

АНАЛИЗ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В работе представлена методика идентификации линии, где произошло замыкание в два этапа. Своевременное обнаружение линии с замыканием на землю повышает надежность электроснабжения и снижает риски поражения персонала электрическим током. Первый этап основан на анализе высокочастотных компонент, возникающих при переходном процессе. Второй этап предусматривает анализ установившегося режима однофазного замыкания на землю. На основании энергии спектра высших гармоник выявляется поврежденная линия. Предлагаемая методика может быть реализована для организации цифровых защит от замыканий на землю.

Ключевые слова: вейвлет преобразование, однофазное замыкание на землю, ток нулевой последовательности, комбинированная нейтраль.

Введение. В соответствии с принятыми нормами в электроэнергетических системах России могут применяться различные режимы работы нейтрали. Электрические сети среднего напряжения (6–35 кВ) работают, как правило, в режиме изолированной или компенсированной нейтрали. Заземление нейтрали через дугогасящий реактор позволяет снизить вероятность возникновения дуговых однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

Вейвлет-преобразование в последнее время широко используется для решения задач идентификации ОЗЗ, определения отходящей линии и места, где возникло замыкание. Так, в работе [1] предложено применение непрерывного вейвлет-преобразования для реализации алгоритма защиты от замыкания на землю, который может быть применен для проектирования защит среднего напряжения в воздушных линиях и кабельных линиях электропередачи. Алгоритм основан на измерении фазового смещения. В предложенном алгоритме происходит сравнение фазы вейвлет-коэффициентов напряжения нулевой последовательности с токовыми сигналами [1]. Широкое распространение получают алгоритмы защит, основанные на совместной работе аппарата вейвлет-преобразования и нейтральных сетей. В статье [2] авторы предлагают с помощью нейронных сетей определять места замыкания на землю по частотному спектру, полученному с помощью вейвлет-преобразования.

Аппарат вейвлет-преобразования активно замещает алгоритмы частотного анализа, основанные

на преобразовании Фурье. Дискретное вейвлет-преобразование можно рассматривать как процесс фильтрации. Он разлагает дискретизированный сигнал во временной области на несколько сигналов, располагающихся на разных уровнях разрешения. Процесс разложения проводится в соответствии с пирамидальным алгоритмом [3] (рис. 1). Во временной области фильтрация заданного сигнала $i(t)$ эквивалентна свертке этого сигнала с импульсной характеристикой фильтра

$$\begin{cases} i_j^A = \sum_k h_0(2t - k)i_{j-1}^A \\ i_j^D = \sum_k h_1(2t - k)i_{j-1}^A \end{cases} \quad (1)$$

Сигнал $i(t)$ пропускается через цифровой фильтр низких частот h_0 и цифровой фильтр высоких частот h_1 . Символ $2\downarrow$ на рис. 1 представляет собой операцию прореживания в 2 раза. Согласно критерию Найквиста, можно исключить половину выборки сигнала.

На выходе вейвлет-фильтров мы имеем две последовательности вейвлет-коэффициентов. Последовательность коэффициентов, полученная при помощи фильтра низких частот, называется «аппроксимирующей». Другая — «детализирующей». Операция (называемая разложением) повторяется для аппроксимирующих коэффициентов, чтобы получить разные уровни разрешений во временной

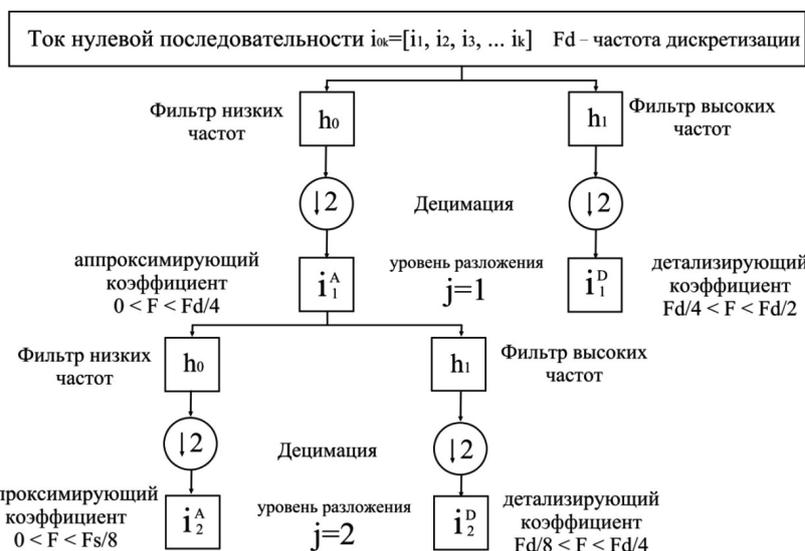


Рис. 1. Алгоритм дискретного вейвлет-разложения сигнала тока

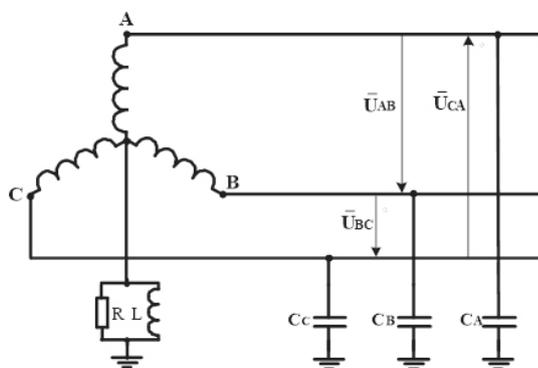


Рис. 2. Упрощенная схема замещения сети с комбинированным заземлением нейтрали

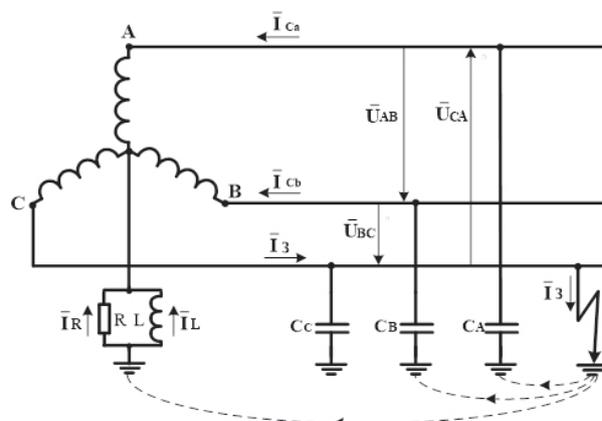


Рис. 3. Пути протекания токов при ОЗЗ в сети с комбинированной нейтралью

области. Каждый уровень разрешения имеет определённый диапазон пропускания частот.

Теория. Вейвлет-преобразование может быть применено для дополнения существующих методов идентификации ОЗЗ.

Так, в работах [4, 5] для определения отходящей линии с ОЗЗ используются волновые методы. Компоненты падающей волны, измеренные датчиками тока нулевой последовательности, разлагаются с использованием вейвлет-анализа. Максимумы локального модуля вейвлет-преобразования извлекаются для определения времени начальной бегущей волны. Вейвлет-преобразования на всех фидерах в то время сравниваются по величине и полярности друг с другом, чтобы идентифицировать неисправный фидер [4, 5].

Имитационная модель для идентификации ОЗЗ в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью на основе вейвлет-преобразования представлена в работах [6, 7]. В настоящей работе будет исследована проблема вейвлет-преобразования тока нулевой последовательности в сетях с комбинированным заземлением нейтрали (рис. 2, рис. 3). Применение высокоомного резистора, шунтирующего дугогасящий реактор, приводит к прекращению биений напряжения на фазах после погасания дуги. Прекращение биений достигается даже при доста-

точно больших расстройках компенсации. Данный вид заземления обеспечивает сокращение кратности перенапряжений на неповреждённых фазах до величины 2,5 о.е.

Дугогасящий реактор создаёт индуктивную составляющую тока замыкания I_L , а резистор — дополнительную активную составляющую тока замыкания I_R . Сопротивление резистора выбирается из следующего условия:

$$R = \frac{U \phi}{\Delta I}, \quad (2)$$

где ΔI — ток расстройки компенсационного реактора, А.

Высокочастотные составляющие (высшие гармоники) возникают как в переходном процессе при замыкании фазы на землю, так возможно присутствие гармоник и при устойчивом замыкании. Поскольку алгоритм вейвлет-преобразования подразумевает частотную декомпозицию сигнала, рассмотрим подробнее возможный состав высших гармоник при возникновении ОЗЗ.

Анализу электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ посвящена работа [8]. Для полных комплексных схем замещения были записаны урав-

нения для тока нулевой последовательности в месте ОЗЗ [8]:

$$3i_0 = -3C_0 du_0/dt = i_{np} + i_3 + i_p = 3C_0 \Sigma U_m \cos(\omega t + \varphi) + I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3), \quad (3)$$

где ω_p — частота разрядных колебаний; ω_3 — частота зарядных колебаний; δ_p — постоянная затухания разрядных колебаний; δ_3 — постоянная затухания зарядных колебаний; U_m — амплитуда составляющей напряжения промышленной частоты на поврежденной фазе [4].

Частота разрядной составляющей

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} \quad (4)$$

определяется типом и длиной ЛЭП, а также удалением точки простого замыкания на землю от шин защищаемого объекта. Частота зарядной составляющей [8]:

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} \quad (5)$$

зависит в основном от суммарного ёмкостного тока сети и индуктивности источника питания. Зарядная составляющая затухает в течение 3–5 миллисекунд.

Одним из видов защит от ОЗЗ в сетях с компенсированной нейтралью являются максимальные токовые защиты, основанные на абсолютном заме-

ре высших гармоник [9]. Алгоритм работы данных устройств успешно работает при устойчивых ОЗЗ. Дуговые замыкания в сетях с компенсированной нейтралью при резонансной настройке дугогасящего реактора считаются маловероятными. Для правильной оценки коэффициента чувствительности данного типа защит имеет немаловажное значение определение максимального уровня высших гармоник в исследуемых сетях. Представленная в работе [9] модель компенсированной кабельной сети 6–10 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия позволила построить зависимости относительного уровня высших гармоник в токе ОЗЗ от коэффициента искажения синусоидальности напряжения K_u . Численные эксперименты выполнялись для различных отраслей промышленности, при этом авторы [9] задавали ограничение $K_u \leq K_{unreg} = 8\%$, что соответствует действующему ГОСТ на качество электроэнергии [10].

В работе [11], приняв за основу допустимые значения коэффициентов n -ной гармонической составляющей K_{un} , указанных в [6] для 5, 7, 11 и 13 гармоник, авторы определили наибольший уровень высших гармоник в токе ОЗЗ [11]:

$$\left(\frac{I_{BG}}{I_{50}} \right)_{\text{макс}} \leq 65\% \cdot$$

На основании приведенных расчётов авторы [11] заключают, что, «сравнивая уровень ВГ и составляющей 50 Гц в токе $3i_0$, можно обеспечить чёткое распознавание вида ОЗЗ — устойчивое ОЗЗ или дуговое ОЗЗ» [11].

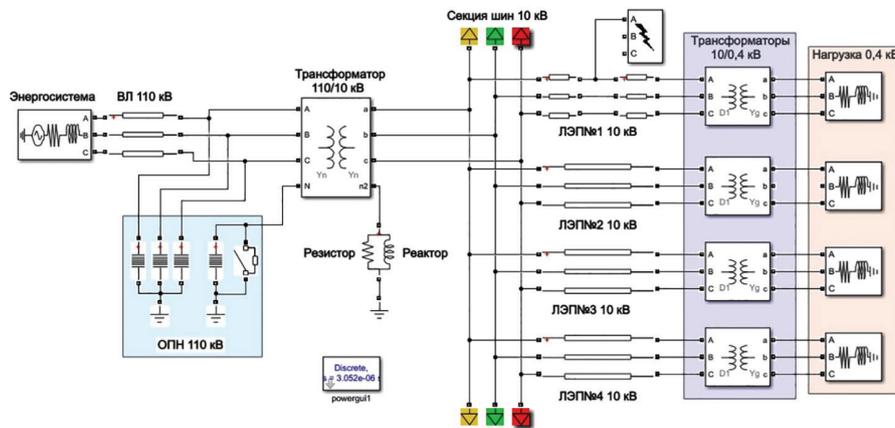


Рис. 4. Имитационная модель исследуемой сети

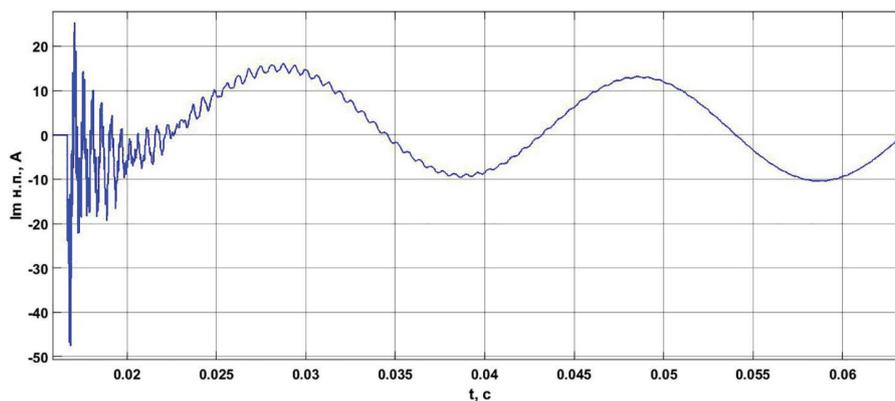


Рис. 5. Оциллограмма тока нулевой последовательности

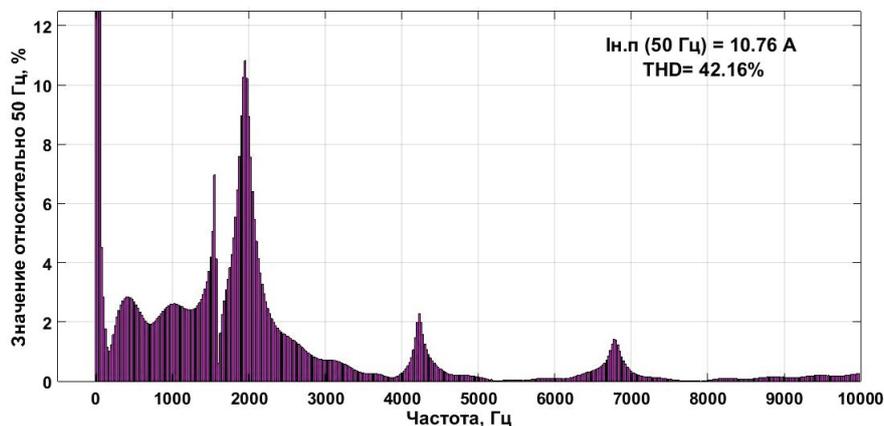


Рис. 6. Фурье спектр тока нулевой последовательности

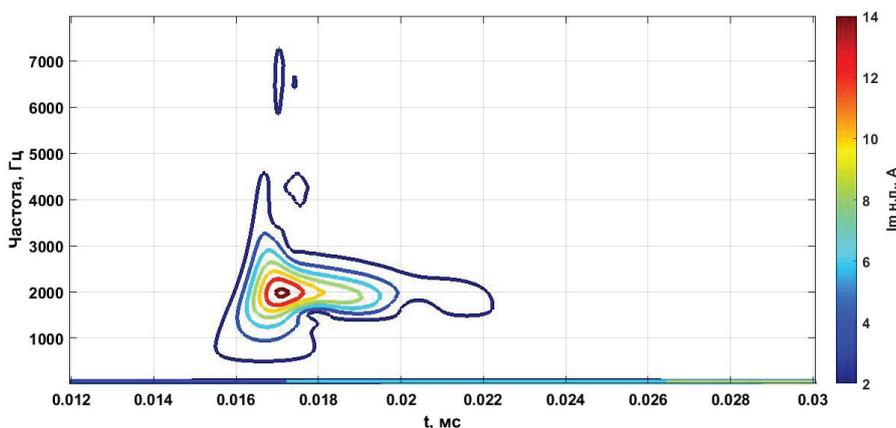


Рис. 7. Скалограмма непрерывного вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морсе

Результаты экспериментов. Численный эксперимент проводится для сети 10 кВ с комбинированным заземлением нейтрали с использованием MATLAB / Simulink power system toolbox. Основные параметры имитационной модели, представленной на рис. 4:

1. Линии с распределенными параметрами (ЛЭП 1–4): Параметры прямой последовательности: $R_1 = 0,429$ Ом/км, $L_1 = 1,1155 \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $C_1 = 1,0351 \cdot 10^{-8}$ Ф/км; параметры нулевой последовательности: $R_0 = 0,57316$ Ом/км, $L_0 = 4,8962 \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $C_0 = 4,2326 \cdot 10^{-9}$ Ф/км. Длины линий $L_2 = L_5 = 10$ км.

2. Параметры трансформатора: $R_l = 5,64$ Ом; $X_l = 79,28$ Ом, $R_m = 484,86$ кОм; $X_m = 110,39$ кОм; коэффициент трансформации 110/10 кВ.

3. Нагрузка: $R = 5750$ Ом, $X_l = 5030$ Ом.

С помощью имитационной модели (рис. 4) была получена осциллограмма тока замыкания на землю (рис. 5).

По условиям моделирования замыкание произошло в момент времени $t = 0,015$ с.

Полученная осциллограмма (рис. 4) имеет качественное совпадение с результатами, полученными авторами [8] для кабельных сетей среднего класса напряжения. Это говорит о достоверности проведенного моделирования.

При анализе нестационарных сигналов преобразование Фурье даёт значительную погрешность. В первую очередь, эта погрешность связана «эффектом растекания спектра» (рис. 6). Этот эффект связан с тем, что преобразование Фурье неявно подразумевает периодическое продолжение исследуемой функции.

Для борьбы с этим эффектом применяют различные весовые окна. Также для устранения данного эффекта может применяться вейвлет-преобразование.

Предлагаемый алгоритм может быть представлен в два этапа.

Этап 1. Определение частотных характеристик переходного процесса на основе непрерывного вейвлет-преобразования.

Как отмечается в работе [12], для различных параметров электрической сети, а также места возникновения ОЗЗ частота зарядной составляющей находится в диапазоне $f_z = 300 - 2000$ Гц, а разрядной составляющей — в пределах $f_p = 3000 - 30000$ Гц.

В данной работе для анализа кривой тока нулевой последовательности на первом этапе применялось непрерывное вейвлет-преобразование. В качестве вейвлет-функции использовался вейвлет Морсе.

К выбору типа вейвлета стоит подходить на основе предварительных расчетов и имитационного моделирования. Как отмечают авторы [13]: «выбор материнского вейвлета играет определяющую роль в определении и локализации различных типов замыканий».

В результате вейвлет-анализа тока $3i_0$ были идентифицированы две частотные составляющие переходного процесса. Как видно из скалограммы (рис. 7), в момент ОЗЗ в токе нулевой последовательности возникают две дополнительные частоты 2 кГц и 4,2 кГц. Полученные в результате вейвлет-анализа частоты соответствуют частотным диапазонам, полученным аналитически в работе [12].

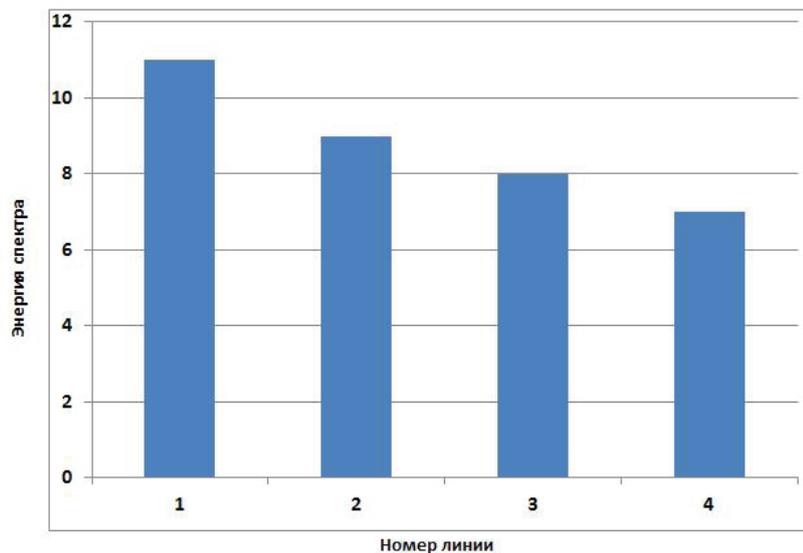


Рис. 8. Определение поврежденной линии по линии спектра

Непрерывное вейвлет-преобразование позволяет на раннем этапе выявить наиболее существенные частотные составляющие в плане энергии спектра.

Этап 2. Определение энергии спектра высших гармоник установившегося режима на основе пакетного вейвлет-преобразования.

После того как были выявлены частотные составляющие для более точного расчета энергии спектра, можно воспользоваться алгоритмом пакетного вейвлет-преобразования (рис. 1). В качестве базисного вейвлета был выбран вейвлет Добеши 24-го порядка (db24).

Расчет энергии спектра вейвлет-коэффициентов позволит определить линию, в которой произошло ОЗЗ. Оценка энергии спектра осциллограмм токов нулевой последовательности для переходных процессов и установившихся ОЗЗ производится в работе [14]. Как отмечают авторы, подавляющая часть энергии сигнала «сосредоточена в диапазоне частот от 0 до 200 Гц» [14]. Частота дискретизации в предлагаемой модели составляла 4 кГц, что, в соответствии с теоремой Котельникова, позволило ограничить исследуемые ВГ в токе нулевой последовательности диапазоном частот до 2 кГц. Данный диапазон частот соответствует рекомендациям, указанным в [15].

Сумма квадратов вейвлет-коэффициентов определяет энергию заданного частотного диапазона

$$\sum_{n=1}^N [i_0(t)]^2 = \sum_{n=1}^N (i_n^A)^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N (i_n^D)^2, \quad (6)$$

где $i_0(t)$ — исследуемый ток нулевой последовательности; N — количество вейвлет-коэффициентов на заданном уровне разложения j ; i^A , i^D — аппроксимирующие и детализирующие вейвлет-коэффициенты.

Производится расчет энергии спектра каждой частотной полосы для каждой из линий. Для устранения граничного эффекта целесообразно использовать «метод скользящего окна» [16]. Авторы используют данный подход для детектирования переходных процессов в режиме реального времени по энергии вейвлет-коэффициентов [16]. Сравнимое полученное значение энергии спектра высокочастотной

составляющей каждой линии с установленным, которое соответствует нормальному режиму. Превышение установленного уровня означает, что линия повреждена, это наглядно видно на рис. 8. Энергия спектра для 1-й линии является наибольшей, следовательно, данная линия имеет повреждение.

Заключение. В настоящей работе был произведен анализ однофазного замыкания на землю в сети с комбинированным заземлением нейтрали при помощи вейвлет-преобразования.

Данный метод имеет преимущество перед широко применяемыми методами на основе оконного преобразования Фурье. Преимущество связано с отсутствием необходимости выбора ширины окна. Также вейвлет-преобразование позволяет раскладывать ток нулевой последовательности на частотные диапазоны, что позволяет более детально анализировать зарядную и разрядную частоты. Предложенный в работе метод, основанный на определении энергии спектра сигнала, даёт возможность достаточно точно определить линию, на которой произошло ОЗЗ.

Библиографический список

1. Belka H., Michalik M. Application of the continuous wavelet transform to intermittent high impedance ground fault detection in MV networks // Eighth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection. 2004. P. 473–476. DOI: 10.1049/cp:20040164.
2. Pourahmadi-Nakhli M., Safavi A. A. Path Characteristic Frequency-Based Fault Locating in Radial Distribution Systems Using Wavelets and Neural Networks // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26, Issue 2. P. 772–781. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2050218.
3. Нагорнов О. В., Никитаев В. Г., Простокишин В. М. [и др.]. Вейвлет-анализ в примерах. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 120 с. ISBN 978-5-7262-1387-3.
4. Dong X., Shi S. Identifying Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Noneffectively Grounded Distribution System Using Wavelet Transform // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. Vol. 23, Issue 4. P. 1829–1837. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.917924.
5. Jiang B., Dong X., Shi S., Wang B. Fault line identification of Single Line to Ground fault for non-effectively grounded distribution networks with double-circuit lines // IEEE Power &

Energy Society General Meeting. 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286346.

6. Ляшков А. А., Осипов Д. С., Сатпаев Д. С. [и др.]. Применение вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 56–61.

7. Goryunov V. N., Osipov D. S., Dolgikh N. N. The application of wavelet transform for identification of single phase to earth fault in power system // 2nd Intern. Conf. on ICIEAM, May 19–20, 2016. Chelyabinsk, 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911436.

8. Добрягина О. А. Исследование и разработка методов и средств повышения динамической устойчивости функционирования токовых защит от замыкания на землю в сетях 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2012. 176 с.

9. Шуин В. А., Мартынов В. А., Шагурина Е. С. [и др.]. Максимальные токовые защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ // Электротехника. 2018. № 1. С. 62–72.

10. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

11. Голубев А. Н., Добрягина О. А., Шадрикова Т. Ю. [и др.]. Многопараметрические токовые защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ // Электрические станции. 2017. № 8. С. 36–45.

12. Шуин В. А., Ганджаев Д. И., Сарбеева О. А. [и др.]. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 1. С. 32–44.

13. Megahed A. I., Moussa A. M., Bayoumy A. E. Usage of wavelet transform in the protection of series-compensated transmission lines // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21, Issue 3. P. 1213–1221. DOI:10.1109/TPWRD.2006.876981.

14. Булычев А. В., Дементий Ю. А., Пряников В. С. Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю и в автоматике управления дугогасящими реакторами // Электротехника. 2017. № 7. С. 37–44.

15. Шуин В. А., Добрягина О. А., Шагурина Е. С. [и др.]. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электрические станции. 2018. № 7 (1044). С. 38–45.

16. Costa F. B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy // IEEE

Transactions on Power Delivery. 2014. Vol. 29, Issue 1. P. 140–153. DOI:10.1109/TPWRD.2013.2278272.

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 2220-3520

AuthorID (РИНЦ): 175832

ORCID: 0000-0002-0830-408X

AuthorID (SCOPUS): 57188873609

ResearcherID: B-1019-2016

Адрес для переписки: ossipovdmitriy@list.ru

ДОЛГИХ Надежда Николаевна, аспирантка, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 3679-4944

AuthorID (РИНЦ): 828105

ORCID: 0000-0002-7404-0596

AuthorID (SCOPUS): 57193404041

ResearcherID: O-8241-2016

САТПАЕВ Дмитрий Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 9391-2773

AuthorID (РИНЦ): 889538

АНДРЕЕВА Елена Григорьевна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 8247-7262

AuthorID (РИНЦ): 259826

ORCID: 0000-0002-1303-669X

AuthorID (SCOPUS): 56825338600

ResearcherID: Q-1479-2015

Для цитирования

Осипов Д. С., Долгих Н. Н., Сатпаев Д. С., Андреева Е. Г. Анализ режима однофазного замыкания на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с помощью вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 76–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-76-81.

Статья поступила в редакцию 25.09.2018 г.

© Д. С. Осипов, Н. Н. Долгих, Д. С. Сатпаев, Е. Г. Андреева