряжением 6-35 кВ, работающих с компенсированной или изолированной нейтралью, разработана селективная защита от замыканий фазы на землю, которая реагирует на направление реактивной мощности, определяемое с помощью коэффициентов вейвлет-преобразования тока и напряжения нулевой последовательности, а также их производных, введенных для обеспечения фазового сдвига на 90 градусов и повышения чувствительности защиты. Коэффициенты находят путем свертки дискретных значений тока, напряжения и их производных с сигналами материнской функции Морле, вычисление которых производится с помощью квадратной матрицы, для которой изложены правила её формирования. Реактивная мощность определяется на каждом шаге расчета как сумма произведений, совпадающих по фазе и имеющих одинаковый порядковый номер вейвлет-коэффициентов тока и производной от напряжения, а также напряжения и производной от тока. В качестве пускового органа защиты используется превышение амплитудой напряжения нулевой последовательности заданного значения. С помощью математической модели сети выполнены исследования поведения защиты при глухих и дуговых замыканиях фазы на землю, при различной степени компенсации емкостных токов, при различных значениях напряжения в момент замыкания. Во всех режимах получена надежная работа защиты, чувствительность которой в 5-8 раз выше чувствительности защиты, основанной на преобразованиях Фурье. Библ. 10, рис. 5.

Ключевые слова: электрическая сеть, защита от замыканий на землю, ток, напряжение, нулевая последовательность, вейвлет-преобразование, реактивная мощность.

Актуальність проблеми і її зв'язок з прикладними задачами. В системах електропостачання середньої напруги ушкодження фазної ізоляції призводять до однофазних замикань на землю. В такому випадку струм навантаження зазвичай значно перевищує ustalений струм замикання на землю, що ускладнює роботу захисту від таких замикань. Попри це, однофазне замикання на землю може бути вкрай небезпечним. Воно може бути причиною пожеж, пошкодження електричного обладнання в результаті перенапруг або нагрівання струмом замикання, ураження електричним струмом людей і тварин. Відповідно до нормативних документів, що діють в Україні, ділянка електричної мережі з однофазним замиканням на землю має бути негайно відключена у випадку її розташування в зонах підвищеної небезпеки, наприклад, у вугільних шахтах або на підприємствах, що переробляють пожежонебезпечну сировину. Застосування резонансно заземленої нейтралі додатково ускладнює роботу пристроїв захисту, оскільки суттєво зменшує і без того незначний струм однофазного замикання на землю. Ще одним важливим наслідком незначного струму однофазного замикання на землю є те, що таке

замикання часто має нестійкий характер, електрична дуга в місці пошкодження ізоляції може багаторазово згасати і спалахувати знову, що надає однофазному замиканню на землю характер перманентного перехідного процесу.

Огляд публікацій і недоліки відомих рішень. Існує значний масив джерел, у яких досліджуються питання захисту систем електропостачання від однофазних замикань на землю. Велика кількість оглядів публікацій з досліджуваної проблеми [1-4] є свідченням того, що тема захисту від однофазних замикань на землю на сьогодні залишається серйозним викликом як для науково-теоретичних досліджень, так і інженерно-практичних розробок. Зокрема, не імплементованими повною мірою залишаються нові методи обробки і аналізу сигналів, які були розроблені у зв'язку з розвитком сучасних систем комунікацій.

Оскільки з ustalеного струму нульової послідовності фідера при однофазному замиканні на землю дуже важко отримати інформацію про таке замикання, багато уваги приділяється струму перехідного процесу.

© В.Ф. Сивокобиленко, В.А. Лисенко

Зокрема, в роботі [5] пропонується використовувати цифрові фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою для екстракції інформаційного параметра зі струмів і напруг нульової послідовності. В роботі [6] пропонується використовувати перетворення Фур'є для отримання фазових і амплітудних характеристик напруги і струму нульової послідовності. В роботі [7] порівнюються властивості перетворення Фур'є і вейвлет-перетворення на прикладі виявлення електричної дуги. В роботі [8] було запропоновано виявляти замикання, спираючись на коефіцієнти, отримані за допомогою вейвлет-перетворення. В [9] за допомогою програмних засобів АТР/ЕМТР моделюються однофазні замикання в мережі з незаземленою нейтраллю і також пропонується алгоритм виявлення такого замикання за допомогою вейвлет-перетворення. Але характеристики алгоритмів захисту в роботах [7-9] не розглядаються.

Мета статті – підвищення чутливості і швидкодії систем селективного захисту електричних мереж з ізольованою або компенсованою нейтраллю на основі використання вейвлет-перетворень перехідних складових напруг і струмів нульової послідовності, що виникають при появі замикання фази на землю під час розряду і дозаряду ємностей мережі.

Основний матеріал і отримані результати. Дослідження перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю (ОЗЗ) і аналіз роботи захисту виконаємо за допомогою математичної моделі, опис якої наведено в [10]. Розглянемо типову двохтрансформаторну підстанцію для системи електропостачання напругою 6 кВ, яка складається з двох понижуючих 110/6 кВ силових трансформаторів Т1 і Т2, збірних шин першої СШ-1 і другої СШ-2 секцій, від яких живляться кабельні лінії Ф1 – Ф3, на кожній з яких встановлено трансформатори струму нульової послідовності (ТСНП). До збірних шин підключені вимірювальні трансформатори напруги ТН1, ТН2. Захист від замикань фази на землю підключено до вторинних кіл ТСНП і ТН. Нейтраль мережі першої секції заземлено через реактор з резонансною індуктивністю 0,161 Гн, а ємності фаз на землю для підключених до цієї секції фідерів Ф1-Ф3 становлять відповідно 1, 8 і 12 мкФ, міжфазні ємності – 2 мкФ, усталений струм замикання на землю – 72,3 А. Рішення диференціальних рівнянь у математичній моделі будемо виконувати неявним методом з кроком розрахунку $h = 0,667$ мс. Розрахункові величини при моделюванні представимо у відносних одиницях (р.у.) до базисних:

$$U_b = \frac{\sqrt{2} \cdot 6000}{\sqrt{3}} = 4899 \text{ В};$$

$$I_b = \sqrt{2} \cdot I_{0f} = \sqrt{2} \cdot 72.36 = 102.33 \text{ А};$$

$$Q_b = U_b \cdot I_b = 501 \cdot 10^3 \text{ ВА},$$

де U_b , I_b , Q_b – базисні напруга, струм і потужність відповідно; I_{0f} – струм однофазного замикання на землю.

Запропоновані в останні роки частотні [5] і мультичастотні [6] захисти від ОЗЗ засновані на використанні вищих гармонік у струмах і напругах, що виникають в перший момент замикання і тому залежать від миттєвого значення фазної напруги на пошкодженій фазі. Від цієї напруги залежить ступінь спотво-

рення синусоїд напруг і струмів, що видно, наприклад, з рис. 1, де показані результати моделювання ОЗЗ при початковій напрузі на пошкодженій фазі, що дорівнює амплітудному (рис. 1,а), а також нульовому (рис. 1,б) значенню. У першому випадку має місце досить тривалий збіг за фазою струму і напруги, тоді як у другому, час збігу за фазою цих сигналів набагато менше. Чутливість алгоритму захисту, що заснований на використанні добутку цих сигналів, який є пропорційним реактивній потужності, залежить від зазначених початкових умов, що необхідно враховувати, розробляючи нові методи захисту.

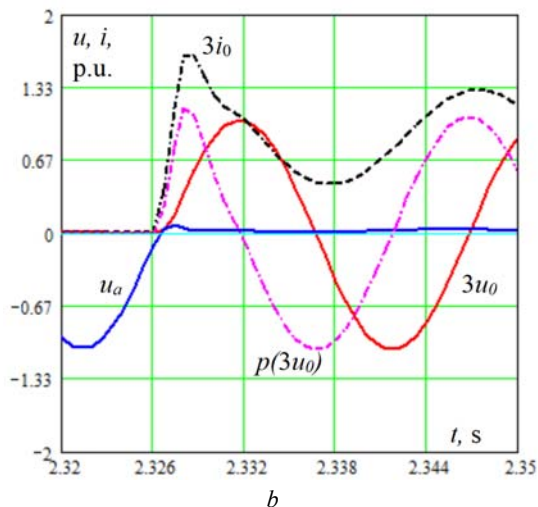
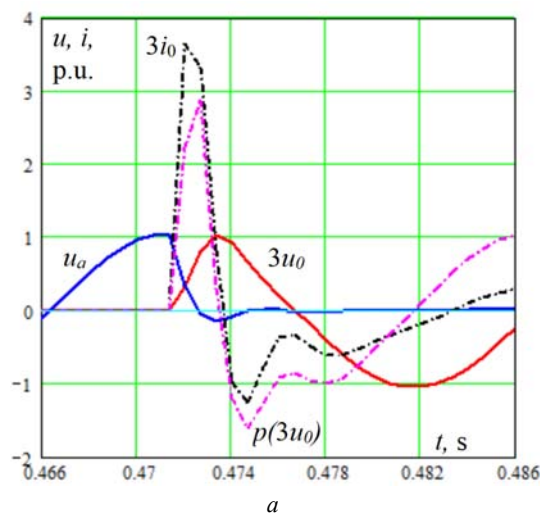


Рис. 1. Результати моделювання ОЗЗ, що виникло за максимального (а) і нульового (б) миттєвого значення напруги на пошкодженій фазі u_a

В електричних мережах напругою 6-35 кВ, що працюють з ізольованою або заземленою через котушку Петерсена нейтраллю, перехідні процеси при дугових замиканнях фази на землю є нестационарними, і тому виникають питання щодо коректності застосування алгоритмів захистів, заснованих на використанні частотних [5] і мультичастотних [6] складових в струмах $3i_0$ і напругах $3u_0$ нульової послідовності, отриманих за допомогою спектральних перетворень Фур'є. Для такого роду процесів раціональнішим є застосування вейвлет-перетворень ВП, що дозволяють розкласти вхідний, змінний у часі сигнал $x(t)$, на

частотно-часові складові у вигляді коефіцієнтів $CW(a,b,t)$, що залежать від обраної материнської функції $g(a,b,t)$, а також від коефіцієнтів частотного масштабу a і зсуву в часі b [8]. Дослідження характеристик ВП струмів і напруг та можливість використання фазового спектра (кута зсуву фаз) або опорів для побудови групового захисту від замикань фази на землю розглядається в роботах [1-4]. Однак важливим завданням є розробка автономного для кожного фідера захисту, який діє як при дугових, так і при стійких замиканнях, використовує співвідношення між струмами і напругами і має більш високу чутливість. Як показано в [8], безперервне вейвлет-перетворення сигналів здійснюється за допомогою інтегрального виразу, що містить добуток цього сигналу та деякої базової функції, званої материнським вейвлетом:

$$CW(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (1)$$

Вхідними сигналами, в нашому випадку, будуть масиви розмірністю N , що складаються з дискретних значень напруг і струмів, записаних за допомогою аналого-цифрових перетворювачів протягом періоду основної частоти (50 Гц) з дискретністю з частотою f_s , а також значень похідних від струму $pi = p(3i_0)$ і напруги $pu = p(3u_0)$. Вони використовуються для компенсації кутового зсуву за фазою на 90 градусів між сигналами струму і напруги нульової послідовності (рис. 1). Чисельне визначення похідних, наприклад, за трьома миттєвими значеннями струму (напруги) проводиться за виразами, в яких використовується також крок розрахунку і кутова частота ω , які в нашому випадку приймалися рівними відповідно 0,667 мс і 314 c^{-1}

$$px = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2\omega h} (3x_n - 4x_{n-1} + x_{n-2}). \quad (2)$$

Як материнський вейвлет візьмемо комплексний вейвлет Морле [8], що є плоскою хвилею, модульованою кривою Гауса

$$g(t) = \exp\left(-\frac{\pi \cdot t^2}{2}\right) \cdot \exp(j2\pi \cdot t). \quad (3)$$

Для запису (1) і (3) в дискретній формі підставимо в (3) замість часу t вираз $(t-b)/a$, в якому містяться коефіцієнти частотного масштабу a і зсуву в часі b . З отриманого виразу виділимо одну зі складових материнської функції $g(t)$, наприклад, уявну (синусну) $gS(n)$. Тоді вирази для визначення k -тих значень коефіцієнтів вейвлет-перетворень матимуть вигляд:

$$CW(k,a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n=1}^N x(k-n) \cdot g\left(\frac{n-b}{a}\right); \quad (4)$$

$$a = \frac{f_s}{f_n}; \quad b = \frac{\pi \cdot a}{2};$$

$$gS(n) = \text{Im}\left[g\left(\frac{n-b}{a}\right)\right] = \exp\left[-\pi \frac{(n-b)^2}{a^2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi(n-b)}{a}\right)\right]. \quad (5)$$

Як приклад, на рис. 2 показаний характер зміни материнського вейвлета $gS(n)$ і його амплітудної складової $J(n)$ за $a = 8$, $b = 15$, $N = 30$, $f_n = 250$ Гц, $f_s = 1500$ Гц. Відзначимо, що за допомогою коефіцієнта частотного масштабу a встановлюють час тривалості вейвлета в області потрібного діапазону частоти f_n , значення якого ми приймемо рівним 250 Гц, що відповідає переважним гармонікам при дугових замиканнях [6].

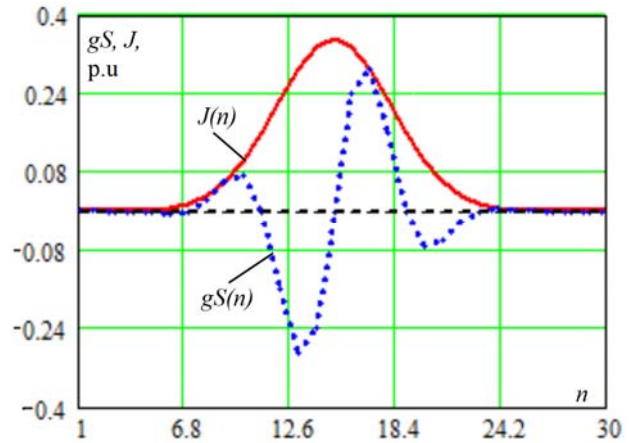


Рис. 2. Характер зміни материнського вейвлета $gS(n)$ і його амплітуди $J(n)$

Як видно з (4), вейвлет-перетворення є згорткою значень вхідного сигналу (струму, напруги та їх похідних) з такою ж кількістю значень функції материнського вейвлета. При цьому згортка визначається як взаємна кореляція однієї з цих послідовностей з оберненою в часі іншою. Для обчислення згортки скористаємось матричною формою запису оберненої в часі послідовності значень, розрахованих за (5) у випадку $n = 1, \dots, N$. Матриця ядра згортки є квадратною розмірністю $N \times N$ і на її головній діагоналі розташовано елементи $gS_1 = gS_{(n=1)}$, на діагоналі, вище головної, $-gS_{N-1} = gS_{(n=N-1)}$, потім $-gS_{N-2} = gS_{(n=N-2)}$ і т.д. На діагоналі, нижче головної, розташовані елементи $gS_2 = gS_{(n=2)}$, потім $-$ відповідно gS_3, \dots, gS_N . Для масиву з N елементів матриця буде мати вигляд:

$$\mathbf{G}(gS) = \begin{pmatrix} gS_1 & gS_N & gS_{N-1} & \dots & gS_2 \\ gS_2 & gS_1 & gS_N & \dots & gS_3 \\ gS_3 & gS_2 & gS_1 & \dots & gS_4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ gS_N & gS_{N-1} & gS_{N-2} & \dots & gS_1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Вектори вейвлет-перетворень напруг W_u і струмів W_i нульової послідовності, а також похідних від напруг W_{pu} і від струмів W_{pi} знайдемо як:

$$\begin{aligned} W_u &= \mathbf{G}(gS) \times u; & W_i &= \mathbf{G}(gS) \times i; \\ W_{pu} &= \mathbf{G}(gS) \times pu; & W_{pi} &= \mathbf{G}(gS) \times pi. \end{aligned} \quad (7)$$

Результати розрахунку за виразами (7) коефіцієнтів ВП з порядковим номером $n = 3$ наведено на рис. 3, a, b , з яких випливає, що на початковій ділянці перехідного процесу при ОЗЗ має місце близький збіг за фазою векторів W_i і W_{pu} , а також W_u і W_{pi} . При цьому за допомогою їх добутку для сигналів з однаковим порядковим номером можна визначити величину і знак реактивної потужності (рис. 3, a, b). Резуль-

туючу реактивну потужність Q можна визначити як суму добутків для всіх N коефіцієнтів, завдяки чому значно підвищується чутливість захисту

$$Q = \sum_{k=1}^N W_u^k \times W_{pi}^k - \sum_{k=1}^N W_{pu}^k \times W_i^k \quad (8)$$

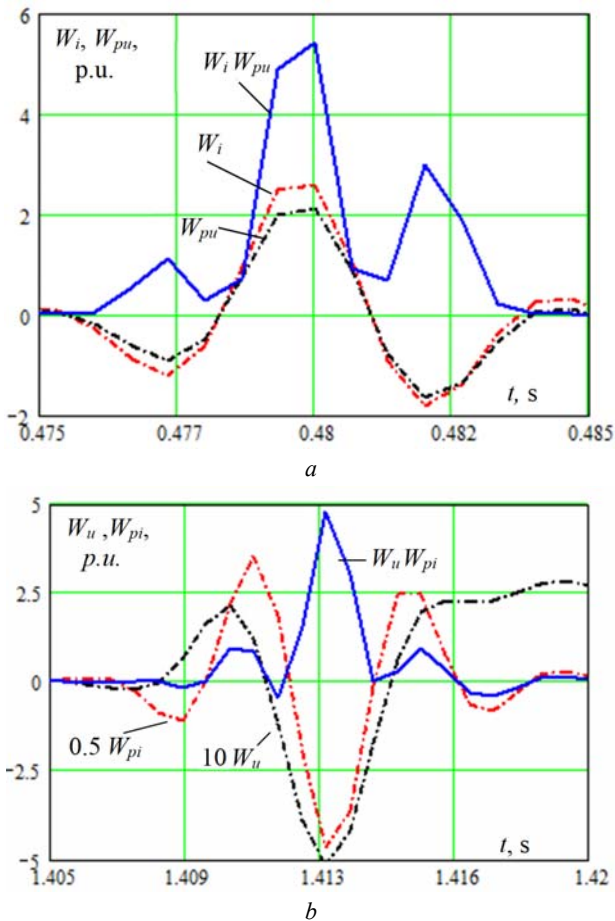


Рис. 3. Коефіцієнти вейвлет-перетворень струму і похідної від напруги (а), похідної від струму і напруги (b) і складові отриманої за їх допомоги реактивної потужності

Блок-схема розробленого алгоритму захисту показана на рис. 4. Вона містить аналого-цифрові перетворювачі (ADC) для отримання дискретних значень напруг $3u_0$ і струмів $3i_0$, блоки d/dt для розрахунку за (2) похідних від зазначених сигналів, блок розрахунку за (5) материнської вейвлет-функції $g(S)$, блок формування за (6) матриці $G(gS)$ ядра згортки, блоки W_u , W_i , W_{pu} , W_{pi} для розрахунку за (7) вейвлет-перетворення відповідно напруг, струмів і їх похідних, блоки добутків для розрахунку за (8) складових реактивної потужності $Q_1 = Q_{upi} = W_u \times W_{pi}$ і $Q_2 = Q_{ipu} = W_{pu} \times W_i$, а також суматор для визначення потужності $Q = Q_1 - Q_2$, при перевищенні якою позитивного порогового значення Q_t у компараторі відповідний сигнал надходить на вихідний орган реле через ряд логічних елементів І (AND), АБО (OR). В алгоритмі захисту як пусковий орган використовується перевищення амплітудою напруги порогового значення U_t . Амплітуда визначається в блоці U_a за його ортогональними складовими як $\sqrt{(3u_0)^2 + (p3u_0)^2}$. Після спрацювання захисту

передбачено самоутримання реле на час існування $U_m > U_t$, що забезпечує надійну роботу захисту після переходу дугового замикання в стійке.

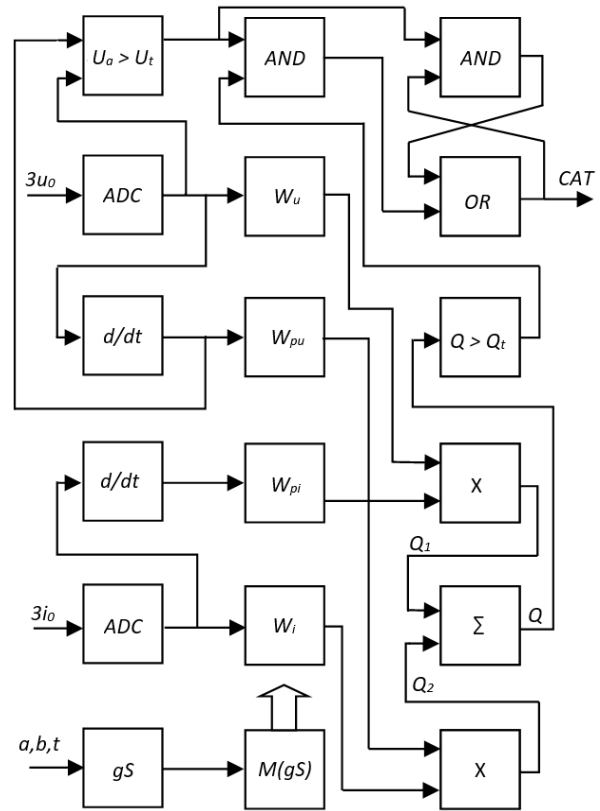


Рис. 4. Блок-схема алгоритму «вейвлет-захисту» від замикань фази на землю

При розробці захисту було розглянуто питання підвищення його швидкодії за рахунок скорочення обчислювальних витрат на вейвлет-перетворення. Встановлено, що для цього можна використати тільки фіксовані значеннями $a = 8$, $b = 15$ для розрахунків за формулою (5).

Результати розрахунку результуючої реактивної потужності за ОЗЗ з різними початковими напругами наведені на рис. 5. З наведених даних випливає, що чутливість розробленого захисту в даному випадку в 8 разів перевищує чутливість захисту, побудованого на основі перетворень Фур'є, а час спрацювання захисту складає близько 5-7 мс. Порогове значення реактивної потужності приймається рівним базовому значенню Q_b .

За допомогою математичної моделі було досліджено поведінку захисту за різних режимів виникнення ОЗЗ: за резонансного налаштування реактора, пере- і недокомпенсації, за різних значень початкової напруги на пошкодженій фазі і різних опорах у місці замикання. В усіх зазначених режимах має місце чітка робота вихідного органу реле.

Найменша чутливість захисту має місце (рис. 5,с) при нульовій початковій напрузі. У порівнянні з мультискотним захистом, заснованим на перетворенні Фур'є [6], розроблений захист має чутливість майже на порядок вище.

Отримано також позитивні результати роботи захисту при подачі на вхід записаних в реальній ме-

режі аварійних файлів ОЗЗ, а також при випробуваннях на лабораторному стенді.

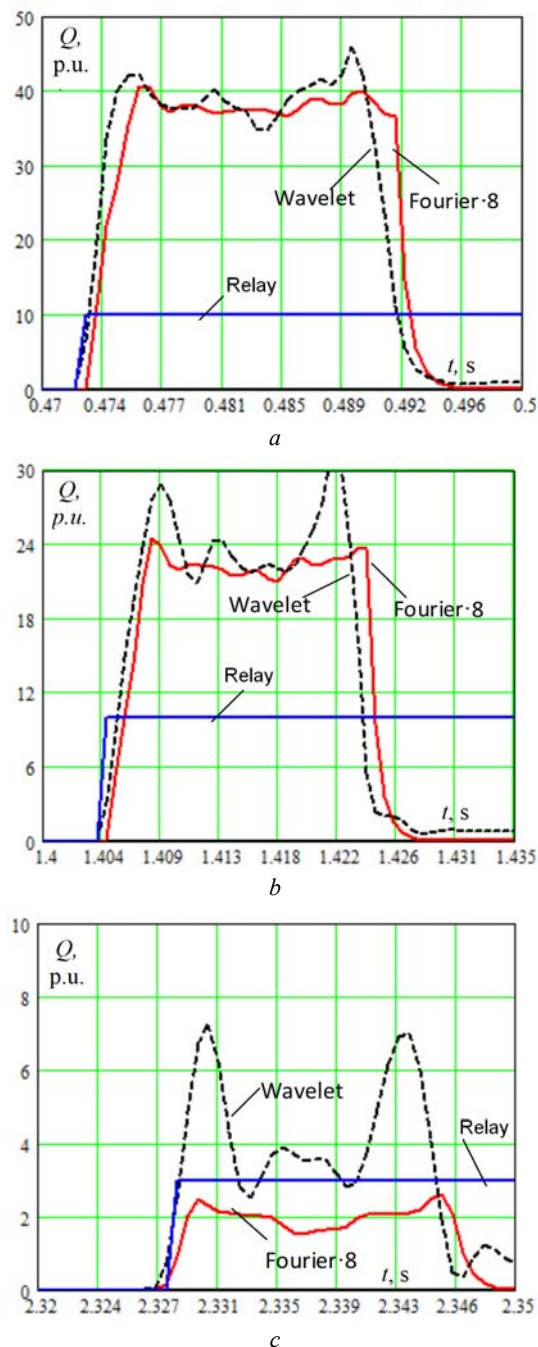


Рис. 5. Реактивна потужність при ОЗЗ, визначена за допомогою вейвлет-перетворення і перетворення Фур'є при різних початкових напругах на пошкодженій фазі: u_{\max} (a); $0,5 u_{\max}$ (b); $0,01 u_{\max}$ (c)

Висновки.

1. Набув розвитку метод захисту електричних мереж з ізольованою або компенсованою нейтраллю від замикань фази на землю та запропоновано новий алгоритм реалізації методу на основі використання вейвлет-перетворень (ВП) перехідних складових напруг і струмів нульової послідовності, що має експериментальне підтвердження і що дозволяє підвищити ефективність роботи електричних мереж.

2. За допомогою коефіцієнтів вейвлет-перетворень, які знаходять шляхом згортки дискретних значень

струму, напруги та їх похідних із сигналами материнської функції Морле, обчислюють реактивну потужність, за позитивним значенням якої визначають ушкоджене приєднання.

3. Працездатність алгоритму захисту підтверджено результатами математичного моделювання і натурними випробуваннями на лабораторному стенді.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ghaderi A., Ginn H.L., Mohammadpour H.A. High impedance fault detection: A review. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 143, pp. 376-388. doi: 10.1016/j.epsr.2016.10.021.
2. Farughian A., Kumpulainen L., Kauhaniemi K. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol. 154, pp. 373-380. doi: 10.1016/j.epsr.2017.09.006.
3. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 74, pp. 949-958. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.021.
4. Raza A., Benrabah A., Alquthami T., Akmal M. A Review of Fault Diagnosing Methods in Power Transmission Systems. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 4, p. 1312. doi: 10.3390/app10041312.
5. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Earth fault protection for compensated electric networks based on frequency filters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, no. 1, pp. 69-74. doi: 10.33271/nvngu/2020-1/069.
6. Сивокобыленко В.Ф., Лисенко В.А. Мультичастотний метод захисту від замикань фази на землю в компенсованих електричних мережах. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020, № 1, С. 56-60. doi: 10.20998/2074-272X.2020.1.09.
7. Wang Z., McConnell S., Balog R.S., Johnson J. Arc fault signal detection – Fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 3239-3244. doi: 10.1109/PVSC.2014.6925625.
8. Michalik M., Rebizant W., Lukowicz M.R., Lee S.-J., Kang S.-H. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 21, no. 4, pp. 1793-1802. doi: 10.1109/TPWRD.2006.874581.
9. Elkalashy N.I., Lehtonen M., Darwish H.A., Taalab A.-M.I., Izzularab M.A. DWT-Based Detection and Transient Power Direction-Based Location of High-Impedance Faults Due to Leaning Trees in Unearthed MV Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 1, pp. 94-101. doi: 10.1109/TPWRD.2007.911168.
10. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Mathematical modeling of new algorithms for single-phase earth faults protection in a compensated electrical network. *Problemele Energeticii Regionale*, 2019, no.1-2(41), pp. 1-11. doi: 10.5281/zenodo.3239135.

REFERENCES

1. Ghaderi A., Ginn H.L., Mohammadpour H.A. High impedance fault detection: A review. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 143, pp. 376-388. doi: 10.1016/j.epsr.2016.10.021.
2. Farughian A., Kumpulainen L., Kauhaniemi K. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol. 154, pp. 373-380. doi: 10.1016/j.epsr.2017.09.006.
3. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 74, pp. 949-958. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.021.

4. Raza A., Benrabah A., Alquthami T., Akmal M. A Review of Fault Diagnosing Methods in Power Transmission Systems. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 4, p. 1312. doi: **10.3390/app10041312**.
5. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Earth fault protection for compensated electric networks based on frequency filters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, no. 1, pp. 69-74. doi: **10.33271/nvngu/2020-1/069**.
6. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Multifrequency protecting method against earth-faults of phase in the compensated electric networks. *Electrical engineering & electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 56-60. doi: **10.20998/2074-272X.2020.1.09**.
7. Wang Z., McConnell S., Balog R.S., Johnson J. Arc fault signal detection – Fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 3239-3244. doi: **10.1109/PVSC.2014.6925625**.
8. Michalik M., Rebizant W., Lukowicz M.R., Lee S.-J., Kang S.-H. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 21, no. 4, pp. 1793-1802. doi: **10.1109/TPWRD.2006.874581**.
9. Elkalashy N.I., Lehtonen M., Darwish H.A., Taalab A.-M.I., Izzularab M.A. DWT-Based Detection and Transient Power Direction-Based Location of High-Impedance Faults Due to Leaning Trees in Unearthed MV Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 1, pp. 94-101. doi: **10.1109/TPWRD.2007.911168**.
10. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Mathematical modeling of new algorithms for single-phase earth faults protection in a compensated electrical network. *Problemele Energeticii Regionale*, 2019, no.1-2(41), pp. 1-11. doi: **10.5281/zenodo.3239135**.

Надійшла (received) 01.06.2020

Сивокобиленко Віталій Федорович¹, д.т.н., проф.,
 Лисенко Віктор Анатолійович¹, к.т.н.,
¹Донецький національний технічний університет,
 85300, Донецька обл., Покровськ, пл. Шибанкова, 2,
 e-mail: svf1934@gmail.com, viktor.lysenko@donntu.edu.ua

V.F. Syvokobylenko¹, V.A. Lysenko¹

¹Donetsk National Technical University,
 2, Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300,
 Ukraine.

Improving the efficiency of fault protection systems of electrical grids based on zero sequence voltages and currents wavelet transforms.

Introduction. A significant proportion of earth faults in medium voltage networks represents a short-lived and transient process.

Problem. In such cases, earth fault protection that responds to steady-state current and voltage is not able to operate properly.

Purpose. To develop earth faults protection selective algorithm using transient components, that occur in zero-sequence currents and voltage in the fault process.

Method. A mathematical model of the power supply system was applied to study the transient components of currents and voltage of zero sequence in compensated electrical networks with phase-to-earth faults, and a those model also is used to test the operation of the developed protection algorithm.

The results showed that, the reactive power for transient components, of the frequency greater by 4-6 times, than fundamental frequency, which are extracted from the current and voltage of zero sequence by wavelet transform in compensated electrical networks on the damaged feeder, is positive regardless of the degree of compensation of the capacitive current.

That may be the basis of the principle of directional protection.

Originality. Phase-to-earth fault selective protection algorithm has been developed. In that algorithm, first derivatives of currents and voltages of zero sequence are found, to reduce the influence of aperiodic components.

And then, by using of the wavelet transform with Morlet mother function, an orthogonal components are extracted from them. Reactive power is calculated for transient component.

If that reactive power excess of threshold, the relay will make a decision. The reliability of the developed protection algorithm is confirmed by the results of mathematical modelling and verification of the test sample at the laboratory stand and by means of field signals that were recorded by digital loggers at the substations. References 10, figures 5.

Key words: electrical grid, earth fault protection, current, voltage, zero sequence, wavelet transform, reactive power.