

РАЗРАБОТКА СПОСОБА СЕЛЕКТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНИИ С ОДНОФАЗНЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ 6–35 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ПРЕОБЛАДАНИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

В данной работе представлен способ определения отходящей линии с однофазным замыканием на землю для сетей 6–35 кВ с преобладанием несинусоидальных нагрузок. В работе поднимается актуальность вопроса применения математического аппарата вейвлет-преобразования применительно к традиционным методам определения места повреждения. Применение вейвлет-аппарата особенно актуально в задачах декомпозиции несинусоидального сигнала тока отходящих линий, обусловленного наличием в нагрузках современных предприятий нефтедобывающего сектора ХМАО-Югры нелинейных потребителей. Предлагается модернизация существующих алгоритмов относительного замера уровня высших гармоник в параметрах аварийного режима. Предложенный метод позволяет определить отходящую линию по суммарной энергии спектра высших гармоник для различных конфигураций сети.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, вейвлет-преобразование, декомпозиция сигнала, энергия спектра, высшие гармоники.

Введение. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра является основным нефтегазоносным регионом России, а также одним из крупнейших нефтедобывающих регионов мира [1]. Стоит также отметить ряд особенностей функционирования энергетической системы данного региона, изложенных в [2], где в качестве крупнейших потребителей электроэнергии отмечается преобладание установок для добычи полезных ископаемых. А значит, можно сделать вывод о том, что наибольшая протяженность электрических сетей соответствует классам напряжения 6 (10) кВ, что подтверждается [2, с. 28]. Как правило, такие сети работают в режиме изолированной, либо компенсированной нейтрали.

Важно будет упомянуть, что, в отличие от европейской части страны с преобладанием кабельных сетей [3], для ХМАО – Югры характерна большая протяженность воздушных линий электропередачи вне населенных пунктов.

В качестве подавляющего числа аварий распределительных сетей 6 (10) кВ с изолированной и компенсированной нейтралью принято выделять однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [4]. Данная проблема существует на протяжении достаточно большого промежутка времени [5], однако она до настоящего времени остается актуальной ввиду невозможности предоставить универсальное реше-

ние, успешно функционирующее в различных конфигурациях сетей.

Для идентификации аварий подобного рода на практике нашли применение несколько типов методов определения места повреждения (ОМП) линии. Наибольшей точностью обладают топографические методы, которые предполагают обход трассы с соответствующим прибором и не могут быть использованы в труднопроходимой местности и в условиях большой протяженности линий электропередачи. Кроме того, в [6] авторами отмечается, что топографические методы применяют оперативно-выездные службы и к работе релейной защиты и автоматики (РЗА) отношения данные методы не имеют, соответственно, в данной работе рассматриваться не будут.

Классификация дистанционных методов ОМП вариативна, однако считаем необходимым отметить в соответствии с [7] применение для ВЛ следующих методов: **импульсный** (подразделяется на локационный и волновой), где зондирующий импульс напряжения, отражаясь от места повреждения, возвращается к месту отправления [8]; **электромеханический метод**, суть которого состоит в «выбрасывании» блинкеров от механических усилий токов замыкания [9]; **ОМП** по параметрам аварийного режима (ПАР), которые принято подразделять на односторонние [10] и двусторонние [11]. Последняя груп-

па методов находит особую популярность в связи с развитием вычислительных мощностей и возможности применения нового математического аппарата с целью повышения точности ОМП [12].

Авторами работы [13] отмечается, что в процессе перехода предприятий нефтегазового сектора к современным статическим преобразователям частоты в качестве побочного эффекта наблюдается искажение высшими гармониками токов и напряжений силового канала оборудования. Аналогичное утверждение об источнике высших гармоник делается в [14]. Это обуславливается тем, что, как правило, подобные устройства реализуются с использованием полупроводниковой элементной базы (большим количеством транзисторов, тиристоров и т.п.), а также автономных инверторов напряжения, для которых характерно наличие широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Исследованию гармонических составляющих в сетях 6 (10) кВ также посвящены работы [15] и [16], где авторами отмечается: «токи высших гармонических составляющих могут увеличивать токи однофазного замыкания на землю в несколько раз».

В то же время, как отмечается в работе [17], «высшие гармоники представляют собой широкий информационный базис для защит от однофазных замыканий на землю». Однако вместе с этим автором отмечается сложность в технической реализации измерения высших гармоник в условиях неопределенности сигнала и преобладания в нем основной частоты [17, с. 1], аналогичное замечание имеется в работе [18].

С целью идентификации высших гармоник (ВГ) и оценки их уровня в мировом опыте получило широкое распространение преобразование Фурье. Однако неоднократно рассматривался вопрос о повышении точности и быстродействия подобных систем за счет использования более совершенного математического аппарата и алгоритмов. Так, например, в работе [19] предлагается использовать подход адаптивного структурного анализа. Интеллектуальная защита сети от однофазных замыканий на землю с использованием самообучающегося агента представлена в статье [20]. Также в задачах определения места повреждения находят применение другие нейросетевые технологии и алгоритмы нечеткой логики [21]. Авторами работы [22] произведен анализ однофазного замыкания на землю с использованием быстрого преобразования Фурье и противопоставления ему математического аппарата вейвлет-анализа.

Вейвлет-анализ в последние годы нашел применение и продолжает набирать популярность при решении энергетических задач [23], в том числе при определении места повреждения линии электропередачи, свидетельством данного факта могут служить работы [24, 25].

Постановка задачи. Для восстановления нормальной работы системы электроснабжения в случае возникновения ОЗЗ рекомендуется отключать линию с замыканием на землю как можно быстрее, произвести поиск места повреждения и устранить его. Однако допускается эксплуатация линии в течение нормируемого промежутка времени, равного двум часам, в течение которых замыкание может существовать [26]. Ранее уже отмечалось, что замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью не отключаются релейными защитами линий ввиду малых емкостных токов. Такое повреждение только сигнализируется на питающей подстанции за счет

изменения фазных напряжений на всех присоединениях, подключенных к одному силовому трансформатору. Следовательно, перед тем как приступить к процессу ОМП, необходимо предварительно селективно определить отходящую линию с ОЗЗ.

От метода, с помощью которого должна быть определена отходящая линия с ОЗЗ, в свою очередь, зависит оперативность и точность получения данных о месте повреждения, которые способствуют быстрому устранению повреждения и, следовательно, повышению надежности энергоснабжения потребителей без риска выхода оборудования из строя. Соответственно, разработка имитационных моделей сети, их исследование, а также создание и модификация методов селективного определения отходящей линии с ОЗЗ для сетей 6–35 кВ является актуальной задачей.

Одним из принципов исполнения устройств защиты от ОЗЗ является использование высших гармонических составляющих токов Zi_0 и напряжения Zu_0 установившегося режима ОЗЗ. Причем, если ряд нечетных высших гармоник не компенсируется дугогасящим реактором (ДГР), «то по отношению к высшим гармоникам электрическую сеть с заземлением нейтрали через ДГР можно рассматривать с достаточной степенью точности как сеть с изолированной нейтралью» [6, с. 35]. Целью настоящего исследования является модернизация существующего способа относительного замера уровня высших гармоник в токе Zi_0 с помощью вейвлет-преобразования для селективного определения отходящей линии с ОЗЗ.

Теория. Для реализации существующих методов относительного замера высших гармоник в действующих устройствах применяется аппаратная фильтрация сигнала. Методы вейвлет-преобразования позволяют осуществлять программную фильтрацию (выделять интересующий спектр) и производить расчет энергии спектра, используя вейвлет-коэффициенты, занимающие значительно меньшие объемы информации, чем исходный сигнал. Предлагается осуществить анализ установившегося режима однофазного замыкания на землю на предмет наличия в токах отходящих линий высших гармоник. Иными словами, определить относительный уровень высших гармоник, наибольшее значение которых будет соответствовать поврежденному ответвлению ВЛ в соответствии с [27]. Основное преимущество вейвлет-анализа заключается в возможности производить цифровую фильтрацию и сжатие сигналов. Для этого достаточно обнулить вейвлет-коэффициенты, отвечающие за соответствующий частотный диапазон.

Для получения вейвлет-коэффициентов из одномерного массива тока необходимо осуществить свертку исходного сигнала $i(t)$ и вейвлет-функции $\Psi(t)$ по составляющим в различных масштабах и частотных диапазонах.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int i(t)\psi\left(\frac{t}{a} - nb\right)dt.$$

Здесь a — нормирующий коэффициент, задающий ширину вейвлет-пакета, b — коэффициент, определяющий его положение. Необходимо отметить, что a и b могут принимать только дискретные значения $a = a_0^m$, $b = nb_0a_0^m$, где $m, n \in Z$.

В данной работе реализацию декомпозиции сигнала предлагается осуществлять с использованием

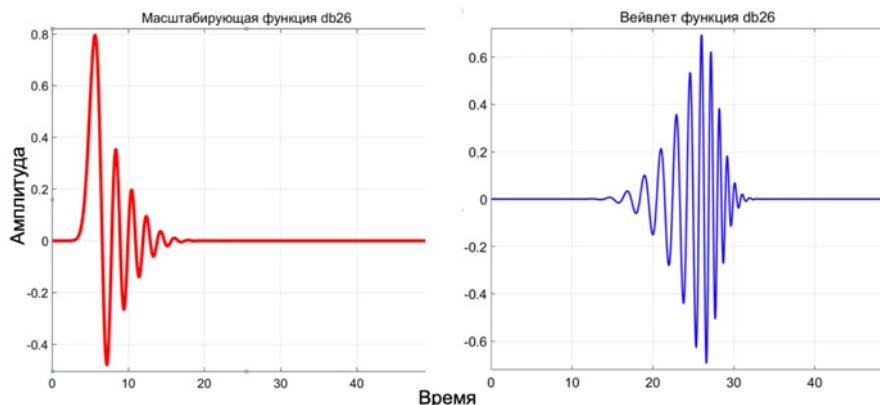


Рис. 1. Масштабирующая функция и вейвлет Добеши

вейвлета Добеши 26 порядка, что обуславливается точностью данного вида вейвлет-преобразования. Масштабирующая функция $\varphi(t)$ и вейвлет $\Psi(t)$ для которого представлены на рис. 1.

Принято связывать масштабирующую функцию и вейвлет одного уровня с масштабирующей функцией на более низком уровне посредством фиксированного количества коэффициентов $h_0(k)$ и $h_1(k)$:

$$\varphi(t) = \sum_k h_0(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k),$$

$$\psi(t) = \sum_k h_1(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k).$$

Первый уровень вейвлет-коэффициентов можно получить из произведения исходного сигнала тока на масштабирующую функцию $\varphi(t)$, которая сдвинута вдоль оси времени таким образом, чтобы полностью покрывать исходный сигнал тока. В результате преобразования удастся получить аппроксимирующие коэффициенты первого уровня разложения $i_{1,k}^A$. Аналогично можно получить значения детализирующих коэффициентов $i_{1,k}^D$, найдя произведение с вейвлетом $\Psi(t)$. В случае необходимости разложения на последующие уровни необходимо получить новое семейство отмасштабированных и сдвинутых функций $\varphi(t)$ и $\Psi(t)$.

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

Проиллюстрируем процесс пакетного вейвлет-преобразования для одномерного массива сигнала тока на примере рис. 2.

Соответственно, дискретный сигнал тока можно представить в виде суммы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов в выбранной частоте дискретизации по следующей формуле:

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k_m} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{k_m} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(k).$$

Здесь j — выбранная глубина разложения, N — количество отсчетов сигнала, а J — максимально возможный уровень разложения, определяемый как

$$J = \log_2 N.$$

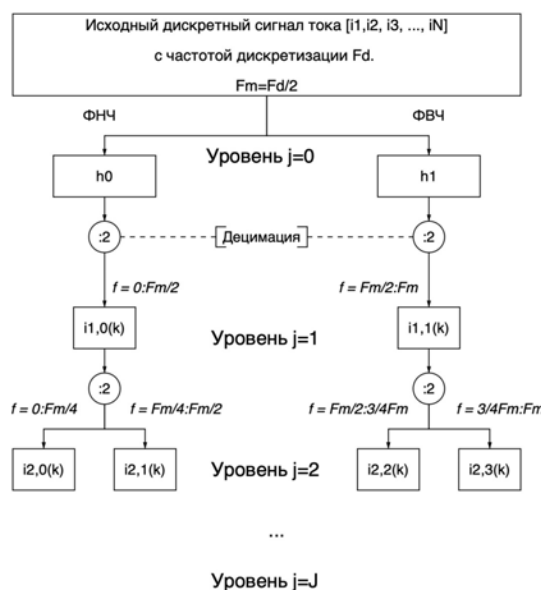


Рис. 2. Схема пакетного вейвлет-преобразования

Энергетические характеристики исходного сигнала тока можно определить на основании равенства Парсеваля и найденных вейвлет-коэффициентов:

$$E_i = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2.$$

В отличие от вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Хаара преимущество «семейства» вейвлетов Добеши состоит в том, что для каждого члена этого семейства достаточно указать только коэффициенты фильтра нижних частот g_k , определяемых как

$$g_k = (-1)^k \cdot h_{1-k}.$$

Кроме того, для данного типа вейвлетов необходимо определять только масштабирующую функцию, которая связывается с вейвлетом следующим выражением:

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{k_m} g_k \varphi(2t - k).$$

Результаты. Задачу селективного определения отходящей линии с однофазным замыканием

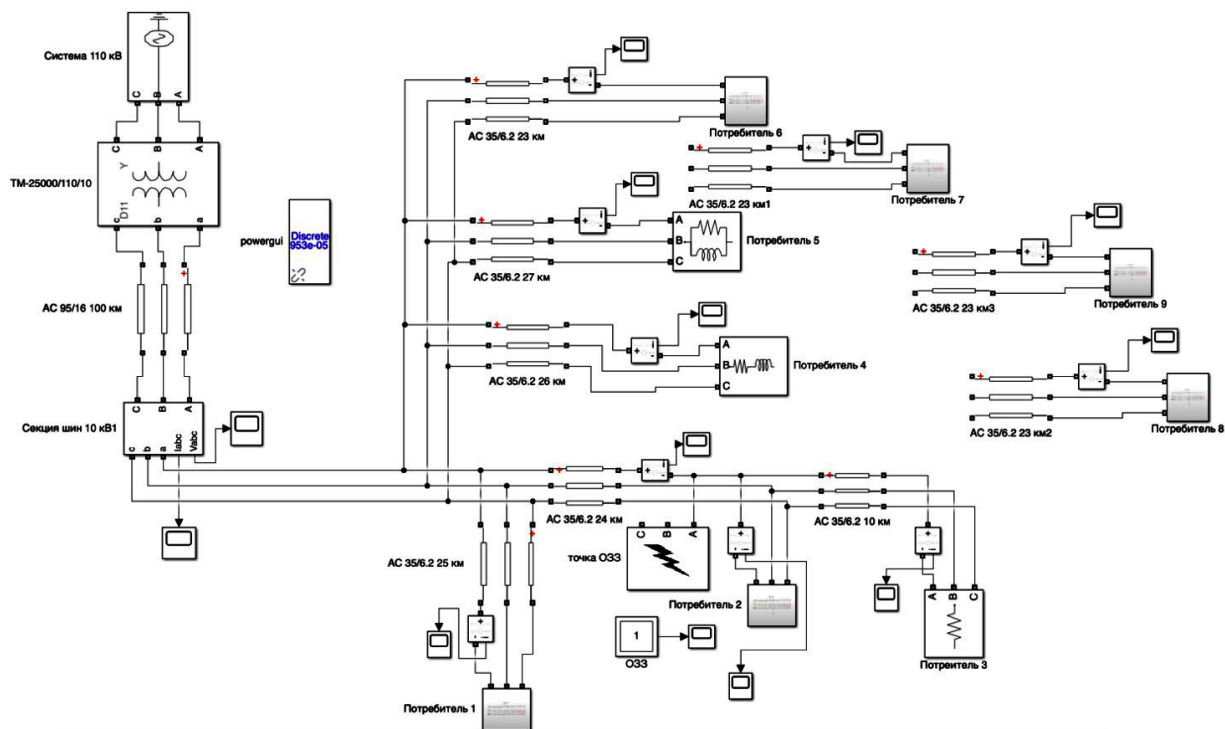


Рис. 3. Имитационная модель сети в Matlab Simulink

Таблица 1

Паспортные данные трансформатора ТРДН 25000/110

$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	$S_{НОМ}$, кВА	ΔP_{XX} , кВт	$\Delta P_{КЗ}$, кВт	$U_{КЗ}$, %
115	10	25000	17	120	10,5

Таблица 2

Суммарные значения энергии спектра (о.е.) токов отходящих линий, полученные в результате вейвлет-преобразования

№ эксп-та \ Отх. линия	1	2	3	4	5	6
Потребитель 1	$1,2 \cdot 10^2$	$7,1 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$
Потребитель 2	—	—	—	—	—	$9,8 \cdot 10^8$
Потребитель 6	$1,2 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$
Потребитель 7	—	—	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$
Потребитель 8	—	—	—	—	$6,1 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^6$
Потребитель 9	—	—	—	—	$1,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$
Линия с ОЗЗ	$7,1 \cdot 10^4$	$1,54 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^9$

на землю предлагается реализовать с использованием компьютерного моделирования в пакете прикладных программ Matlab Simulink. Так, на рис. 3 представлена имитационная модель промышленной сети с односторонним питанием, которая состоит из понижающего трансформатора ТРДН 25000/110-6(10), параметры схемы замещения которого определены по известной методике в соответствии с паспортными данными из табл. 1.

Распределенные параметры трехпроводной воздушной линии напряжением 10 кВ определены

в соответствии с методом зеркальных отображений [28] при использовании поднастройки блока powergui — power line parameters. Допустимые типы проводов, геометрия их расположения и сечения приняты согласно [29].

Модель включает в себя девять отходящих линий к трем, из которых подключены потребители с линейной вольтамперной характеристикой; для остальных имеется возможность задавать параметры гармонических составляющих, которые оказывают влияние на энергосистему. В одной из этих

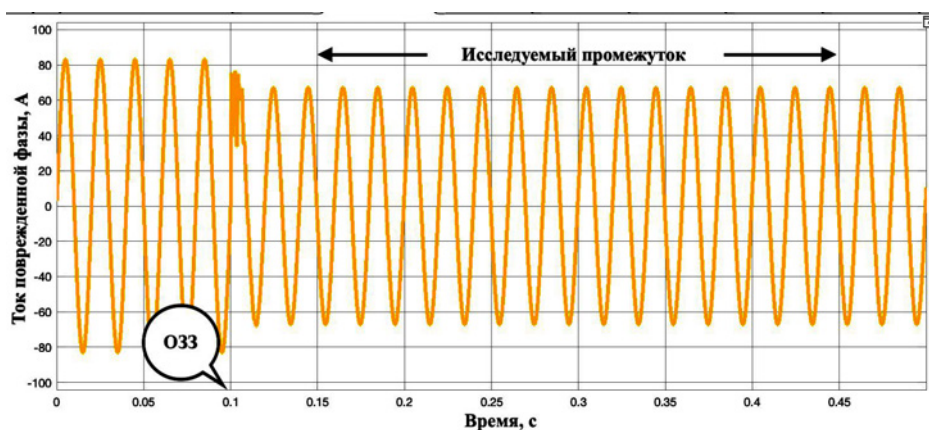


Рис. 4. Оциллограмма тока в поврежденной фазе при синусоидальной нагрузке (эксперимент 1)

линий располагается точка ОЗЗ, которая для всех экспериментов остается неизменной.

В качестве подтверждения предложенной ранее гипотезы необходимо определить энергию спектра каждой отходящей линии и осуществить их сравнение. В отходящей линии с наличием ОЗЗ значение спектральной плотности сигнала должно быть больше остальных.

Для решения поставленной в данной работе задачи выбрана глубина разложения j до 8-го уровня. Частота дискретизации принята равной $51,2 \text{ кГц}$ ($953 \cdot 10^{-5} \text{ с}$) согласно условиям теоремы Котельникова и требованиям к максимально возможному уровню вейвлет-разложения.

В результате имитационного моделирования проведена серия вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в табл. 2.

В процессе расчета осуществлялось пакетное вейвлет-преобразование участка установившегося режима ОЗЗ (рис. 4) тока отходящих линий и вычисления вейвлет-коэффициентов, а также соответствующей им суммы энергии спектра высших гармоник.

Эксперимент 1 проведен для начальной инициализации модели. Нагрузка задана линейными потребителями 1 и 6. Действующие значения токов основной частоты 160 А и 60 А соответственно. Потребители 4 и 5 представлены активной нагрузкой 300 кВт. Прочие нагрузки отсутствуют.

Эксперимент 2 подразумевает изменение гармонического состава токов нагрузок потребителей 1 и 6. Помимо токов основной частоты для потребителей 1 и 6 характерно наличие третьей гармоники. Действующие значения токов с частотой 150 Гц заданы 53 А и 20 А соответственно. Конфигурация сети аналогична эксперименту 1.

Эксперимент 3 предполагает изменение конфигурации сети. К линии, питающей потребителя 6 из предыдущего эксперимента дополнительно присоединяется ВЛ, которая питает нелинейного потребителя 7. Токи нагрузки в данном ответвлении содержат в своем составе 1, 3, 5 и 7 гармоники с действующими значениями 150, 50, 30 и 21 А соответственно.

В **эксперименте 4** осуществим смену характера нагрузки для потребителя 4 и 5 с активного на активно-индуктивный с $\cos\phi = 0,8$. Конфигурация сети и ее параметры аналогичны эксперименту 3.

Для выполнения **эксперимента 5** в качестве дополнительных ответвлений линий, питающих потребителей 4 и 5, присоединим дополнительные ВЛ, которые осуществляют питание нелинейных потребителей 8 и 9. Спектральный состав токов включает 3, 5, 7 и 9 гармоники с действующими значениями 140, 93, 70 и 46 А.

В **эксперименте 6** рядом с местом ОЗЗ создается дополнительное ответвление ВЛ, к которому присоединен потребитель 2. Ток нагрузки данного присоединения характеризуется наличием 1, 3, 5, 7, 9 и 11 гармоник.

По результатам сравнительного анализа суммарных значений энергии спектра высших гармоник в отходящих линиях можно заметить, что вне зависимости от типа эксперимента и конфигурации сети концентрация максимальной энергии, определенной из вейвлет-коэффициентов, соответствует поврежденной линии. Представленный расчет подтверждает возможность реализации алгоритма относительного замера высших гармоник для селективного определения линии с ОЗЗ, используя энергию спектра вейвлет-коэффициентов.

Заключение. Разработка методов селективного определения отходящей линии с ОЗЗ для сетей 6–35 кВ по-прежнему остается актуальной задачей. Современное развитие вычислительной техники позволяет использовать для этих целей вейвлет-преобразование, с помощью которого возможно осуществлять программную фильтрацию токов отходящих линий, а также по найденным вейвлет-коэффициентам осуществлять вычисление энергии спектра высших гармоник. Результаты работы могут быть использованы для организации цифровых алгоритмов для защиты и сигнализации об однофазных замыканиях на землю в распределительных сетях 6–35 кВ при наличии несинусоидальной нагрузки.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Разработка моделей вейвлет-анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей», код темы: FENG-2023-0005).

Библиографический список

1. Экономика ХМАО—Югры // Официальный сайт полномочного представителя Президента Российской Федерации в Уральском федеральном округе. URL: http://uralfo.gov.ru/district/KNM/hmao_ekonomy/ (дата обращения: 30.05.2023).
2. Схема и программа развития электроэнергетики Ханты-Мансийского автономного округа — Югры на период до 2025 года // Департамент жилищно-коммунального комплекса и энергетики Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. URL: <https://docs.cntd.ru/document/570863613> (дата обращения: 14.06.2023).
3. Шуин В. А., Винокурова Т. Ю., Шагурина Е. С. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в комбинированных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2013. № 6. С. 35–41. EDN: RRYZSX.
4. Медведева М. А., Кузьмин С. В., Кузьмин И. С., Шманев В. Д. Анализ и прогноз аварийности распределительных сетей и электроприемников 6–10 кВ в горной отрасли // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10, № 2. С. 120–125.
5. Шуин В. А., Гусенков А. В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. Москва: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.
6. Аржанников Е. А., Чухин А. М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. Москва: НТФ «Энергопрогресс», 1998. 87 с.
7. СТО 34.01-4.1-001-2016. Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования. Введ. 2016–07–04. ПАО «Россети», 2016. 20 с.
8. Куликов А. Л., Мисриханов М. Ш., Петрухин А. А. Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования Москва: Энергоатомиздат, 2009. 164 с. ISBN 978-5-283-03292-4.
9. Куликов А. Л., Вуколов В. Ю., Шарыгин М. В., Бездушный Д. И., Темирбеков Ж. Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи с ответвлениями // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76). С. 29–38.
10. Солдатов В. А., Климов Н. А., Яблоков А. С. Определение места повреждения в электрических сетях 35–10–6 кВ по эмпирическим критериям в координатах трех симметричных составляющих // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 3. С. 32–38. DOI: 10.14529/power220304.
11. Лачугин В. Ф., Панфилов Д. И., Смирнов А. Н., Платонов П. С. Определение мест повреждений воздушных линий высокого напряжения с использованием спутниковой связи. Волновой метод двусторонних синхронизированных измерений // Энергия единой сети. 2017. № 2 (31). С. 30–41.
12. Абрамочкина Л. В. Повышение точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи по параметрам предаварийного и аварийного режимов: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 167 с.
13. Кликушин Ю. Н., Птицына Е. В., Сорокин В. Н. Исследование потерь электрической энергии, вызванных наличием высших гармоник в напряжениях и токах силового канала преобразования энергии установок электроцентробежных насосов // Известия Транссиба. 2012. № 2 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-poterelektricheskoy-energii-vyzvannyh-nalichiem-vysshih-garmonik-v-naryazheniyah-i-tokah-silovogo-kanala> (дата обращения: 12.03.2023).
14. Костин В. Н., Кривенко А. В., Сериков В. А. Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу конденсаторных батарей в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 431–441.
15. Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Дрей Н. М. Алгоритм расчёта тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С. 40–45.
16. Авербух М. А., Прасол Д. А. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6–10 кВ // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2 (14). С. 26–40. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26. EDN: DFXIEQ.
17. Солдатов А. В., Кудряшова М. Н., Антонов В. И. [и др.] Методы распознавания высших гармоник на фоне доминирующего гармонического шума для целей защиты от однофазного замыкания на землю // Электрические станции. 2021. № 7 (1080). С. 27–34. EDN: DCFEXI.
18. Antonov V. I., Naumov V. A., Soldatov A. V. [et al.] Recognition of Weak Harmonic Signal Components in Generator Protection Against Single-Phase Earth Fault // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52, № 2. DOI: 10.1007/s10749-018-0937-x.
19. Антонов В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике: моногр. Чебоксары: Чувашский гос. ун-т имени И. Н. Ульянова, 2018. 334 с. EDN: UWMDAS. ISBN 978-5-7677-2571-7.
20. Шилин А. Н., Дикарев П. В., Дементьев С. С. Интеллектуальная система релейной защиты воздушных линий в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю // Глобальная ядерная безопасность. 2022. № 4 (45). С. 40–53. DOI: 10.26583/gns-2022-04-04.
21. Touati K. O. M., Merzouk I., Hafifa A. [et al.]. Intelligent fault diagnosis of power transmission line using fuzzy logic and artificial neural network // Diagnostyka. 2022. Vol. 23, № 4. DOI: 10.29354/diag/156495.
22. 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). DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-76-81. EDN: VLUNZH.
23. Пат. 2632989 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Способ и устройство для определения местонахождения однофазного замыкания на землю в распределительной сети на основе вейвлет-преобразования переходных сигналов / Ц. Му, Ц. Ван, И. Ван [и др.] № 2015119649; заявл. 08.11.13; опубл. 11.10.17. Бюл. № 29.
24. Xu Y., Liu Y., Xing Y. [et al.]. Power Network Fault Location Using Traveling Waves and Continuous Wavelet Transform // 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Denver, CO, USA. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM48719.2022.9916846.
25. Shabangu M., Roux P. Le, Jordaan J. [et al.]. Fault Location Detection in Underground Cables based on Wavelet-ANFIS Approach // 2021 IEEE PES/IAS Power Africa. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543184.
26. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007. 549 с.
27. Добрягина О. А., Тютиков В. В., Шадрикова Т. Ю. [и др.]. Способ выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью // Вестник ИГЭУ. 2019. № 5. С. 31–39. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.031-039.
28. Пацок В. И., Берзан В. П., Рыбакова Г. А. Математическая модель трехфазной электрической линии с расщепленными фазами // Проблемы региональной энергетики. 2019. № S1-3 (42). С. 53–67. DOI: 10.5281/zenodo.3239218. EDN: XVCDVS.
29. Серия 3.407.1-143. Железобетонные опоры ВЛ 10 кВ. Типовые строительные конструкции, изделия, узлы. Введ. 1989–01–07. Сельэнергопроект, 1989. 60 с.

ПАРАМЗИН Александр Олегович, преподаватель
 Политехнической школы Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.
 SPIN-код: 2889-8437
 AuthorID (РИНЦ): 1021763
 ORCID: 0000-0002-7266-4493
 AuthorID (Scopus): 6504763711
 Адрес для переписки: a_paramzin@ugrasu.ru

Парамзин А. О. Разработка способа селективного определения линии с однофазным замыканием на землю для промышленных сетей 6–35 кВ с изолированной нейтралью при преобладании несинусоидальной нагрузки // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 100–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-100-108.

Статья поступила в редакцию 26.06.2023 г.
 © А. О. Парамзин

UDC 621.31
 DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-100-108
 EDN: WIUEEM

A. O. PARAMZIN

Yugra State University,
 Khanty-Mansiysk, Russia

DEVELOPMENT OF SELECTIVE LINE DETECTION METHOD WITH SINGLE-PHASE EARTH FAULT FOR INDUSTRIAL 6–35 KV NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL WITH NON-SINUSOIDAL LOAD

This paper presents a method for determining the outgoing line with a single-phase fault for 6–35 kV networks with a non-sinusoidal loads. The paper considers the relevance of applying the mathematical apparatus of the wavelet transform together with the traditional methods of fault location. The application of the wavelet is relevant in the problems of decomposition of non-sinusoidal current signal of outgoing lines. This is due to the loads of modern enterprises of the oil producing sector of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra. It is proposed to modernize the existing algorithm for relative measurement of the level of higher harmonics. The proposed method makes it possible to determine the outgoing line by the total energy of the spectrum of higher harmonics for different network configurations.

Keywords: single-phase faults, wavelet transform, signal decomposition, spectrum energy, higher harmonics.

Acknowledgments

The research is done within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject: «Development of models of wavelet analysis of nonstationary modes of electric networks to improve the reliability and efficiency of power supply to consumers», subject code: FENG-2023-0005).

References

1. *Ekonomika KHMАО-Yugry* [Economy of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra] // *Ofitsial'nyy sayt polnomochnogo predstavatelya Prezidenta Rossiyskoy Federatsii v Ural'skom federal'nom okruge. Official website of the Plenipotentiary Representative of the President of the Russian Federation in the Urals Federal District.* URL: http://uralfo.gov.ru/district/KHM/hmao_economy/ (accessed: 30.05.2023). (In Russ.).

2. *Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry na period do 2025 goda* [Scheme and program of the electric power industry development in Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Ugra for the period till 2025] // *Departament zhilishchno-kompleksa i energetiki Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry. Department of housing and energy sector of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Ugra.* URL: <https://docs.cntd.ru/document/570863613> (accessed: 14.06.2023). (In Russ.).

3. *Shuin V. A., Vinokurova T. Yu., Shagurina E. S. Matematicheskaya model' dlya otsenki minimal'nogo urovnya vysshikh garmonik v toke odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kompensirovannykh setyakh 6–10 kV* [Mathematical model for estimating the minimum level of higher harmonics in the single-phase earth-fault current in compensated 6–10 kV networks] // *Vestnik IGEU. Vestnik IGEU.* 2013. No. 6. P. 35–41. EDN: RRYZSX. (In Russ.).

4. *Medvedeva M. L., Kuzmin S. V., Kuzmin I. S., Shmanev V. D. Analiz i prognoz avariynosti raspredelitel'nykh setey*

i elektropriyemnikov 6–10 kV v gornoy otrasli [Analysis and forecast of accident rate of 6–10 kV distribution grids and power consumers in the mining sector Safety and Reliability of Power Industry] // *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki. Safety and Reliability of Power Industry*. 2017. Vol. 10, no. 2. P. 120–125. (In Russ.).

5. Shuin V. A., Gusenkov A. V. Zashchity ot zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV [Protection against earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow, 2001. 104 p. (In Russ.).

6. Arzhannikov E. A., Chukhin A. M. Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi [Methods and Instruments for Locating Faults on Electric Transmission Lines]. Moscow, 1998. 87 p. (In Russ.).

7. STO 34.01-4.1-001-2016. Ustroystva opredeleniya mesta povrezhdeniya vozduzhnykh liniy elektroperedachi. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [STO 34.01-4.1-001-2016. Devices for fault location of overhead power lines. General technical requirements]. PAO Rosseti, 2016. 20 p. (In Russ.).

8. Kulikov A. L., Misrikhanov M. S., Petrukhin A. A. Opredeleniye mest povrezhdeniy LEP 6–35 kV metodami aktivnogo zondirovaniya [Determination of fault locations on 6–35 kV power lines by active sensing methods]. Moscow, 2009. 164 p. ISBN 978-5-283-03292-4. (In Russ.).

9. Kulikov A. L., Vukolov V. Yu. V., Bezdushny D. I., Temirbekov J. Algorithm of fault location on a power line with branch lines [Fault location algorithm for a power line with taps] // *Vestnik NGIEI. Bulletin NGIEI*. 2017. No. 9 (76). P. 29–38. (In Russ.).

10. Soldatov V. A., Klimov N. A., Yablokov A. S. Opredeleniye mesta povrezhdeniya v elek- tricheskikh setyakh 35–10–6 kV po empiricheskim kriteriyam v koordinatakh trekh simmetrichnykh sostavlyayushchikh [Fault location in electric 35–10–6 kV networks according to empirical criteria in the coordinates of three symmetric components] // *Vestnik YUUrGU. Seriya «Energetika». Bulletin of South Ural State University. Series «Power Engineering»*. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 32–38. DOI: 10.14529/power220304. (In Russ.).

11. Lachugin V. F., Panfilov D. I., Smirnov A. N., Platonov P. S. Opredeleniye mest povrezhdeniy vozduzhnykh liniy vysokogo napryazheniya s ispol'zovaniyem sputnikovoy svyazi. Volnovoy metod dvustoronnikh sinkhronizirovannykh izmereniy [High voltage overhead lines fault location based on the wave bilateral synchronized measureme] // *Energiya edinoy seti. Energy of Unified Grid*. 2017. No. 2 (31). P. 30–41. (In Russ.).

12. Abramochkina L. V. Povysheniye tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya vozduzhnykh liniy elektroperedachi po parametram predavariynogo i avariynogo rezhimov [Increasing the accuracy of fault location of overhead power lines according to the parameters of pre-emergency and emergency modes]. Tomsk, 2014. 167 p. (In Russ.).

13. Klikushin Yu. N., Ptitsyna E. V., Sorokin V. H. Issledovaniye poter' elektricheskoy energii, vyzvannykh nalichiyem vysshikh garmonik v napryazheniyakh i tokakh silovogo kanala preobrazovaniya energii ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov [Study of electric energy losses caused by the presence of higher harmonics in the voltages and currents of the power converter channel of electric centrifugal pumps units] // *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2012. No. 2 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-poter-elektricheskoy-energii-vyzvannykh-nalichiem-vysshih-garmonik-v-napryazheniyah-i-tokakh-silovogo-kanala> (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).

14. Kostin V. N., Krivenko A. V., Serikov V. A. Vliyaniye vysshikh garmonik na kachestvo napryazheniya i na rabotu kondensatornykh batarey v sistemakh elektroperedachi s nelineynoy nagruzkoy [Influence of high harmonics on the quality of voltage and on the operation of capacitor banks in electric supply systems with non-linear load] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya*

Tula State University. Technical Sciences. 2020. No. 5. P. 431–441. (In Russ.).

15. Mikheev G. M., Atamanov M. N., Drey N. M. Algoritm rascheta toka vysshikh garmonik v sisteme elektroperedachi promyshlennykh predpriyatii [Algorithm for calculating the current of higher harmonics in the power supply system of industrial enterprises] // *Promyshlennaya energetika. Industrial Energy*. 2018. No. 3. P. 40–45. EDN: XOWALR. (In Russ.).

16. Averbukh M. A., Prasol D. A. Otsenka vliyaniya vysshikh garmonik na toki odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu napryazheniyem 6–10 kV [Assessment of influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents in 6–10 kV networks with isolated neutral] // *Intellektual'naya elektrotehnika. Smart Electrical Engineering*. 2021. No. 2 (14). DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26. EDN: DFXIEQ. (In Russ.).

17. Soldatov A. V., Kudryashova M. N., Antonov V. I. [et al.] Metody raspoznavaniya vysshikh garmonik na fone dominiruyushchego garmonicheskogo shuma dlya tseyey zashchity ot odnofaznogo zamykaniya na zemlyu [Methods for detecting higher harmonics against a background of dominant harmonic noise for the purpose of protection against single-phase ground faults] // *Elektricheskkiye stantsii. Electrical Stations*. 2021. No. 7 (1080). P. 27–34. EDN: DCFXLI. (In Russ.).

18. Antonov V. I., Naumov V. A., Soldatov A. V. [et al.] Recognition of Weak Harmonic Signal Components in Generator Protection Against Single-Phase Earth Fault // *Power Technology and Engineering*. 2018. Vol. 52, no. 2. DOI: 10.1007/s10749-018-0937-x. (In Engl.).

19. Antonov V. I. Adaptivnyy strukturnyy analiz elektricheskikh signalov: teoriya i yeye prilozheniya v intellektual'noy elektroenergetike [Adaptive structural analysis of electrical signals: theory and its applications in intelligent power engineering] *Cheboksary*, 2018. 334 p. EDN: UWMDAS. ISBN 978-5-7677-2571-7. (In Russ.).

20. Shilin A. N., Dikarev P. V., Dementiev S. C. Intellektual'naya sistema releynoy zashchity vozduzhnykh liniy v elektricheskikh setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu [Intelligent Relay Protection System for Overhead Lines in Electrical Networks with Low Earth Fault Currents] // *Global'naya yadernaya bezopasnost'.* *Global Nuclear Security*. 2022. No. 4 (45). P. 40–53. DOI: 10.26583/gns-2022-04-04. (In Russ.).

21. Touati K. O. M., Merzouk I., Hafaifa A. [et al.]. Intelligent fault diagnosis of power transmission line using fuzzy logic and artificial neural network // *Diagnostyka*. 2022. Vol. 23, no. 4. DOI: 10.29354/diag/156495. (In Engl.).

22. Osipov D. S., Dolgikh N. N., Satpayev D. S., Andreeva E. G. Analiz rezhima odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s kombinirovannym zazemleniyem neytrali s pomoshch'yu veyvlet-preobrazovaniya [Analysis of single-phase earth fault mode in networks with combined neutral ground by means of wavelet transformation] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 5 (161). P. 76–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-76-81. EDN: VLUZNH. (In Russ.).

23. Patent 2632989 Russian Federation, IPC G 01 R 31/08. Sposob i ustroystvo dlya opredeleniya mestonakhozhdeniya odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'noy seti na osnove veyvlet-preobrazovaniya perekhodnykh signalov [Method and device for determining location of single-phase-to-ground fault in distributing networkbased on wavelet transformation of transitional signals] / TS. Mu, TS. Van, I. Van [et al.]. No. 2015119649. (In Russ.).

24. Xu Y., Liu Y., Xing Y. [et al.]. Power Network Fault Location Using Traveling Waves and Continuous Wavelet Transform // 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Denver. CO. USA. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM48719.2022.9916846. (In Engl.).

25. Shabangu M., Roux P. Le, Jordaan J. [et al.]. Fault Location Detection in Underground Cables based on Wavelet-ANFIS Approach // 2021 IEEE PES/IAS Power Africa. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543184.26. (In Engl.).

26. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules for Electrical Installations]. 7th ed. Moscow, 2007. 549 p. (In Russ.).

27. Dobryagina O. A., Tyutikov V. V., Shadrikova T. Yu. [et al.]. Sposob vypolneniya adaptivnoy tokovoy zashchity ot zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV s izolirovannoy neytral'yu [Method of adaptive current protection against earth faults in 6–10 kV cable networks with an insulated neutral] // Vestnik IGEU. *Vestnik IGEU*. 2019. No. 5. P. 31–39. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.031-039. (In Russ.)

28. Patsyuk V. I., Berzan V. P., Rybakova G. A. Matematicheskaya model' trekhfaznoy elektricheskoy linii s rasshcheplyennymi fazami [Mathematical Model of a Three-Phase Electric Line with Split Phases] // Problemy regional'noy energetiki. *Problems of the Regional Energetics*. 2019. No. S1-3 (42). P. 53–67. DOI: 10.5281/zenodo.3239218. EDN: XVCDVS. (In Russ.).

29. Seriya 3.407.1-143. Zhelezobetonnyye opory VL 10 kV. Tipovyye stroitel'nyye konstruktsii, izdeliya uzly [Series 3.407.1-143. Reinforced Concrete Supports of 10 kV Overhead Line. Typical building structures, products assemblies]. Selenergoproekt, 1989. 60 p. (In Russ.).

PARAMZIN Alexander Olegovich, Lecturer at the Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 2889-8437

AuthorID (RSCI):1021763

ORCID: 0000-0002-7266-4493

AuthorID (SCOPUS): 6504763711

Correspondence address: a_paramzin@ugrasu.ru

For citations

Paramzin A. O. Development of selective line detection method with single-phase earth fault for industrial 6–35 kV networks with isolated neutral with non-sinusoidal load // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 100–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-100-108.

Received June 26, 2023.

© A. O. Paramzin