

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ  
Направление – Электрофизика, электрофизические установки

<https://doi.org/10.17816/transsyst637451>

© А.А. Кузнецов, А.В. Пономарев, А.В. Горлов, М. А. Волчанина  
Омский государственный университет путей сообщения  
(Омск, Россия)

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Обоснование.** В статье рассматривается применение вейвлет-преобразования для обработки акустических сигналов при диагностировании силовых трансформаторов с использованием имитатора с различным набором дефектов. Рассмотрены особенности применения непрерывного вейвлет-преобразования на конкретном примере, описан алгоритм получения эталонных сигналов для распознавания вида дефекта.

**Цель.** Разработка математической модели построения эталонных сигналов акустического контроля при обработке данных от имитатора различных дефектов и последующего распознавания дефектов на реальных силовых трансформаторах во время их эксплуатации.

**Материалы и методы.** Получение акустических сигналов от имитатора дефектов и реальных трансформаторов при помощи автоматизированных систем акустического контроля. Обработка данных при помощи вейвлет преобразования, получение скейлограмм, сравнение результатов преобразования эталонных сигналов и сигналов силовых трансформаторов для выявления вида дефекта и степени его развития.

**Результаты.** Представлены выражения для преобразования сигналов, показаны сигналы акустического контроля, формирование эталонных сигналов, распознавание наиболее близких сигналов по форме, соответствующие различным видам дефектов.

**Заключение.** Показан подход формирования методики обработки сигналов акустического контроля, позволяющего воспроизводить различные дефекты изоляции силовых трансформаторов, распознавания подобных дефектов по предложенным параметрам вейвлет преобразования.

**Ключевые слова:** силовые трансформаторы; диагностирование; дефекты изоляции; акустический контроль; вейвлет-преобразование.

### Как цитировать:

Кузнецов А.А., Пономарев А.В., Горлов А.В., Волчанина М.А. Применение вейвлет-преобразования для распознавания акустических сигналов различных дефектов силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т.10. № 4. С. 504–516. doi: 10.17816/transsyst637451

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrophysics, electrophysical installations

© **A.A. Kuznetsov, A.V. Ponomarev, A.V. Gorlov, M.A. Volchanina**

Omsk State Transport University

(Omsk, Russia)

## APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM FOR RECOGNITION OF ACOUSTIC SIGNALS OF VARIOUS DEFECTS OF POWER TRANSFORMERS

**Background:** This study discusses the use of wavelet transform for processing acoustic signals when diagnosing power transformers. A simulator with various defects was used to explore the application of continuous wavelet transform. The study also outlines an algorithm for obtaining signal standards to identify different types of defects.

**Aim.** To develop a mathematical model for constructing reference acoustic control signals when processing data from a simulator with various defects. These signals will be used to identify and diagnose defects in real power transformers during their operation.

**Methods.** The study introduces expressions for signal transformation, presents acoustic control signals, and explains the formation of reference signals. It also describes the process of recognizing the closest signals in form, corresponding to different types of defects.

**Results.** The key results include expressions for signal transformation, acoustic control signals, and the formation of reference signals. The closest matching signals were identified, enabling accurate recognition of different defect types.

**Conclusion.** The research proposes a method for processing acoustic control signals, allowing the reproduction of various insulation defects of power transformers and the recognition of such defects according to the proposed parameters of the wavelet transform.

**Keywords:** power transformers; diagnostics; insulation defects; acoustic control; wavelet transform.

### To cite this article:

Kuznetsov AA, Ponomarev AV, Gorlov AV, Volchanina MA. Application of wavelet transform for recognition of acoustic signals of various defects of power transformers. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):504–516. doi: 10.17816/transsyst637451

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при диагностировании состояния изоляции высоковольтных трансформаторов широко применяется акустический метод контроля. К достоинствам приборов акустического контроля, выделяющим их среди других методов контроля, можно отнести: мобильность, позволяющую легко переносить прибор к различным объектам; информативность, выражающуюся в высокой чувствительности при начальном уровне сигналов; селективность, заключающуюся в способности определять координаты источника сигнала.

Вместе с тем остаются проблемы в распознавании вида и степени развития дефекта по форме зарегистрированных акустических сигналов.

В работе рассматривается применение вейвлет-преобразования для обработки акустических сигналов, зарегистрированных системой СЦАД-16 [1] при диагностировании силовых трансформаторов [2, 3] с использованием имитатора с различным набором дефектов [4, 5].

## РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Электрические сигналы, полученные от системы СЦАД-16, не стационарны. Для их анализа не подходит стандартное преобразование Фурье, которое предполагает периодичность и стационарность сигнала. Одним из вариантов решения данной проблемы может быть применение оконного преобразования Фурье, так как оно как раз учитывает динамику изменения сигнала. Но в силу постоянства ширины окна преобразования (которая не зависит от частоты, для которой выполняется преобразование) получаем низкую детализацию на высоких частотах [6, 7].

Более удобным методом анализа подобных сигналов является вейвлет-преобразование (ВП), которое в зависимости от решаемой задачи может быть дискретным (Discrete Wavelet Transform, DWT) или непрерывным (Continuous Wavelet Transform, CWT) [8].

В основе ВП лежит некоторая функция  $\psi(t)$ , обладающая свойством локальности:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

В этом случае непрерывным ВП функции  $x(t)$  будет являться функция двух аргументов:

$$CWT_x(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

где  $a$  – масштабирующий коэффициент (обратно пропорционально связан с частотой вейвлет-функции);  $b$  – временной сдвиг (определяет локализацию вейвлет-функции по времени).

Таким образом, принцип анализа некоторого сигнала на основе непрерывного ВП заключается в том, чтобы построить так называемую скейлограмму и найти на ней особенности, присущие данному сигналу.

Скейлограмма представляет из себя трехмерную плоскость, у которой в основании координаты каждой точки определяют рассматриваемый масштаб вейвлет-функции и тот момент времени, в который рассматривается связь этой функции с заданным сигналом. По вертикали откладывается величина этой связи (сильно или слабо выражена вейвлет-функция заданного масштаба в конкретно заданный момент времени).

Для удобства трехмерную плоскость иногда заменяют соответствующей ей двумерной картой, на которой степень выраженности конкретной вейвлет-функции в данный момент времени отображается соответствующим цветом.

Например, рассмотрим сигнал, представляющий собой синусоиду с частотой 5 Гц на интервале от 0 до 2047 мс. На интервале [300; 500] мс к сигналу добавляется синусоида с частотой 20 Гц, а на интервале [400; 500] к ним добавляется еще одна синусоида частотой 100 Гц. В итоге сигнал принимает вид:

$$f(t) = \begin{cases} 20 \sin(2\pi 5t), & 0 \leq t < 0,3, \\ 20 \sin(2\pi 5t) + 20 \sin(2\pi 20t), & 0,3 \leq t < 0,4, \\ 20 \sin(2\pi 5t) + 20 \sin(2\pi 20t) + 20 \sin(2\pi 100t), & 0,4 \leq t < 0,5, \\ 20 \sin(2\pi 5t), & t \geq 0,5; \end{cases}$$

где время  $t$  указано в секундах. График функции представлен на Рис 1.

Скейлограмма данной функции будет зависеть от вида и параметров материнского вейвлета [9]. Например, для комплексного вейвлета Morlet

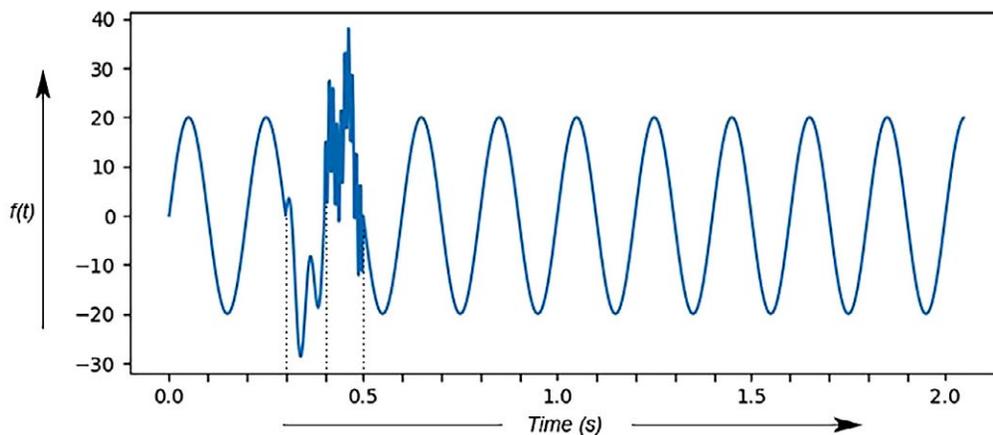


Рис. 1. Пример исследуемой функции

Fig. 1. Example of the function under study

в диапазоне масштабов (0;400] скейлограмма принимает вид, приведенный на Рис. 2.

Изображение скейлограммы на двумерной плоскости на основе цветового отображения высоты графика позволяет более четко выделять области с интересующими параметрами. Например, для скейлограммы, приведенной на Рис. 2, двумерное представление будет иметь вид Рис. 3.

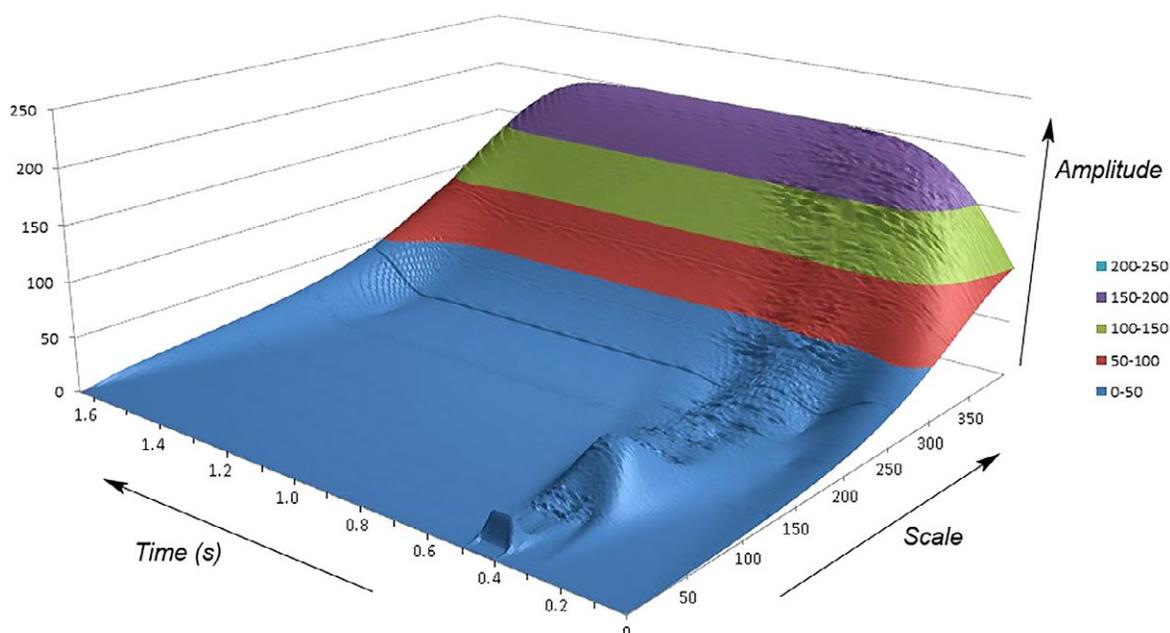
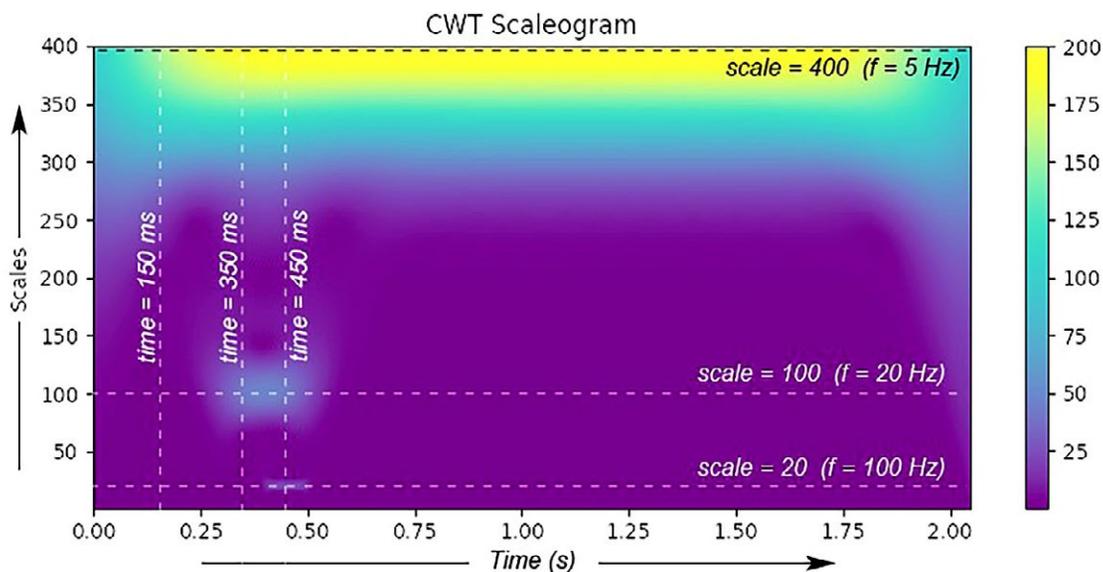


Рис. 2. Трехмерное представление скейлограммы приведенного сигнала

Fig. 2. Three-dimensional representation of the scalogram of the reduced signal



**Рис. 3.** Двумерное представление скейлограммы исследуемого сигнала с обозначением линий временных и масштабных срезов

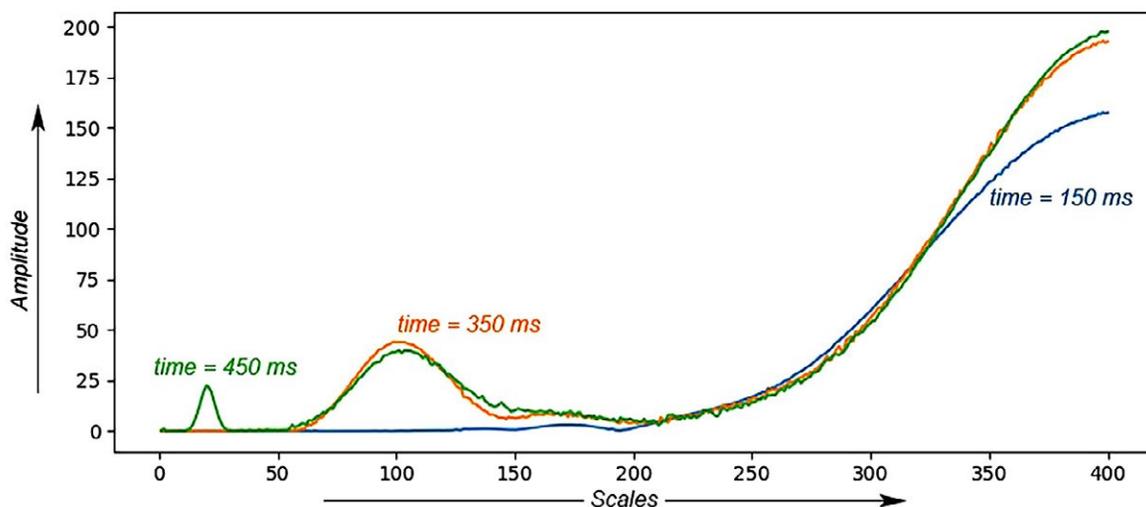
**Fig. 3.** Two-dimensional representation of the scalegram of the signal under study with the designation of time and scale slice lines

На скейлограмме хорошо видно, что высокочастотная составляющая сигнала ( $scale = 20$ ) проявляется в диапазоне (400; 500) мс и определена она с высокой детализацией. Низкочастотная составляющая сигнала ( $scale = 400$ ) определена на протяжении всего времени существования сигнала, но ее детализация достаточно низкая.

Для получения более детальной информации и удобства обработки данных можно рассмотреть срезы скейлограммы в той или иной плоскости. Например, если посмотреть на срезы при  $t = 150, 350$  и  $450$  мс, то можно заметить изменения в частотном составе сигнала, что показано на Рис. 4.

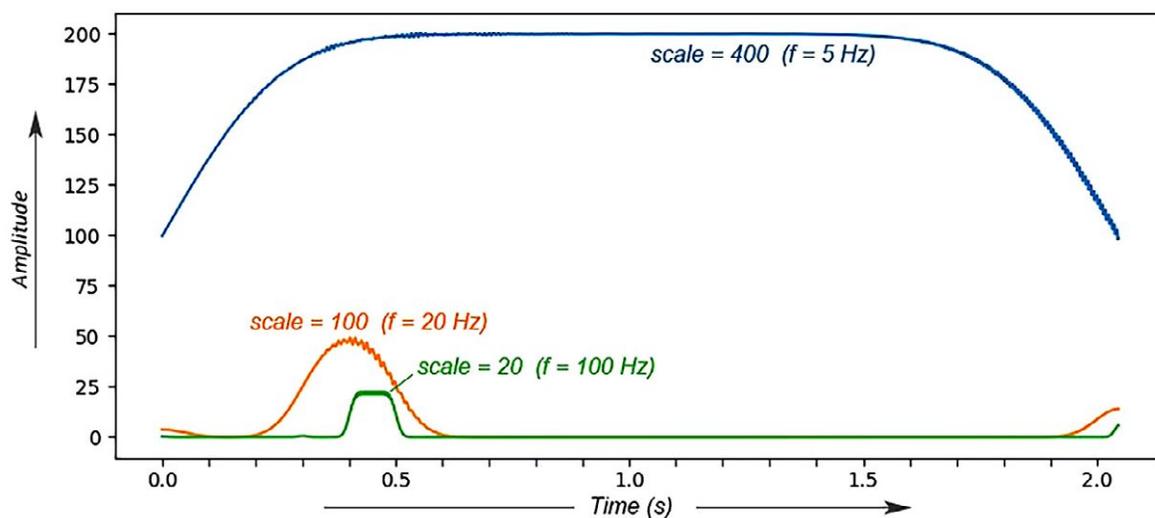
По срезу скейлограммы при фиксированном масштабе можно выявлять временные промежутки, когда та или иная составляющая сигнала проявляется наиболее ярко. Например, при масштабах 20, 100 и 400, соответствующих имеющимся в сигнале частотам 100, 20 и 5 Гц, видим графики, приведенные на Рис. 5.

Таким образом, непрерывный вейвлет-анализ сигнала позволяет эффективно исследовать локальные изменения в частотном составе сигнала [10]. Этот факт можно применить, например, для анализа акустических сигналов, возникающих при частичных разрядах силовых трансформаторов.



**Рис. 4.** Срезы скейлограммы при  $t = 150$  мс,  $t = 350$  мс и  $t = 450$  мс

**Fig. 4.** Slices of the scalegram at  $t = 150$  ms,  $t = 350$  ms and  $t = 450$  ms

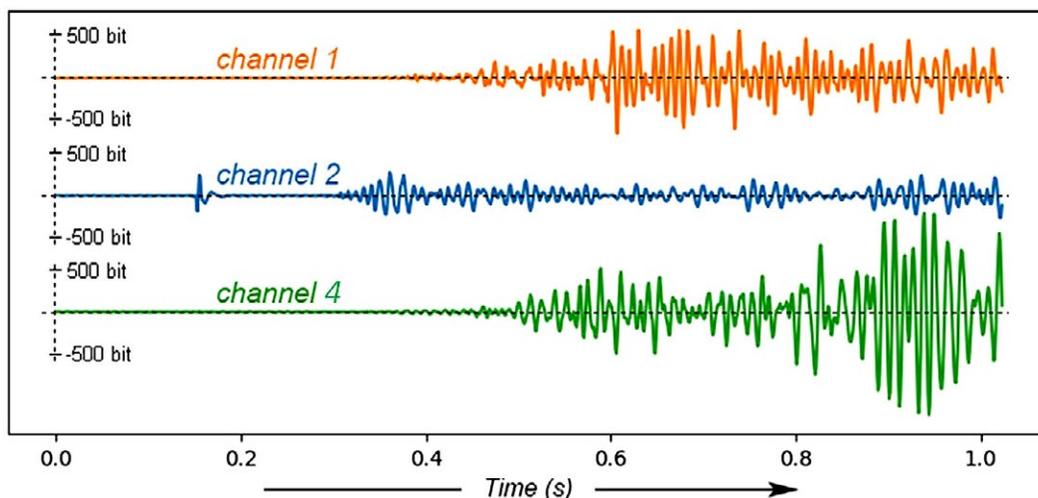


**Рис. 5.** Временные срезы скейлограммы при трех основных масштабах

**Fig. 5.** Time slices of the scalegram at three main scales

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

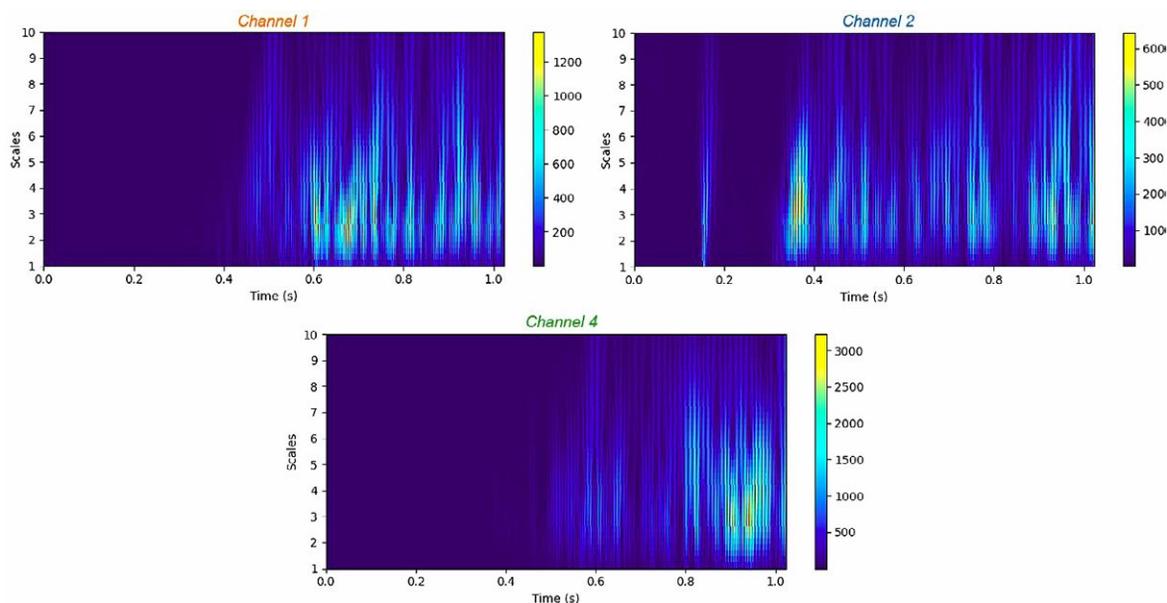
С помощью разработанного ИРНД с использованием четырех каналов СЦАД-16 были получены сигналы различных видов дефектов. Например, один из сигналов, имитирующий пробой изоляции, фиксировался тремя каналами: 1, 2 и 4. Сигналы, зафиксированные на каждом из каналов, представлены на Рис. 6.



**Рис. 6.** Акустические сигналы, зафиксированные при имитации дефекта «пробой изоляции»

**Fig. 6.** Acoustic signals recorded during the simulation of the defect «insulation breakdown»

При применении к данным сигналам непрерывного вейвлет-преобразования с материнским вейлетом «Мексиканская шляпа» получены скейлограммы, приведенные на Рис. 7.



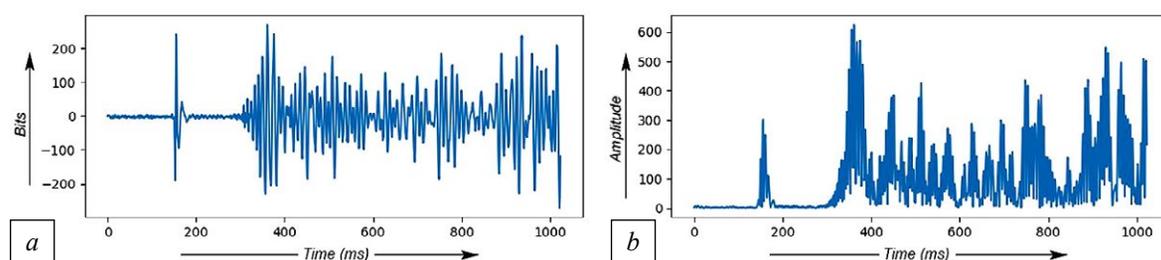
**Рис. 7.** Скейлограммы акустических сигналов, зафиксированных при имитации дефекта «пробой изоляции»

**Fig. 7.** Scalegrams of acoustic signals recorded during the simulation defect “insulation breakdown”

По приведенным скейлограммам видно, что наиболее информативные яркие области зафиксированы при масштабе  $scale = 3$ , что соответствует частоте около 330 Гц (соответствие масштаба и частоты определяется видом материнского вейвлета). Также на Рис. 7 хорошо виден локальный всплеск на втором канале, что является одной из отличительных черт сигналов, возникающих при данном виде дефекта.

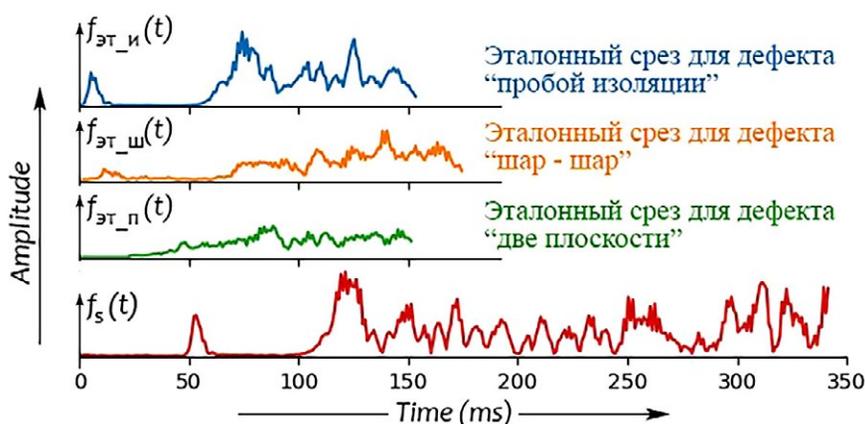
На основе обработки множества однотипных сигналов получены их скейлограммы. Для приведенного выше сигнала обработка выполнялась по второму каналу. Исходный сигнал и срез его скейлограммы при фиксированном, наиболее информативном масштабе приведены на Рис. 8.

Аналогичные срезы были получены для дефектов типа «шар – шар» и «две плоскости» [4, 5]. Для формирования эталона было проведено



**Рис. 8.** Исходный сигнал (a) и временной срез его скейлограммы на фиксированном масштабе (b)

**Fig. 8.** The original signal (a) and the time slice of its scalegram on a fixed scale (b)



**Рис. 9.** Временной срез скейлограммы исследуемого сигнала  $f_s(t)$  и эталонные срезы различных дефектов

**Fig. 9.** Time slice of the scalegram of the studied signal  $f_s(t)$  and reference slices of various defects

усреднение максимальных значений полученного среза и выделение наиболее характерного участка. В итоге получены эталонные срезы скейлограммы для трех видов дефектов, представленные на Рис. 9.

С каждым из эталонов  $f_{\text{эт}}(t)$  было выполнено сравнение срезов скейлограммы оригинальных сигналов  $f_s(t)$  путем вычисления коэффициента  $K_s$ , характеризующего степень различия двух функций:

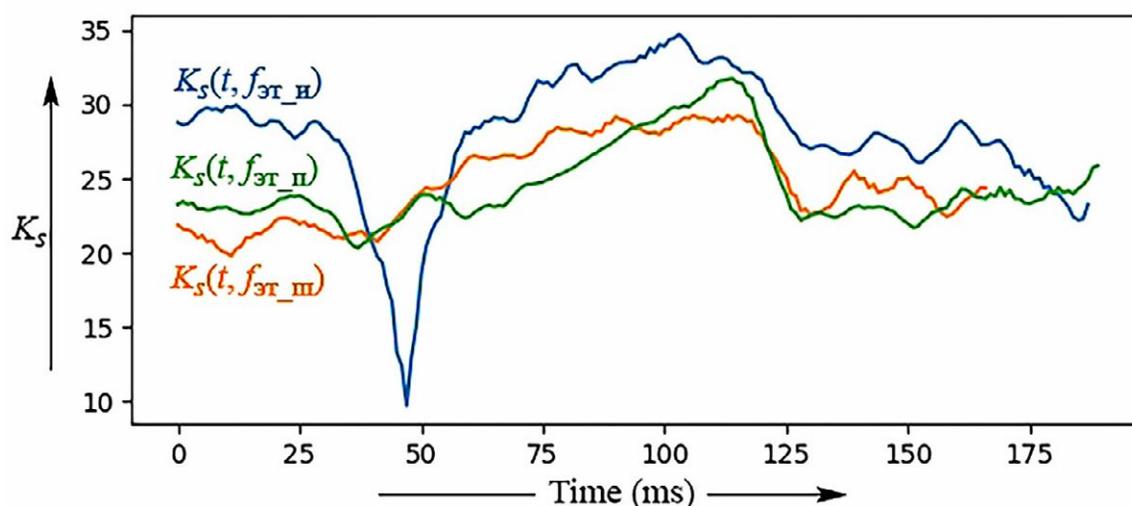
$$K_s(t, f_{\text{эт}}) = \frac{1}{T_{\text{эт}}} \int_0^{T_{\text{эт}}} (f_s(t+x) - f_{\text{эт}}(x))^2 dx \quad (3)$$

где  $T_{\text{эт}}$  – длительность эталонного сигнала.

Для приведенного в работе сигнала, представляющего дефект «пробой изоляции», временное изменение данного коэффициента с применением трех вышеописанных эталонов приведено на Рис. 10.

Как видно из рисунка, в 45 мс эталонный образец  $f_{\text{эт}_И}(t)$  максимально совпадает с проверяемым сигналом  $f_s(t)$ , что подтверждается низким локализованным значением коэффициента  $K_s(t, f_{\text{эт}_И})$  (отличия минимальны).

Таким образом, применение непрерывного вейвлет-преобразования и сравнение срезов полученных скейлограмм с эталонными срезами позволяет различать сигналы, полученные от СЦАД, и диагностировать по ним различные виды дефектов силовых трансформаторов.



**Рис. 10.** Динамика изменения коэффициента  $K_s$  при сравнении исследуемого сигнала с тремя эталонными

**Fig. 10.** Dynamics of change in the coefficient  $K_s$  when comparing the studied signal with three reference ones

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведена информация по разработке методики обработки сигналов акустического контроля силовых трансформаторов с использованием вейвлет преобразования, позволяющей распознавать различные состояния изоляции путем сравнения сигналов с эталонными сигналами, полученными от имитатора дефектов.

## ВЫВОДЫ

Использование вейвлет преобразования при обработке сигналов диагностирования, позволит сопоставлять сигналы, измеренные на силовом оборудовании, с сигналами, полученными с использованием имитатора дефектов, что позволит определять не только наличие, но и виды дефектов в силовом оборудовании.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00477, <https://rscf.ru/project/23-29-00477/>

### Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

### The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 2004.
2. Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Сравнение акустических сигналов и видеоизображений высоковольтных разрядов в масле в задачах диагностирования силовых трансформаторов // Известия Транссиба. 2023. Т. 56, № 4. С. 121–134. EDN: OZHBWL
3. Волчанина М.А., Кузнецов А.А., Горлов А.В. Повышение достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры // Электротехнические системы и комплексы. 2021. Т. 53, № 4. С. 33–38. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38
4. Черемисин В.Т., Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6, № 4. С. 161–171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171 EDN: DRLMYV

5. Горлов А.В., Волчанина М.А., Пономарев А.В., Кузнецов А.А. Исследование высоковольтных разрядов в масле на имитаторе с различным набором дефектов // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2023. Т. 9, № 1. С. 83–94. doi: 10.17816/transsyst20239183-94 EDN: WPBXRM
6. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс, 2010.
7. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
8. Осипов Д.С., Долгих Н.Н., Дюба Е.А. Анализ несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей на основе вейвлет преобразования // *Вестник Югорского государственного университета*. 2023. № 3. С. 117–126. doi: 10.18822/byusu202303117-126
9. Осипов Д.С. Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения // *Омский научный вестник*. 2018. Т. 162, № 6. С. 71–75. doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-71-75
10. Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С. Использование вейвлет-преобразований для локации сигналов акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 10. С. 18–26. doi: 10.14489/td.2017.10

## REFERENCES

1. Ser'eznov AN, Stepanova LN, Murav'ev VV. *Diagnostics of transport objects using acoustic emission method*. Moscow: Mashinostroenie; 2004. (In Russ).
2. Kuznecov AA, Volchanina MA, Gorlov AV. Comparison of acoustic signals and video images of high-voltage discharges in oil in problems of power transformer diagnostics. *Izvestiya Transsiba*. 2023;4(56):121–134. (In Russ). EDN: OZHBWL
3. Volchanina MA, Kuznecov AA, Gorlov AV. Increasing the Reliability of Power Transformers Diagnosing under Seasonal Temperature Changes. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021;4(53):33–38. (In Russ). doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38
4. Cheremisin VT, Kuznecov AA, Volchanina MA, Gorlov AV. Measuring the acoustic signals parameters of the defect simulator of power transformers. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(4):161–171. (In Russ). doi: 10.17816/transsyst202064161-171 EDN: DRLMYV
5. Gorlov AV, Volchanina MA, Ponomarev AV, Kuznecov AA. Investigation of high-voltage discharge in oil on a simulator with a different set of defects. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):83–94. (In Russ). doi: 10.17816/transsyst20239183-94 EDN: WPBXRM
6. Dyakonov VP. *Wavelets. From Theory to Practice*. Moscow: SOLON-Press; 2010. (In Russ).
7. Dobeshi I. *Ten Lectures on Wavelets*. Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika»; 2001. (In Russ).

8. Osipov DC, Dolgih NN, Dyuba EA. Analysis of non-sinusoidal non-stationary modes of electric networks based on the wavelet transformation. *Yugra State University Bulletin*. 2023;3:117–126. (In Russ). doi: 10.18822/byusu202303117-126
9. Osipov DC. Development of criterion for choosing optimal type of mother wavelet in problem of calculating active and reactive power at power systems. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;6(162):71–75. (In Russ). doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-71-75
10. Stepanova LN, Ser'eznov AN, Kabanov SI, Ramazanov IS. Wavelet transform application for acoustic emission signals location. *Kontrol. Diagnostika*. 2017;10:18–26. (In Russ). doi: 10.14489/td.2017.10

**Сведения об авторах:**

**Кузнецов Андрей Альбертович**, доктор технических наук, профессор;  
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;  
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

**Пономарев Антон Витальевич**, кандидат технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402;  
E-mail: antonyswork@gmail.com

**Горлов Антон Вячеславович**, аспирант;  
eLibrary SPIN: 8845-5070; ORCID: 0000-0002-8413-6612;  
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

**Волчанина Мария Андреевна**, кандидат технических наук, инженер;  
eLibrary SPIN: 2130-4637;  
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

**Information about the authors:**

**Andrey A. Kuznetsov**, Doctor of Technical Science, professor;  
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;  
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

**Anton V. Ponomarev**, Candidate of Technical Science, Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402  
E-mail: antonyswork@gmail.com

**Anton V. Gorlov**, Postgraduate student;  
eLibrary SPIN: 8845-5070; ORCID: 0000-0002-8413-6612  
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

**Maria A. Volchanina**, Candidate of Technical Science, engineer;  
eLibrary SPIN: 2130-4637;  
E-mail: kuznetcova994@gmail.com