Секция «19.5 Газовая и волновая динамика»

Сравнение методов обработки термографических снимков конструкций при помощи Фурье и Вейвлет преобразований.

Научный руководитель – Глушков Сергей Павлович

Чигрина Диана Сергеевна
Студент (бакалавр)
Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия
E-mail: chigrinadiana74@gmail.com

Любая конструкция, подверженная нагрузкам, изменяет температуру в местах напряженности. Одной из ключевых характеристик конструкции, является её надёжность. При помощи тепловизионной съёмке можно произвести диагностику дефектов, и как следствие предотвратить аварии.
Преобразование Фурье.
$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$
где
$x(t)$ - вибрационный сигнал во времени;
ω- круговая частота;
$F(\omega)$- спектральная функция.
Преобразование Фурье разлагает сигнал на бесконечную сумму гармонических колебаний различной частоты. Он анализирует сигнал целиком, мы получаем информацию: какие частоты присутствуют, какие у них амплитуды, энергетическое распределение. Мы не получаем информацию о возникновении этих частот.
Данное преобразование не актуально на данный момент по многим причин, вот несколько из них: сигналы нестационарны, содержат переходные процессы, например торможение, содержат кратковременные импульсы, дефекты локализованы во времени.
Углубимся в математические причины ограничений:
Базисные функции Фурье описывают бесконечные синусоиды, существующие на всём интервале времени: , то есть каждая гармоника «охватывает» весь сигнал, локальные особенности не могут быть выделены по времени.
Дефект появляется как короткий импульс, содержащий широкий спектр частот, который не позволяет определить момент возникновения дефекта.
Важно понимать, что преобразование Фурье эффективно для анализа стационарных процессов и определения собственных частот конструкции, однако его применение ограничено при исследовании нестационарных сигналов, содержащих локализованные временные аномалии. Фурье больше анализ для глобального частотного анализа, а не для локальной диагностики во времени.
Для анализа нестационарных вибросигналов нужен метод, обеспечивающий одновременную локализацию во времени и по температуре.
Один из таких методов вейвлет-преобразование.
Кратковременное преобразование Фурье (STFT)
$STFT(\tau,\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t-\tau)e^{-j\omega t}dt$,
где
$g(t-\tau)$ - оконная функция,

\tau- временной сдвиг окна.

Сигнал разбивается на короткие участки и для каждого вычисляется спектр. В итоге мы получаем частотно-временное представление. Главные недостаток метода: невозможность одновременно хорошо анализировать низкие температуры и короткие скачки высокой. Это проявление принципа неопределённости: \Delta t \cdot \Delta \omega \geq const

Непрерывное вейвлет-преобразование.

W(a,b)=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}d
где

a - масштаб;

b - временный сдвиг;

\psi(t)- материнский вейвлет.

В отличие от STFT, ширина анализирующего окна автоматически изменяется:

на высоких частотах окно узкое (хорошая временная локализация);

на низких частотах окно широкое (хорошая частотная локализация). Это называется мультиразрешающим анализом. Это позволяет анализировать глобальную динамику конструкции, одновременно выявлять локальные дефекты.

Дискретное вейвлет-преобразование (DWT).

энергия на уровне j:

E_j = \sum_n |d_j[n]|^2, если энергия на высокочастотных уровнях резко увеличилась, значит имеется дефект или был удар.

Вместо интегралов используется разложение через фильтры:

низкочастотный фильтр (low-pass), высокочастотный фильтр (high-pass). После этого результат прореживается в 2 раза (downsampling).

Пусть есть сигнал :

a_1[n] = \sum_k x[k] \, h[2n-k],

d_1[n] = \sum_k x[k] \, g[2n-k],

где

h[n] — коэффициенты низкочастотного фильтра;

g[n] — коэффициенты высокочастотного фильтра;

a1— аппроксимация;

d1— детали.

После первого уровня разложения:

a1 содержит медленные (низкочастотные) колебания моста

d1 содержит быстрые изменения (удары, дефекты)

Затем аппроксимация снова разлагается:

a_1 \rightarrow a_2 + d_2, и т.д.

Получим структуру:

x[n] \rightarrow a_J + d_J + d_{J-1} + ... + d_1.

Дискретное вейвлет-преобразование это многоуровневое частотное разложение тепловизионного сигнала, позволяющее локализовать энергию дефектов компонентов в определяемых диапазонах температур.

Заключение: в термографии анализируются изображения, в которых температурные аномалии и дефекты имеют локальный и нестационарный характер. В таких условиях преобразование Фурье показывает только общий частотный состав изображения, но не позволяет определить, где именно расположены важные изменения температуры. Это ограничивает его

эффективность при поиске трещин, зон перегрева и скрытых дефектов. Вейвлет преобразования напротив, выполняет многомасштабный анализ и сохраняет пространственную локализацию. Это позволяет одновременно выделять крупные температурные области и мелкие структурные особенности, эффективно подавлять шум и сохранять границы дефектов.
Практически это означает, что вейвлет-обработка: точнее выявляет температурные аномалии; лучше сохраняет контуры дефектов; эффективнее работает с нестационарными тепловыми процессами; повышает информативность термограмм.

Иллюстрации

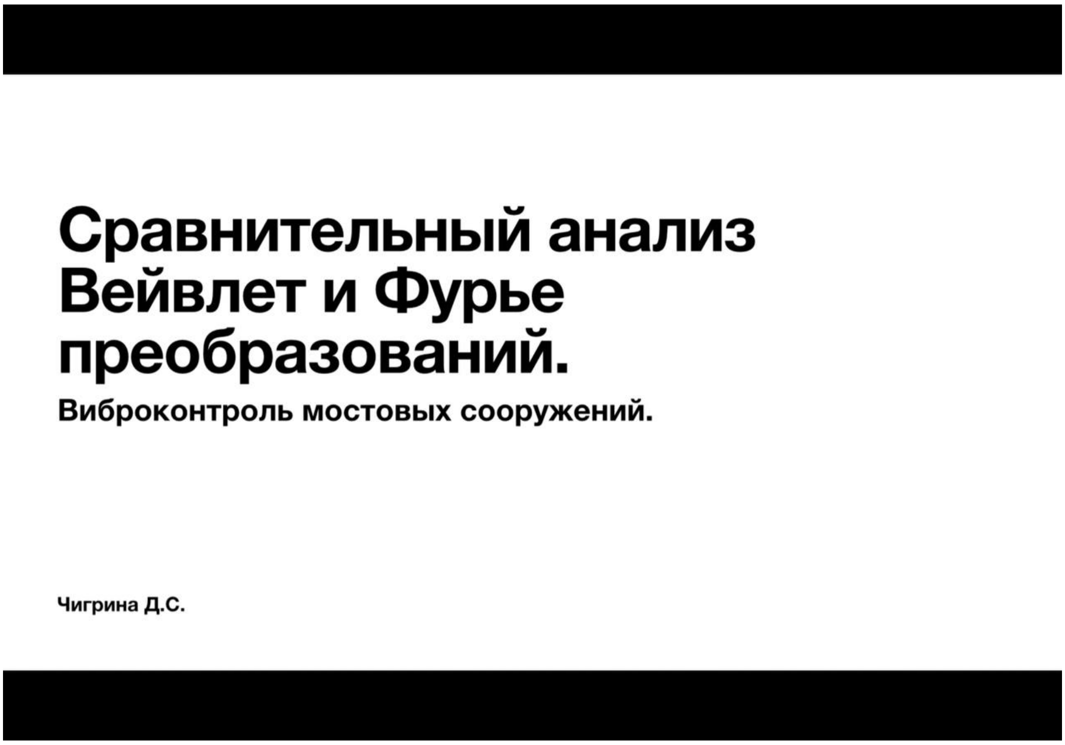


Рис. : 1 слайд

[redacted]

Преобразование Фурье.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt,$$

где

x(t) - вибрационный сигнал во времени;

ω - круговая частота;

$F(\omega)$ - спектральная функция.

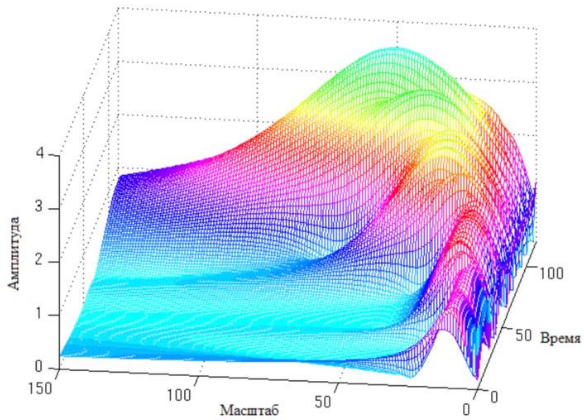
[redacted]

Рис. : 2 слайд

[redacted]

Трёхмерный график вейвлет-коэффициентов

(масштабирование vs время)



[redacted]

Рис. : 3 слайд

Рис. : 4 слайд

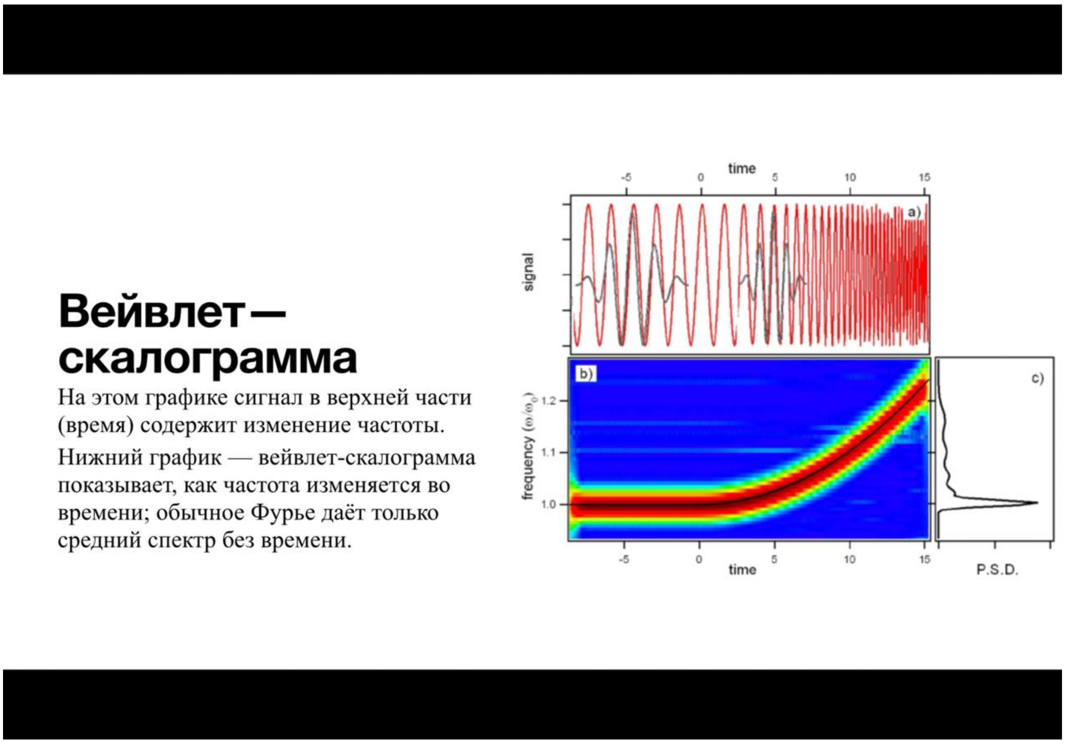


Рис. : 5 слайд

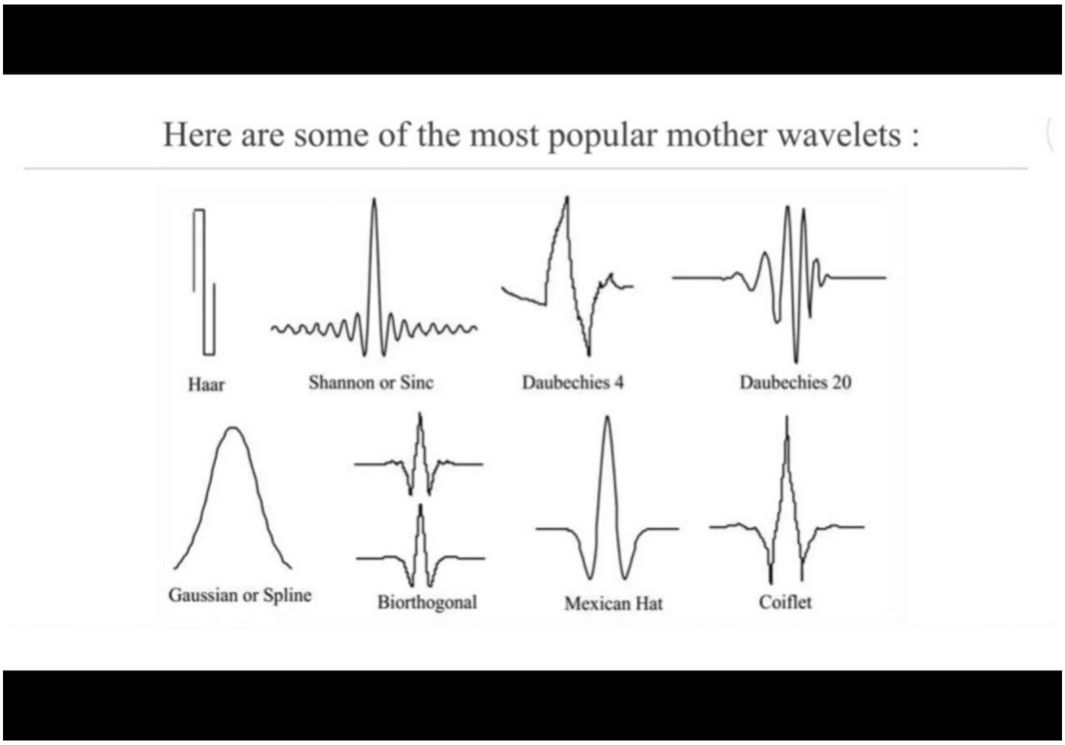


Рис. : 6 слайд

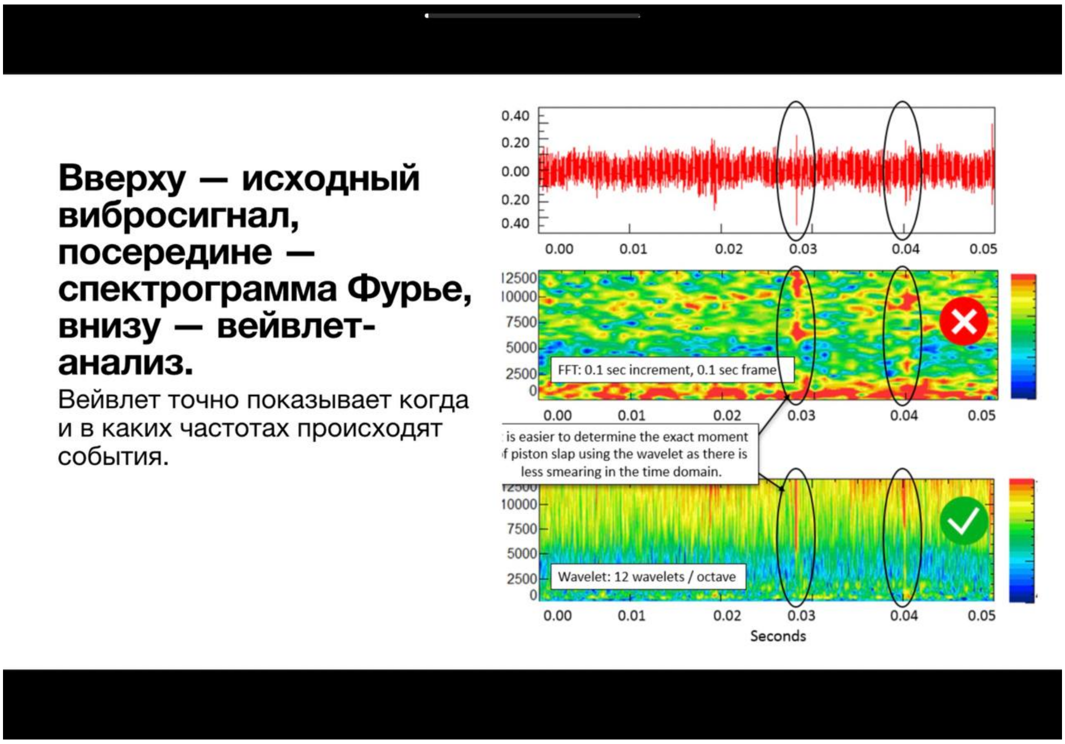
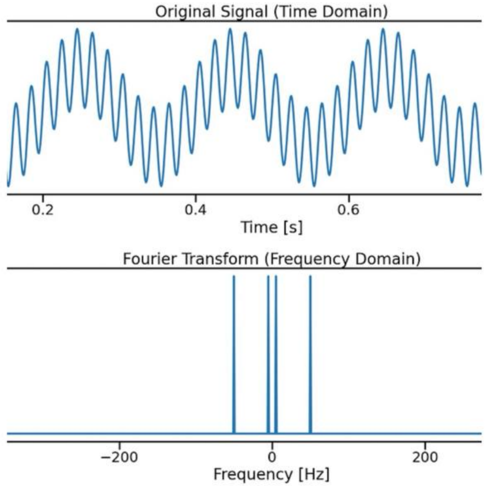


Рис. : 7 слайд

[redacted]

Вверху — сигнал во времени, внизу — спектр Фурье.

Показывает, что Фурье видит только частоты, но не моменты, когда они присутствуют.



[redacted]

Рис. : 8 слайд

[redacted]

Кратковременное преобразование Фурье (STFT)

$$STFT(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t-\tau)e^{-j\omega t}dt,$$

где

$g(t-\tau)$ - оконная функция,

τ - временной сдвиг окна.

[redacted]

Рис. : 9 слайд

[redacted]

Непрерывное вейвлет-преобразование.

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt,$$

где

a - масштаб;

b - временный сдвиг;

$\psi(t)$ - материнский вейвлет.

[redacted]

Рис. : 10 слайд

[redacted]

Если энергия в высокочастотных диапазонах растёт → возможен дефект.

Заключение: Для анализа стационарных режимов мостовой конструкции рекомендуется применять преобразование Фурье, а для выявления локальных дефектов и нестационарных процессов эффективным является вейвлет-преобразование.

[redacted]

Рис. : 11 слайд