

### 2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.31

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.2>

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ПОИСКА ПОВРЕЖДЕННОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ С ОДНОФАЗНЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ ПО ДАННЫМ SV-ПОТОКА

**Александр Олегович Парамзин<sup>1\*</sup>, Станислав Юрьевич Долингер<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Югорский государственный университет (д. 16, ул. Чехова, Ханты-Мансийск, 628011, Российской Федерации)

<sup>1</sup> [a\\_paramzin@ugrasu.ru](mailto:a_paramzin@ugrasu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7266-4493>

<sup>2</sup> [s\\_dolinger@ugrasu.ru](mailto:s_dolinger@ugrasu.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6897-4440>

\* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация.** *Введение.* Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения селективности устройств защиты и сигнализации однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ. Однофазные замыкания на землю являются преобладающими причинами отказов оборудования нефтегазодобывающего сектора России, составляющим основу ее экономики. *Цель.* Проверка возможности использования данных SV-потока МЭК 61850 в задачах поиска присоединения с однофазным замыканием на землю при помощи вейвлет-преобразования. *Материалы и методы.* Пакетное вейвлет-преобразование с разложением до 6-го уровня тока 3и0. Интерполяция данных SV-потока. Определение действующих значений токов высших гармоник по вейвлет-коэффициентам. *Результаты и обсуждение.* Величина относительного отклонения вычисленных действующих значений токов высших гармоник между данными датчика тока с частотой дискретизации 12 800 Гц и интерполированными значениями SV-потока с повышенной частотой от 4 000 до 12 800 Гц составила 1,18 % при повреждении присоединения, питающего нелинейную нагрузку и 2,86 % в эксперименте с синусоидальной нагрузкой. *Заключение.* Аппарат вейвлет-анализа позволяет вычислить вейвлет-коэффициенты соответствующего уровня разложения для определения действующих значений высших гармоник. Результаты экспериментов показали, что наибольшее значение суммы токов высших гармоник соответствует присоединению с однофазным замыканием на землю вне зависимости от типа нагрузки на данной линии. Ограничено количество выборок за период ставит задачу интерполяции данных SV-потока до частоты 12 800 Гц.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание на землю, изолированная нейтраль, высшие гармоники, МЭК 61850, вейвлет-преобразование

**Для цитирования:** Парамзин А. О., Долингер С. Ю. Применение вейвлет-преобразования в задачах поиска поврежденного присоединения с однофазным замыканием на землю по данным SV-потока // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 4 (103). С. 17–27. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.2>

**Финансирование:** 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).

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.05.2024;  
одобрена после рецензирования 01.07.2024;  
принята к публикации 05.07.2024.

Research article

## APPLICATION OF THE WAVELET TRANSFORM IN PROBLEMS OF SEARCHING FOR A DAMAGED CONNECTION WITH A SINGLE-PHASE EARTH FAULT ACCORDING TO SV-STREAM DATA

**Alexander O. Paramzin<sup>1\*</sup>, Stanislav Yu. Dolinger<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Yugra State University (16, Chekhova str., Khanty-Mansiysk, 628011, Russian Federation)

<sup>1</sup> [a\\_paramzin@ugrasu.ru](mailto:a_paramzin@ugrasu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7266-4493>

<sup>2</sup> [s\\_dolinger@ugrasu.ru](mailto:s_dolinger@ugrasu.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6897-4440>

\* Corresponding author

**Abstract.** *Introduction.* Research relevance is conditioned by the necessity to increase selectivity of protection and signaling devices for single-phase ground faults in 6-10 kV networks. Single-phase ground faults are one of the prevailing causes of equipment

failures in the oil and gas production sector of Russia, which is the backbone of the economy. **Goal.** The article aims is verification of the possibility of using the Sample Value data of IEC 61850 in the tasks of finding a faulty feeder with single-phase earth fault by means of wavelet transform **Materials and methods.** Wavelet transform with decomposition to the 6th level of zero-sequence current 3i0. Interpolation of SV-flow data. Determination of effective values of higher harmonic currents by wavelet coefficients. **Results and discussion.** The magnitude of the relative deviation of the calculated effective values of the higher harmonic currents between the data of the current sensor with a sampling frequency of 12,800 Hz and the interpolated values of the SV flow with an increased frequency from 4,000 to 12,800 Hz was 1.18 % with damage to the connection feeding the nonlinear load and 2.86 % in the experiment with a sinusoidal load. **Conclusion.** Experimental results show that the highest value of the sum of the higher harmonic currents corresponds to the feeder with the presence of a single-phase ground fault. The limited number of samples per period poses the challenge of interpolating the Sampled Value data up to a frequency of 12 800 Hz.

**Keywords:** single-phase ground fault, isolated neutral, higher harmonics, IEC 61850, wavelet transform

**For citation:** Paramzin AO, Dolinger SYu. Application of the wavelet transform in problems of searching for a damaged connection with a single-phase earth fault according to SV-stream data. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;4(103):17-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.4.2>

**Funding:** the research has been conducted within the national assignment by the Ministry of Science and Higher Education in the Russian Federation (theme "Model building for wavelet analysis of non-steady behavior in electric power systems for reliability growth effectiveness for electric power supply to a customer", theme code: FENG-2023-0005).

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 06.05.2024;

approved after reviewing 01.07.2024;

accepted for publication 05.07.2024.

**Введение / Introduction.** Ханты-Мансийский автономный округ – Югра является крупным энергетическим субъектом РФ, где основным потребителем электроэнергии выступают нефтегазодобывающие компании, а электрические сети 6-10 кВ расположены в малозаселенных районах.

Надежность и бесперебойность электроснабжения в сетях напряжением 6-10 кВ во многом определяется состоянием воздушных линий (ВЛ) электропередачи, что подтверждается анализом статистики отказов по видам электрооборудования в сетях нефтегазодобывающих компаний [1]. Причины повреждения линий электропередачи напряжением 6-10 кВ изложены в работе [2]. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений данных электрических сетей.

Как правило, сети напряжением 6-10 кВ работают в режиме изолированной нейтрали и подразумевают существование ОЗЗ в сети с малыми токами замыкания на землю. Как следствие, появляется возможность организации защиты от ОЗЗ с действием «на сигнал» без отключения линии.

Известно, что в токе ОЗЗ электрических сетей среднего напряжения преобладают гармоники в диапазоне от 150 Гц до 1-1,5 кГц, которые и рекомендуется использовать для действия токовых защит на основе высших гармоник (ВГ). Благодаря этому широкое распространение в задачах организации защиты и индикации наличия ОЗЗ в сетях 6-10 кВ получили устройства абсолютного и относительного замера уровня высших гармоник в отходящих присоединениях. Согласно [3], применение устройств абсолютного замера считается нецелесообразным на сегодняшний день. Работа [4] подтверждает влияние нестабильности уровня гармоник в токе ОЗЗ на селективность таких защит. Также авторами данной работы делается акцент на устройствах относительного замера ВГ, применительно к сетям с большим количеством индивидуальных фидеров. Подтверждением данного высказывания может служить [5], где говорится о возможности применения ВГ в качестве опорного информационного базиса для защит от ОЗЗ. Однако неоднократно отмечалась сложность распознавания ВГ в токах нулевой последовательности (НП). Так, например, существующее устройство [6] выполняет программную фильтрацию с помощью преобразования Фурье, которое снижает селективность защиты из-за наличия эффекта «растекания спектра» [7]. В свою очередь, защиты, реализованные с помощью аппаратных фильтров [8], лишены подобного недостатка. При этом отказ от аппаратной фильтрации совместно с использованием цифровых измерительных устройств при реализации защит от ОЗЗ является вкладом в развитие технологии «цифровая подстанция» и национальной инициативы «Энерджинет».

Важно отметить тенденции развития рынка устройств защиты от ОЗЗ, где традиционные электромеханические устройства претерпевают значительные изменения начиная с 2000-х годов,

когда в эксплуатацию вошли и закрепились на рынке микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗиА) [9]. Авторы работы [10] отмечают, что ранее термин «интеллектуальная защита» характеризовал устройства, выполненные на основе микропроцессорной техники, но постепенно с развитием данной технологии термин закрепился за устройствами защиты, для которых обязательно не только использование современной микропроцессорной базы, но и удовлетворение требований, предъявляемых к достижению максимального количества информации об измеряемых параметрах [10 с. 35]. В качестве критерия интеллектуализации РЗиА выделяют внедрение стандарта IEC 61850 (МЭК 61850) [11], а также использование для обработки сигналов современного математического аппарата, например, вейвлет-преобразования [12].

Согласно [13], для организации селективной интеллектуальной защиты необходимо перед промышленной эксплуатацией оборудования осуществить ряд испытаний, которые позволяют оценить правильность функционирования алгоритмов защиты. Особенностям тестирования и стандартизации подобных устройств посвящены работы [14, 15].

В данной работе предлагается сравнить и проверить работоспособность традиционного способа поиска поврежденного присоединения с наличием ОЗЗ по параметрам ВГ в токе  $3I_0$  и защиты, выполняющей относительный замер ВГ в токе  $3i_0$ , а также последующий поиск повреждения по данным SV-потока (Sampled Values). Выделение гармонических составляющих из токов  $3i_0$  выполняется с использованием пакетного вейвлет-преобразования, неоднократно доказавшего эффективность в задачах подобного рода.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** Установившийся режим ОЗЗ принято характеризовать протеканием емкостного тока, величину которого можно определить в соответствии с выражением

$$I_{O33} = 3I_0 = \omega f U_\phi C_\phi = 2\pi f \sqrt{3} U_\phi C_\phi, \quad (1)$$

где  $I_{O33}$  – величина емкостного тока;  $I_0$  – значение тока нулевой последовательности;  $U_\phi$  и  $U_\lambda$  – фазные и линейные напряжения;  $C_\phi$  – величина емкости фаз;  $f$  – частота питающей сети.

Теоретические положения о соответствии наибольшего уровня ВГ линии с наличием замыкания на землю изложены в [16]. На рис. 1 представлена векторная диаграмма при ОЗЗ.

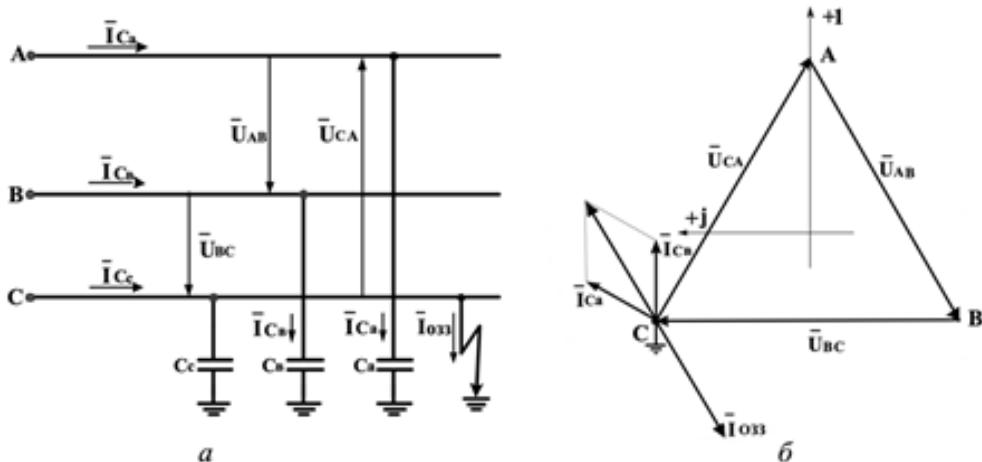


Рис. 1. Упрощенная схема замещения сети при ОЗЗ (а) и векторная диаграмма токов и напряжений при металлическом ОЗЗ (б) / Fig. 1. Simplified electric circuit (a) and vector diagram of currents and voltages(b) for SPGF

Здесь  $\bar{I}_{Ca}$  и  $\bar{I}_{Cb}$  – емкостные токи здоровых фаз, а  $\bar{I}_{O33}$  – ток замыкания на землю.  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  – емкости соответствующих фаз ЛЭП, определяемые из конфигурации опор. Вектор тока  $\bar{I}_{Cc}$  для случая металлического ОЗЗ равен 0.

Тогда, согласно основным законам электротехники, емкостной ток  $\bar{I}_{Ca}$  может быть выражен как

$$\bar{I}_{Ca} = \frac{\bar{U}_{AC}}{-j2\pi fC_a}. \quad (2)$$

Аналогично для емкостного тока фазы В выражение примет вид

$$\bar{I}_{Cb} = \frac{\bar{U}_{CB}}{-j2\pi fC_b}, \quad (3)$$

тогда ток ОЗЗ можно представить как сумму векторов  $\bar{I}_{Ca}$  и  $\bar{I}_{Cb}$

$$\bar{I}_{O33} = 3\bar{I}_0 = \bar{I}_{Ca} + \bar{I}_{Cb}. \quad (4)$$

В данной работе предлагается выявить присоединение с наличием ОЗЗ по наибольшему относительно других присоединений значению ВГ в токе  $3i_0$ , полученному в результате пакетного вейвлет-преобразования исходного сигнала и вычисления соответствующих вейвлет-коэффициентов по данным SV-потока размерностью 80 точек/период. В качестве референсного измерительного канала выступает датчик тока на базе микросхемы ACS712, исходные сигналы частотой 12 800 Гц, с которого были также подвергнуты программной фильтрации при помощи вейвлетов и вычислены значения ВГ в токе  $3i_0$ .

Вычисление вейвлет-коэффициентов для полученного массива значений токов в установившемся режиме ОЗЗ позволяет осуществлять программную фильтрацию, используя вейвлет-коэффициенты, занимающие значительно меньшие объемы информации, чем исходный сигнал. Кроме того, в отличие от традиционного быстрого преобразования Фурье, вейвлеты позволяют разложить сигнал по системам базисных функций и обладают высокой разрешающей способностью в частотной и временной областях.

При решении данной задачи целесообразно применять пакетное вейвлет-преобразование. Для разложения исходный сигнал  $\bar{I}_{Ci}$  и вейвлет  $\Psi(t)$  могут быть свернуты согласно выражению

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int i(t)\Psi\left(\frac{t}{a} - nb\right)dt, \quad (5)$$

где  $\bar{I}_{Ci}$  – емкостный ток соответствующей фазы;  $a$  – нормирующий коэффициент, задающий ширину вейвлет пакета;  $b$  – коэффициент, определяющий его положение.

Необходимо отметить, что в случае пакетного вейвлет-преобразования  $a$  и  $b$  принимают дискретные значения.

Масштабирующую функцию и вейвлет одного уровня обычно связывают с масштабирующей функцией на более низком уровне посредством фиксированного количества коэффициентов  $h_0(k)$  и  $h_1(k)$ :

$$\varphi(t) = \sum_k h_0(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k), \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \sum_k h_1(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k). \quad (7)$$

Требуется упомянуть особенность вейвлет-анализа, которая предъявляет ряд требований к исходному массиву данных для его успешного последующего разложения.

В соответствии с теоремой Котельникова, восстановление непрерывного сигнала с ограниченным спектром возможно осуществить по его дискретным отсчетам, если последние были взяты с частотой дискретизации, превышающей максимальную частоту сигнала минимум в два раза.

Согласно единой технической политике в электросетевом комплексе ПАО «Россети», частота дискретизации передаваемых данных SV кадром для устройств защиты и автоматики должна быть не ниже 80 точек/период.

В данной работе измерения емкостных токов были выполнены с помощью датчиков тока ACS712 функционирующими на эффекте Холла. Данное решение обосновано упомянутыми в [17] недостатками других известных на сегодняшний день измерительных каналов. Выбранные датчики могут быть использованы в качестве аналогового источника референсных данных и информационного канала для формирования потока SV-80.

Получение референсного набора данных осуществлялось опросом датчиков, установленных в рассечку фазных проводников, питающих нагрузку с помощью комплекса полунаатурного моделирования (КПМ) «РИТМ». Конфигурация КПМ «РИТМ» включает настраиваемый модуль АЦП с возможностью задействовать до 16 независимых входных каналов разрядностью 16 бит с одновременным считыванием по всем каналам. Входное сопротивление каналов соответствует 1 МОм. Полоса пропускания каждого канала соответствует 25 кГц.

КПМ «РИТМ» и его встроенный АЦП не входит в государственный реестр средств измерений РФ. Проверка качества преобразования данных с датчиков тока выполнялась при помощи осциллографа Rigol DS1102, каждый канал которого подключен к одной из фаз исследуемого присоединения. Встроенный АЦП осциллографа с максимальной полосой пропускания 100 МГц и частотой дискретизации в режиме реального времени до 1 Гвыб/с позволяет получить осциллограммы для установившегося режима однофазного замыкания на землю в количестве 6 периодов с частотой выборки 12 800 Гц.

Поток SV-80 в соответствии со стандартом МЭК 61850 формировался одновременно для всех фаз в отходящих присоединениях при помощи библиотеки IEC61850, входящей в пакет расширения RITM-demo для Matlab Simulink. В процессе получения осциллограмм конфигурация и параметры исследуемой сети в рамках одного эксперимента оставались неизменными, внешние факторы, такие как температура окружающей среды и влажность воздуха, поддерживались постоянными на протяжении всех экспериментов.

Режим ОЗЗ в сети 6-10 кВ смоделирован на базе лабораторных стендов «учебная техника» (рис. 2) с питанием 0,4 кВ. Гальваническая связь источника питания напряжением 0,4 кВ выполнена при помощи трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y без вывода нулевой точки. Моделирование воздушных линий осуществлялось при помощи блоков «Модель линии электропередачи» со следующими параметрами:

*Линия 1:  $R = 0 \text{ Ом}$  (Добавочное),  $C/2 = 0,18 \text{ мкФ}$ ,  $L/RL = 0,3/0,8 \text{ Гн/Ом}$ ;*

*Линия 2:  $R = 0 \text{ Ом}$  (Добавочное),  $C/2 = 0,18 \text{ мкФ}$ ,  $L/RL = 0,3/0,8 \text{ Гн/Ом}$ .*

В качестве нагрузок отходящих от трансформатора присоединений выступали: *Асинхронный двигатель мощностью 125 Вт* в режиме холостого хода – имитация линейного потребителя; *Мост Ларионова с нагрузкой* в 1,2 кОм – имитация наличия нелинейных нагрузок в сети.

Расположение точки ОЗЗ для эксперимента № 1 соответствует концу линии № 2 (табл. 1). В эксперименте № 2 место ОЗЗ соответствует конец линии № 1 (табл. 2).

#### *Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.*

Декомпозиция полученного сигнала отходящих линий осуществлена при помощи вейвлета Добеши 20-го порядка, выбор которого обусловлен точностью данного вида вейвлет-преобразования при относительно небольшом времени вычислений. Масштабирующая функция и вейвлет представлены на рис. 3. При помощи пакетного вейвлет-преобразования, схема разложения которого представлена в [18] возможно получить несколько уровней вейвлет-коэффициентов, первый из которых (аппроксимирующий) получим из произведения исследуемого сигнала тока  $3i_0$  и масштабирующей функции, которая сдвигается по временной шкале до тех пор, пока полностью не покроет исходную осциллограмму. Вычислив произведение исходного сигнала с вейвлетом Добеши 20-го порядка, на выходе сможем получить значения детализирующих коэффициентов. При разложении на дополнительные уровни остается лишь найти новое семейство отмасштабированных и сдвинутых функций  $\varphi(t)$ , и  $\Psi(t)$ .

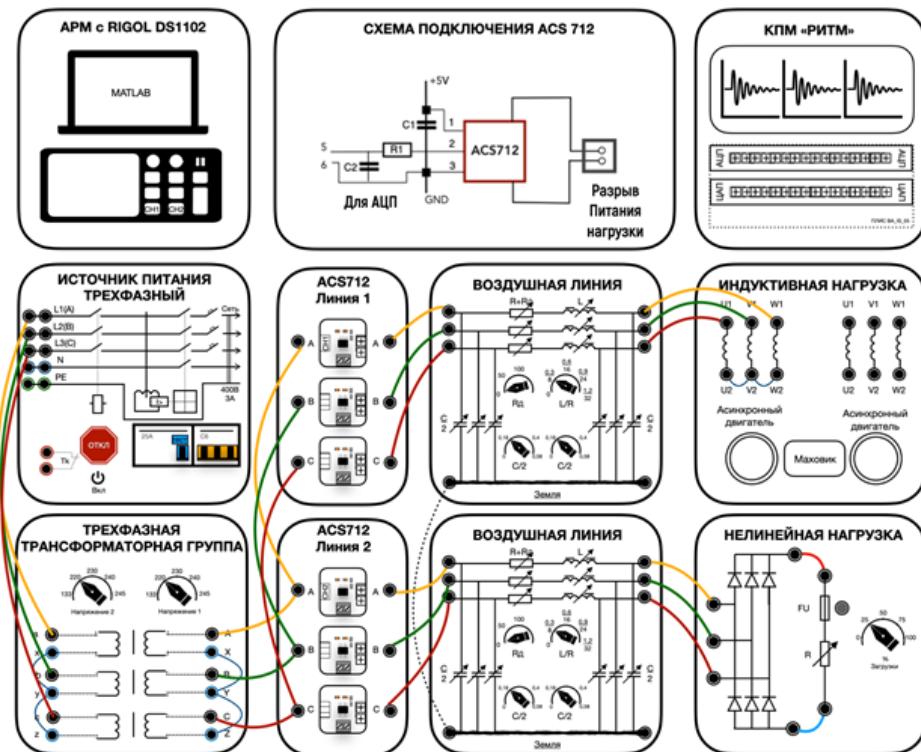


Рис. 2. Фрагмент экспериментальной установки на базе стендов «Учебная техника» / Fig. 2. Experimental installation on the basis of training stands

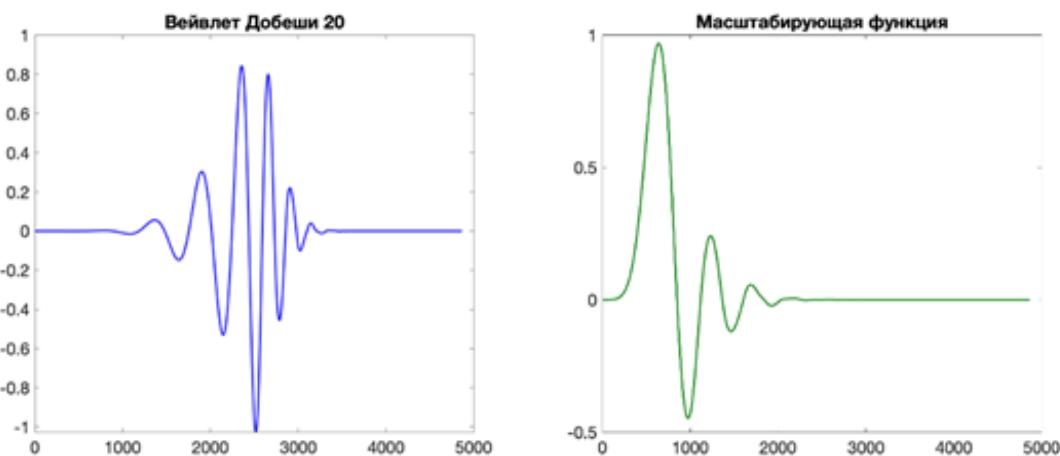


Рис. 3. Масштабирующая функция и вейвлет Добеши 20 / Fig. 3. Scaling function and wavelet Daubesches 20

В ходе эксперимента был получен набор референсных осциллограмм с частотой дискретизации 12 800 Гц длительностью 0,12 с и массив данных потока SV-80 частотой 4 000 Гц. Частота источника референсных данных обусловлена необходимостью получения вейвлет-коэффициентов соответствующего уровня разложения. Для решения задачи вычисления действующих значений высших гармоник в токах 3i0 была выполнена декомпозиция сигнала до вейвлет-коэффициентов 6-го уровня разложения. По полученным вейвлет-коэффициентам были вычислены действующие значения токов высших гармоник (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1 / Table 1

**Действующие значение токов ВГ из вейвлет-коэффициентов по эксперименту № 1 / Real values of HV currents obtained from wavelet coefficients in experiment № 1**

Источник данных	ACS 712		SV		Отклонение, %	
	Точка изм. № гармоники	$3i_0$ , мА Линия 1	$3i_0$ , мА Линия 2	$3i_0$ , мА Линия 1	$3i_0$ , мА Линия 2	Л1
3	8,9	17,5	8,8	17,3	-1,1	-1,1
5	1,7	6,9	1,7	6,8	0,0	-1,4
7	1,8	3,5	1,6	3,7	-11,1	5,7
9	2,9	2,3	2,8	2,3	-3,4	0,0
11	1,1	1,9	1,4	2,4	27,3	26,3
Итого	<b>9,7</b>	<b>19,4</b>	<b>9,6</b>	<b>19,2</b>	-1,2	-0,6

Соответственно, если в качестве измерительного канала выступает устройство, функционирующее в соответствии с МЭК 61850, возникает задача повысить количество точек измерения в полученной кривой тока более чем в 3 раза и лишь затем производить операцию вейвлет-преобразования. Увеличить частоту дискретизации массива возможно путем вставки интерполированных значений между выборками. В рамках данной работы реализация операции выполнена на языке программирования Python с использованием библиотеки SciPy.

Результаты вычисления действующих значений токов ВГ для интерполированного SV-потока представлены в соответствующих столбцах таблиц. Величина относительного отклонения показывает разницу между действующими значениями токов соответствующих гармоник, полученных по мгновенным значениям датчика ACS 712 и интерполированного SV-потока.

Таблица 2 / Table 2

**Действующие значение токов ВГ полученные из вейвлет-коэффициентов в ходе эксперимента № 2 / Real values of HV currents obtained from wavelet coefficients in experiment №2**

Источник данных	ACS 712		SV		Отклонение, %	
	Точка изм. № гармоники	$3i_0$ , мА Линия 1	$3i_0$ , мА Линия 2	$3i_0$ , мА Линия 1	$3i_0$ , мА Линия 2	Л1
3	17,5	3,5	17,3	4,0	-1,1	14,3
5	6,9	2,4	6,8	3,1	-1,4	29,2
7	3,5	3,1	3,7	2,3	5,7	-25,8
9	1,2	2,0	1,8	2,2	50,0	10,0
11	1,9	1,6	2,4	1,6	26,3	0,0
Итого	<b>19,3</b>	<b>5,8</b>	<b>19,2</b>	<b>6,2</b>	-0,4	5,9

На рис. 4 также представлены осциллограмма токов с датчика Холла и осциллограмма интерполированного SV-потока, которые подвергались декомпозиции при помощи вейвлет-анализа. Визуальное совпадение осциллограмм подтверждает результаты экспериментов и возможность использовать SV-поток на 80 выборок для поиска линии с ОЗЗ при помощи вейвлет-преобразования в соответствии с МЭК 61850.

**Заключение / Conclusion.** В работе представлена идея использования вейвлет-преобразования для программной фильтрации данных SV-потока токов и напряжений нулевой последовательности с целью определения по величине высших гармоник в токах  $3i_0$  поврежденного присоединения с однофазным замыканием на землю.

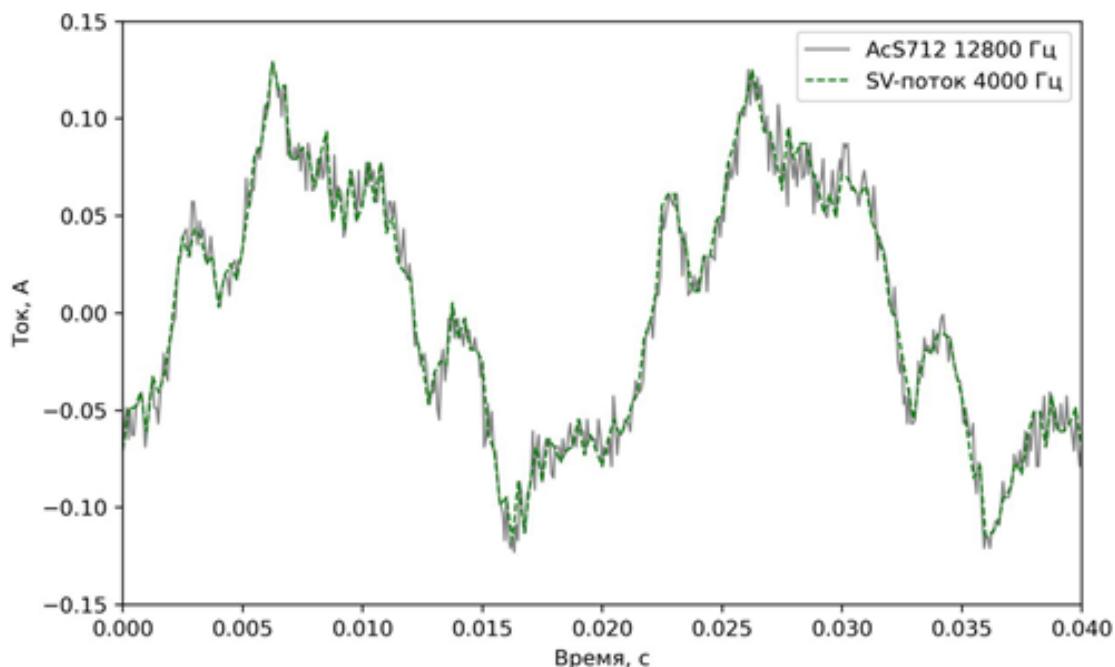


Рис. 4. Сопоставление осциллографм токов фазы А, полученных с датчика ACS712 и интерполированного SV-потока с частоты с 4 до 12.8 кГц / Fig. 4. Comparison of phase A current oscillograms obtained from the ACS712 sensor and interpolated SV-flow from the frequency from 4 to 12.8 kHz

Из-за несоответствия частоты SV-потока требованиям к вейвлет-преобразованию задача поиска поврежденного присоединения усложняется в связи с необходимостью наличия звена интерполяции полученного SV-потока перед декомпозицией сигнала и вычислением вейвлет-коэффициентов соответствующего уровня. Реализовать данную операцию возможно при помощи современных пакетов прикладных программ, таких как Matlab, либо же использовать для этого традиционную теорию цифровой обработки сигналов и ее реализацию на различных языках программирования.

Величина относительного отклонения суммы вейвлет-коэффициентов высших гармоник, определенных по данным интерполированного SV-потока и референсным показаниям ACS 712 для линии с замыканием на землю, составляет 1,18 % в эксперименте № 1 с нелинейной нагрузкой в поврежденном присоединении и 2,86 % в эксперименте № 2, когда повреждению соответствовала синусоидальная нагрузка.

Использование результатов работы возможно в рамках организации интеллектуальной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ, работающих в режиме изолированной или компенсированной нейтрали.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сидоров С. В., Сушкин В. В., Сухачев И. С. Разработка методики определения места однофазного замыкания на землю воздушной линии электропередачи напряжением 6(10) кВ с учетом климатических факторов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 2. С. 115–123. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/2/2486>
2. Сушкин В. В., Сухачев И. С., Сидоров С. В. Разработка комплексного подхода к диагностированию места повреждения воздушной линии электропередачи при однофазных замыканиях на землю на основе алгоритма обработки данных цифровых подстанций // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 7. С. 66–77. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/7/4332>

3. 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. [https://doi.org/10.46960/2658-6754\\_2021\\_2\\_26](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_2_26)
4. Винокурова Т. Ю., Шuin В. А., Шагурина Е. С. Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2014. № 6. С. 31–38.
5. Саттаров Р. Р., Гарафутдинов Р. Р., Хафизов Р. Р. Повышение надежности сетей 6-35 кВ путем применения метода STA/LTA // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2018. № 3. С. 30–37. <https://doi.org/10.14529/power180304>
6. Патент № 2771222 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ определения поврежденного фидера при однофазном замыкании на землю в распределительной электрической сети: № 2021100561: заявл. 13.01.2021: опубл. 28.04.2022 / А. И. Федотов, А. Г. Латипов, А. Ф. Абдуллаев, Г. В. Вагапов; заявитель Акционерное общество «Сетевая компания».
7. Долгих Н. Н., Осипов Д. С., Парамзин А. О. Идентификация однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ на основе вейвлет-преобразования // Вестник ЮГУ. 2023. № 1 (68) С. 139–146.
8. Патент № 2675623 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю в компенсированных электрических сетях среднего напряжения: № 2017141907: заявл. 30.11.2017: опубл. 21.12.2018 / В. А. Шuin, Т. Ю. Шадрикова, О. А. Добрягина [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» (ИГЭУ).
9. Intelligent control and protection in the Russian electric power system / N. Voropai, D. Efimov, I. Kolosok, V. Kurbatsky // L. A. Lamont, A. Sayigh. (eds.) Application of Smart Grid Technologies – Case Studies in Saving Electricity in Different Parts of the World. Amsterdam: Elsevier, 2018. P. 61–140. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803128-5.00003-9>
10. Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей / В. Ф. Лачугин, Д. И. Панфилов, А. Л. Куликов, А. А. Рывкин, М. Д. Обалин // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 4. С. 28–37.
11. Feeder protection and control REF615 IEC. Official website ABB. URL: <https://new.abb.com/medium-voltage/digitalsubstations/protection-relays/feeder-protection-and-control/feeder-protection-and-control-ref615-iec> (accessed: 24.03.2024).
12. Martín F., Aguado J. A. Wavelet Based ANN Approach for Transmission Line Protection // IEEE. Transact. Power Delivery. 2003. Vol. 18. No. 4. P. 1572–1574. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817523>
13. Ayello M., Lopes Y. Interoperability based on IEC 61850 standard: systematic literature review, certification method proposal, and case study // Electric power system research. 2023. No. 220. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109355>.
14. Kowalik R., Rasolomampionona D. D., Januszewski M. Laboratory testing of process bus equipment and protection functions in accordance with IEC 61850 standard: part I: electrical arrangement and basic protection functions tests // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2018. No. 94. P. 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.023>
15. Kowalik R., Rasolomampionona D. D., Januszewski M. Laboratory testing of process bus equipment and protection functions in accordance with IEC 61850 standard. Part II: tests of protection functions in a LAN-based environment // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2017. No. 90. P. 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.024>
16. Патент № 2688210 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов: № 2018126268: заявл. 16.07.2018: опубл. 21.05.2019 / В. А. Шuin, Т. Ю. Шадрикова, О. А. Добрягина, Е. С. Шагурина; заявитель ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» (ИГЭУ).
17. Mingotti A., Peretto L., Tinarelli R. Effects of multiple influence quantities on Rogowski-coil-type current transformers // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2020. No. 6. P. 4827–4834. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2953419>
18. Osipov D. S., Paramzin A. O., Tkachenko V. A. Wavelet Transform Algorithms in Analyzing Transient Phenomena and Power Quality Parameters // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2023. P. 31–35. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272838>

**REFERENCES**

1. Sidorov SV, Sushkov VV, Sukhachev IS. Development of a method for determining the location of a single-phase ground fault of an overhead power line 6(10) kv voltage considering climatic factors. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020;331(2):115-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/2/2486>
2. Sushkov VV, Sukhachev IS, Sidorov SV. Development of a comprehensive approach to diagnosing the overhead line faults location in single-phase ground faults based on a digital substation data processing algorithm. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023;334(7):66-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/7/4332>
3. Averbukh MA, Prasol DA. Assessment of influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents in 6-10 kV networks with isolated neutral. Smart Electrical Engineering. 2021;2(14):26-40. (In Russ.). [https://doi.org/10.46960/2658-6754\\_2021\\_2\\_26](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_2_26)
4. Vinokurova TYu, Shuin VA, Shagurina ES. Application of simulation to evaluation of higher harmonics instability of single-phase earth fault current in 6–10 kv compensated cable networks. Vestnik of ISPEU. 2014;(6):31-38. (In Russ.).
5. Sattarov RR, Garafutdinov RR, Khafizov RR. Improving the reliability of 6-35 kv networks by using STA/LTA method. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2018;18(3):30-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power180304>
6. Fedotov AI, Latipov AG, Abdullazjanov AF, Vagapov GV A method for determining a damaged feeder during a single-phase earth fault in a distribution electrical network. Patent Russian Federation 2675623. 28 April 2022. (In Russ.).
7. Dolgikh NN, Osipov DS, Paramzin AO. Identification of single-phase ground fault in networks 6-35 kv using the wavelet transform. Vestnik JuGU. 2023;1(68):139-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202301139-146>
8. Shuin VA, Shadrikova TYu, Dobryagina OA [et al]. Protection device against single-phase earth faults in compensated medium voltage electrical networks. Patent Russian Federation 2017141907. 21 December 2018.
9. Voropai N, Efimov D, Kolosok I, Kurbatsky V. Intelligent control and protection in the Russian electric power system. In: L. A. Lamont, A. Sayigh. (eds.) Application of Smart Grid Technologies – Case Studies in Saving Electricity in Different Parts of the World. Amsterdam: Elsevier, 2018. P. 61-140. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803128-5.00003-9>
10. Lachugin VF, Panfilov DI, Kulikov AI, Ryvkin AA, Obalin MD. Design concept of power system intelligent relay protection. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy industry. 2015;(4):28-37. (In Russ.).
11. Feeder protection and control REF615 IEC. Available from: <https://new.abb.com/medium-voltage/digitalsubstations/protection-relays/feeder-protection-and-control/feeder-protection-and-control-ref615-iec> [Accessed 24 March 2024].
12. Martín F, Aguado JA. Wavelet Based ANN Approach for Transmission Line Protection. IEEE. Transact. Power Delivery. 2003;18(4):1572-1574. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817523>.
13. Ayello M, Lopes Y. Interoperability based on IEC 61850 standard: systematic literature review, certification method proposal, and case study. Electric power system research. 2023;220. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109355>
14. Kowalik R, Rasolomampionona DD, Januszewski M. Laboratory testing of process bus equipment and protection functions in accordance with IEC 61850 standard: part I: electrical arrangement and basic protection functions tests. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2018(94):405-414. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.023>
15. Kowalik R, Rasolomampionona DD, Januszewski M. Laboratory testing of process bus equipment and protection functions in accordance with IEC 61850 standard. Part II: tests of protection functions in a LAN-based environment. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2017;(90):54-63. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.024>
16. Shuin VA, Shadrikova TYu., Dobryagina OA, Shagurina ES. Protection device against single-phase earth faults in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents. Patent Russian Federation 2688210. 21 May 2018. (In Russ.).
17. Mingotti A, Peretto L, Tinarelli R. Effects of multiple influence quantities on Rogowski-coil-type current transformers. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2020;6:4827-4834. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2953419>
18. Osipov DS, Paramzin AO, Tkachenko VA. Wavelet Transform Algorithms in Analyzing Transient Phenomena and Power Quality Parameters. International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi; 2023. P. 31-35. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272838>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр Олегович Парамзин** – преподаватель политехнической школы, аспирант Югорского государственного университета, Scopus ID: 57802315400, Researcher ID: AAK-8001-2021.

**Станислав Юрьевич Долингер** – кандидат технических наук, доцент политехнической школы Югорского государственного университета, Scopus ID: 57190176871, Researcher ID: A-5526-2014.

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Александр Олегович Парамзин.** Проведение исследования – разработка концепции эксперимента, сбор и анализ полученных данных. Подготовка и редактирование текста – формирование окончательного варианта рукописи, принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

**Станислав Юрьевич Долингер.** Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи, участие в научном дизайне. Проведение исследования – алгоритмизация методики обработки данных.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexander O. Paramzin** – Lecturer of Polytechnic School, Postgraduate Student, Yugra State University, Scopus ID: 57802315400, Researcher ID: AAK-8001-2021

**Stanislav Yu. Dolinger** – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor of Polytechnic School, Yugra State University, Scopus ID: 57190176871, Researcher ID: A-5526-2014

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Alexander O. Paramzin.** Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and formation of its final conducting the study – design of the experiment, collection and analysis of the data obtained. Preparation and editing of the text – creating the final version of the manuscript, taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version

**Stanislav Yu. Dolinger.** Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript, participation in scientific design. Conducting the study – algorithmization of data processing methodology.