

## Сравнение основных частотно-временных преобразований спектрального анализа сигналов акустической эмиссии

© 2022

*Растегаева Инна Ивановна*<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

*Растегаев Игорь Анатольевич*<sup>\*2</sup>, кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник НИО-2 НИИ прогрессивных технологий

*Аглетдинов Эйнара Альбертович*<sup>3</sup>, кандидат физико-математических наук,

младший научный сотрудник НИО-2 НИИ прогрессивных технологий

*Мерсон Дмитрий Львович*<sup>4</sup>, доктор физико-математических наук, профессор,

директор НИИ прогрессивных технологий

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

\*E-mail: [RastIgaev@yandex.ru](mailto:RastIgaev@yandex.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7634-2328>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3807-8105>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-941X>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-4115>

*Поступила в редакцию 28.12.2021*

*Принята к публикации 11.03.2022*

**Аннотация:** В связи с интенсивным развитием спектральных методов анализа акустической эмиссии на передний план выходит проблема обеспечения наилучшего частотного и временного разрешения путем применения определенных алгоритмов частотно-временного преобразования. Основными используемыми или интегрируемыми в метод акустической эмиссии частотно-временными преобразованиями сегодня являются: оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, псевдопреобразование Вигнера – Вилля, преобразование Чои – Вильямса и псевдопреобразование Гильберта – Хуанга. Однако в литературных источниках недостаточно информации, позволяющей оценить эффективность их применения для выделения особенностей сигналов акустической эмиссии дискретного и непрерывного вида. Исходя из этого, на синтетических и реальных модельных сигналах проведен экспериментальный сравнительный анализ работоспособности обозначенных частотно-временных преобразований. Первые модельные сигналы представляли собой chirp-сигнал, идеальные синусоиды и дельта-функцию Дирака, а вторые – дискретный сигнал акустической эмиссии от источника Су Нельсона, разложенный в акустическом канале на дисперсионные моды, и непрерывный акустический сигнал от истечения воздуха через калиброванное отверстие. Показано, что при перепаде энергии частотных составляющих порядка 25 дБ установить все контрольные особенности модельных сигналов оказались способны только преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Преобразование Вигнера – Вилля, Чои – Вильямса и Гильберта – Хуанга, показавшие более высокое частотно-временное разрешение, не выявили частотные составляющие низкой энергии. Поэтому их можно рекомендовать для обнаружения спектральных изменений в резонансных и дискретных сигналах, но в узком энергетическом диапазоне. Для анализа непрерывной акустической эмиссии наилучший результат продемонстрировали преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Однако для применения последнего требуется процедура выбора оптимальной базисной функции. Установлено, что преобразование Гильберта – Хуанга позволяет выделять флуктуации частоты, но для повышения достоверности его результатов требуется проработка способов повышения чувствительности и выделения основной информации из спектрограмм.

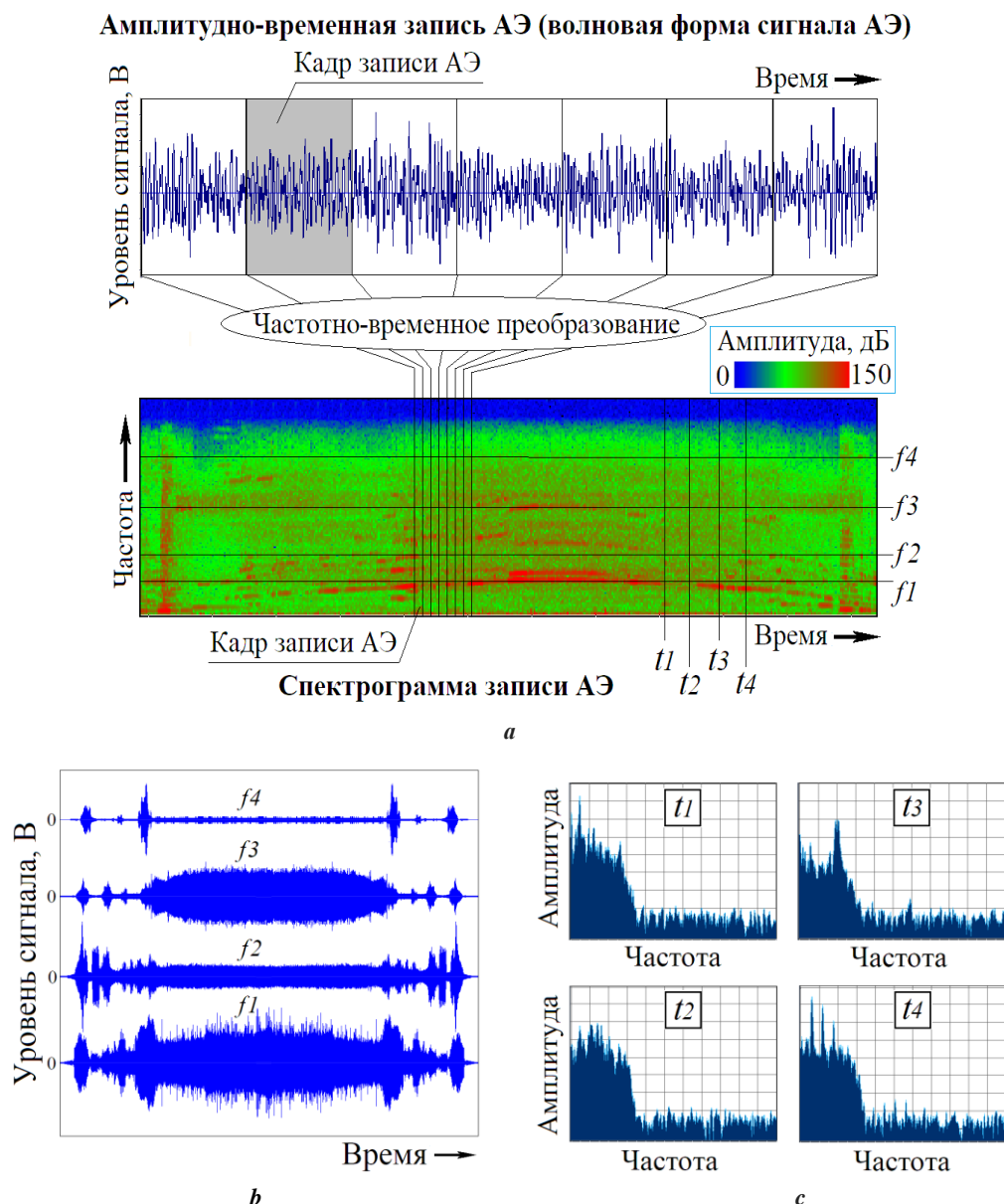
**Ключевые слова:** спектральный анализ; преобразование Фурье; вейвлет-преобразование; преобразование Вигнера – Вилля; преобразование Чои – Вильямса; преобразование Гильберта – Хуанга; акустическая эмиссия.

**Для цитирования:** Растегаева И.И., Растегаев И.А., Аглетдинов Э.А., Мерсон Д.Л. Сравнение основных частотно-временных преобразований спектрального анализа сигналов акустической эмиссии // Frontier Materials and Technologies. 2022. № 1. С. 49–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-49-60.

### ВВЕДЕНИЕ

Многие исследования показали, что добавление частотных оценочных параметров к параметрам оценки амплитудно-волновой формы (АВФ) сигналов позволяет существенно повысить информативность результатов обработки данных. Для этой процедуры требуется определить амплитудно-частотную характеристику сигнала (АЧХ, или периодограмму) и оценить ее частотные составляющие суммарно или отдельно по каждой частоте или полосам частот. Повышение информативности достигается за счет более объективной оценки нестационарных сигналов и эффектов наложения (сло-

жения) волн, что часто затруднительно или вообще невозможно выполнить по АВФ (рис. 1). В методе акустической эмиссии (АЭ) периодограммы используются при: вычислении энергии (мощности) сигналов [1], полосовой частотной фильтрации или широкополосном шумопонижении [2–4], кластеризации данных и распознавании источников АЭ [5–7], оценке передаточных характеристик акустического тракта и затухания в нем [8], гармоническом анализе работы узлов циклического действия [9] и т. д. Однако периодограмма не позволяет обнаружить, в какой момент времени возникают те или иные отличия в частотной области, т. е. не отображает динамику частотных изменений в сигнале (рис. 1).



**Рис. 1.** Схематичный пример построения спектрограммы (а) и объем получаемых данных при ЧВП акустико-эмиссионного сигнала непрерывного вида:  
**б** – волновая форма АЭ, восстановленная по продольным срезам спектрограммы записи (а) по полосам частот  $f_1...f_4$ , или полосовая фильтрация сигнала;  
**с** – поперечные срезы спектрограммы записи (а) по времени записи  $t_1...t_4$ , или периодограммы  
**Fig. 1.** A schematic example of the construction of a spectrogram (a) and the amount of data obtained during the time-frequency transformations of a continuous AE signal:  
**b** – the AE waveform reconstructed from the longitudinal slices of a recording spectrogram (a) from the frequency bands  $f_1...f_4$  or signal bandpass filtering;  
**c** – cross-sections of a recording spectrogram (a) from the recording time  $t_1...t_4$  or periodograms

Динамику локальных изменений по каждой спектральной линии позволяют установить спектрограммы, являющиеся итогом частотно-временного преобразования (ЧВП). Спектрограмма (рис. 1–4) представляет сигнал в виде трехмерной диаграммы, показывающей изменение его спектральной плотности мощности во времени. Таким образом, переход от периодограмм к спектрограммам позволяет расширить возможности спектрального анализа данных за счет добавления временных характеристик акустико-эмиссионных сигналов (время прихода сигнала, длительность сигнала, времена

наложения сигналов, задержка дисперсионных мод сигнала и т. д. [4; 10; 11]), а также локальных энергетических изменений (главной частоты, перераспределения частот, фрактальности и т. д. [12]). Обозначенное достигается за счет использования продольных ( $f_1...f_4$ ) и поперечных ( $t_1...t_4$ ) срезов спектрограммы (рис. 1).

Традиционно для получения периодограмм и спектрограмм использовались алгоритмы на основе преобразования Фурье, но в настоящее время разработано множество видов и подвидов ЧВП другого типа [13; 14]. Сегодня для решения различных практических

задач в акустико-эмиссионном методе известно применение пяти основных видов ЧВП: оконное преобразование Фурье (Short-Time Fourier Transform, или STFT), вейвлет-преобразование (Wavelet Transform, или WT), псевдопреобразование Вигнера – Вилля (Smoothed Pseudo Wigner Distribution, или SPWD), преобразование Чои – Вильямса (Choi-Williams Distribution, или ChWD) и псевдопреобразование Гильберта – Хуанга (Hilbert-Huang Transform, или ННТ). Несомненно, каждый вид ЧВП имеет свои сильные и слабые стороны, но прежде всего они отличаются друг от друга помехоустойчивостью и частотно-временным разрешением, что экспериментально определяется путем их сравнения на модельных сигналах или контрольных выборках. Однако работы по их комплексному сравнению на одних и тех же выборках нам неизвестны, что не обеспечивает прозрачности их выбора и применения для разных задач в акустико-эмиссионном методе.

Цель работы – сравнительный анализ эффективности применения основных видов ЧВП для распознавания сигналов АЭ, в качестве которых были выбраны три вида специальных модельных сигналов: первый – синтезированный из синусоид строго заданного частотного диапазона с интегрированной дельта-функцией; второй – экспериментально полученный сигнал дискретной АЭ, разложенный в акустическом канале на дисперсионные моды; третий – экспериментально полученный сигнал непрерывной АЭ от истечения воздуха через калиброванное отверстие.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предметом исследований являются перечисленные выше основные виды ЧВП, которые подробно математически описаны в литературных источниках: STFT, WT, SPWD и ChWD в [15; 16], а ННТ в [17; 18]. Отметим, что общей сутью ЧВП является разделение сигнала на малые временные отрезки – кадры (рис. 1) с последующим их разложением по базисным функциям. У каждого ЧВП эти функции свои: при STFT используются бесконечные гармонические функции; при WT – короткие волновые функции разного вида (вейвлеты); при SPWD и ChWD – автокорреляционная функция анализируемого сигнала, получаемая сверткой его фрагментов на рассматриваемом временном отрезке; при ННТ – эмпирические модовые декомпозиции анализируемого сигнала, являющиеся средним между огибающими его максимумами и минимумами на разном масштабном уровне. Однако даже из такого краткого описания видно, что разрешение SPWD, ChWD и ННТ зависит от свойств самого анализируемого сигнала, а STFT и WT – от уровня согласованности свойств сигнала с нормированной базисной функцией.

Методами исследования являются специальные модельные сигналы заданного вида, применяющиеся для исследования эффективности различных алгоритмов обработки в теории сигналов и методе АЭ [19–21]. При этом все сигналы относительно минимального условия Котельникова (Найквиста – Шеннона) имели избыточное количество отсчетов в сигнале, так как соотношение [частота дискретизации = 2 МГц / максимальная частота спектра = 500 кГц]=4>2.

Первый модельный сигнал (рис. 2 а) синтезирован на компьютере и имеет четыре части. Первая часть ( $t_1 \div t_2 = 0 \div 830$  мкс) представляет собой синусоидальный сигнал постоянной амплитуды с линейно изменяющейся частотой от  $f_1 = 90$  до  $f_2 = 180$  кГц (Sine Sweep-сигнал, или chirp-сигнал). Вторая часть ( $t_2 \div t_3 = 830 \div 1460$  мкс) – синусоида частотой  $f_2 = 180$  кГц. Третья часть ( $t_3 \div t_{rec} = 1460 \div 2000$  мкс) – синусоида частотой  $f_3 = 365$  кГц. Четвертая часть сигнала –  $\delta$ -функция Дирака, вставленная в третью часть сигнала на  $t_4 = 1770$  мкс.

Второй и третий модельные сигналы (рис. 3 а и 4 а) получены на универсальном учебно-исследовательском стенде, подробное описание которого приведено в [22]. При этом второй сигнал генерировался имитатором Су Нельсона [7] и претерпел дисперсию при распространении на расстояние 1 м в стальной стенке макета сосуда давления (объемного макета) толщиной 8 мм. Третий модельный сигнал представляет собой запись акустического шума, сопровождающего истечение воздуха через отверстие диффузора  $\varnothing 0,75$  мм с перепадом давления 0,4 МПа. Регистрация акустико-эмиссионных сигналов 2-го и 3-го типа со стенда проводилась системой A-Line 32D PCI-8E (ООО «Интерюнис-ИТ», Москва) с полосовыми пьезопреобразователями П111-(0,05-0,8) и предварительными усилителями ПАЭФ-014 при общем усилении 26 дБ.

Полученные модельные сигналы позволяют исследовать частотно-временные трансформации, так как имеется точное знание их положения по времени и частоте. Так, первый модельный сигнал позволяет наглядно показать погрешность расчета относительно жестко заданных частот  $f_j$  и временных точек их изменения в сигнале  $t_i$ , второй – правильность оценки дисперсионного разложения сигнала на две главные нулевые моды волн Лэмба ( $A_0$  – ассиметричная,  $S_0$  – симметричная), которые для объекта в виде пластины хорошо поддаются расчету. При этом расстояние между источником и преобразователем АЭ выбиралось так, чтобы их амплитуды значительно отличались друг от друга ( $A_0/S_0 \sim 5$  раз или 14 дБ). Расчет теоретических дисперсионных кривых волн Лэмба, представленных на рис. 3, проводился по [23] с последующим переводом их в координаты «частота/время» и наложением на спектрограмму способом [21]. Здесь контрольными параметрами являются время прихода  $A_0$  и  $S_0$  мод по их пиковым значениям, зная которые можно установить величину соотношения их пиковых энергетических значений  $A_0/S_0$  в амплитудной и частотных областях (где  $A_0/S_0$  заменяется отношением пиковых значений спектральной плотности мощности ( $G_{A_0}/G_{S_0}$ ) вблизи  $t_{A_0}$  и  $t_{S_0}$  соответственно).

Третий вид модельного сигнала представляет собой шумоподобный источник в виде чередующихся пульсаций (пачек сигналов) уплотнения и разряжения выходящего через жиклер воздуха, резонансные частоты которых подчиняются закону кратности обертонов [24]. Поэтому из-за близости амплитуд пачки сигналов плохо видны в амплитудно-временной области и хорошо в частотно-временной. При этом минимальное искажение пачек достигалось установкой преобразователя АЭ (записью АЭ) непосредственно в месте истечения воздуха (вблизи жиклера). Здесь контрольными параметрами

являются количество пачек акустико-эмиссионных сигналов ( $N$ ), различимых в частотных областях, а также значения основной частоты АЭ ( $f_0$ ) и ее первой и второй гармоник ( $f_1=2\cdot f_0$  и  $f_2=3\cdot f_0$ ) и  $f'$  – ложные частоты, или артефакты, которые возникли при ЧВП. При расчете по [24] для гладкого канала диаметром диффузора и перепада давления, указанного выше, получено  $f_0=93$  кГц,  $f_1=186$  кГц,  $f_2=279$  кГц.

Среднее значение и доверительный интервал оценки всех контрольных параметров определялись методом Стьюдента при уровне надежности 0,95. Чтобы учесть в оценке размах изменения частотных параметров, их первое значение соответствовало максимальному значению на контрольной временной метке, а второе и третье принималось при  $\pm 2\sigma$  его распределения, где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемые результаты ЧВП выбранных модельных сигналов получены при многоитерационном вычислении с изменением всех возможных настроечных (управляющих) параметров преобразований (см. подробнее в литературных источниках по каждому виду ЧВП, указанных выше) так, чтобы достичь максимально лучшего результата их применения ко всем модельным сигналам одновременно. В связи с этим диапазон изменения величин спектральных составляющих между спектрограммами ЧВП существенно различается, поэтому цвет на рис. 2–4 показывает диапазон изменения спектральных составляющих условно.

Результаты применения исследуемых ЧВП к модельным сигналам показаны на рис. 2–4 и сведены в таблицы 1–3. Из них следует, что ЧВП одинаково отображают основные закономерности изменения в сигналах, но с разной степенью детализации (частотно-временным разрешением). Рассмотрим эти результаты подробнее.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что при достаточном соотношении частоты дискретизации к ширине анализируемого частотного диапазона результат STFT определяется типом используемой оконной функции, которая позволяет управлять эффектом перетекания энергии в спектральные составляющие основного лепестка (боковые лепестки) [16]. Подробное исследование большого числа оконных функций для Фурье-преобразования приведено в работах [25; 26]. В настоящей работе исследовались основные из них: треугольное окно Барлетта, окно Ханнинга, окно Хэмминга, окно Блэкманна, окно Гаусса и окно Блэкманна – Харриса. Лучшие результаты получены при использовании последнего окна, поэтому далее обсуждаются только они.

При STFT среднее расхождение определения контрольных временных точек изменения в сигналах 1-го и 2-го типа составляет 8,34 мкс, а частот (по 1 сигналу) – 0,45 кГц. По ширине полос вокруг главного максимума на рис. 1–3 и доверительному интервалу в таблицах 1 и 2 видно, что точность STFT с окном Блэкманна – Харриса более чем в 4 раза уступает ННТ, ChWD и SPWD, но лучше WT в 2 раза. При этом WT имеет в 1,2 раза меньшее среднее расхождение определения контрольных

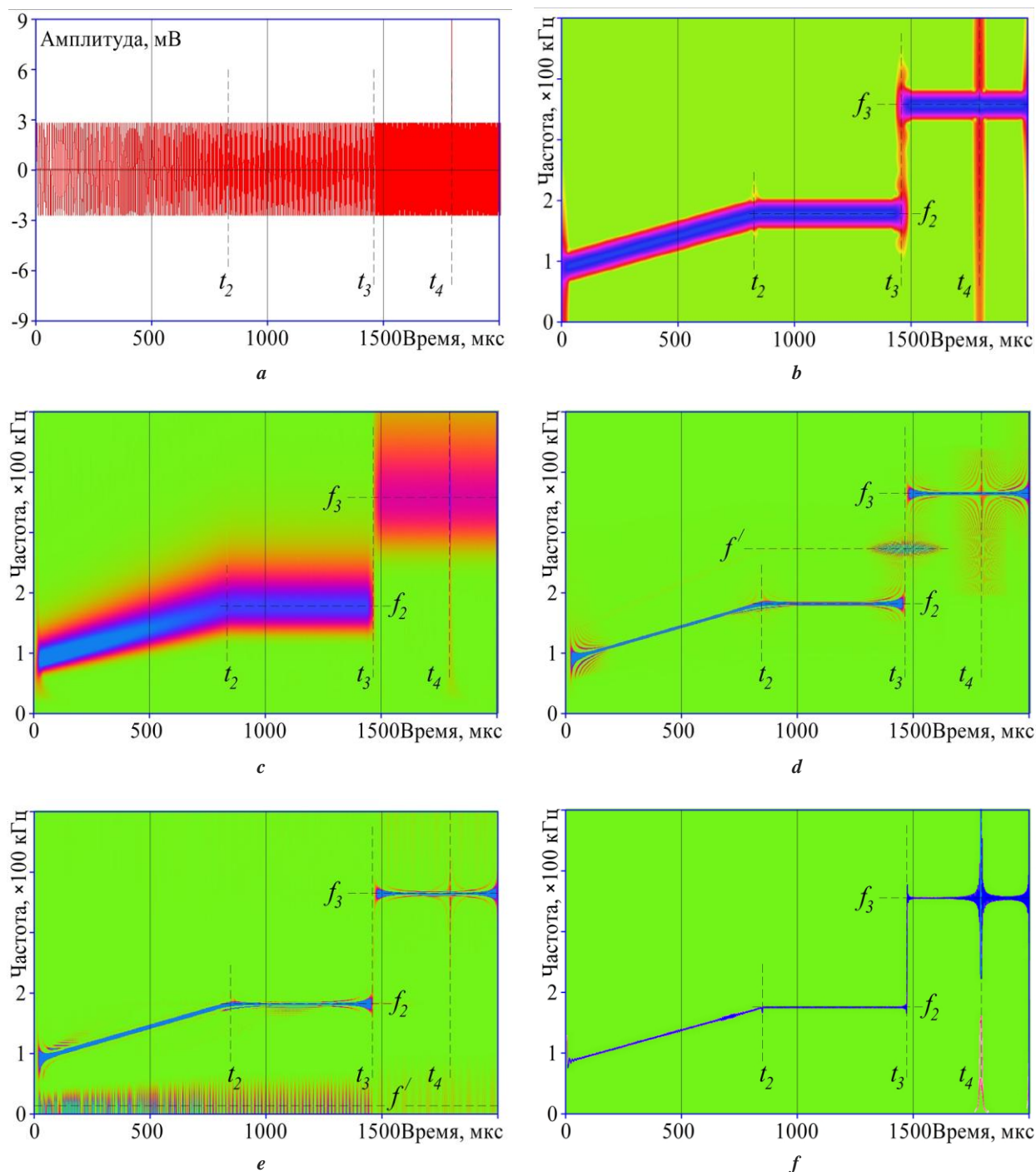
временных точек в сигналах 1-го и 2-го типа, которое составляет 6,94 мкс, но в 13 раз большее частотное расхождение, которое составляет (по 1 сигналу) 6,05 кГц. При WT специально использовался только один вид базисной функции – вейвлет Морле, который, исходя из литературного обзора, наиболее часто применяется в практике АЭ. Известно, что эффективность применения WT всецело определяется правильностью выбора типа вейвлета, который зачастую субъективен [27]. Поэтому, скорее всего, подбором оптимального вейвлета для каждого типа сигнала возможно улучшить полученные результаты, но этот вопрос есть смысл исследовать при адаптации WT под каждую конкретную задачу. В данной работе ставилась задача исследовать универсальность применения основного в методе АЭ вейвлета для обнаружения сигналов нескольких типов.

Из рис. 2–4 и таблиц 1–3 видно, что минимальные доверительные интервалы, а значит, разброс значений имеют преобразования ННТ, ChWD и SPWD. Расхождение определения контрольных временных точек изменения в сигналах 1-го и 2-го типа составляет 8,57; 6,55 и 5,37 мкс и частот (по 1 сигналу) – 0,35; 0,4 и 0,4 кГц соответственно, т. е. они обладают лучшим частотным разрешением. Однако преобразования SPWD и ChWD имеют существенные интерференционные артефакты, что хорошо видно на рис. 2–4 и в таблицах 1 и 3, по параметру  $f'$ . Артефакты имеют STFT и WT, но они гораздо меньше по энергетическому уровню относительно частотных составляющих, где происходит главное изменение, поэтому возможно их подавление более простыми средствами. Сравнивая SPWD и ChWD между собой, видим, что ChWD имеет меньшее количество интерференционных составляющих вокруг главных частотных изменений в сигнале, но существенные артефакты в низкочастотной области, которая наиболее важна при анализе сигналов, полученных в условиях высокого затухания.

Рис. 3 показывает, что результат ЧВП максимально близок к расчетным дисперсионным кривым у SPWD, ChWD и ННТ. При этом ННТ позволяет разглядеть флуктуации частоты на моде  $S_0$ , что недоступно при применении других преобразований. Однако при пятикратной разнице амплитуды между модой  $S_0$  и  $A_0$  четкой видимой на спектрограммах остается только мода  $S_0$ . STFT и WT при худшем частотном разрешении отображают моду  $A_0$  с достаточным для ее идентификации энергетическим уровнем с близким к расчетному соотношению  $A_0/S_0$  (таблица 2). Последнее логично вытекает из теоремы Парсевала, однако поскольку для достижения лучших результатов использовались процедуры усреднения по всем осям, то возможны отклонения  $A_0/S_0$  от расчетного значения, которые должны быть учтены при ЧВП, что и проверялось. В отличие от STFT и WT, повышение чувствительности SPWD и ChWD невозможно, поскольку ему сопутствует увеличение ложных частотных составляющих (артефактов) либо критическое снижение частотно-временного разрешения.

Для ННТ в [17; 18] показано, что процедура ЧВП самодостаточна (адаптивна) и в стандартной реализации не имеет настроечных параметров. Возможно, сегодня имеются модификации ННТ, включающие настроечные (управляющие) параметры, позволяющие



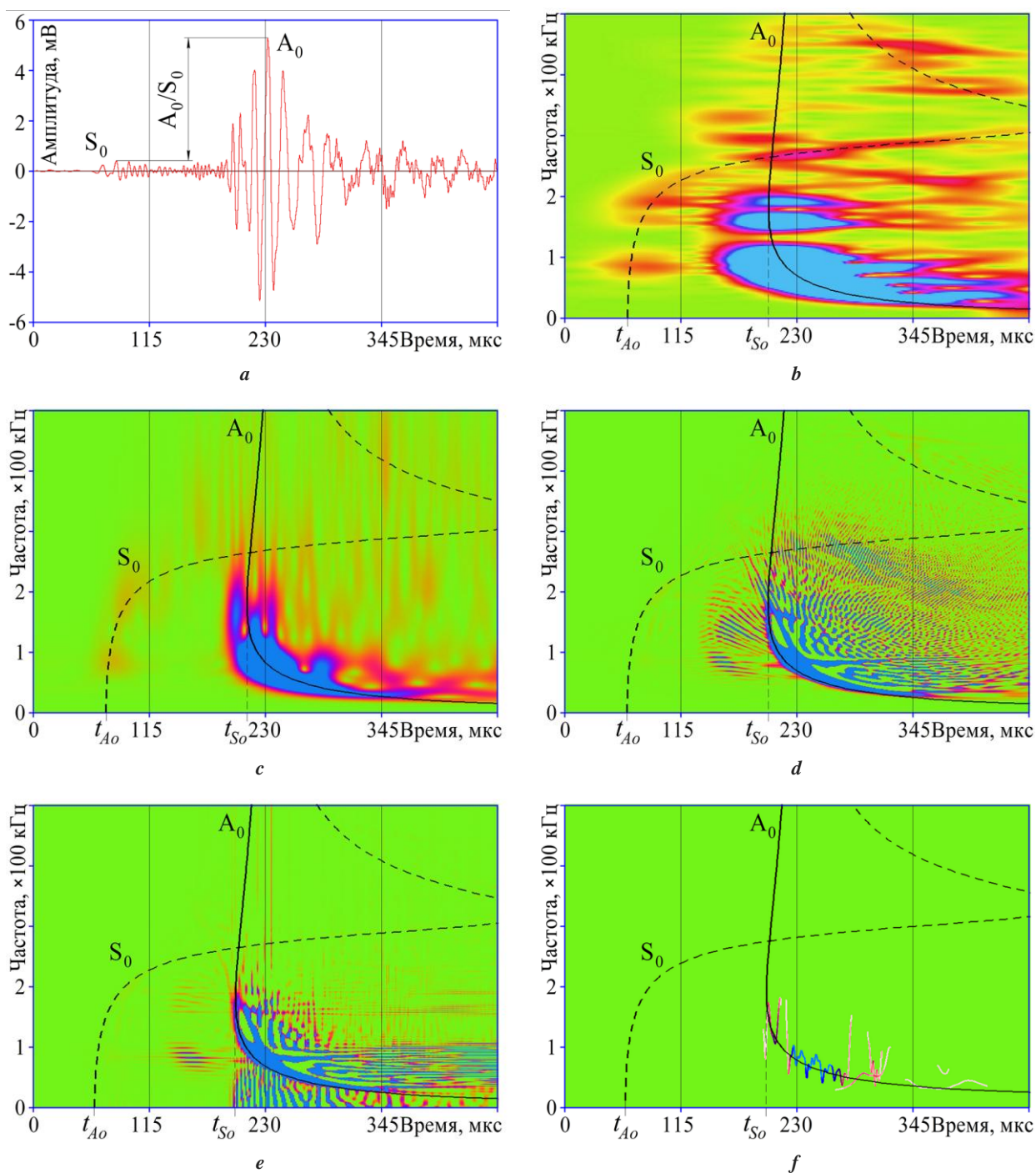


**Рис. 2.** Общий вид модельного сигнала (а) и его частотно-временное представление, полученное с помощью преобразования: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e), HHT (f).

На рисунке обозначены: цвет – условный диапазон изменения мощности (min max);  $t_i$  – временная точка изменения в сигнале ( $i=1...4$ );  $f_j$  – частота синусоиды ( $j=1...3$ );  $f'$  – ложные частоты, или артефакты, которые возникли при ЧВП

**Fig. 2.** General view of a simulated signal (a) and its time-frequency representation obtained using the transformation: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e), and HHT (f).

The figure shows: color – the conditional range of power changes (min max);  $t_i$  – the time point of change in the signal ( $i=1...4$ );  $f_j$  – the sine curve frequency ( $j=1...3$ ),  $f'$  – false frequencies or artifacts occurred during the time-frequency transformations

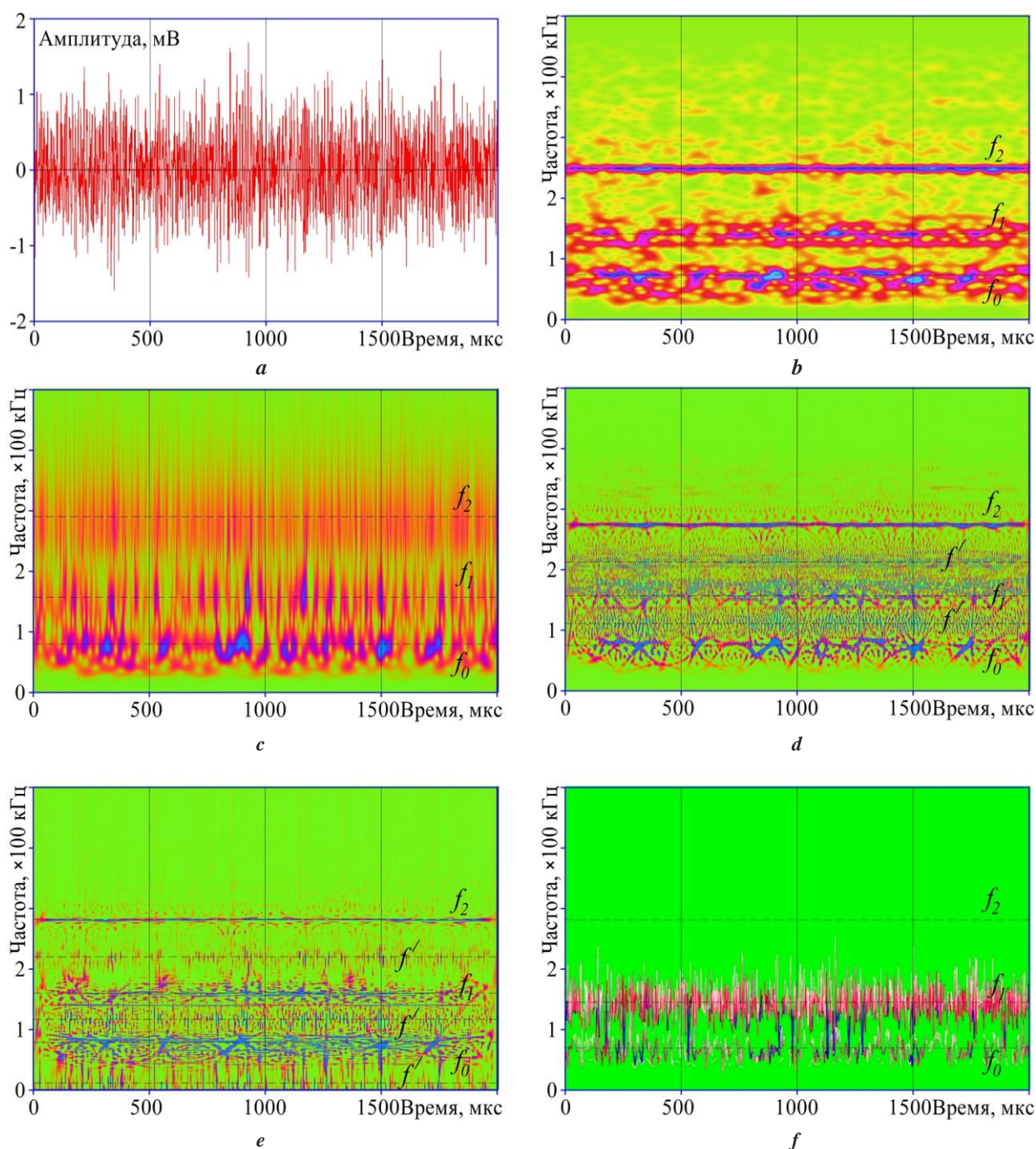


**Рис. 3.** Общий вид сигнала от источника Су Нельсона (а) и его частотно-временное представление, полученное с помощью преобразования: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e), HHT (f).

На рисунке обозначены: цвет – условный диапазон изменения мощности (min max); линии: — – мода A<sub>0</sub>, - - - - мода S<sub>0</sub>; t<sub>A0</sub> и t<sub>S0</sub> – время прихода A<sub>0</sub> и S<sub>0</sub> мод соответственно

**Fig. 3.** General view of a signal from the Hsu Nelson source (a) and its time-frequency representation obtained using the transformation: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e), HHT (f).

The figure shows: color – the conditional range of power changes (min max); line: — – A<sub>0</sub> - phase, - - - – S<sub>0</sub> - phase; t<sub>A0</sub> and t<sub>S0</sub> – the arrival time of A<sub>0</sub> and S<sub>0</sub> phases, respectively



**Рис. 4.** Общий вид сигнала от истечения воздуха через отверстие (а) и его частотно-временное представление, полученное с помощью преобразования: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e), HHT (f).

На рисунке обозначены: цвет – условный диапазон изменения мощности (min max);  $f_0$  – основная частота сигнала;  $f_1$  и  $f_2$  – гармоники  $f_0$ ;  $f'$  – ложные частоты, или артефакты, которые возникли при ЧВП

**Fig. 4.** General view of a signal from the air outflow through the hole (a) and its time-frequency representation obtained using the transformation: STFT (b), WT (c), SPWD (d), ChWD (e), and HHT (f).

The figure shows: color – the conditional range of power changes (min max);  $f_0$  – the signal main frequency;  $f_1$  and  $f_2$  – the harmonics  $f_0$ ;  $f'$  – false frequencies, or artifacts occurred during the time-frequency transformations



**Таблица 1.** Оценка ЧВП по контрольным параметрам модельного сигнала 1-го типа  
**Table 1.** Estimation of time-frequency transformations according to the control parameters of a 1<sup>st</sup>-type model signal

Параметр сравнения	Реальное значение	Определенное по спектрограмме значение				
		STFT	WT	SPWD	ChWD	HHT
$t_2$ , мкс	830,0	826,9±36,6	828,1±75,8	833,7±15,9	833,4±13,9	832,9±10,8
$t_3$ , мкс	1460,0	1458,1±49,6	1461,6±17,6	1463,7±12,2	1462,9±5,2	1460,8±3,0
$t_4$ , мкс	1770,0	1786,5±37,9	1782,3±5,5	1785,8±136,5	1780,8±11,5	1779,8±25,7
$f_2$ , кГц	180,0	180,7±43,4	185,9±87,3	180,6±5,6	180,7±9,2	180,2±3,2
$f_3$ , кГц	365,0	364,8±46,5	371,2±122,9	364,9±4,8	364,9±12,2	365,6±2,9
$f^l$ , кГц	нет	нет	нет	272,1±5,5	25,1±46,0	нет

Примечание:  $t_i$  – временная точка изменения в сигнале ( $i=1 \dots 4$ );  $f_j$  – частота синусоиды ( $j=1 \dots 3$ );  $f^l$  – ложные частоты, или артефакты, которые возникли при частотно-временном преобразовании.

Note.  $t_i$  – the time point of change in a signal ( $i=1 \dots 4$ );  $f_j$  – the sine curve frequency ( $j=1 \dots 3$ );  $f^l$  – false frequencies, or artifacts occurred during the time-frequency transformations.

**Таблица 2.** Оценка ЧВП по контрольным параметрам модельного сигнала 2-го типа  
**Table 2.** Estimation of time-frequency transformations according to the control parameters of a 2<sup>nd</sup>-type model signal

Параметр сравнения	Расчетное значение	Определенное по спектрограмме значение				
		STFT	WT	SPWD	ChWD	HHT
$t_{S_0}$ , мкс	68,5	69,3±62,7	74,6±28,0	нет	нет	нет
$t_{A_0}$ , мкс	195,5	214,9±101,8	208,3±42,9	206,6±26,9	204,6±20,5	203,5±11,8
$A_0/S_0$	~25,0*	23,2±2,8	30,6±4,5	нет	нет	нет

Примечание:  $t_{A_0}$  и  $t_{S_0}$  – время прихода  $A_0$  и  $S_0$  мод соответственно; \* – приблизительное значение, рассчитанное как  $A_0/S_0 \sim 5$  раз по амплитуде или  $\sim 5^2 = 25$  раз по энергетическим параметрам.

Note.  $t_{A_0}$  and  $t_{S_0}$  – the arrival time of  $A_0$  and  $S_0$  phases, respectively; \* – approximate value calculated as  $A_0/S_0 \sim 5$  times against the amplitude or  $\sim 5^2 = 25$  times against the energy parameters.

**Таблица 3.** Оценка ЧВП по контрольным параметрам модельного сигнала 3-го типа  
**Table 3.** Estimation of time-frequency transformations according to the control parameters of a 3<sup>rd</sup>-type model signal

Параметр сравнения	Расчетное значение	Определенное по спектрограмме значение				
		STFT	WT	SPWD	ChWD	HHT
$f_0$ , кГц	93,0	79,1±30,6	78,7±48,2	80,8±19,5	78,2±28,6	70,4±44,9
$f_1$ , кГц	186,0	155,7±28,9	169,7±72,4	153,7±20,6	156,2±21,8	145,8±85,2
$f_2$ , кГц	279,0	248,5±14,7	301,1±125,4	270,3±9,3	274,4±7,1	нет
$f^l$ , кГц	нет	нет	нет	120,8±25,5 216,2±13,6	15,3±28,1 113,3±25,1 214,2±18,7	нет
$N$ , шт.	нет	11,0±2,0	14,0±6,0	18,0±7,0	16,0±3,0	13,0±4,0

Примечание:  $N$  – количество пачек акустико-эмиссионных сигналов;  $f_0$  – основная частота сигнала;

$f_1$  и  $f_2$  – первая и вторая гармоника  $f_0$ ;  $f^l$  – ложные частоты, или артефакты, которые возникли при ЧВП.

Note.  $N$  – the quantity of bursts of acoustic-emission signals;  $f_0$  – the signal main frequency;  $f_1$  and  $f_2$  – the first and the second harmonics of  $f_0$ ;  $f^l$  – false frequencies, or artifacts occurred during the time-frequency transformations.

выделить моду  $A_0$  при рассматриваемых условиях, но поскольку на момент выполнения работы такие публикации в открытых источниках нами найдены не были, то этот вопрос не исследовался.

Из таблицы 3 видно, что для всех ЧВП расчетные значения  $f_0$ ,  $f_1$  и  $f_2$  отличаются от экспериментальных в среднем на 15,5 кГц, но с четким сохранением условия кратности обертонов. Указанное отличие, по нашему мнению, связано с тем, что в использованной расчетной модели не учитывается длина канала и расширение на выходе жиклера. Однако при наличии одинаковой (систематической) для всех ЧВП ошибки проведение их сравнения по полученным данным можно считать корректным. Несмотря на хорошее частотное разрешение, из-за интерференционных составляющих при SPWD и ChWD затруднительно в непрерывном сигнале выделить пачки акустико-эмиссионных сигналов, что и определяет высокую погрешность оценки  $N$  (рис. 4, таблица 3). STFT, WT и ННТ формируют более различные области концентрации энергии, которые при наложении спектрограмм совпадают по временному и частотному положению. При этом рис. 4 с показывает, что вейвлет Морле (Morlet) при худшем частотном разрешении имеет хорошую временную локализацию пульсаций с более заметным отличием по энергии. STFT также отображает эти изменения, но с меньшей энергетической разницей между основными составляющими в разных частотных областях. ННТ показывает самую четкую временную локализацию изменения частотных составляющих, но, как и в случае выше, не отображает менее энергетическую гармонику  $f_2$ , которую четко показывают все остальные преобразования.

Таким образом, продемонстрировано, что STFT, WT и ННТ имеют преимущество перед SPWD и ChWD в виде отсутствия интерференционных составляющих (артефактов). Использование способов борьбы с этим эффектом согласно [16] показало, что при уменьшении сглаживания результат ChWD приближается к SPWD, который, в свою очередь, стремится к STFT. Поэтому для каждого применения SPWD и ChWD необходим поиск баланса между количеством ложных акустико-эмиссионных событий и подавляемой полезной информации низкого энергетического уровня, таких как мода  $A_0$  на рис. 3. Кроме того, высокая вычислительная сложность и отсутствие быстрых алгоритмов SPWD и ChWD затрудняет их использование при обработке сигналов в реальном времени (онлайн) [16].

ННТ показал самое высокое частотно-временное разрешение, однако из-за отсутствия параметров управления в базовом алгоритме преобразования он не позволил выявить моду  $A_0$  с пятикратным амплитудным различием (~14 дБ). Кроме этого, в [17; 18] показано, что при применении алгоритмов шумоподавления ННТ теряет свое преимущество в виде быстрого счета, что также ограничивает возможность его применение в режиме онлайн, особенно при обработке сигналов непрерывного вида. Таким образом, несмотря на то, что по полученным результатам видно преимущество ННТ перед другими ЧВП, вопрос его применения для анализа акустико-эмиссионных сигналов еще требует дальнейших исследований и проработки.

Для обеспечения высокого частотного разрешения при применении WT необходимо выполнение подгото-

вительных работ по поиску оптимальной базисной функции для каждого конкретного вида акустико-эмиссионного сигнала. Из этого следует, что для непрерывной АЭ, которая чаще всего формируется несколькими одновременно действующими источниками АЭ разного вида, подбор оптимального вейвлета для анализа сигналов является нетривиальной и отдельно стоящей задачей. При этом работы [27; 28] показывают, что в случаях большой вероятности неудачного выбора базисной функции WT его следует заменять на более надежные ЧВП типа STFT. Однако, как показано выше, если главные частотные составляющие сигнала не являются ближайшими (соседними), то применение WT приемлемо даже с неоптимальной базовой функцией, так как обеспечивается выделение концентрации мощности с высоким временным разрешением.

При STFT эффекты перетекания энергии в боковые лепестки могут быть скомпенсированы выбором длины окна и процедуры сглаживания на его концах. При достаточном запасе в соотношении [частота дискретизации / максимальная частота спектра] STFT позволяет получить частотно-временное разрешение на уровне других ЧВП. Конечно, это требует большего объема для хранения данных и более скоростных средств их записи и обработки, но данный вопрос не является проблемным для сегодняшнего уровня развития акустико-эмиссионной аппаратуры. Кроме того, STFT сегодня является основой гармонического анализа, описывается с помощью двух действительных функций ( $\sin$ ,  $\cos$ ) или одной комплексной ( $\exp$ ), а также имеет достаточно простые физические интерпретации, наиболее полные теоретические выкладки/доказательства и множество хорошо отработанных быстрых алгоритмов расчета, позволяющих организовать алгоритмы обработки акустико-эмиссионных данных в режиме онлайн. Поэтому STFT можно считать алгоритмом «по умолчанию», т. е. его применение всегда гарантирует результат, пусть даже не лучший по сравнению с другими ЧВП.

## ВЫВОДЫ

1. Управляющие параметры всех исследованных ЧВП, кроме преобразования ННТ, позволяют регулировать частотно-временное разрешение в достаточно широком диапазоне, но при необходимом запасе в соотношении [частота дискретизации / максимальная частота спектра]. При этом добиться относительно универсальной настройки ЧВП одновременно для выделения основных особенностей дискретной и непрерывной (АЭ) возможно только у STFT и WT.

2. При выборе ЧВП для исследования дискретной АЭ следует отдавать предпочтение преобразованиям SPWD, ChWD и ННТ. WT следует использовать только после определения оптимального вейвлета под каждый конкретный вид сигнала. Несмотря на то, что STFT более универсально для анализа дискретной АЭ, его следует рассматривать в последнюю очередь и только при запасе в соотношении [частота дискретизации / максимальная частота спектра]  $\geq 4$  и после подбора оптимальной оконной функции.

3. При выборе ЧВП для исследования непрерывной АЭ следует отдавать предпочтение STFT и WT, но с учетом условий, приведенных для них в п. 2 выводов.



4. ННТ показал самое высокое частотно-временное разрешение и для дискретной, и для непрерывной АЭ. Поэтому он представляется весьма перспективным ЧВП для применения в акустико-эмиссионном методе, однако способы повышения его чувствительности и выделения основной информации из спектрограмм еще требуют глубокой проработки.

5. Для максимально эффективного использования выявленных преимуществ исследованных ЧВП для выявления сигналов АЭ разного типа и уровня требуется проработка вопроса комплексного применения либо нескольких ЧВП, либо нескольких настроек внутри одного ЧВП (например, несколько уровней сглаживания ChWD или нескольких вейвлетов WT) к анализу одной записи АЭ, но в несколько этапов (подходов).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Caesarendra W., Tjahjowidodo T. A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing // *Machines*. 2017. Vol. 5. № 4. Article number 21. DOI: [10.3390/machines5040021](https://doi.org/10.3390/machines5040021).
- Растегаев И.А., Данюк А.В., Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л., Растегаева И.И. Анализ шумоподобных сигналов акустической эмиссии способами широкополосной фильтрации // *Контроль. Диагностика*. 2014. № 8. С. 49–55. DOI: [10.14489/td.2014.08.pp.049-056](https://doi.org/10.14489/td.2014.08.pp.049-056).
- Shivani G., Vandna B. Signal Analysis for High Speed Acoustic Data Using Acoustic Emission Analysis Tool // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2015. Vol. 4. № 12. P. 541–544. DOI: [10.21275/v4i12.nov151837](https://doi.org/10.21275/v4i12.nov151837).
- Vaezi Y., Van der Baan M. Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection // *Geophysical Journal International*. 2015. Vol. 203. № 3. P. 1896–1908. DOI: [10.1093/gji/ggv419](https://doi.org/10.1093/gji/ggv419).
- Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I., Vиноградов А.Ю. A Time-Frequency based Approach for Acoustic Emission Assessment of Sliding Wear // *Lubricants*. 2020. Vol. 8. № 5. Article number 52. DOI: [10.3390/lubricants8050052](https://doi.org/10.3390/lubricants8050052).
- Чешев М.Е., Кульков Д.С. Кластерный анализ ключевых признаков акустоэмиссионных сигналов образцов горных пород. Часть 1. Обзор алгоритмов кластеризации // *Вестник Кыргызско-российского славянского университета*. 2019. Т. 19. № 8. С. 160–164.
- Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 368 с.
- Ono K. Acoustic Emission // *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. P. 1209–1229. DOI: [10.1007/978-1-4939-0755-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_30).
- Фирсов А.В., Посадов В.В. Диагностика дефектов подшипников качения при стендовой доводке малогабаритного высокооборотного газотурбинного двигателя с помощью спектрального анализа вибрации // *Контроль. Диагностика*. 2013. № 7. С. 40–47.
- Яблоков А.В., Сердюков А.С. Метод автоматизированного извлечения дисперсионных кривых на основе временно-частотного распределения сейсмических данных // *Геофизические технологии*. 2018. № 3. С. 48–58. DOI: [10.18303/2619-1563-2018-3-5](https://doi.org/10.18303/2619-1563-2018-3-5).
- Chi-Duran R., Comte D., Diaz M., Silva J.F. Automatic detection of P- and S-wave arrival times: new strategies based on the modified fractal method and basic matching pursuit // *Journal of Seismology*. 2017. Vol. 21. № 5. P. 1171–1184. DOI: [10.1007/s10950-017-9658-0](https://doi.org/10.1007/s10950-017-9658-0).
- Kaul B.C., Lawler B., Zahdeh A. Engine Diagnostics Using Acoustic Emissions Sensors // *SAE International Journal of Engines*. 2016. Vol. 9. № 2. P. 684–692. DOI: [10.4271/2016-01-0639](https://doi.org/10.4271/2016-01-0639).
- Feng Z., Liang M., Chu F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. Vol. 38. № 1. P. 165–205. DOI: [10.1016/j.ymssp.2013.01.017](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.01.017).
- Yan J., Laflamme S., Singh P., Sadhu A., Dodson J. A Comparison of Time-Frequency Methods for Real-Time Application to High-Rate Dynamic Systems // *Vibration*. 2020. Vol. 3. № 3. P. 204–216. DOI: [10.3390/vibration3030016](https://doi.org/10.3390/vibration3030016).
- Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008. Т. 13. № 4. С. 270–322.
- Меркушева А.В. Классы преобразований нестационарного сигнала в информационно-измерительных системах. II. Время-частотные преобразования // *Научное приборостроение*. 2002. Т. 12. № 2. С. 59–70.
- Huang N.E., Shen S.S.P. Hilbert–Huang Transform and Its Applications. *Interdisciplinary Mathematical Sciences*. Vol. 5. Singapore: World Scientific Publishing Co, 2014. 311 p. DOI: [10.1142/5862](https://doi.org/10.1142/5862).
- Liu Y., An H., Bian S. Hilbert-Huang Transform and the Application // *Proceedings of IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems*. 2020. № 20-22. P. 534–539. DOI: [10.1109/ICAIS49377.2020.9194944](https://doi.org/10.1109/ICAIS49377.2020.9194944).
- Novak A., Lotton P., Simon L. Synchronized Swept-Sine: Theory, Application, and Implementation // *AES: Journal of the Audio Engineering Society*. 2015. Vol. 63. № 10. P. 786–798. DOI: [10.17743/jaes.2015.0071](https://doi.org/10.17743/jaes.2015.0071).
- Dhar S.S., Kundu D., Das U. Tests For the Parameters of Chirp Signal Model // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2019. Vol. 67. № 16. P. 4291–4301. DOI: [10.1109/TSP.2019.2928996](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2928996).
- Герентьев Д.А. Идентификация сигналов акустической эмиссии при помощи частотно-временного анализа // *В мире неразрушающего контроля*. 2013. Т. 60. № 2. С. 51–55.
- Rastegaev I.A., Danyuk A.V., Merson D.L., Vиноградов А.Ю. Universal Educational and Research Facility for the Study of the Processes of Generation and Propagation of Acoustic Emission Waves // *Inorganic Materials*. 2017. Vol. 53. № 15. P. 1548–1554. DOI: [10.1134/S0020168517150158](https://doi.org/10.1134/S0020168517150158).
- Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.

24. Дробот Ю.Б., Грешников В.А., Бачегов В.Н. Акустическое контактное течеискание. М.: Машиностроение, 1989. 120 с.
25. Харрис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). 1978. Т. 6. № 1. С. 60–96.
26. Nuttall A.H. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1981. Vol. 29. № 1. P. 84–91.
27. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003. 176 с.
28. Добеши И. Всплески и другие методы локализации в фазовом пространстве // Международный конгресс математиков в Цюрихе. М.: Мир, 1999. С. 84–108.
10. Yablokov A.V., Serdyukov A.S. Method of automated extracting of dispersion curves based on time-frequency distribution of seismic datav. *Geofizicheskie tehnologii*, 2019, no. 3, pp. 48–58. DOI: [10.18303/2619-1563-2018-3-5](https://doi.org/10.18303/2619-1563-2018-3-5).
11. Chi-Duran R., Comte D., Diaz M., Silva J.F. Automatic detection of P- and S-wave arrival times: new strategies based on the modified fractal method and basic matching pursuit. *Journal of Seismology*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 1171–1184. DOI: [10.1007/s10950-017-9658-0](https://doi.org/10.1007/s10950-017-9658-0).
12. Kaul B.C., Lawler B., Zahdeh A. Engine Diagnostics Using Acoustic Emissions Sensors. *SAE International Journal of Engines*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 684–692. DOI: [10.4271/2016-01-0639](https://doi.org/10.4271/2016-01-0639).
13. Feng Z., Liang M., Chu F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, vol. 38, no. 1, pp. 165–205. DOI: [10.1016/j.ymssp.2013.01.017](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.01.017).
14. Yan J., Laflamme S., Singh P., Sadhu A., Dodson J. A Comparison of Time-Frequency Methods for Real-Time Application to High-Rate Dynamic Systems. *Vibration*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 204–216. DOI: [10.3390/vibration3030016](https://doi.org/10.3390/vibration3030016).
15. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. Ultra-wideband signals and physical processes. 2. Methods of analysis and application. *Radiofizika i radioastronomiya*, 2008, vol. 13, no. 4, pp. 270–322.
16. Merkusheva A.V. Transformation classes for nonstationary signals in information measurement systems. II. Time-frequency transforms. *Nauchnoe priboroostroenie*, 2002, vol. 12, no. 2, pp. 59–70.
17. Huang N.E., Shen S.S.P. *Hilbert–Huang Transform and Its Applications. Interdisciplinary Mathematical Sciences*. Singapore, World Scientific Publ., 2014. Vol. 5, 311 p. DOI: [10.1142/5862](https://doi.org/10.1142/5862).
18. Liu Y., An H., Bian S. Hilbert-Huang Transform and the Application. *Proceedings of IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems*, 2020, no. 20-22, pp. 534–539. DOI: [10.1109/ICAIS49377.2020.9194944](https://doi.org/10.1109/ICAIS49377.2020.9194944).
19. Novak A., Lotton P., Simon L. Synchronized Swept-Sine: Theory, Application, and Implementation. *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, 2015, vol. 63, no. 10, pp. 786–798. DOI: [10.17743/jaes.2015.0071](https://doi.org/10.17743/jaes.2015.0071).
20. Dhar S.S., Kundu D., Das U. Tests For the Parameters of Chirp Signal Model. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, vol. 67, no. 16, pp. 4291–4301. DOI: [10.1109/TSP.2019.2928996](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2928996).
21. Terentev D.A. Time-frequency analysis for identification of acoustic emission signals. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2013, vol. 60, no. 2, pp. 51–55.
22. Rastegaev I.A., Danyuk A.V., Merson D.L., Vinogradov A.Yu. Universal Educational and Research Facility for the Study of the Processes of Generation and Propagation of Acoustic Emission Waves. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 15, pp. 1548–1554. DOI: [10.1134/S0020168517150158](https://doi.org/10.1134/S0020168517150158).
23. Viktorov I.A. *Fizicheskie osnovy primeneniya ultrazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike* [Physical bases of application of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in engineering]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 168 p.

## REFERENCES

1. Caesarendra W., Tjahjowidodo T. A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing. *Machines*, 2017, vol. 5, no. 4, article number 21. DOI: [10.3390/machines5040021](https://doi.org/10.3390/machines5040021).
2. Rastegaev I.A., Danyuk A.V., Vinogradov A.Yu., Merson D.L., Rastegaeva I.I. Analysis of noise-like signals of acoustic emission methods broadband filtering. *Kontrol. Diagnostika*, 2014, no. 8, pp. 49–55. DOI: [10.14489/td.2014.08.pp.049-056](https://doi.org/10.14489/td.2014.08.pp.049-056).
3. Shivani G., Vandna B. Signal Analysis for High Speed Acoustic Data Using Acoustic Emission Analysis Tool. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015, vol. 4, no. 12, pp. 541–544. DOI: [10.21275/v4i12.nov151837](https://doi.org/10.21275/v4i12.nov151837).
4. Vaezi Y., Van der Baan M. Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection. *Geophysical Journal International*, 2015, vol. 203, no. 3, pp. 1896–1908. DOI: [10.1093/gji/ggv419](https://doi.org/10.1093/gji/ggv419).
5. Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I., Vinogradov A.Yu. A Time-Frequency based Approach for Acoustic Emission Assessment of Sliding Wear. *Lubricants*, 2020, vol. 8, no. 5, article number 52. DOI: [10.3390/lubricants8050052](https://doi.org/10.3390/lubricants8050052).
6. Cheshev M.E., Kulkov D.S. Cluster analysis of key features of acoustic emission signals in rock specimens. Part 1: Overview of clustering algorithms. *Vestnik Kyrgyzsko-rossiyskogo slavyanskogo universiteta*, 2019, vol. 19, no. 8, pp. 160–164.
7. Ivanov V.I., Barat V.A. *Akustiko-emissionnaya diagnostika* [Acoustic emission diagnostics]. Moscow, Spektr Publ., 2017. 368 p.
8. Ono K. Acoustic Emission. *Springer Handbook of Acoustics*. New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg Publ., 2014, pp. 1209–1229. DOI: [10.1007/978-1-4939-0755-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_30).
9. Firsov A.V., Posadov V.V. Diagnosis of defects of rolling element bearings at poster's argument-CI small-sized high-speed gas-turbine engine using a spectral analysis of vibration analysis. *Kontrol. Diagnostika*, 2013, no. 7, pp. 40–47.

24. Drobot Yu.B., Greshnikov V.A., Bachegov V.N. *Akusticheskoe kontaktnoe techeiskanie* [Acoustic contact leak detection]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 120 p.
25. Kharris F.Dzh. The use of windows in harmonic analysis by the discrete Fourier transform method. *Trudy instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike (TIER)*, 1978, vol. 6, no. 1, pp. 60–96.
26. Nuttall A.H. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, vol. 29, no. 1, pp. 84–91.
27. Koronovskiy A.A., Khramov A.E. *Nepreryvnyy veyvletnyy analiz i ego prilozheniya* [Continuous wavelet analysis and its applications]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 176 p.
28. Dobeshi I. Bursts and other methods of localization in phase space. *Mezhdunarodnyy kongress matematikov v Tsyurikhe*. Moscow, Mir Publ., 1999, pp. 84–108.

## The comparison of the main time-frequency transformations of spectral analysis of acoustic emission signals

© 2022

**Inna I. Rastegaeva**<sup>1</sup>, senior lecturer of Chair “Nanotechnologies, Materials Science, and Mechanics”

**Igor A. Rastegaev**\*<sup>2</sup>, PhD (Physics and Mathematics),

senior researcher of the Research Unit-2 of the Research Institute of Advanced Technologies

**Einar A. Agletdinov**<sup>3</sup>, PhD (Physics and Mathematics),

junior researcher of the Research Unit-2 of the Research Institute of Advanced Technologies

**Dmitry L. Merson**<sup>4</sup>, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,

Director of the Research Institute of Advanced Technologies

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

\*E-mail: [RastIgaEv@yandex.ru](mailto:RastIgaEv@yandex.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7634-2328>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3807-8105>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-941X>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-4115>

Received 28.12.2021

Accepted 11.03.2022

**Abstract:** Due to the intensive development of spectroscopic techniques for detecting acoustic emission signals, the problem of providing the best time-frequency resolution through the application of specific time-frequency transformation algorithms comes to the fore. The Short-Time Fourier Transform, the Wavelet Transform, the Smoothed Pseudo Wigner Distribution, the Choi-Williams Distribution, and the Hilbert-Huang Transform are currently the main time-frequency transformations used or integrated into the acoustic emission method. However, today in the literature, there is not enough information that allows evaluating time-frequency transformations regarding the effectiveness of their application to specify the features of discrete and continuous acoustic emission signals. On this basis, the authors carried out an experimental comparison of synthetic and actual model signals to determine the efficiency of specified time-frequency transformations. The synthetic model signals were a chirp signal, ideal sinusoids, and a Dirac delta function. The actual signals were a discrete acoustic emission signal from the Hsu Nelson source decomposed into dispersion modes in the acoustic channel and a continuous acoustic emission signal from the air outflow through a calibrated hole. The analysis shows that only the Fourier transform and the Wavelet transform can define all control features of model signals at the frequency components' energy gap of about 25 dB. Wigner Distribution, Choi-Williams Distribution, and Hilbert-Huang Transform demonstrated higher time-frequency resolution did not identify frequency components of low energy. Therefore, the authors recommend using them to identify spectral changes in the resonance and discrete signals but in the narrow energy range. The Fourier transform and the Wavelet transform demonstrated the best result to analyze continuous acoustic emission. However, to use the latter, the procedure of selection of the optimal basis function is necessary. The study determined that the Hilbert-Huang transform allows identifying the frequency fluctuations, but it is necessary to develop ways to increase sensitivity and extract basic information from the spectrograms to enhance the validity of its results.

**Keywords:** spectral analysis; Fourier transform; wavelet transform; Wigner Distribution; Choi-Williams Distribution; Hilbert-Huang Transform; acoustic emission.

**For citation:** Rastegaeva I.I., Rastegaev I.A., Agletdinov E.A., Merson D.L. The comparison of the main time-frequency transformations of spectral analysis of acoustic emission signals. *Frontier Materials and Technologies*, 2022, no. 1, pp. 49–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-49-60.