

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ
В СЕТЯХ 6-35 КВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Долгих Надежда Николаевна

*старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru*

Осипов Дмитрий Сергеевич

*профессор, доктор технических наук,
руководитель Политехнической школы
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru*

Парамзин Александр Олегович

*преподаватель,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: prado1404@yandex.ru*

Предмет исследования: методы селективного определения отходящей линии с однофазным замыканием на землю на основе относительного замера высших гармоник.

Цель исследования: разработка метода программной фильтрации высокочастотных составляющих и метода идентификации линии с однофазным замыканием на землю.

Объект исследования: распределительные сети 6-35 кВ.

Методы исследования: вейвлет-преобразование токов и напряжений нулевой последовательности.

Основные результаты исследования: в статье предложена идея использовать вейвлет-преобразования для организации программной фильтрации тока нулевой последовательности с целью повышения чувствительности адмитансной защиты. На основе вейвлет-преобразования предложена модернизация алгоритма определения линии электропередачи с однофазным замыканием на землю по принципу относительного замера энергии спектра высших гармоник. В работе предложено энергию спектра определять по вейвлет коэффициентам дискретного вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, вейвлет-преобразование, режим нейтрали, высшие гармоники, преобразование Фурье.

**IDENTIFICATION OF SINGLE-PHASE GROUND FAULT
IN NETWORKS 6-35 KV USING THE WAVELET TRANSFORM**

Nadezhda N. Dolgikh

*Senior Lecturer,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru*

Dmitry S. Osipov

*Professor,
Head of the Polytechnic School,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru*

Alexander O. Paramzin

*Lecturer,
Yugra State University,*

Subject of research: methods for selective determination of an outgoing line with a single-phase earth fault based on the relative measurement of higher harmonics.

Purpose of research: to develop a method for software filtering of high-frequency components and a method for identifying a line with a single-phase ground fault.

Object of research: distribution networks 6-35 kV.

Methods of research: wavelet-transformation of zero-sequence currents and voltages.

Main results of research: the article proposes the idea of using the wavelet transform to organize software filtering of the zero-sequence current in order to increase the sensitivity of the admittance protection. On the basis of the wavelet transform, a modernization of the algorithm for determining a power line with a single-phase earth fault is proposed according to the principle of relative measurement of the energy of the spectrum of higher harmonics. The paper proposes to determine the energy of the spectrum by the wavelet coefficients of the discrete wavelet transform.

Keywords: single-phase ground fault, wavelet transform, neutral mode, high harmonics, Fourier transform.

Введение

Общая протяженность электрических распределительных сетей 6-35 кВ в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре превышает 12 тыс. км, а число трансформаторных подстанций классом напряжения 6(10) – 35 кВ составляет 5200 шт. При этом значительная часть линий электропередачи 6-35 кВ проходят в труднодоступных для обслуживания районах. Наиболее часто встречающимся видом повреждения в распределительных сетях напряжением 6-35 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). В электросетевых компаниях отмечают, что ежегодно от 70 до 90 % от общего числа повреждений, возникающих в электрических сетях данного класса, приходится на долю ОЗЗ. Для обеспечения надежности питания нефтедобывающих предприятий автономного округа требуется обеспечение условий, при которых обеспечивается безаварийная работа сети с ОЗЗ в течение времени, достаточного для определения отходящей линии с замыканием и нахождения поврежденного участка на трассе. Такой подход позволяет предотвратить перерывы электроснабжения потребителей и минимизировать ущербы от недодобычи нефти, вызванные отключением поврежденного участка сети. В электрических сетях 6-35 кВ с компенсацией емкостного тока находят применение максимальные токовые защиты, основанные на использовании высших гармоник тока нулевой последовательности [1, с. 39]. Для анализа несинусоидальных процессов традиционно применяется преобразование Фурье, имеющее ряд ограничений при исследовании нестационарных и переходных процессов. Для анализа сложной динамики нестационарных несинусоидальных процессов в электросетевом комплексе находит применение математический аппарат вейвлет-преобразования [2]. Вейвлет-преобразование используется для анализа коротких замыканий в распределительных сетях [6, 7]. В настоящей работе представлена модернизация

существующих алгоритмов определения отходящей линии с однофазным замыканием на землю, где в качестве основного инструмента расчета высших гармоник применен метод вейвлет-преобразования.

Результаты и обсуждение

В настоящее время одним из видов релейной защиты для определения ОЗЗ являются защиты относительного замера высших гармоник, для достоверной работы которых требуется учет характеристик трансформаторов тока нулевой последовательности. В работе [3, с. 77] авторы отмечают, что производители трансформаторов тока «не приводят данные о передаче трансформатором гармоник тока, что значительно снижает точность оценки и выбора коэффициента чувствительности защит». В статье [4, с. 51] определены основные недостатки токовых защит нулевой последовательности, построенных на электромеханической и микроэлектронной, в результате проведенного исследования авторы приходят к выводу об актуальности и целесообразности развития цифровых токовых защит с применением микропроцессорной базы. Использование микропроцессорных устройств позволит значительно расширить круг применяемых алгоритмов анализа и обработки параметров высших гармоник. В частности, применение вейвлет-преобразования позволяет производить частотно-временной анализ не на аппаратном, а на программном уровне устройства.

Для анализа переходного процесса, возникающего при однофазном замыкании на землю в сетях с компенсированной нейтралью (наличие дугогасящего реактора), с целью определения тока в месте замыкания $i_{03}(t)$ следует применить комплексную схему замещения (рис. 1, привод. по [1, с. 40]).

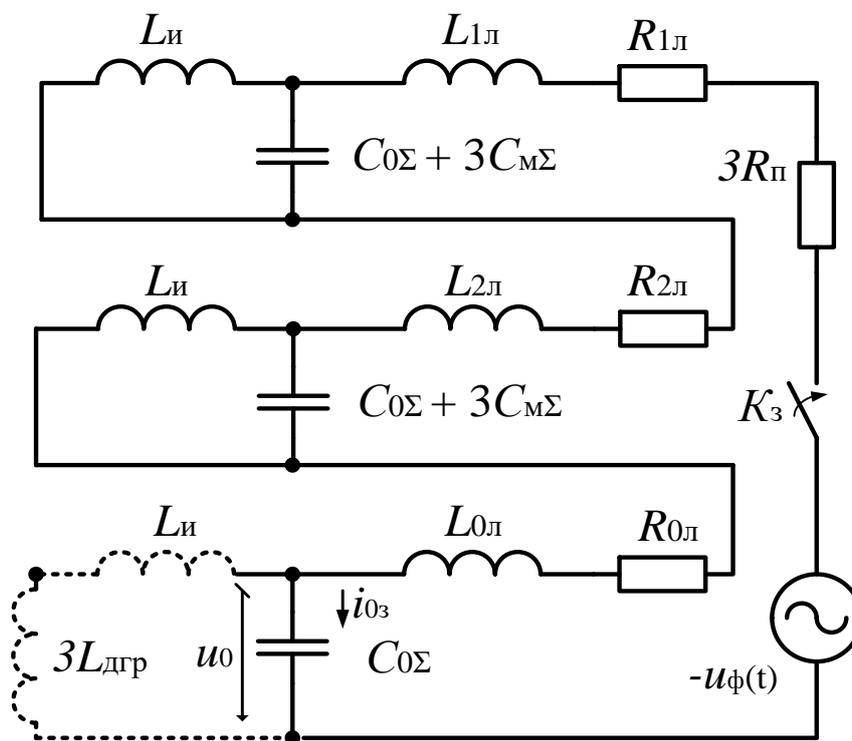


Рисунок 1 – Комплексная схема замещения электрической сети с ОЗЗ

Имитационное моделирование ОЗЗ в сети 10 кВ произведем в среде моделирования Matlab Simulink. От главной понизительной подстанции 110/10 кВ отходят 4 линии 10 кВ, на одной из которых будем имитировать ОЗЗ (рис. 2).

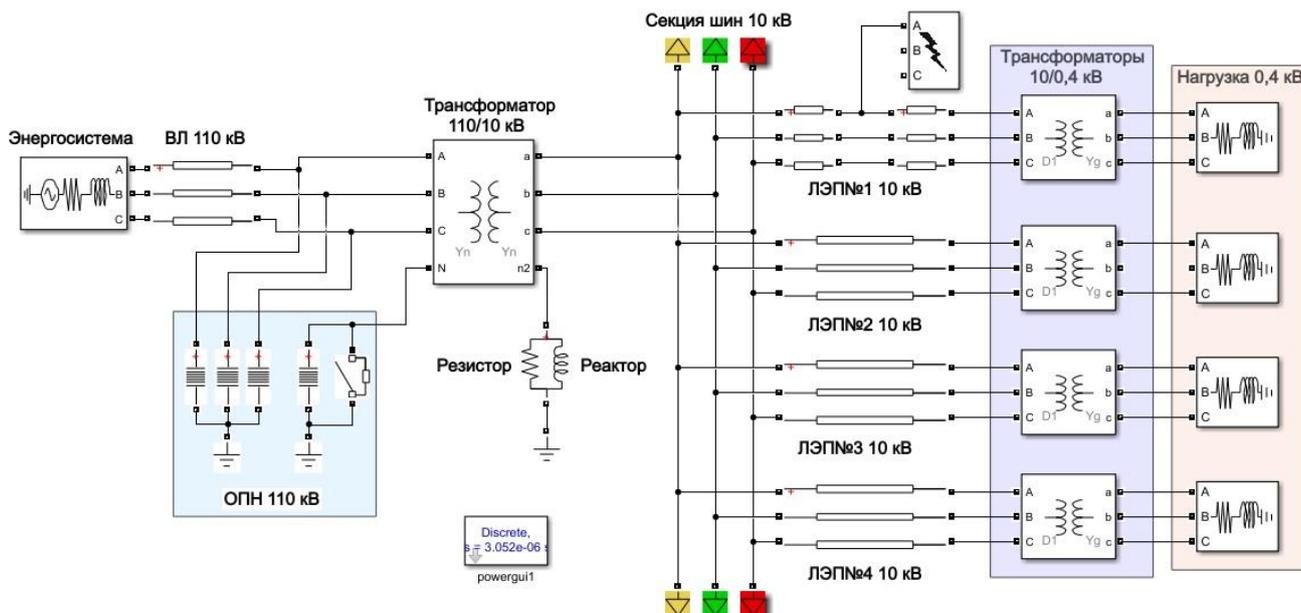


Рисунок 2 – Имитационная модель сети 10 кВ с компенсацией ёмкостных токов

В результате имитационного моделирования получена осциллограмма тока замыкания на землю для случая не оптимальной настройки дугогасящего реактора (рис. 3).

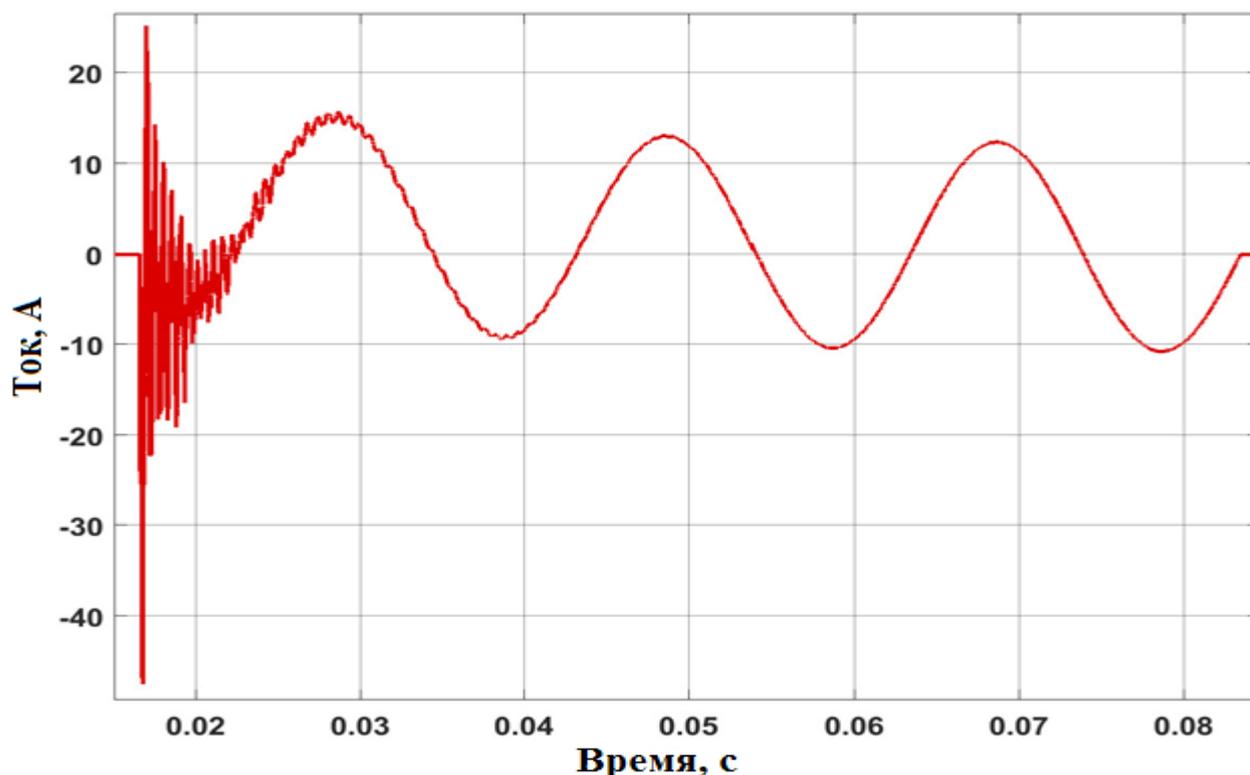


Рисунок 3 – Осциллограмма тока замыкания на землю

Результат быстрого преобразования Фурье осциллограммы тока однофазного замыкания на землю (рис. 4) позволяет зафиксировать действующее значение тока основной составляющей (50 Гц) на уровне 10,76 А и наличие существенных гармонических искажений (коэффициент суммарного гармонического искажения THD более 42 %). При этом фиксируется эффект растекания спектра.

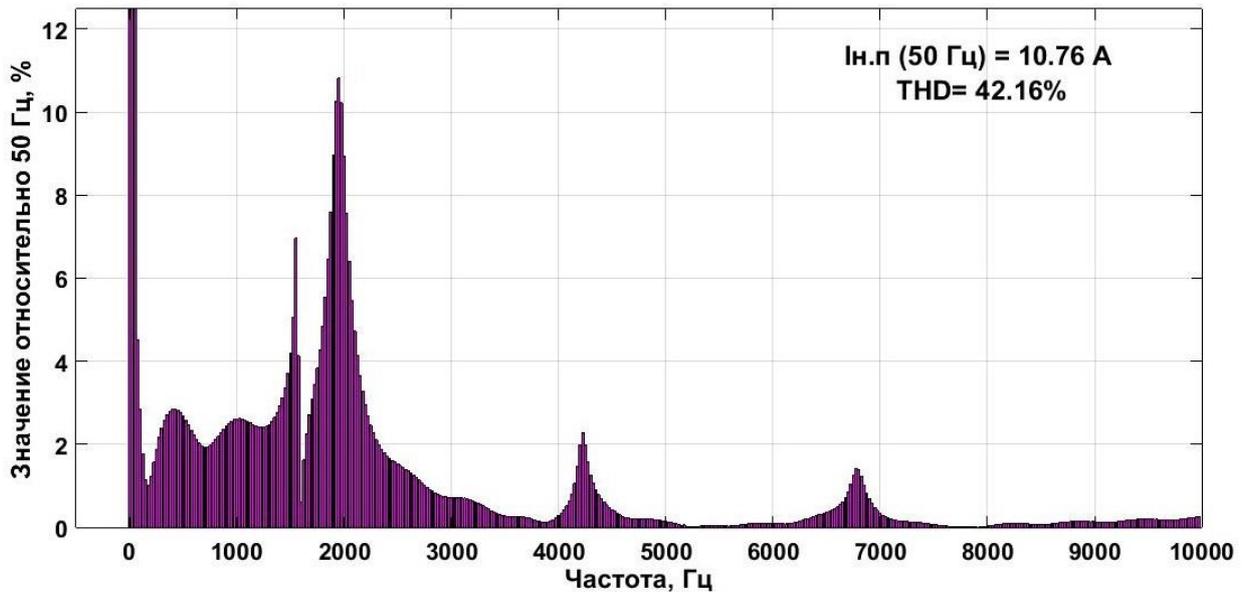


Рисунок 4 – Быстрое преобразование Фурье осциллограммы на рисунке 3

Возможности применения непрерывного вейвлет-преобразования для локализации замыканий в распределительных сетях представлены в работе [8], где авторы отмечают важность выбора функции материнского вейвлета. Проведем непрерывное вейвлет-преобразование осциллограммы тока замыкания на землю (рис. 5). В результате преобразования, фиксируется время, амплитуда, длительность присутствия и частота высших гармоник, возникающих при переходном процессе ОЗЗ.

Контроль емкости нулевой последовательности, по мнению авторов [5], позволит повысить чувствительность адмитансной защиты от ОЗЗ в сетях, преимущественно выполненных кабельными линиями. Авторы отмечают, что условием стабильности замера C_0 является необходимость подавления в токе нулевой последовательности высших гармоник с частотами, превышающими 1,5-2 кГц [5, с. 25]. Указанные частоты четко определены в результате непрерывного вейвлет-преобразования и представлены на скалограмме (рис. 5).

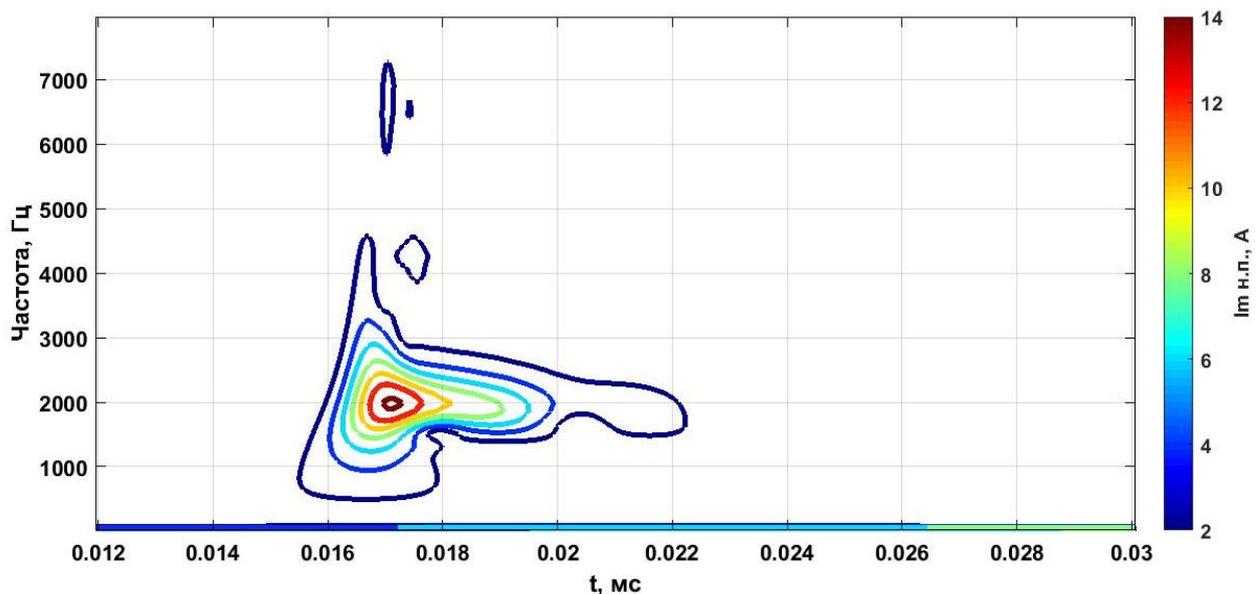


Рисунок 5 – Непрерывное вейвлет-преобразование осциллограммы на рисунке 3

Вейвлет-анализ позволяет производить цифровую фильтрацию сигналов. Для этого достаточно обнулить вейвлет-коэффициенты, отвечающие за соответствующий частотный диапазон. Таким образом, применение вейвлет-преобразования позволяет решить первую задачу, а именно – подавление (фильтрация) нежелательных частот на программном уровне работы цифровых устройств.

Для вейвлет-преобразования может быть сформулировано равенство Парсевала, т. е. энергия исследуемой функции тока или напряжения может быть определена через величины вейвлет коэффициентов, полученных в результате преобразования:

$$E_u = \int u^2(t) dt = C_{\psi}^{-1} \iint V^2(a, b) \frac{dadb}{a^2}. \quad (1)$$

Плотность энергии $E_{V(a,b)} = V_{2(a,b)}$ исследуемого сигнала напряжения может быть представлена отдельно для каждого энергетического уровня. Таким образом, для дискретного вейвлет-преобразования, при согласовании частотных групп с требованиями, сформулированными в ГОСТ 30804.4.7-2013, возможно нахождение действующего значения искомой гармоники и энергии спектра в пределах локализованного периода времени. Другими словами, ВП позволяет определять плотность энергии сигнала в локальной окрестности точки времени t_0 :

$$E_{\xi}(a, t_0) = \int E_V(a, b) \xi\left(\frac{b-t_0}{a}\right) db, \quad (2)$$

где ξ – оконная функция.

Расчет тока нулевой последовательности для поврежденной ($3I_{0неп}$) и поврежденной линии ($3I_{0пов}$) через аппроксимирующие (A) и детализирующие (D) вейвлет коэффициенты уровня разложения J, может быть произведен по формулам:

$$3I_{0неп} = \frac{3C_{0собр}}{N} \sqrt{\sum_{k \in Z} (i_{J_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2}, \quad (3)$$

$$3I_{0пов} = \frac{3(C_{0\Sigma} - C_{0собр})}{N} \sqrt{\sum_{k \in Z} (i_{J_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2}. \quad (4)$$

На основании формул (1-2) определяем энергию спектра для каждого частотного диапазона. Энергия спектра суммируется для каждой отходящей линии. Максимальная энергия спектра позволит выявить линию, где произошло ОЗЗ (рис. 6).

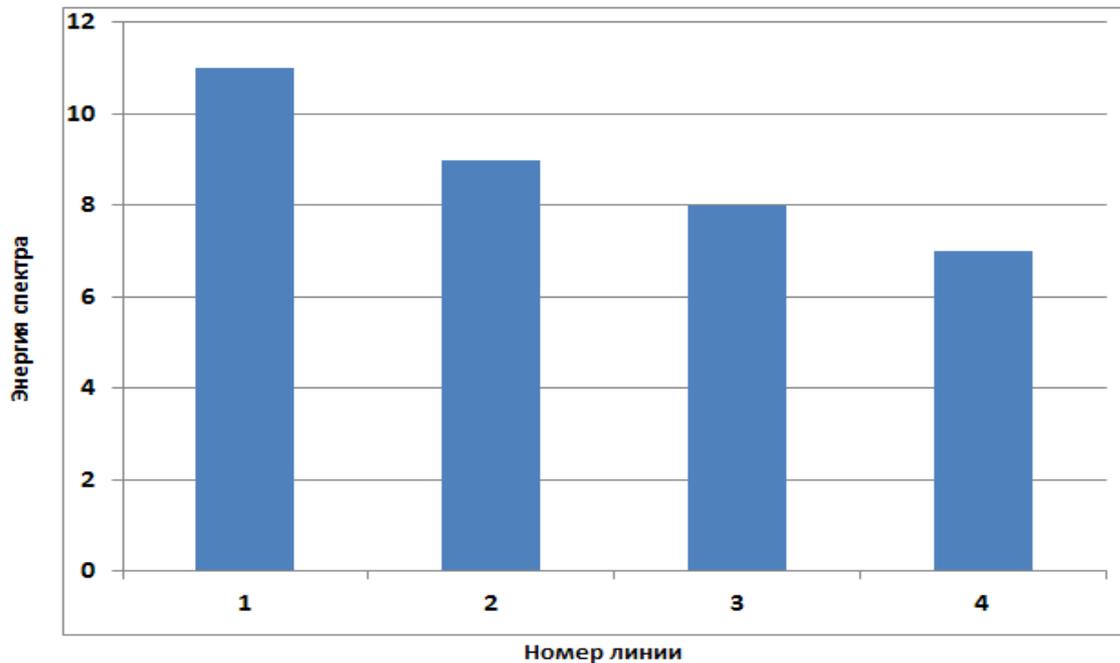


Рисунок 6 – Определение линии с ОЗЗ по максимальной энергии спектра вейвлет-преобразования

В имитационной модели (рис. 2) замыкание моделировалось для отходящей линии № 1. В результате сравнения энергии спектра высших гармоник по отходящим линиям № 1–№ 4 видим, что максимальная энергия представлена в линии № 1, что подтверждает корректность работы алгоритма.

Заключение и выводы

1. Разработка и модернизация алгоритмов определения отходящей линии при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью остается актуальной и востребованной научно-технической задачей в электросетевом комплексе. Развитие цифровых технологий позволяет применять алгоритмы вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции сигналов токов и напряжений нулевой последовательности, на которые реагируют защиты.

2. В работе представлена идея применения вейвлет-преобразования для программной фильтрации частот выше 1,5-2 кГц тока нулевой последовательности, что позволит повысить чувствительность адмитансных защит. Программная фильтрация представляется более надежной, по сравнению с применяемой аппаратной фильтрацией.

3. Произведена модернизация существующего алгоритма работы защиты и сигнализации ОЗЗ для цифровых устройств релейной защиты, основанного на принципе относительного замера гармоник. Предложенный алгоритм основан на определении энергии спектра, рассчитываемой по вейвлет-коэффициентам, полученным в результате преобразования.

Результаты работы могут быть использованы для организации цифровых алгоритмов для защиты и сигнализации об однофазных замыканиях на землю в распределительных сетях 6-35 кВ, работающих в режиме изолированной или компенсированной нейтрали.

Литература

1. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ / В. А. Шуин [и др.]. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2018. – № 7. – С. 38–45.
2. Мисриханов, А. М. Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике / А. М. Мисриханов. – Текст : непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 5. – С. 5–23.
3. Особенности применения специальных трансформаторов тока нулевой последовательности с устройствами защиты от замыканий на землю / Д. В. Батулько [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 76–79.
4. Оценка чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / М. С. Аль-Хомиди [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – №3. – С. 50–55.
5. Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью / В. А. Шуин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 4. – С. 20–30.
6. Guo, M.-F. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks / M.-F. Guo, N.-C. Yang, L.-X. You // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – Vol. 99, July. – Pp. 706–721. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013
7. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: theory and experimental validation / A. Borghetti [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25, issue 4. – Pp. 3139–3146. DOI: 10.1109/tpwr.2010.2046655
8. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients / A. Borghetti [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23, issue 2. – Pp. 380–388. – DOI: 10.1109/TPWRS.2008.919249