

УДК 539

## АНАЛИЗ ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ ФОТОЭДС, ПОЛУЧЕННЫХ РЕГИСТРАЦИЕЙ ЭРОЗИОННОГО ФАКЕЛА, ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

© П.М. Кузнецов, В.А. Федоров

*Ключевые слова:* лазерное излучение; вейвлет-разложение; эрозионный факел; характерные частоты. Выполнен анализ вейвлет-спектров колебаний фотоэдс, полученных при регистрации свечения эрозионного факела, формирующегося воздействием лазерного излучения на поверхность металла. Выявленные характерные частоты вейвлет-спектров сопоставлены с частотами, полученными от этих же колебаний фурье-разложением.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов исследования спектрального состава сложных колебаний является вейвлет-разложение (например, осциллограмм [1]). Разложение в вейвлет-спектры несет информацию не только о характерных частотах колебаний в различные моменты времени, но также позволяет определить вклад каждой частоты в энергетический спектр.

*Цель работы:* исследовать частотно-временные характеристики колебаний фотоэдс, вызванных свечением эрозионного факела, методом вейвлет-преобразования и сопоставить их с частотными характеристиками, полученными фурье-разложением.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе [2] получены частотные характеристики колебаний фотоэдс разложением в фурье-спектры. Вместе с тем определить частотно-временные характеристики сигналов невозможно разложением только в спектр Фурье. В связи с этим для определения частотно-временных характеристик колебаний фотоэдс в течение импульса проводили разложение относительного фотоэдс-сигнала в непрерывное вейвлет-преобразование (CWT – continuum wavelet transform). Это позволило сравнить различные по форме сигналы. Разло-

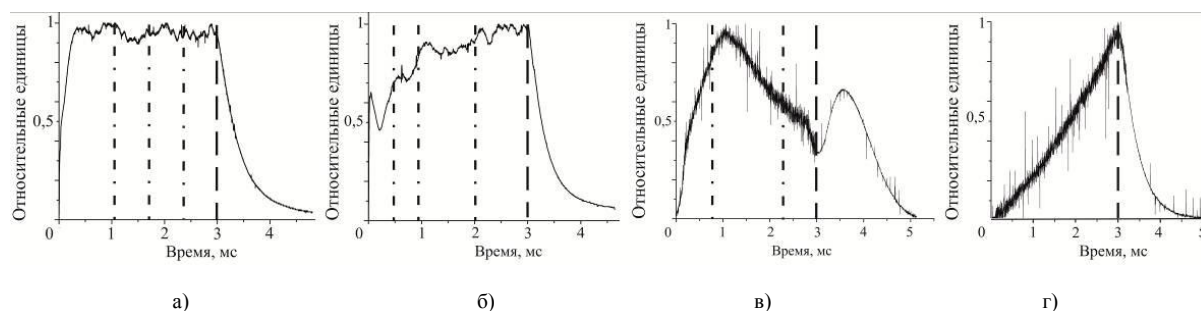
жение полученных сигналов в вейвлет-спектр проводили в программе Matlab R2010b [3].

Из вейвлет-преобразования можно получить модуль вейвлет-разложения и его фазу. Фаза определяет момент времени изменения частоты колебаний. Это позволяет явно выделить изменение фазы колебаний в течение импульса и определить частотно-временные характеристики сигнала. Модуль вейвлет-преобразования отвечает за вклад определенной частоты в энергетический спектр.

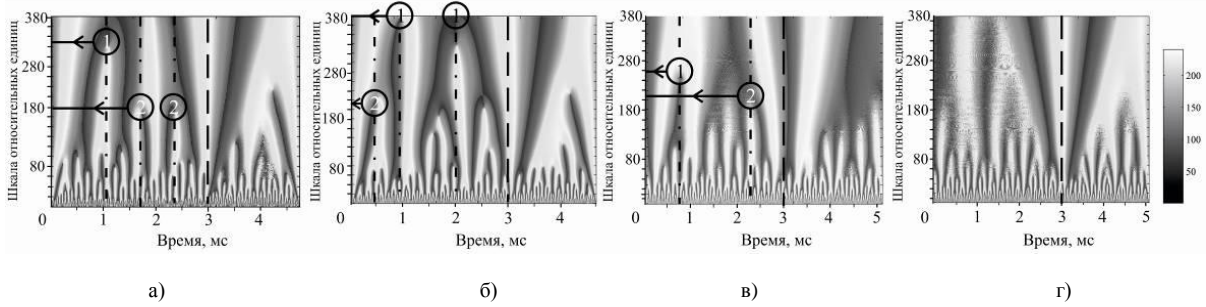
### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а–1г представлены относительные фотоэдс-сигналы (нормированные на максимальное значение), инициированные свечением эрозионного факела, для различных плотностей мощности лазерного излучения. Соответствующие фотоэдс-сигналам значения фазы и модуля вейвлет-преобразования представлены на рис. 2а–2г и рис. 3а–3г.

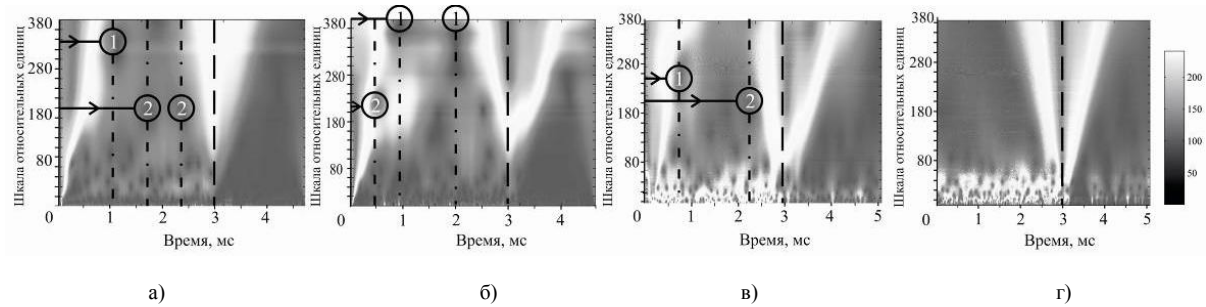
Так, например, на рис. 1а штрихпунктирными линиями отмечены моменты времени, соответствующие началу или окончанию высокоамплитудных колебаний фотоэдс. Соответствующие этому изменения фазы и модуля вейвлет-преобразования отмечены цифрами в окружностях на рис. 2а и рис. 3а. На рис. 2а и рис. 3а отмечены три момента времени (1, 1,7, 2,3 мс) верти-



**Рис. 1.** Изменения фотоэдс-сигнала эрозионного факела в зависимости от плотности мощности лазерного излучения: а)  $3,28 \cdot 10^5 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ , б)  $3,09 \cdot 10^5 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ , в)  $2,21 \cdot 10^5 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ , г)  $1,53 \cdot 10^5 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$



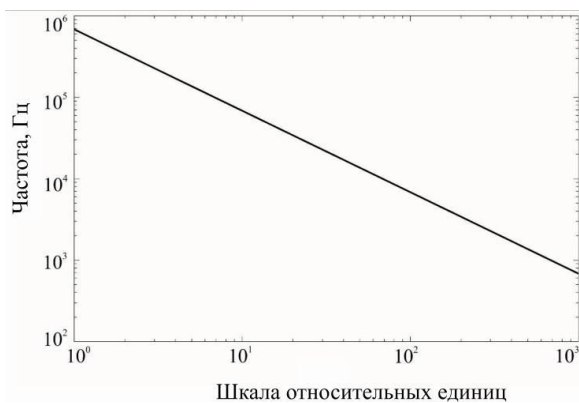
**Рис. 2.** Фазы непрерывного вейвлет-преобразования для фотоэкс-сигналов, представленных на рис. 1а–1г. Цифрами обозначены области изменения фазы определенной частоты. Частоты колебаний фотоэкс-сигналов приведены в табл. 1.



**Рис. 3.** Модули непрерывного вейвлет-преобразования, соответствующие изменению фотоэкс-сигналов эрозионного факела, представленных на рис. 1а–1г. Цифрами, соответствующими рис. 2, обозначены области энергетического вклада в спектр колебаний. Относительные значения вклада частот в энергетический спектр определяются по цветовой шкале

кальной штрихпунктирной линией. Этим моментам времени соответствует появление двух низких частот 1,5 и 3,8 кГц, последняя появляется два раза в моменты времени 1,7 и 2,3 мс. Окончание импульса сопровождается резким изменением фазы и модуля вейвлет-спектра. На рис. 1–3 этот момент времени отмечен вертикальной пунктирной линией.

На рис. 2, 3 по оси ординат приведена амплитуда фазы и модуля вейвлет-преобразования в относительных единицах. Перевод относительных единиц в частоту (Гц) соответствующего комплексного гауссова вейвлета четвертого порядка можно осуществить, используя рис. 4.



**Рис. 4.** График перевода относительного масштаба в частоту (Гц)

На приведенном рис. 2 указаны частоты (цифры в окружности), близкие или кратные частотам, выявленным из фурье-спектров [2]. Значения характерных частот представлены в табл. 1. При уменьшении плотности мощности лазерного излучения вклад низкочастотной составляющей в колебания интенсивности эрозионного факела уменьшается (рис. 3а–3г). Этому соответствует уменьшение яркости в верхней части вейвлет-спектров. При низких значениях плотности мощности лазерного излучения (рис. 3г) наиболее яркий участок в вейвлет-спектре находится в области высоких частот (нижняя часть рисунка). Следовательно, в спектре колебаний интенсивности эрозионного факела преобладают высокие частоты, что подтверждает выводы, сделанные в [2]. Так как при малых плотностях мощности лазерного излучения в колебаниях эрозионного факела низкие частоты не дают вклада в спектр колебаний (низкая амплитуда в фурье-спектрах [2]), то в табл. 1 в колонке г) они не отмечены.

Таблица 1

Характерные частоты вейвлет-спектров, отмеченные на рис. 2, 3

№	а) Частота, кГц	б) Частота, кГц	в) Частота, кГц	г) Частота, кГц
1	$\nu_1 \sim 1,5$	$\nu_1 \sim 1,7$	$\nu_1 \sim 2,4$	–
2	$\nu_2 \sim 3,8$	$\nu_2 \sim 2,0$	$\nu_2 \sim 3$	–

Изменения фазы соответствуют началу или окончанию (вертикальная штрихпунктирная линия) высокоамплитудных колебаний в течение сигнала фотоэда (рис. 1) и показывают, что такие колебания соответствуют низкочастотной составляющей (низкочастотные всплески фотоэда). Как было показано в [2], образование эрозионного факела связано с окислительными процессами на поверхности кратера и горением микрокапель расплава, чем может быть объяснено появление низкочастотных всплесков в течение всего импульса.

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, методом вейвлет-преобразования сигналов фотоэда эрозионного факела определены характерные частоты, которые совпадают или кратны частотам, полученным быстрым фурье-разложением. Показано, что появление низкочастотной составляющей в течение всего импульса (верхняя часть модуля вейвлет-спектров) вызвано высокоамплитудными колебаниями относительного сигнала фотоэда, что связано с горением микрокапель расплава. При уменьшении плотности мощности лазерного излучения вклад в сигнал фотоэда низкочастотной составляющей уменьшается. Процесс горения на поверхности металла дает вклад в высокочастотную составляющую вейвлет-спектра колебаний эрозионного факела (нижняя часть модуля вейвлет-спектров).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов В.П. Математический и спектральный анализ в MATLAB реальных осциллограмм // КИПС. 2010. № 1. С. 19-25.
2. Федоров В.А., Кузнецов П.М., Лобачев А.В., Яковлев А.В., Васильева С.В. Колебательный режим эрозионного факела при воздействии лазерного излучения на поверхность металла // Актуальные проблемы прочности: сб. тез. II Междунар. конф. Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. С. 89-90.
3. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-97519\_p\_a).

Поступила в редакцию 26 ноября 2012 г.

Kuznetsov P.M., Feodorov V.A. WAVELET SPECTRUM ANALYSIS OF PHOTOVOLTAGE SIGNALS DERIVED FROM REGISTRATION OF EROSION TORCH BY LASER RADIATION TREATMENT ON METAL SURFACES

The analysis of the wavelet spectrum photovoltage signals derived by registration of erosion torch glow formed by laser radiation on the surface of the metal is derived. The found characteristic frequencies of the wavelet spectrum are compared to the frequencies derived from the same Fourier decomposition oscillation.

*Key words:* laser radiation; wavelet decomposition; erosion torch; characteristic frequencies.