

Задача локализации проблемного сечения по длине пролета моста на основе экспериментальных данных

77-30569/311247

04, апрель 2012

Щеглова Н. Н.

УДК: 539.4

МГТУ им. Н.Э. Баумана
SheglovaNN@yandex.ru

На кафедре «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана серийно способная система мониторинга [1, 2], обеспечивающая возможность оценки состояния различных строительных сооружений (высотные здания, мосты различной конструкции и т.д., т.е. огромные строительные сооружения). В качестве чувствительных элементов в системе используются разработанные на кафедре прецизионные наклонометры и акселерометры. Система обеспечивает измерение угловой скорости наклона, поступательных перемещений конструкции и его отдельных элементов, а также частот основных мод колебаний строительного сооружения. Разрешающая способность системы по углу – 0.1 угловой секунды, долговременная стабильность нуля – 1 угловая секунда, частотный диапазон измерения мод колебаний – от 0.05 до 30 Гц, разрешающая способность по виброускорениям – 10 мкг. К достоинствам системы можно отнести то, что не требуется проведения сверхпрецизионных экспериментов, объекты испытаний не надо помещать, как это делается в машиностроении, в вибростолы на вибростенды (что в нашем случае практически осуществить невозможно), не требуется проведения предварительных специальных монтажных работ по установке оборудования, как, например, при прокладке световолоконных элементов. В качестве внешнего возмущения можно использовать штатную нагрузку объекта (ветровую для высотных зданий, а также движение лифтов и людей в здании, или поток автомобилей или идущий по железнодорожному мосту поезд и т.д.) Такого вида нагрузку можно рассматривать в виде слабо окрашенного белого шума, содержащего весь спектр частот. Обследование осуществляется путем измерения параметров трех составляющих поступательных колебаний и определения частот основных мод колебаний конструкции. Модальные частоты являются истинными и

остаются неизменными независимо от движения транспорта, т.е. у мостов со стабильной конструкцией частоты во времени не изменяются. Наличие скачкообразных изменений наклона, например, полотна моста или конструкции здания, а также падение частот основных мод в соответствии с теоремой Релея будет свидетельствовать о появлении разрушения связей. Мониторинг Ворошиловского моста в Ростове-на-Дону (рис. 1) позволил обнаружить скрытую трещину и предсказать обрушение моста за 6 месяцев. На рис. 2 показан этап ремонта моста.



Рис. 1. Ворошиловский мост в Ростове-на-Дону



Рис. 2. Ремонт Ворошиловского моста в Ростове-на-Дону

Разработанная аппаратура позволяет установить факт появления трещины, но не может указать место ее расположения. С целью локализации трещины была проанализирована математическая модель шарнирно-опертой балки с точечным грузом, поскольку присоединение дополнительной точечной массы на стержне приводит к такому же снижению основной собственной частоты, как и появлению трещины. Частотная математическая модель для этого случая (модель колебаний системы с распределенными параметрами) приведена в [3].

Частотные методы исследования предполагают решение волнового уравнения. Дифференциальное уравнение изгиба балки – это волновое уравнение в частных производных (1) относительно амплитуд (при условии, что диаметр и свойства поперечного сечения стержня постоянны).

$$EJ \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где EJ – жесткость сечения балки при изгибе;

η – вертикальное смещение сечения балки;

ρ – масса единицы длины балки (погонная масса стержня).

Расчетная схема показана на рис. 3.

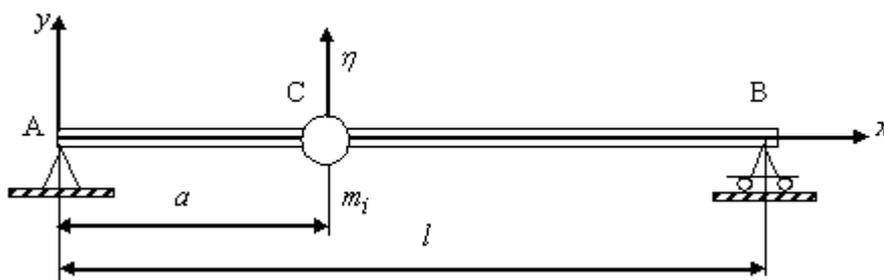


Рис. 3. Модель балки с точечным грузом

Анализ уравнения частот (2)

$$\Delta = \begin{vmatrix} \{T(b_j l) + b_j l \mu T(b_j a) V[b_j(l-a)]\} & \{V(b_j l) + b_j l \mu V(b_j a) V[b_j(l-a)]\} \\ \{V(b_j l) + b_j l \mu T(b_j a) T[b_j(l-a)]\} & \{T(b_j l) + b_j l \mu V(b_j a) T[b_j(l-a)]\} \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

проводился для различных значений масс и местоположений относительно балки присоединенного груза, что позволило выявить некоторые закономерности изменения

шести первых собственных частот системы в зависимости от положения проблемного сечения. Законы их изменения представлены на рис. 4, где использованы следующие обозначения:

$\mu_i = \frac{m_i}{\rho l}$ – отношение массы груза к собственной массе балки.

$x = \frac{a}{l}$, где a – расстояние от левой опоры до груза, l – полная длина балки.

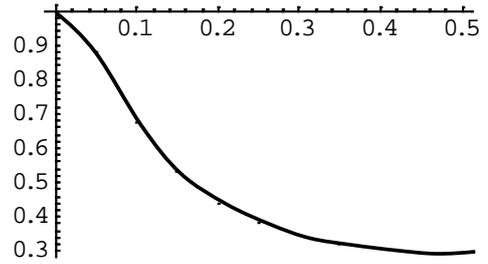
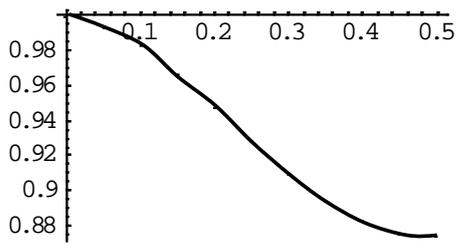
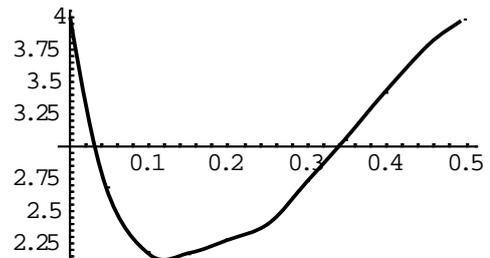
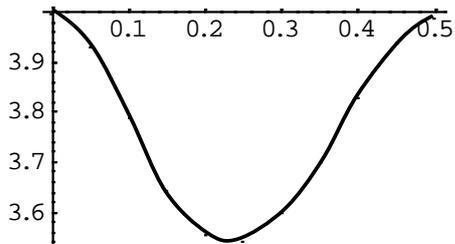
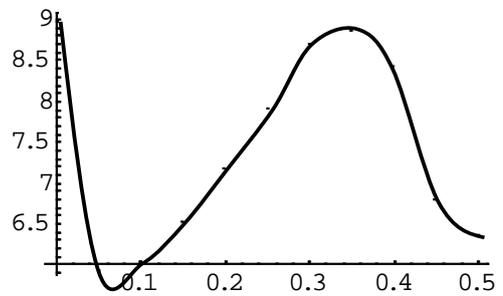
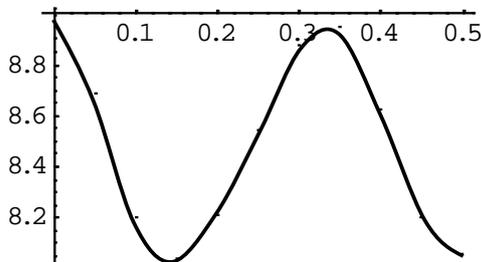
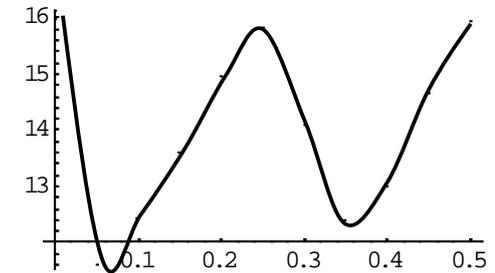
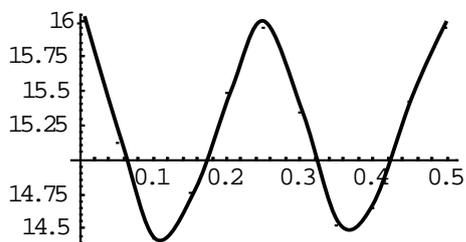
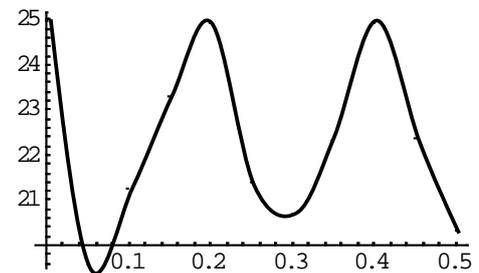
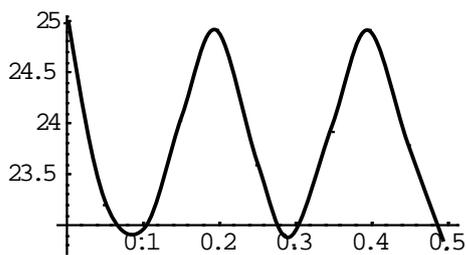
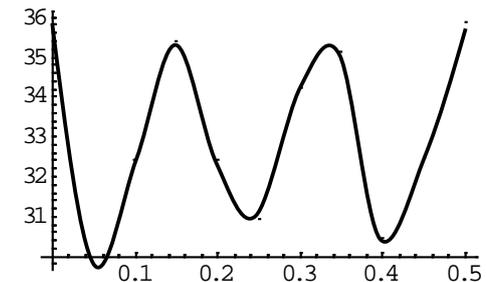
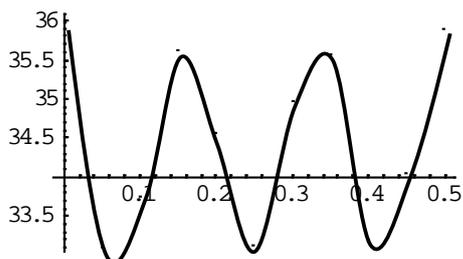
$\mu = 0.15$ $f_1[\Gamma y]$ $\mu = 5$ $x\left(\frac{a}{l}\right)$  $f_2[\Gamma y]$  $f_3[\Gamma y]$  $f_4[\Gamma y]$  $f_5[\Gamma y]$  $f_6[\Gamma y]$ 

Рис. 4. Изменение частот в зависимости от положения груза относительно балки

Встает следующая задача – задача обработки информации и создания алгоритма вычисления опасного сечения по результатам экспериментальных данных.

Абсолютная величина падения частот может свидетельствовать только о факте появления разрушения связей. Насколько велика трещина и где она расположена по абсолютным значениям величин падения частот судить невозможно.

Введем понятие относительного изменения частоты:

$$\delta_{21} = \frac{\Delta f_2}{\Delta f_1}, \quad \delta_{31} = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_1}, \quad \delta_{41} = \frac{\Delta f_4}{\Delta f_1}, \quad \delta_{51} = \frac{\Delta f_5}{\Delta f_1}, \quad \delta_{61} = \frac{\Delta f_6}{\Delta f_1}$$

и перестроим графики (рис. 4) в относительных единицах изменения частоты (рис. 5).

Анализ изменения относительных частот позволяет сделать следующие выводы:

Если основная частота упала, то появилось опасное сечение.

1. Если для 2-ой, 4-ой и 6-ой частот одновременно наблюдается малое падение, а для 5-й и 3-ей одновременно – большое, то опасное сечение в середине балки.
2. Если одновременно мало падение 3-ей частоты и велико падение 4-ой частоты, то опасное сечение находится на расстоянии $1/3$ от одной из опор.
3. Если мало падение 4-ой и велико падение 6-ой частот одновременно, то опасное сечение находится на расстоянии $1/4$ от одной из опор.
4. Если велико падение всех частот одновременно, то опасное сечение находится вблизи опор

$$a = 0.05l$$

5. Малое падение 6-ой частоты наблюдается в точках балки

$$a = 0.15l, \quad a = 0.35l, \quad a = 0.5l$$

6. При малых проблемах картина носит более выпуклый характер, чем при больших. Т.е. если при малых трещинах падение частот по отношению к первой частоте составляет 10, 20, 40 и 200 раз в районе заделки, то при больших – соответственно 5, 8, 10 и максимум 20 раз в районе заделки.
7. В любом сечении балки можно найти хотя бы 1 частоту, которая изменяется сильно, т.е. можно определить максимум падения.

Большим падением частот можно считать изменение частот по отношению к изменению первой частоты в 5 и более раз, а малым, если соотношения соответствующих разностей частот меньше 1.

Таким образом, анализируя величину относительного изменения первых шести частот, можно определить место расположения опасного сечения.

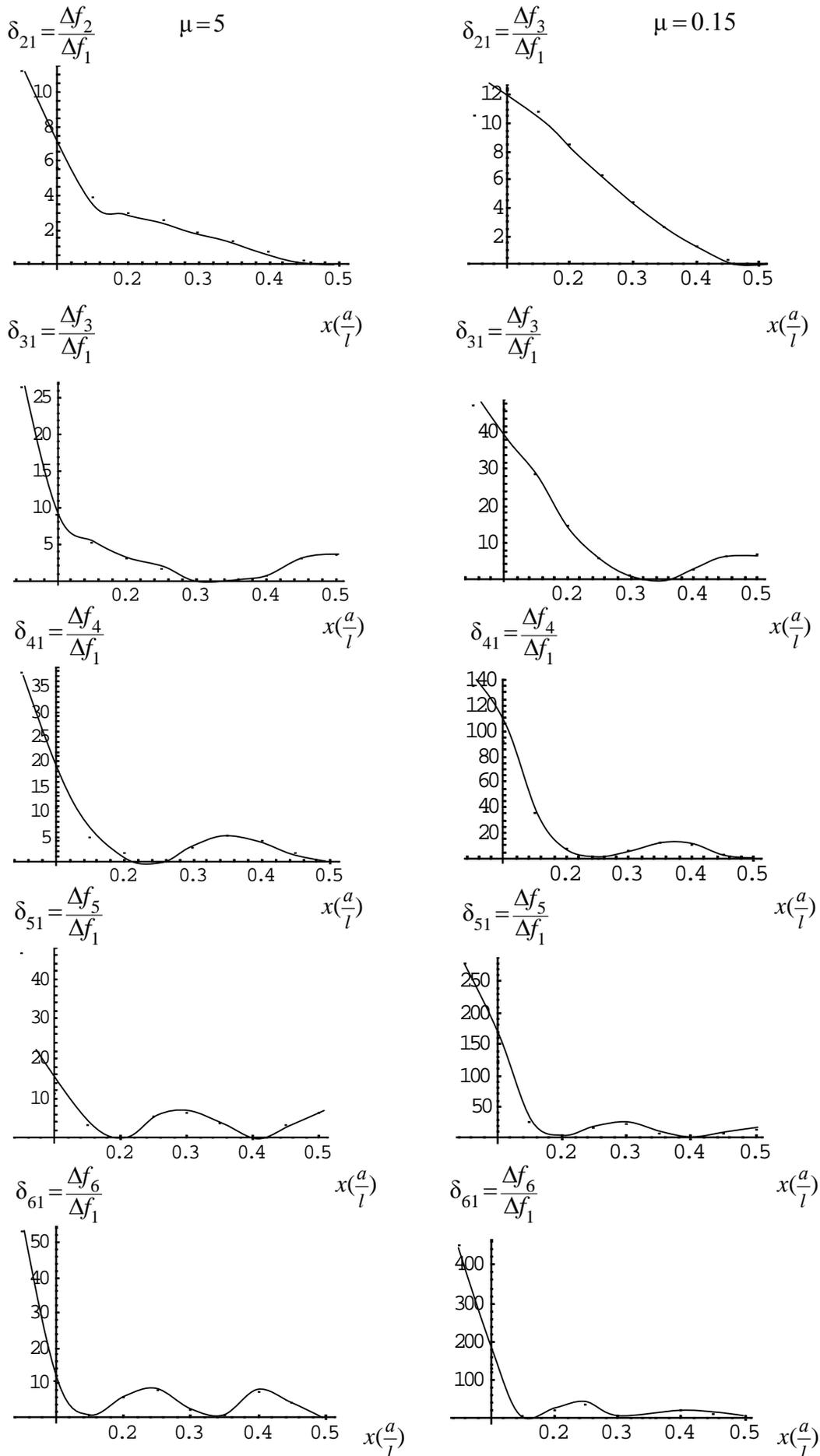


Рис. 5. Относительное изменение частот

Литература

1. Басс В.Н., Ивановский Е.А., Коновалов С.Ф. Система для мониторинга строительных сооружений // Доклад на научно-практической конференции «Современные системы и средства комплексной безопасности и противопожарной защиты объектов строительства».- АСУ «Дом на Брестской» , 2007.
2. Прецизионные системы мониторинга / С.Ф. Коновалов, Е.А. Ивановский, Е.Л. Межеричкий и др.// Высотные здания. – 2008. – Апрель/май. С. 120-125.
3. Щеглова Н.Н. Анализ собственных частот конструкций мостов при нарушении их целостности // Наука и образование, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2011г.

Localization of a critical section along the length of a bridge span basing on experimental data

77-30569/311247

04, April 2012

Scheglova N.N.

Bauman Moscow State Technical University
ScheglovaNN@yandex.ru

The author considers the problem of localization of a hidden fracture in a bridge span, basing on the experimental data analysis. Monitoring system, which allows to record spectrums of natural frequencies of certain spans of a bridge, was developed at the “Apparatuses and systems of orientation, stabilization and navigation” department of BMSTU. It was shown in the article that analysis of fractional variation of the first six frequencies of each span of a bridge makes it possible to localize the critical section.

Publications with keywords: [experiment](#), [structural failure](#), [bridge's monitoring](#), [frequency spectrum](#), [relative changes of frequencies](#), [analyses](#)

Publications with words: [experiment](#), [structural failure](#), [bridge's monitoring](#), [frequency spectrum](#), [relative changes of frequencies](#), [analyses](#)

References

1. Bass V.N., Ivanovskii E.A., Konovalov S.F. Sistema dlia monitoringa stroitel'nykh sooruzhenii (doklad) [System for monitoring of building structures (report)]. *Nauchno-prakticheskaiia konferentsiia «Sovremennye sistemy i sredstva kompleksnoi bezopasnosti i protivopozharnoi zashchity ob"ektov stroitel'stva»* [The scientific and practical conference "Modern systems and integrated security and fire protection facilities of objects of construction"]. Architectural-Construction Centre «Dom na Brestskoi», 2007.
2. Konovalov S.F., Ivanovskii E.A., Mezheritskii E.L., et al. Pretsizionnye sistemy monitoring [Precision monitoring system]. *Vysotnye zdaniia*, 2008, April-May, pp. 120-125.
3. Shcheglova N.N. Analiz sobstvennykh chastot konstruktsii mostov pri narushenii ikh tselostnosti [The analyses of natural frequencies of the bridge structures in the process of crippling]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 3, available at: <http://technomag.edu.ru/doc/311032.html>.