

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

## ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, BRIDGES AND TUNNELS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2026. Т. 28. № 2. С. 256–267.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2026; 28 (2): 256–267.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.014.072

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-256-267>

EDN: TFYSWP

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕСУЩИХ БАЛОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

**Владимир Михайлович Картопольцев**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

*ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия*

**Аннотация.** *Актуальность.* Спектральный анализ свободных колебаний балок мостовых пролетных строений является важным инструментом оценки их динамических характеристик и технического состояния. Анализ акселерограмм колебаний, зарегистрированных при ударном воздействии, позволяет выявлять основные частотные составляющие и энергетические особенности колебательного процесса.

*Цель работы:* анализ трансформации входных сигналов, регистрируемых измерительными устройствами, и выходных реакций конструкций в виде свободных колебаний, а также исследование статистических характеристик их спектральных параметров.

*Практическая значимость.* Результаты исследования могут быть использованы при диагностике и мониторинге динамического состояния мостовых конструкций на основе анализа их вибрационных характеристик.

*Результаты.* Выполнен спектральный анализ акселерограмм свободных колебаний балок металлических пролетных строений мостов, полученных в лабораторных и натуральных условиях. Установлено, что энергетический спектр колебаний содержит несколько

узких частотных полос, среди которых выделяются основные энергонесущие области. Определены характерные диапазоны собственных частот колебаний и параметры их затухания. Показано, что использование сегментарного спектрального анализа и вероятностного подхода позволяет оценивать распределение спектральной мощности и выявлять особенности динамической работы балок.

**Ключевые слова:** спектр, выборка, колебания, акселерограмма, импульс, реализация, удар, частота, амплитуды

**Для цитирования:** Картопольцев, В.М. Совершенствование спектрального анализа свободных колебаний несущих балок металлических пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 2. С. 256–267. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-256-267>. EDN: TFYSWP

## IMPROVEMENT OF SPECTRAL ANALYSIS OF FREE OSCILLATIONS OF LOAD-BEARING BEAMS OF METAL BRIDGE SPANS

Vladimir M. Kartopoltsev

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,

ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

**Abstract.** The spectral analysis of free vibrations of bridge spans is an important tool to evaluate their dynamic characteristics and technical condition. The analysis oscilloscope patterns recorded during the impact, allows identifying the main frequency components and energy characteristics of the vibration process.

**Purpose:** The aim is to analyze the transformation of input signals recorded by measuring devices and structural responses in the form of free vibrations and investigate statistical characteristics of their spectral parameters.

**Methodology:** The spectral analysis was performed for oscilloscope patterns of free vibrations of metal bridge spans obtained under laboratory and field conditions. Segmental spectral analysis and a probabilistic approach allow to estimate the spectral power distribution and identify the dynamic behavior of beams.

**Research findings:** It is found that the energy spectrum of vibrations contains several narrow frequency bands, among which there are the main energy-carrying regions. The range of natural frequencies and their damping parameters are determined. Practical implications: Research results can be used in diagnosis and monitoring of the dynamic state of bridges based on the analysis of their vibration characteristics.

**Keywords:** spectrum, sample, oscillations, oscilloscope pattern, impulse, implementation, impact, frequency, amplitude

**For citation:** Kartopoltsev, V.M. Improvement of Spectral Analysis of Free Oscillations of Load-Bearing Beams of Metal Bridge Spans. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (2): 256–267. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-2-256-267>. EDN: TFYSWP

Классический прием спектрального анализа колебаний с использованием временного разложения и преобразования в ряд Фурье основан на преобразовании функций времени и частоты. Текущий спектр определяется как преобра-

зование Фурье, но с переменным верхним пределом интегрирования, в качестве которого используется текущее время сегмента выборки акселерограммы. Общую интегральную функцию запишем в виде

$$f(t) = f(t + n \cdot T), \quad (1)$$

где  $T$  – период колебания;  $n$  – положительное число гармоник.

При синусоидальной форме колебания балки от одиночного удара грузом функция  $f(t)$  (рис. 1) может быть записана в виде

$$f(t) = A_k \cos\left(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_n\right), \quad (2)$$

где  $A_k$  – амплитуда колебания;  $\varphi_n$  – начальная функция колебания;  $k$  – коэффициент формы колебаний, принимаемый равным 1,11 для полупериода колебания.

Воздействие ударных сил и возникающие ускорения рассматриваются как случайные процессы. При этом параметры импульсных воздействий и характеристики акселерограмм могут изменяться в зависимости от типа импульса и условий регистрации сигналов [1].

Вероятностная модель спектрального анализа основана на положениях теории вероятностей, объясняющих закономерности случайных явлений независимо от их физической природы. Такой подход позволяет выполнять как количественную, так и качественную оценку влияния случайных факторов на параметры колебаний.

Спектральная плотность сегмента выборки акселерограммы выходных параметров колебания как комплексная величина обратного преобразования Фурье состоит из мнимой части спектра и модуля спектра, полученных путем разделения длительности импульсного воздействия от удара на равные интервалы  $N$  [2]. При достаточно коротком сегменте импульса  $10^{-4} < T \cdot \nu < 10^{-2}$  с комплексный спектр можно считать постоянным и равным площади импульса и выходные реакции системы пропорциональными ее весовой функции  $g(t)$  [3]:

$$g(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{p_0} R \cdot e_{p_0} \cos p_0 \cdot t \cdot dp_0, \quad (3)$$

где  $0 < p_0 < 1$ ;  $R \cdot e_{p_0} \leq p_0$ .

Тогда максимальная величина исходной реакции в виде частоты и ускорения будет равна

$$X_{\max} = F(x) g(t), \quad (4)$$

где  $F(x) = \int_0^t X(t) dt$ .

$X(t)$  – функция распределения случайных величин спектра свободных колебаний на протяжении сегмента выборки в период времени  $t$ .

Производная  $F(x) = F'(x)$  непрерывной случайной величины  $X$  является плотностью вероятности распределения случайной величины и дифференциальным законом распределения  $X$ .

При интегральном законе распределения случайной величины  $X$ , задаваемой функцией распределения  $F(x)$ , величину  $X_{cp}$  будем рассматривать как среднее значение случайной величины в пределах  $i$ -го интервала сегмента спектра частот. В этом случае среднее значение определяется выражением

$$X_{cp} = \frac{1}{T_{ix}} \int_0^{T_{ix}} X_i dx = \frac{X_{cp i}^{T_{ix}}}{\sum_{i=1}^N X_{cp i}}, \quad (5)$$

где  $X_{cp i}$  – относительная величина среднего значения спектральной функции  $F(x)$ .

Любая выборка спектра частот или ускорения будет характеризоваться параметром среднего значения

$$\varepsilon_{c \min} = T_{ix} = \pi \cdot F(x) \Delta t \approx \frac{\pi}{2}, \quad (6)$$

где  $\Delta t \leq \frac{1}{2p_{0 \text{cp}}}$  – частота спектра средних частот собственных колебаний в пре-

делах сегмента выборки.

Выражение для  $X_{cp}$  при обратном преобразовании Фурье принимает вид

$$X_{cp} = \frac{2}{\pi} \Delta p_0 \sum_{i=1}^N p_0 \cdot \varepsilon_{c \min}. \quad (7)$$

Тогда среднее значение случайной величины  $X_{cp}$  функции вероятности  $F(x)$  и плотности распределения  $d(x)$  в сегменте выборки и математическое ожидание  $m_x$  определяются зависимостью в виде

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} X_i \cdot f(x) dx, \quad (8)$$

где  $m_x$  – математическое ожидание или среднее значение случайной величины  $X_i$ . Эта величина равна

$$m_x = \sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i,$$

где  $X_i$  – текущие координаты случайных величин;  $P_i$  – вероятность появления случайной величины  $X_i$ .

Зависимость между математическим ожиданием  $m_x$  и дисперсией случайной величины имеет вид

$$D_x = -m_x^2. \quad (9)$$

Возможное рассеяние значений случайной величины  $X$  учитывается среднеквадратичным отклонением  $\sigma_x$ , равным

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (10)$$

Для примера, центр рассеяния случайной величины импульсов (рис. 1) колокольного типа  $h_2 = 2h_1$  и синусоидального  $h_1$  с математическим ожиданием  $m_x = a$  в виде нормального закона распределения случайных величин  $f(x)$  запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2(x-a)^2}; \\ D_x &= \frac{1}{2h^2}; \sigma_x = \sqrt{D_x} = \frac{1}{h\sqrt{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

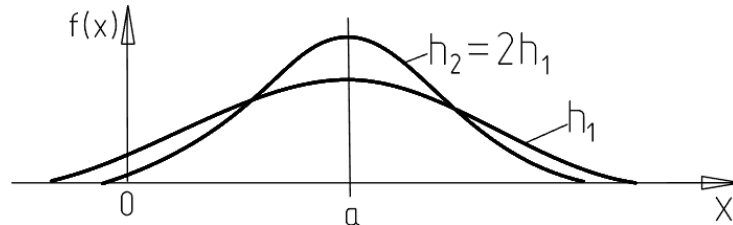


Рис. 1. Центр распределения или центр рассеяния  
Fig. 1. Distribution or scattering center

Функция нормальной плотности вероятности распределения  $F(x)$  будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} F(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot D_x}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2D_x}}; \\ \text{или } F(x) &= \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Функция распределения случайной величины  $X$ , подчиняющейся нормальному закону, выражается через интеграл вероятности (функцию ошибок) [4]

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{2} + \Phi_u \left( \frac{(X - m_x)}{\sigma_x} \right). \quad (13)$$

Принимая вероятность отклонения случайных величин сегмента выборки  $E_x = \frac{\rho}{n} \approx 0,5$ , получаем следующие значения:  $\Phi \left( \frac{E_x}{\sigma_x} \right) = 0,25$ ;  $U = \rho\sqrt{2}$ ;  $\rho = 0,4769$ .

Тогда вероятность появления случайной величины  $X_{cp}$   $P_i = 0,997$  при среднеквадратичном отклонении будет равна  $3\sigma_x$ , при  $P_i = 0,995 - 4\sigma_x$ , при  $P_i = 0,95 - 2\sigma_x$ .

В качестве примера на рис. 2 представлены фрагменты обработки осциллограммы: в линейном и логарифмическом масштабах показаны результаты нормирования спектра мощности колебаний балки от ударного воздействия, сглаженного по  $N = 11$  точкам (исходное физическое разрешение спектра – 0,017 Гц).

На рис. 2, б представлен пример разложения исходного спектра мощности на составляющие ее колебания инерции и ускорения в различных полосах частот, отфильтрованных с помощью полосовой цифровой фильтрации. Осцил-

лограмма 1 соответствует полосе частот 1,9–3,0 Гц и отвечает основной энергонесущей области колебаний. Осциллограммы 2, 3 соответствуют полосам частот 2,0–2,25 Гц с пиком  $X_{\max} = 2,17\text{--}2,38$  Гц.

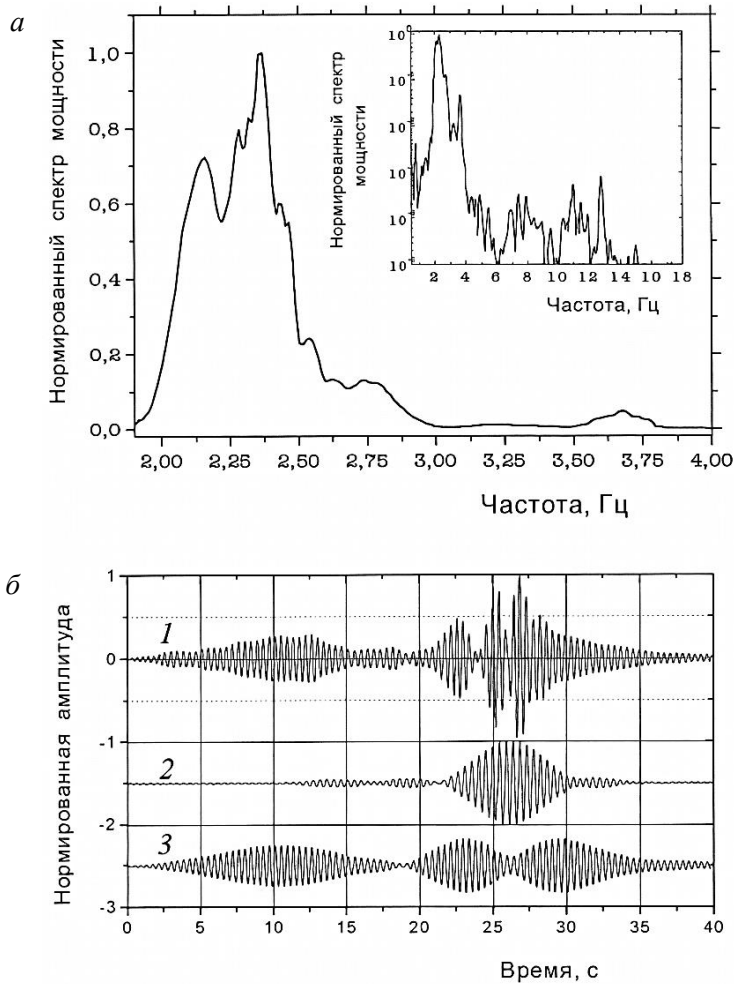


Рис. 2. Фрагменты колебания балок моста:

*a* – в нормированной мощности в основной полосе частот по оси *x* и в логарифмическом масштабе по оси *y*; *b* – нормированные осциллограммы в различных спектральных полосах: 1 – в полосе частот 1,9–3,0 Гц; 2 – в полосе частот 2,0–2,25 Гц; 3 – в полосе частот 2,25–2,5 Гц

Fig. 2. Beam vibration spectra:

*a* – normalized power in the main frequency band on the *x*-axis and on a logarithmic scale on the *y*-axis; *b* – normalized oscilloscope patterns in different spectral bands: 1 – 1.9–3.0 Hz, 2 – 2.0–2.25 Hz, 3 – 2.25–2.5 Hz

Временные реализации собственных колебаний балок моста в г. Томске (рис. 3, *a*, *b*) и их частотные спектры колебаний (рис. 3, *в*, *г*) показывают, что энергетический вклад собственных колебаний соответствует энергетическому спектру колебаний балок пролетных строений (рис. 4).

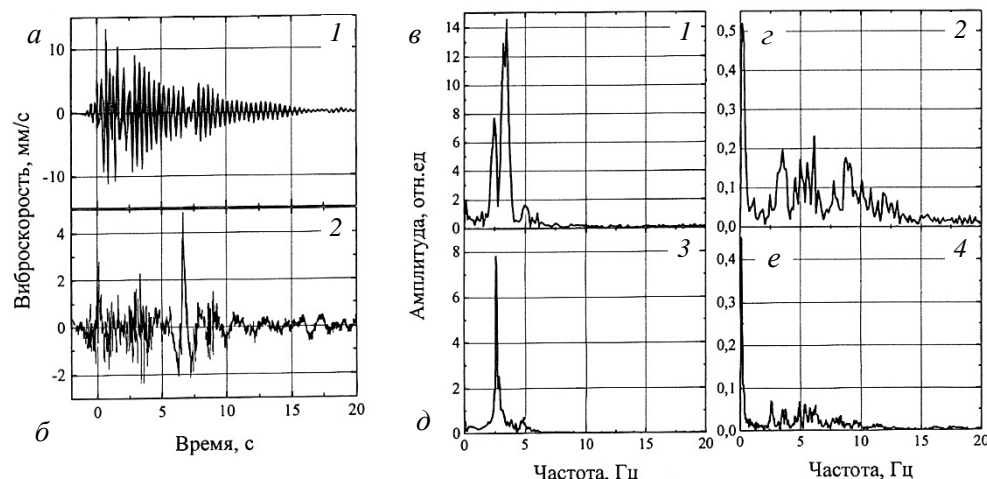


Рис. 3. Временные реализации колебания балок на собственных частотах:  
*a – e* – частотные спектры собственных колебаний балок; 1, 3 – середина пролета;  
 2, 4 – в 1/3 пролета

Fig. 3. Time-domain representations of beam vibrations at natural frequencies:  
*a–f* – frequency spectra of natural vibrations of beams: 1, 3 – at span center; 2, 4 – at 1/3 of the span

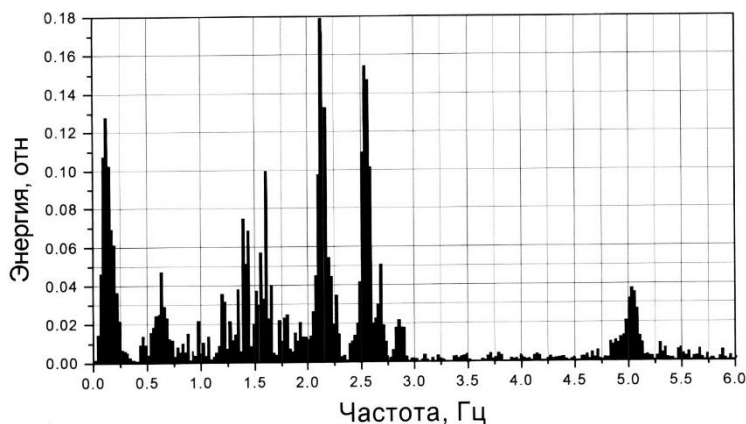


Рис. 4. Энергетическая мощность спектра собственных колебаний балок с учетом инерционности массы

Fig. 4. Energy spectrum of natural vibrations of beams with regard to mass inertia

Из реализации спектра колебаний балок видно, что спектр общей мощности имеет несколько узких частотных полос (см. рис. 3, *в – e*) со следующими максимумами: 0,12; 0,66; 1,3; 2,6; 2,5; 5 Гц. Наиболее мощные спектры лежат в следующих областях: 1,12; 2,1; 2,5 Гц. Основная полоса спектра колебаний с максимумом 0,66 Гц является определяющей в энергетической мощности колебания балок. Результаты аналогичных частотных спектров в режиме свободных колебаний были получены при испытании ряда мостов через р. Нью в Республике Саха (Якутия) [5] (рис. 5).

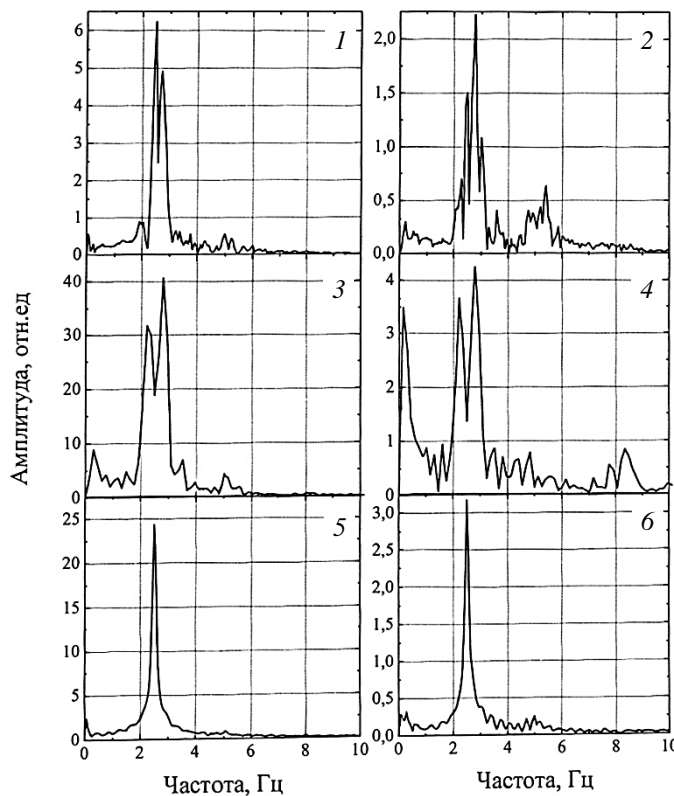


Рис. 5. Частотные спектры свободных колебаний балок автодорожного моста через р. Ньюю  
 Fig. 5. Frequency spectra of free vibrations of bridge beams over the Nyuya River

Спектральный анализ сегментов акселерограмм для балок в режиме свободных колебаний показал, что среднее значение коэффициента затухания составляет  $\varepsilon = 0,231$  в 1 с, а логарифмический декремент затухания  $\ln \delta = 0,092$ . Основная частота собственных колебаний с главными пиками сосредоточена в пределах 2,3–4,1 Гц (период колебаний  $T = 0,244\text{--}0,435$  с).

Другим примером реализации спектрального анализа служат результаты исследований свободных колебаний балки пролетных строений моста неразрезной системы со схемой 42,5 + 6 · 60 + 42,5 м. На рис. 6 в логарифмическом масштабе приведены нормированные спектры мощности свободных колебаний балки. Нормированные спектры мощности (рис. 6, а, б, рис. 7) анализируются как случайные величины спектра с математическим ожиданием  $m_x(t)$  случайной функции  $F(x)$ .

На рис. 6, б функция когерентности (сплошная линия), а также кросс-спектр в линейном масштабе (линия с точками) соответствуют собственной частоте колебания (нулевая гармоника), равной 2,93 Гц, т. к. на нее приходится максимум модуля кроссспектра. В спектре также наблюдается отчетливый пик на частоте 2,34 Гц, обладающий теми же признаками, что и основной, но уступающий ему по амплитуде более чем в 6 раз. Коэффициент затухания колебаний не превышает  $0,2 \text{ с}^{-1}$ . В других спектральных диапазонах (рис. 6, в) выде-

ляются полосы частот 2,0–2,7 Гц с центральным пиком 2,34 Гц и 2,7–3,35 Гц с пиком 2,93 Гц.

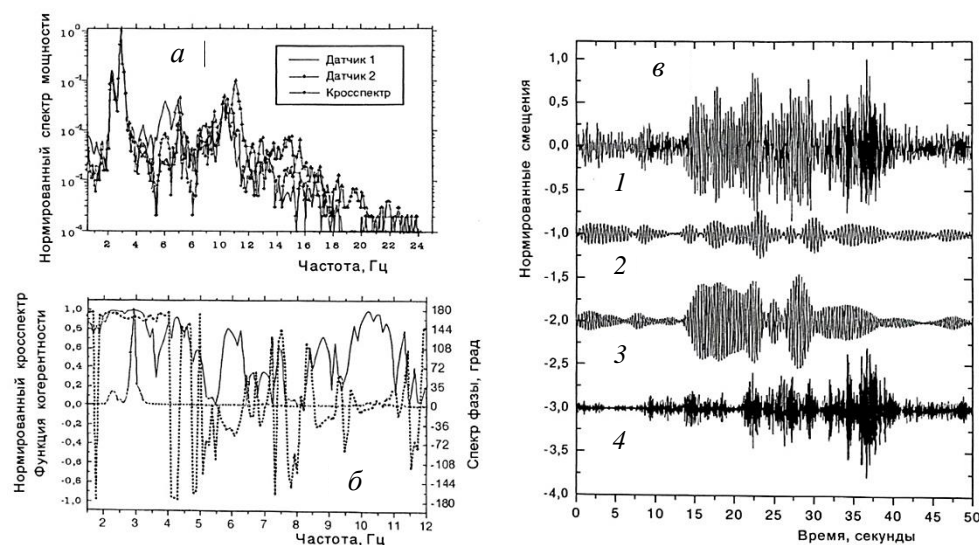


Рис. 6. Нормированные спектры свободных колебаний неразрезной балки:

*a* – нормированные спектры мощности колебаний балок, а также их взаимный амплитудный спектр (логарифмический масштаб по оси ординат); *b* – нормированный взаимный амплитудный спектр (линия с точками); функция когерентности колебаний (сплошная линия), взаимный фазовый спектр колебаний (точечная линия); *c* – нормированная окселерограмма в различных спектральных полосах: 1 – в полосе 0,5–25 Гц; 2 – полоса 2,0–2,7 Гц; 3 – полоса 2,7–3,35 Гц; 4 – полоса 5–16 Гц, окселерограммы 2, 3 и 4 смещены вниз от нулевой линии для более удобного просмотра

Fig. 6. Normalized spectra of free vibrations of an unseparated beam:

*a* – normalized power spectra of beam vibrations and their mutual amplitude spectrum (logarithmic scale on y-axis); *b* – normalized mutual amplitude spectrum (dotted line); vibration coherence function (solid line), mutual phase spectrum of vibrations (dotted line); *c* – normalized pattern in various spectral bands: 1 – 0.5–25 Hz; 2 – 2.0–2.7 Hz; 3 – 2.7–3.35 Hz; 4 – 5–16 Hz. Oscilloscope patterns 2–4 are shifted downward from zero line for easier viewing

Спектральный анализ показал, что основная генерация собственных колебаний находится в пределах  $5 < p_0 < 16$  Гц в диапазонах времени 14–20 с. Усреднение результатов межканального анализа спектра мощности колебаний (рис. 6, *a*) представим в развернутом виде сегмента выборки через одномерную плотность вероятности  $f_i(t)$  и математического ожидания действительной величины  $X$ ; функции  $m_x(t)$  (рис. 7).

Рассмотрим сегмент выборки спектра свободных колебаний, содержащий  $n = 13$  всплесков. Требуется определить вероятность события  $A$ , которая характеризует плотность распределения случайных величин частот в данном сегменте. Эта вероятность служит показателем усредненного значения свободных колебаний и отражает частоту появления всплесков на интервале времени  $t$ . Математическое ожидание при этом определяется зависимостью

$$m_x(t) = p^* = \frac{\sum A}{n}, \quad (14)$$

где  $\sum A$  – сумма всплесков, мм;  $n = 13$  – количество всплесков в сегменте выборки  $m_x(t) = 0,8$  мм.

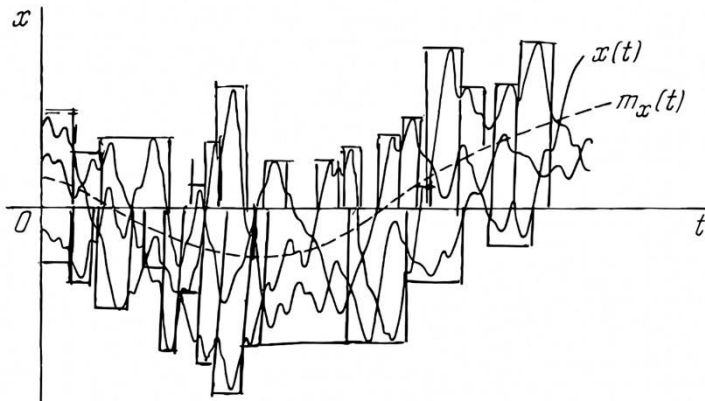


Рис. 7. Сегментарное представление зависимости  $x(t)$  от  $m_x(t)$   
 Fig. 7. Segmental representation of the relationship between  $x(t)$  and  $m_x(t)$

Дисперсия (рассеяния) для сегмента равна

$$D(x) = \frac{p^*(g - p^*)}{n} = 0,011. \quad (15)$$

Среднеквадратичное отклонение при подсчете среднего значения пиков колебаний в сегменте равно

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2}{12}} = 0,4. \quad (16)$$

Коэффициент корреляции  $K(x)$  при среднеквадратичном отклонении 0,4 будет равен

$$K(x) = \frac{D_x + k_x^2}{n-1} = 0,06, \quad (17)$$

где  $k_x^2$  – корреляционный сегмент; в определении коэффициента корреляции равен  $D_x^2 + m(x)^4$ .

Для вычисления отношения длины средних арифметических значений приближений случайных величин в выборке к их математическому ожиданию  $m_x$  воспользуемся законом распределения случайных величин в виде

$$T_e = \frac{M_x - m_x}{S_x}, \quad (18)$$

где  $T_e$  – длина интервала средних значений закона нормального распределения случайных величин;  $S_x$  – спектральная плотность случайных величин  $X_s$  со средним значением;  $X_s$  – случайная средняя величина нормального закона распре-

деления выборки, равна  $\sqrt{(n-1)D_x^2}$ ;  $M_x$  – случайное значение оценки математического ожидания  $m_x$ , разбивая длину спектра выборки записи колебаний на прямоугольники (см. рис. 7). Значение  $M_x$  запишем в виде

$$M_x = \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} X(t) dt. \quad (19)$$

Для определения  $m_x$  справедливо условие

$$m_x = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} X(t), \quad (20)$$

где  $n_1$  – количество прямоугольников со средним значением  $X(t)$  на протяжении интервала  $T_e$  выборки.

Таким образом, комплексный амплитудно-частотный спектр огибающей (см. рис. 7, пунктир) соответствует средним значениям частоты  $P_{0\text{cp}}$  и амплитуды  $A_{0\text{cp}}$ , равным

$$\left. \begin{aligned} P_{0\text{cp}} &= \kappa \frac{2\pi}{T}; \quad \kappa = 1, 2, 3, \dots; \\ A_{0\text{cp}} &= \frac{2S_x \cdot P_{0\text{cp}}}{T}, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где  $T$  – период огибающей колебания  $i$ -й гармоники на длине  $T_e$ .

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n_1(n_1-1)} \sum_{i=1}^{n_1} (X_s - M_x)^2}. \quad (22)$$

### Выводы

Сопоставление результатов спектрального анализа колебаний балок, полученных в лабораторных и натуральных условиях при одиночном ударном воздействии по методу Герца, показывает, что функция когерентности существенно меньше единицы, фазовый спектр далек от стабильного значения вблизи  $0^\circ$  или  $\pm 180^\circ$ , а частота собственных колебаний по ширине полосы оценивается с учетом коэффициента затухания и проявления взаимного амплитудного спектра колебаний.

В зависимости от типа импульса требуется дополнительно исследовать связь между его длительностью и шириной спектра.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Харкевич, А.А. Спектры и анализ. Государственное издательство физико-математической литературы. Москва, 1962. 234 с.
2. Батуев, Г.С., Голубков, Ю.В., Ефремов, А.К., Федосов, А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. Москва : Машиностроение, 1969. 247 с.
3. Картопольцев, В.М. К вопросу вибродиагностики свободных колебаний балок методом Герца // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 242–252. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2024-26-3-242-252>

4. Пугачев, В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва : Гостехиздат, 1957. 659 с.
5. Бочкарев, Н.И., Картопольцев, А.В. Исследование динамической работы сталежелезобетонных мостов по торцевым колебаниям пролетных строений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2001. № 2. С. 145–154.

#### REFERENCES

1. Kharkevich, A.A. Spectra and Analysis. Moscow: Fizmatlit 1962, 234 p. (In Russian)
2. Batuev, G.S., Golubkov, Yu.V., Efremov, A.K., Fedosov, A.A. Engineering Methods for Studying Impact Processes. Moscow: Mashinostroenie 1969, 247 p. (In Russian)
3. Kartopol'tsev, V.M., Alekseev, A.A., Paraev, B.A. Free Vibration Measurement of Beams using Hertz's Method. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26(3): 242–252. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2024-26-3-242-252> (In Russian)
4. Pugachev, V.S. Theory of Random Functions and its Automatic Control Applications. Moscow: Gostekhizdat. 1957, 659 p. (In Russian)
5. Bochkarev, N.I., Kartopol'tsev, A.V. Dynamic Operation of Composite Bridges along End Vibrations of Bridge Spans. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2001; (2): 145–154. (In Russian)

#### Сведения об авторе

*Картопольцев Владимир Михайлович*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет., 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; ООО «Диамос», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, [diamos@mail.ru](mailto:diamos@mail.ru)

#### Author Details

*Vladimir M. Kartopol'tsev*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, [diamos@mail.ru](mailto:diamos@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 30.09.2025  
Одобрена после рецензирования 21.10.2025  
Принята к публикации 22.01.2026

Submitted for publication 30.09.2025  
Approved after review 21.10.2025  
Accepted for publication 22.01.2026