

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОСТА
ПРИ МОНИТОРИНГЕ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ
ГОСТ Р 54859-2011**

Канд. техн. наук **О.В. Крутиков**

(ООО «Т.К.М.»),

канд. техн. наук, доцент **И.Ш. Гершуни**

(ООО «Т.К.М.»;

Российский университет транспорта (МИИТ)),

инженер **Д.И. Рыжов**

(ООО «Т.К.М.»)

Контактная информация: info@tkm-most.ru

Широко внедряемые системы мониторинга технического состояния мостов обеспечивают непрерывное наблюдение за работой конструкции моста и условиями его эксплуатации. В целях обеспечения безопасных условий эксплуатации сооружения необходимы алгоритмы преобразования информации, регистрируемой датчиками системы, и получения параметров, характеризующих состояние моста. В статье рассматриваются вопросы определения динамических характеристик моста, таких как частоты основных форм собственных колебаний и соответствующие им логарифмические декременты с учетом требований ГОСТ Р 54859-2011 на основе экспериментальных данных, получаемых при мониторинге технического состояния моста.

С использованием данных, накопленных системой мониторинга реального объекта, выполнены расчеты спектров мощности методом периодограмм средствами математического пакета MathCad и с помощью разработанной в ООО «Т.К.М.» программы «СпектрКат». Показано получение динамических характеристик пролетного строения в определенном диапазоне частот.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния моста, исследовательский мониторинг, контрольный мониторинг, напряженно-деформированное состояние (НДС), преобразование Фурье, спектр мощности, операционный метод, собственная частота, логарифмический декремент колебания, ГОСТ Р 54859-2011.

Согласно ГОСТ Р 54859-2011 «Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний» [1] и разработанному на его основе межгосударственному стандарту ГОСТ 34081-2017, период и логарифмический декремент основного то-

на собственных колебаний здания или сооружения являются важными расчетными параметрами при анализе изменений напряженно-деформированного состояния здания или сооружения в процессе эксплуатации, в том числе при проведении обследований и мониторинга технического состояния здания. Для определения значений периода собственных колебаний T_m применяют косвенный метод измерений, при котором регистрируют процессы колебаний здания или сооружения по трем взаимно перпендикулярным осям. Значения T_m по каждой из осей определяют по результатам измерений по соответствующей оси расчетным методом, основанным на анализе спектров мощности колебаний здания.

Логарифмический декремент (далее – декремент) колебания D , согласно ГОСТ Р 54859-2011 ([1], далее – ГОСТ), связан с добротностью колебательной системы Q на рассматриваемом периоде тона T формулами:

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = f / (f_B - f_H) ; \quad (1)$$

$$D = \frac{\pi}{Q} = \pi \cdot \frac{f_B - f_H}{f} , \quad (2)$$

где

$f = 1/T_m$ – собственная частота колебательной системы;
 f_B, f_H – границы полосы пропускания, на которой энергии системы вдвое меньше энергии на собственной частоте.

В настоящей статье рассматриваются вопросы получения динамических характеристик мостового сооружения, таких как частоты основных форм собственных (свободных) колебаний (далее – собственные частоты) и соответствующие им декременты колебаний с учетом требований ГОСТ на основе экспериментальных данных, получаемых при мониторинге технического состояния моста.

Мониторинг состояния моста является современным видом работ в системе наблюдения (надзора) за эксплуатируемыми мостовыми сооружениями наряду с диагностикой, обследованиями и испытаниями. Мониторинг мостов предусмотрен нормативными документами ОДМ 218.4.002-2008 [2], СП 274.1325800.2016. Одной из целей мониторинга является наблюдение за напряженно-деформированным (НДС) состоянием моста.

Из опыта динамических испытаний мостов возбуждение свободных колебаний конструкции с амплитудами, достаточными для получе-

ния достоверных динамических характеристик в условиях имеющегося фонового шума, может производиться разными методами, например, путем пропуска испытательного автомобиля через «порожек» после съезда его с моста или в результате раскачивания моста с помощью троса. Исследования «чистых» свободных колебаний возможно в условиях специального режима, когда движение транспорта по мосту прерывается.

При мониторинге исследуется работа моста в обычных эксплуатационных условиях. Средства системы мониторинга обеспечивают сбор «операционных» данных, на основании которых динамические характеристики также могут быть идентифицированы. В качестве альтернативы динамическим испытаниям моста ниже рассматривается «операционный» способ оценки собственных частот и декрементов колебаний.

С учетом того, что метод определения значений собственных частот и декрементов основан на анализе спектров мощности сигналов, период дискретизации сигналов $\Delta \tau$ и связанная с ним частота опроса $f_s = 1/\Delta \tau$ первичных преобразователей, длительность реализаций должны приниматься с учетом значений исследуемого частотного диапазона и декрементов колебаний. Частота опроса первичных преобразователей должна превышать не менее чем в 2-3 раза высшую из рассматриваемых собственных частот конструкции. Вопрос о продолжительности записи T , определяющей разность между ближайшими частотами в спектре (шаг дискретизации спектра) $\Delta f = 1/T$, рассматривается далее.

Проанализируем реализации, полученные на реальном объекте: мостовом переходе через р. Волга на автомобильной дороге Н. Новгород-Шахунья-Киров в Нижегородской области – Борский мост.

Характеристики объекта мониторинга следующие:

- русловая часть мостового перехода включает в себя два разрезных цельнометаллических арочных пролетных строения;
- расчетный пролет арок – 159 м;
- габарит проезда – 10,5 м (2 полосы движения).

Система мониторинга состояния моста через р. Волгу в период эксплуатации (СМС-МВНН) введена в действие в 2017 г. Ввод в действие СМС-МВНН выполнялся в составе работ по возведению моста. Цель мониторинга – наблюдение за работой конструкции моста и условиями его эксплуатации, включающее в себя технический контроль параметров мониторинга для обеспечения безопасных условий эксплуатации сооружения и накопление данных о работе моста при воздействии реальных подвижных нагрузок и природных факторов. Мониторинг состояния моста через р. Волгу по назначению является контрольным и

исследовательским, по форме представления информации в течение времени – непрерывным [2].

СМС-МВНН включает в себя датчики, размещенные непосредственно на опорах и арочных пролетных строениях 15-16 и 16-17:

- датчики деформации, обеспечивающие измерение параметров работы моста, характеризующих его напряженно-деформированное состояние;
- датчики температуры, обеспечивающие измерение температуры элементов моста;
- датчики усилия в ванте, обеспечивающие измерение (оценку) усилия в подвесках;
- акселерометры, обеспечивающие представление информации о колебаниях моста в условиях эксплуатационных воздействий;
- инклинометры и датчики перемещения, обеспечивающие измерение параметров работы моста, характеризующих его пространственное положение;
- видеокамеры, обеспечивающие съемку обстановки на проезжей части.

Мониторинг, реализуемый СМС-МВНН, – *динамический*. Это означает, что СМС-МВНН непрерывно получает подробную информацию о НДС конструкции в объеме, достаточном для анализа ее работы в условиях реальных скоростей движения автомобилей. При частоте опроса 100 Гц, принятой в СМС-МВНН, датчиками одновременно фиксируются состояния конструкции, соответствующие положениям движущегося со скоростью 90 км/ч автомобиля через каждый 0,25 м. При динамическом мониторинге с помощью датчиков возможно выявить направление движения, скорость и массу проезжающего по мосту автотранспортного средства [6].

Для исследования колебаний пролетных строений используются одноосные акселерометры, регистрирующие колебания в вертикальном (12 акселерометров) и в поперечном направлениях (6 акселерометров). Акселерометры размещены в затяжках пролетных строений (п.с.) 15-16, 16-17 в 6-ти сечениях (в 1/4 и 1/2 пролета), по три в сечении.

Теоретический динамический анализ выполнен при проектировании моста. Отметим следующие основные результаты: периоды (частоты) первых форм собственных колебаний находятся в диапазоне от 1,28 с (0,78 Гц) до 0,38 с (2,56 Гц). Формы данных собственных колебаний учтены при выборе мест установки акселерометров и задании направления их осей. Подробный анализ результатов выходит за рамки данной статьи.

Далее рассматривается сигнал от акселерометра UA01 (марка акселерометра – АТ-1105), установленного в 1/4 пролета п.с.15-16 и направленного вертикально. Реализация сигнала акселерометра за период около 1,5 ч приведена на **рис. 1**. Опрос акселерометра производился с частотой $f_s=100$ Гц ($\Delta\tau=0,01$ с).

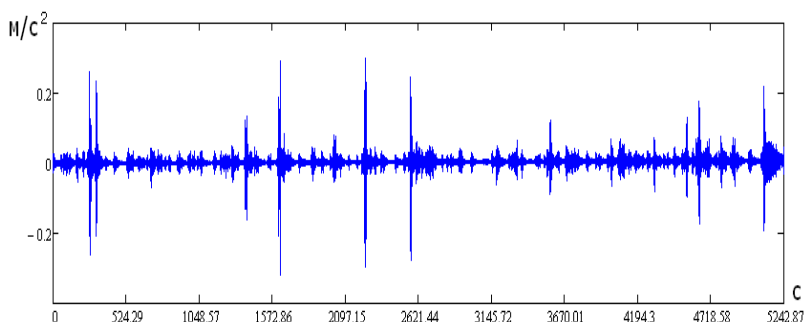


Рис. 1. Реализация сигнала акселерометра UA01 в период с 00:21 по 01:51 (UTC) 4 июля 2021 г.

Зависимость характеризуется определенными закономерностями. В отдельные случайные моменты наблюдаются кратковременные всплески амплитуд различной величины. После возникновения всплеска амплитуда сигнала затухает. Всплески колебаний связаны с проездом по мосту автомобилей. Так, например, всплеск с амплитудой $\pm 0,23$ м/с² на 260-й секунде записи соответствует проезду грузового автомобиля по пролетному строению. Такой момент зафиксирован видеокамерами, соответствующая запись сохранена в видеорегистраторе СМС-МВНН, что показано на **рис. 2**.

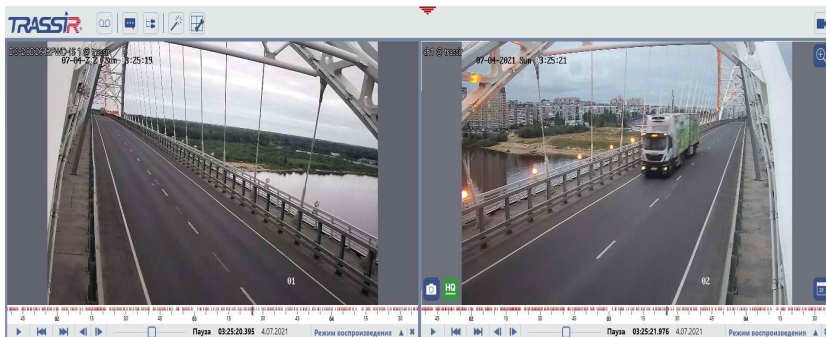


Рис. 2. Вид на проезжую часть моста в 0:25:21 (UTC) 4 июля 2021 г.: пролетное строение 16-17 (слева), пролетное строение 15-16 (справа)

Для анализа сигналов используем *Mathcad* – математическое программное обеспечение, позволяющее выполнять, анализировать инженерные расчеты и обмениваться ими [3]. Применим функцию дискретного преобразования Фурье (ДПФ) *fft*.

Функция *fft* использует высокоэффективный алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Требование к вектору аргумента иметь 2^m элементов является необходимым условием БПФ. *fft* возвращает дискретное преобразование Фурье 2^m -мерного вещественнозначного вектора. Аргумент можно интерпретировать как результат измерений через равные промежутки времени некоторого сигнала. Результат – комплекснозначный вектор размерности $1+2^{m-1}$. Элементы вектора, возвращаемого *fft*, вычисляются по формуле:

$$c_j = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^{n-1} v_k e^{2\pi i (j/n)k} , \quad (3)$$

где

n – число элементов в v ;

v_k – k -й элемент вектора v ;

i – мнимая единица;

j – порядковый номер элемента спектра $j = 0 \dots 1+2^{m-1}$.

Элементы в векторе v , возвращенном функцией *fft*, соответствуют различным частотам. Чтобы восстанавливать фактическую частоту, необходимо знать частоту измерения исходного сигнала. Если v есть n -мерный вектор, переданный в функцию *fft*, и частота измерения исходного сигнала – f_s , то частота, соответствующая элементу j спектра, равна:

$$f_j = \frac{j}{n} \cdot f_s . \quad (4)$$

В качестве аргумента функции *fft* примем часть рассматриваемой реализации – вектор, состоящий из $n=2^{15} = 32768$ точек (рис. 3). Начало вектора совпадает с началом реализации. Длительность вектора $T=327,68$ с. В рассматриваемую часть попали всплески с высокими по сравнению с фоновым шумом амплитудами сигнала.

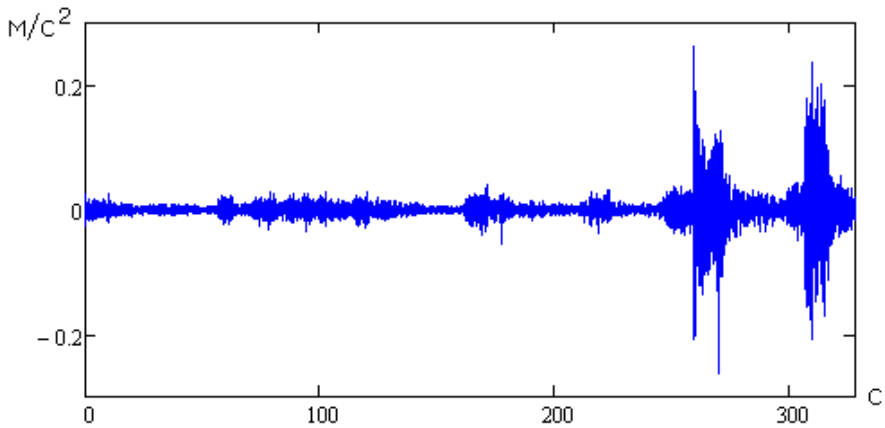


Рис. 3. Вектор v из $n=32768$ точек, длительность $T=327,68$ с

Вычислим (далее команды *Mathcad* в рамке):

$$V1 := \text{fft}(v)$$

В результате применения *fft* для v получена *односторонняя* функция Фурье, состоящая из действительной и мнимой частей, в диапазоне от 0 до 50 Гц. На **рис. 4** показана часть спектра в диапазоне от 0 до 3 Гц, где ожидаются собственные частоты конструкции.

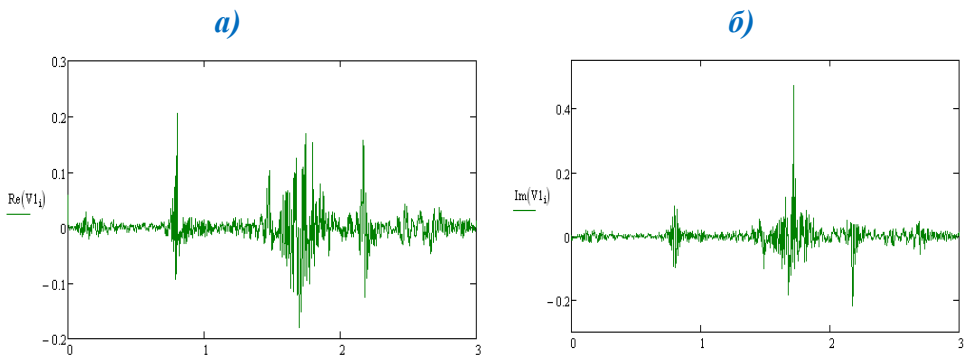


Рис. 4. Спектр сигнала, полученный с помощью функции *fft*
 а) действительная часть спектра; б) мнимая часть спектра

Из теории математической статистики обработки сигналов, например из [4], известно, что одним из вычислительных способов определения спектра мощности (плотности спектра мощности) является использование метода преобразования Фурье (5).

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{P} \overline{|X(f)|^2}, \quad (5)$$

где

$S_{xx}(f)$ – плотность спектра мощности, как функция частоты;
 $X(f)$ – преобразование Фурье сигнала $x(t)$;
 P – длительность реализации.

Таким образом, для оценки спектра мощности необходимо выполнить возведение в квадрат функции Фурье, взятой по модулю.

Вычислим:
$$S1_i = (|V1_i|)^2$$

На рис. 5 а показана часть спектра мощности в диапазоне от 0 до 3 Гц, где ожидаются собственные частоты конструкции.

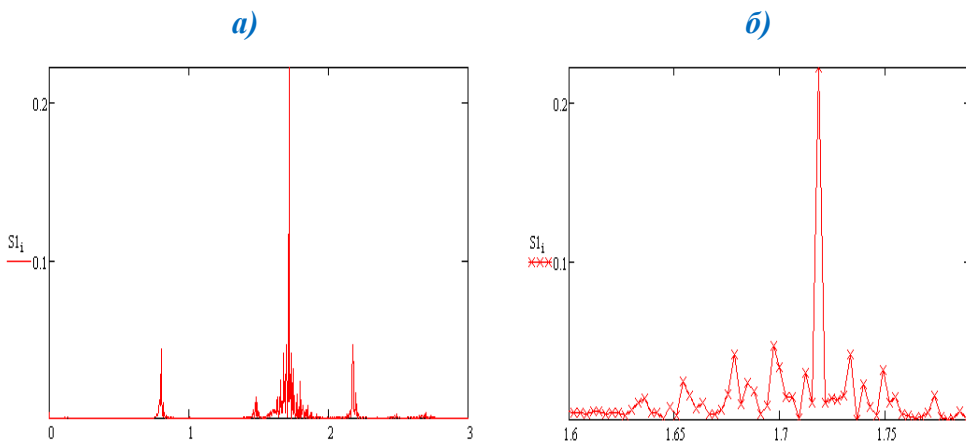


Рис. 5. Спектр мощности:

а) диапазон частот от 0 до 3 Гц; б) диапазон частот от 1,6 до 1,79 Гц

Спектр содержит пики на частотах 0,80; 1,48; 1,72; 2,18 и 2,70 Гц. Соответственно, периоды составляют 1,25; 0,68; 0,58; 0,46 и 0,37 с. Пик с наибольшей амплитудой наблюдается на частоте $f_{11} = 1,72$ Гц (период $T_{11} = 0,58$ с) с амплитудой $A_n = 0,22$ м²/с⁴. На рис. 5 б более подробно показана часть спектра в области этого пика. Полученный

спектр мощности флуктуирован. Это свойственно сигналам с шумом. Для реализации с Гауссовым шумом известно, что чем больше ее длина, тем больше флуктуируется спектр [5]. Это в полной мере справедливо для данных от акселерометров при мониторинге. Такой спектр непригоден для оценки декремента колебаний, так как оценка добротности (полосы пропускания) по методике ГОСТ [1] по линиям, непосредственно примыкающим к максимуму, не будет верно описывать энергию колебаний, сосредоточенную в зоне данной частоты. Избавление от флуктуаций достигается уменьшением длины реализации [5].

На практике при оценке спектров мощности используются статистические осреднения. В [5] показано, что результирующая функция, получаемая без использования такого осреднения и называемая выборочный спектр, оказывается неудовлетворительной из-за статистической несостоятельности получаемых с ее помощью оценок, поскольку среднеквадратичная ошибка таких оценок сравнима по величине со средним значением оценки. Оценки спектра мощности, основанные на прямом преобразовании данных и последующем осреднении, получили название *периодограмм*.

Различают периодограммы *модифицированные* – с использованием весовой функции, называемой «окно», а также периодограммы с *перекрытием*, когда данные сегментов пересекаются.

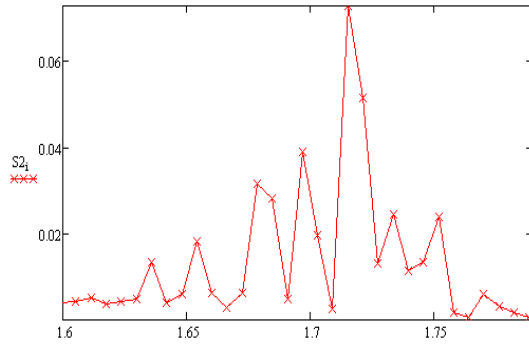
Далее рассмотрим спектры мощности с прямоугольным окном (без изменения амплитуд сигнала) и без перекрытия.

Осредненные спектры мощности получим при использовании функции *fft Mathcad*. Для это необходимо поделить исходный временной ряд на $N=2^k$ участков (сегментов), применить алгоритм БПФ с помощью функции *fft* к каждому сегменту, возвести в квадрат полученный *|fft|* для каждого сегмента, просуммировать коэффициенты преобразованных величин и затем их усреднить (6).

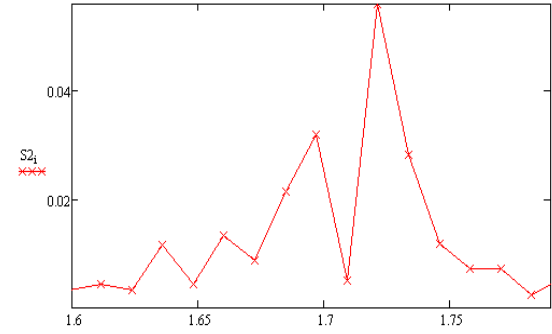
$$S_2 := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|fft(v_i)|)^2 . \quad (6)$$

На **рис. 6** приведены периодограммы, построенные для вектора v ($n = 32768$ точек, $T = 327,68$ с., **рис. 3**), разбитого на $N = 2, 4, 8, 16$ сегментов в диапазоне частот от 1,6 до 1,79 Гц.

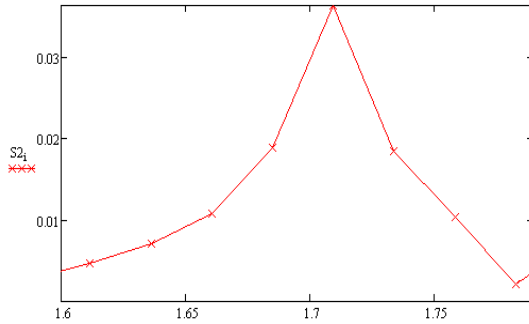
а)



б)



в)



г)

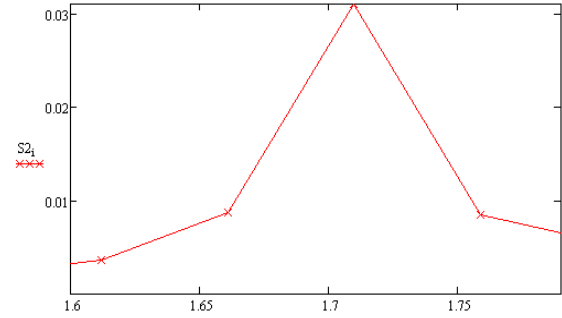


Рис. 6. Периодограммы сигнала в диапазоне частот от 1,6 до 1,79 Гц при разных количествах N и длинах n_{seg} сегментов, участвующих в осреднении:

а) $N = 2$; $n_{seg} = 16384$; $f_{П} = 1,72$ Гц; $A_n = 0,221$; б) $N = 4$; $n_{seg} = 8192$; $f_{П} = 1,72$ Гц; $A_n = 0,056$;
 в) $N = 8$; $n_{seg} = 4096$; $f_{П} = 1,71$ Гц; $A_n = 0,036$; г) $N = 16$; $n_{seg} = 2048$; $f_{П} = 1,71$ Гц; $A_n = 0,031$

Частоты пиков составляют от 1,71 до 1,72 Гц. Оценка частоты несущественно зависит от кратности деления выборки на сегменты.

Очевидно, что из приведенных на **рис. 6** периодограммы сегментов размером $n_{seg} = 4096$ и $n_{seg} = 2048$ точек в меньшей степени флуктуированы и, следовательно, более пригодны для оценки декремента колебаний по методике ГОСТ. Из двух последних для дальнейшего анализа принимаем сегменты $n_{seg} = 4096$ точек, $T_{seg} = 41,0$ с, $\Delta f = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Гц, как имеющие лучшее спектральное разрешение.

Вычислим декремент: согласно ГОСТ нормируем полученный спектр мощности (периодограмма $n_{seg} = 8$). Рассмотрим пик на частоте $f = 1,71$ Гц (**рис. 7**). Верхняя и нижняя границы полосы пропускания составляют: $f_B = 1,74$ Гц, $f_H = 1,68$ Гц.

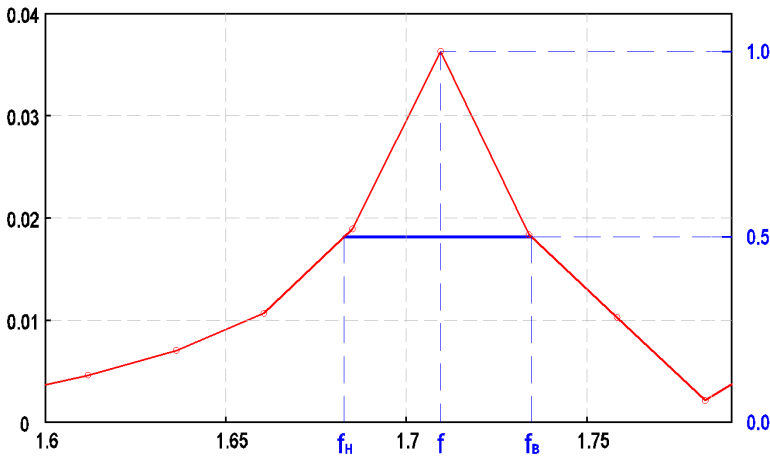


Рис. 7. Нормированный спектр мощности в диапазоне частот от 1,6 до 1,79 Гц

Определим декремент колебаний для рассматриваемой собственной частоты согласно ГОСТ по формуле:

$$D = \pi \cdot \frac{f_B - f_H}{f} = \pi \cdot \frac{1,74 - 1,68}{1,71} = 0,11 \quad (7)$$

Для автоматизированной обработки сигналов, получаемых при мониторинге, и расчетов «операционных» динамических характеристик моста в ООО «Т.К.М.» разработана программа «СпектрКат». В программе используется алгоритм быстрого преобразования Фурье для получения спектров мощности с применением окон разного вида, с перекрытием сегментов различной степени, для оценки декремента колебаний по методике ГОСТ. В результате работы программы вычисляются такие параметры, как частота, период, декремент, при этом оцени-

ваются среднеквадратические отклонения и другие данные для нескольких диапазонов частот. Интерфейс программы с результатами обработки рассмотренного выше вектора из $n = 32768$ точек с осреднением по $N = 8$ сегментам ($n_{seg} = 4096$) приведен на **рис. 8**. Результаты работы программы в диапазоне частот от 1,6 до 1,79 Гц хорошо согласуются с рассмотренными выше результатами *MathCad* (**рис. 6 в, 7**).

Ядро программы может быть использовано для оценки динамических характеристик в реальном времени в составе программного комплекса систем мониторинга.

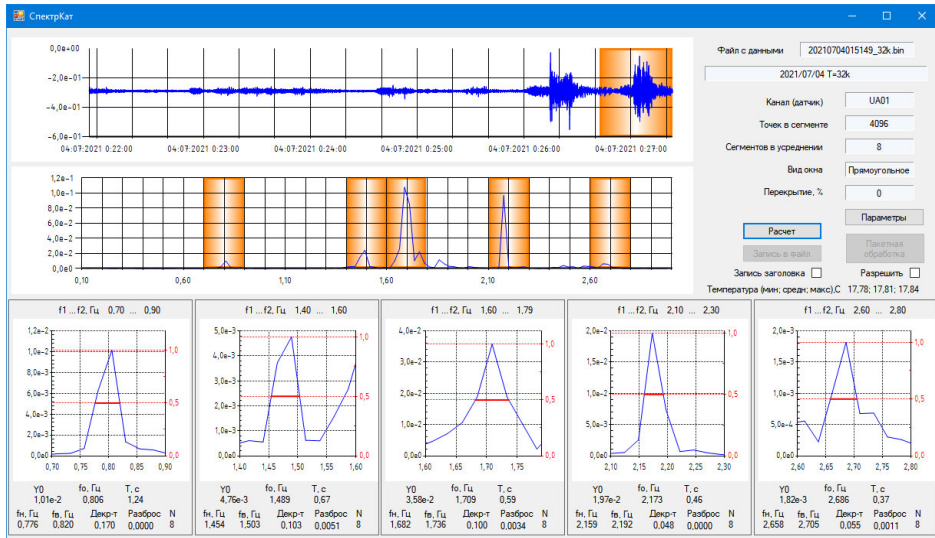


Рис. 8. Интерфейс программы «СпектрКат»

При мониторинге размер генеральной совокупности элементов, охватываемых экспериментом, практически не ограничен. Выборка, составляющая длину периодограммы, задается N – количеством сегментов, участвующих в осреднении. Очевидно, что чем больше N , тем более низкую изменчивость декремента, связанную с операционными условиями (воздействие автомобилей), следует ожидать. С другой стороны, чем меньше N , тем будет заметнее и проявится с меньшей задержкой отклик на возможное нештатное поведение конструкции.

Применим программу «СпектрКат» к совокупности данных в период с 00:21 по 01:51 (UTC) 4 июля 2021 г., показанной на **рис. 1**. При этом используем следующие параметры: $N = 8$, $n_{seg} = 4096$, без перекрытия (перекрытие 0 %) и без изменения амплитуд сигнала (вид окна: прямоугольное). В итоге были получены данные 16-ти экспериментов: собственные частоты, периоды и декременты колебаний, кото-

рые приведены в **табл. 1**. В таблице также приведены значения температуры по результатам измерения соответствующих датчиков в составе системы мониторинга. Температура является важным фактором, определяющим динамические характеристики конструкции.

Согласно требованиям ГОСТ [1], определены значения среднего арифметического T_{cp} , среднеквадратического отклонения σ_T и абсолютной погрешности ΔT периода собственных колебаний в диапазоне частот от 1,6 до 1,79 Гц:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} = 0,584 \text{ с}; \quad (8)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{cp})^2}{n(n-1)}} = 6,83 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad (9)$$

$$\Delta T = \mu(n, p) \cdot \sigma_T = 2,95 \cdot 6,83 \cdot 10^{-4} = 2,02 \cdot 10^{-3} \text{ с} - \text{при заданной вероятности } 0,99. \quad (10)$$

Те же параметры использованы для логарифмического декремента колебаний:

$$D_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} = 0,086; \quad (11)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - D_{cp})^2}{n(n-1)}} = 3,96 \cdot 10^{-3}; \quad (12)$$

$$\Delta D = \mu(n, p) \cdot \sigma_D = 2,95 \cdot 3,96 \cdot 10^{-3} = 1,17 \cdot 10^{-2}. \quad (13)$$

С учетом того, что спектральное разрешение периодограмм *по частоте* составляет $\Delta f = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Гц, разрешение *по периоду* ΔT для данного пика $T_{\Pi} = 0,584$ с определим из соотношений:

$$T_{\Pi} + \Delta T = \frac{1}{f_{\Pi} - \Delta f}, \quad f_{\Pi} = \frac{1}{T_{\Pi}}; \quad (14)$$

$$\Delta T = T_{\Pi} \left(\frac{1}{1 - T_{\Pi} \Delta f} - 1 \right) = 0,584 \left(\frac{1}{1 - 0,584 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2}} - 1 \right) = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (15)$$

Точность оценки периода определяется разрешением метода измерения. Результаты измерения представим в следующем виде:

$$T_{cp} = 0,584 \pm 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (16)$$

$$D_{cp} = 0,086 \pm 1,17 \cdot 10^{-2} - \text{при вероятности } 0,99. \quad (17)$$

Таблица 1

*Динамические характеристики конструкции в диапазоне частот от 1,6 до 1,79 Гц:
собственные частоты, периоды и декременты колебаний в период с 00:21 по 01:51 (UTC) 4 июля 2021 г.*

<i>i</i>	<i>Время</i>	<i>f, Гц</i>	<i>T_i, с</i>	<i>D_i</i>	<i>Температура, °C</i>
1	0:26:01	1,71	0,585	0,100	17,8
2	0:31:29	1,71	0,585	0,098	17,8
3	0:36:56	1,71	0,585	0,055	17,8
4	0:42:24	1,71	0,585	0,099	17,8
5	0:47:51	1,71	0,585	0,070	17,7
6	0:53:19	1,71	0,585	0,089	17,7
7	0:58:47	1,71	0,585	0,080	17,7
8	1:04:14	1,71	0,585	0,104	17,7
9	1:09:42	1,71	0,585	0,092	17,6
10	1:15:09	1,71	0,585	0,090	17,6
11	1:20:37	1,71	0,585	0,068	17,6
12	1:26:04	1,73	0,577	0,114	17,6
13	1:31:32	1,73	0,577	0,094	17,6
14	1:37:00	1,71	0,585	0,077	17,6
15	1:42:27	1,71	0,585	0,069	17,5
16	1:47:55	1,71	0,585	0,077	17,5

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы определения параметров динамических характеристик пролетных строений моста с учетом требований ГОСТ Р 54859-2011 на основе «операционных» данных, получаемых при мониторинге технического состояния.
2. С использованием данных, накопленных системой мониторинга реального объекта, выполнены расчеты спектров мощности средствами математического пакета *MathCad* методом периодограмм. Обоснованы параметры расчетов.
3. Представлена разработанная в ООО «Т.К.М.» программа «СпектрКат», предназначенная для обработки «операционных» данных и позволяющая получать параметры колебаний моста. Показано соответствие результатов программы результатам расчетов *MathCad*.
4. На основе данных, накопленных системой мониторинга реального объекта, показано получение динамических характеристик пролетного строения в определенном диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 54859-2011. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона. – М.: Стандартинформ, 2012. – 17 с.
2. ОДМ 218.4.002-2008. Руководство по проведению мониторинга состояния эксплуатируемых мостовых сооружений / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – М., 2008. – 44 с.
3. Справочный центр о возможностях и функциях *Mathcad* [Электронный ресурс] // Компания РТС – Режим доступа: <https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/> (дата обращения: 16.02.2022).
4. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы [пер. с англ.] / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М.: Мир, 1982. – 430 с.
5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. Крутиков О.В. Мониторинг моста через р. Волга на 176 км автодороги М-10 «Россия» с контролем воздействующей на него подвижной нагрузки / О.В. Крутиков, Д.И. Рыжов, Ю.С. Дабижва, Р.А. Белов // Мир дорог. – 2021. – № 140. – С. 88-91. – Режим доступа: <https://tkm-most.ru/upload/iblock/0d5/0d55de4f65940bb0eba03030f473c6c2.pdf> (дата обращения: 19.02.2022).

LITERATURA

1. GOST R 54859-2011. *Zdaniya i sooruzheniya. Opredelenie parametrov osnovnogo tona.* – M.: Standartinform, 2012. – 17 s.
2. ODM 218.4.002-2008. *Rukovodstvo po provedeniyu monitoringa sostoyaniya ekspluatiruemyh mostovyh sooruzhenij / Federal'noe dorozhnoe agentstvo (Rosavtodor).* – M., 2008. – 44 s.
3. *Spravochnyj centr o vozmozhnostyah i funkciyah Mathcad [Elektronnyj resurs] // Kompaniya PTC – Rezhim dostupa: <https://support.ptc.com/help/mathcad/ru/> (data obrashcheniya: 16.02.2022).*
4. Otnes R. *Prikladnoj analiz vremennyh ryadov. Osnovnye metody [per. s angl.] / R. Otnes, L. Enokson.* – M.: Mir, 1982. – 430 s.
5. Marpl-ml. S.L. *Cifrovoj spektral'nyj analiz i ego prilozheniya.* – M.: Mir, 1990. – 584 s.
6. Krutikov O.V. *Monitoring mosta cherez r. Volga na 176 km avtodorogi M-10 «Rossiya» s kontrolem vozdejstvuyushchej na nego podvizhnoj nagruzki / O.V. Krutikov, D.I. Ryzhov, Yu.S. Dabizha, R.A. Belov // Mir dorog. – 2021. – № 140. – S. 88-91. – Rezhim dostupa: <https://tkm-most.ru/upload/iblock/0d5/0d55de4f65940bb0eba03030f473c6c2.pdf> (data obrashcheniya: 19.02.2022).*

ASSESSMENT OF BRIDGE DYNAMIC CHARACTERISTICS WHEN MONITORING IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF GOST P 54859-2011

Ph. D. (Tech.) **O.V. Krutikov,**
Ph. D. (Tech), Associate Professor **I.Sh. Gershuni**
(«T.K.M.» LLC; Russian University of Transport (MIIT)),
Engineer **D.I. Ryzhov**
(«T.K.M.» LLC)
Contact information: info@tkm-most.ru

Widely implemented bridge technical condition monitoring systems provide continuous monitoring of the bridge structure performance and its operation conditions. In order to ensure safe operation conditions of the structure, algorithms are needed for conversion of data recorded by the sensors of the system, as well as acquisition of parameters characterizing bridge condition. The article considers the issues of obtaining bridge dynamic characteristics such as frequencies of main forms of natural oscillations and

their corresponding logarithmic decrements, in accordance with the requirements of national industry standard GOST R 54859-2011 based on the experimental data obtained during the monitoring of the bridge technical condition.

Using the data accumulated by the monitoring system of a real object, power spectra calculations were performed by the periodogram method using the MathCad mathematical package and with the use of the «SpektrKat» program developed at «Т.К.М.» LLC. The acquisition of the dynamic characteristics of the span in a certain frequency range is considered.

Key words: *bridge technical condition monitoring, research monitoring, stress-strain state (SSS), Fourier transform, power spectrum, operational method, natural frequency, oscillation logarithmic decrement, national industry standard GOST P 54859-2011.*

Рецензент: канд. техн. наук П.А. Сычёв (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 21.02.2022 г.