



Исследование отклика балочных мостов на воздействие поезда



Евгений КУРБАЦКИЙ
Evgeny N. KURBATSKY

Иван БОНДАРЬ
Ivan S. BONDAR



Михаил КВАШНИН
Mikhail Ya. KVASHNIN

Курбацкий Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия.

Бондарь Иван Сергеевич – соискатель кафедры «Мосты и тоннели» МИИТ, Москва, Россия. Квашнин Михаил Яковлевич – кандидат технических наук, доцент Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан.

Study of the Response of Beam Bridges to the Impact of a Train (текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 66)

В статье приведены результаты измерений колебаний металлических и железобетонных балочных пролетных строений железнодорожных мостов при проходе подвижного состава с различными скоростями. Полученные данные могут использоваться для уточнения моделей сооружения и при разработке алгоритмов выявления повреждений.

Ключевые слова: железнодорожный мост, балочное пролетное строение, амплитудно-временные зависимости, виброскорость, виброперемещение, виброускорение, быстрое преобразование Фурье, амплитудно-частотные характеристики.

В странах Европы, Азии и США проводятся многочисленные исследования для оценки технического состояния и диагностики эксплуатируемых искусственных сооружений по динамическим параметрам. Особенно заметный прорыв в этом направлении произошел в 90-х годах прошлого столетия, когда были созданы мощные портативные компьютеры, и оценка колебаний системы под воздействием внешних нагрузок стала возможным и доступным инструментом инженеров-практиков.

Разработанная в Швейцарии система мониторинга состояния мостов (Bridge Monitoring System «BRIMOS») [1] основана на том, что состояние любой конструкции можно оценить, используя параметры динамического поведения. В так называемом «динамическом автографе» (отклике) конструкции содержится вся информация, которая нужна для проведения детальной оценки ее состояния. В широко применяемых методиках используется реакция сооружений на такие случайные воздейст-

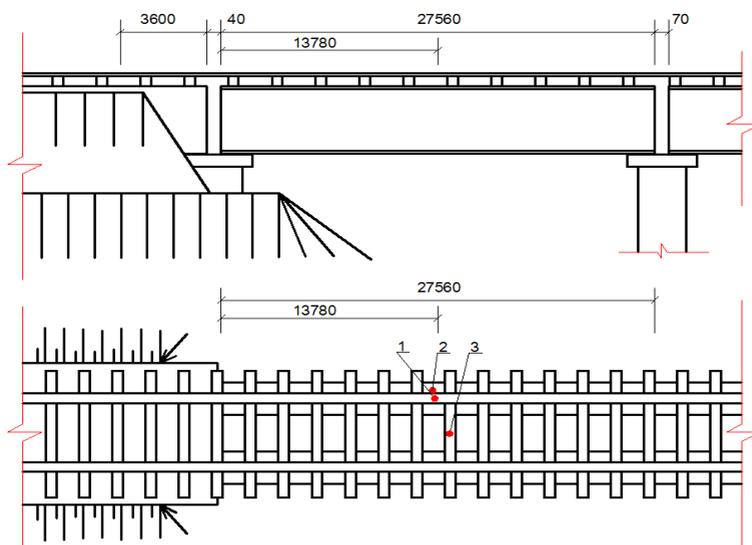


Рис. 1. Схема металлического пролетного строения с расположением вибродатчиков на элементах конструкции:
1 – середина балочного пролетного строения; 2 – подошва рельса; 3 – середина шпалы.

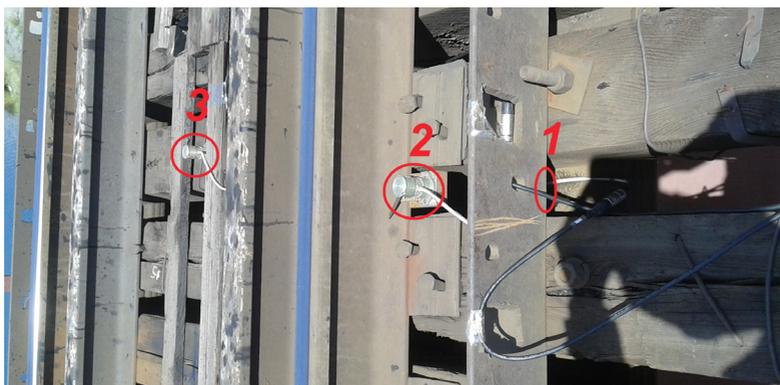


Рис. 2. Общий вид металлического пролетного строения с расположением вибродатчиков на элементах:
1 – середина балочного пролетного строения; 2 – подошва рельса; 3 – середина шпалы.

вия, как ветер, микросейсмика, движущийся по мосту транспорт.

В Японии распространено применение сложных систем мониторинга, для чего разработаны и постоянно совершенствуются специальные аппаратно-программные комплексы динамической идентификации. Под динамической идентификацией системы понимают определение динамических характеристик моста или иного инженерного сооружения по информации, полученной при регистрации его колебаний. Следует отметить, что публикаций по совершенствованию этих методов явно недостаточно [2-6].

Простой и в то же время очень эффективный метод отбора пиковых значений

спектров колебаний мостового сооружения основан только на анализе спектров. В соответствии с требованиями метода собственные частоты колебаний определяют по пиковым значениям осредненных приведенных спектральных плотностей мощности. Для этого используется дискретное преобразование Фурье виброперемещений, виброскоростей и виброускорений. Функция когерентности, рассчитанная для двух одновременно зарегистрированных выходных сигналов, близка к таковой для частот собственных колебаний. Эта закономерность, кроме того, помогает обнаружить именно те частоты, которые могут быть рассмотрены как собственные. При этом предполагается, что динамическая



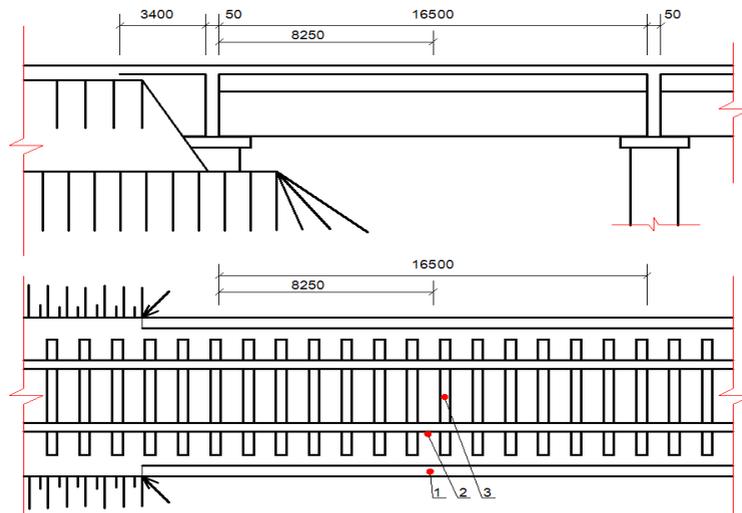


Рис. 3. Схема железобетонного пролетного строения с расположением вибродатчиков на элементах конструкций:

1 – середина балочного пролетного строения; 2 – подошва рельса; 3 – середина шпалы.



Рис. 4. Общий вид железобетонного пролетного строения с расположением вибродатчиков на элементах: 1 – середина балочного пролетного строения; 2 – подошва рельса; 3 – середина шпалы.

реакция при резонансе относится только к собственному тону.

Метод отбора пиковых значений не требует применения сложных алгоритмов для его реализации. В рамках метода для построения графического представления функции спектральной плотности используются различные модификации быстрого преобразования Фурье, подробно описанные в специальной литературе [7].

Объектами исследований, изложенных в данной статье, являлись балочные металлические (рис. 1) 1952 года постройки и железобетонные (рис. 3) 1972 года постройки пролетные строения мостовых переходов через канал Иртыш–Караганда железнодорожной линии Ерейментау–Экибастуз (км 257 ПК 7+0) с пролётами 27 м и 16 м.

В качестве средства измерений использовался мобильный виброизмерительный комплекс с пакетом прикладных программ по обработке и визуализации данных. Технические характеристики, программное обеспечение и методика обработки сигналов достаточно подробно приведены в [8]. Исследования проводились в светлое время суток, в летний период, при движении подвижного состава со скоростями 41–98 км/ч.

Особый интерес представляли как амплитудно-временные зависимости вибро-скоростей, виброперемещений и виброускорений, так и амплитудно-частотные характеристики, определяемые по соответствующим графикам спектральной плотности [9]. В качестве примера на рис. 5, 9, 13 приведены временные зависимости

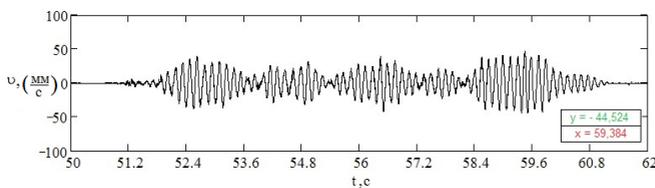


Рис. 5. Скорости вертикальных колебаний металлической балки при проходе электрички из 10 вагонов со скоростью 98 км/ч.

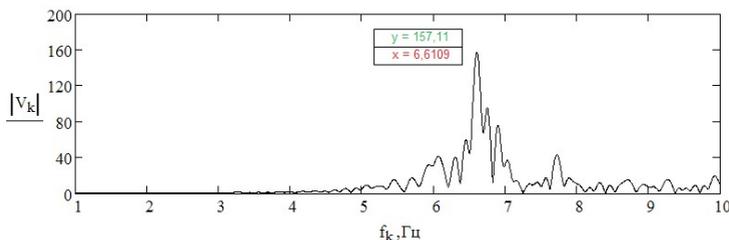


Рис. 6. Спектр скоростей вертикальных колебаний металлической балки.

виброскоростей, виброперемещений и виброускорений металлического пролетного строения при проходе электрички из 10 вагонов со скоростью 98 км/ч, а на рис. 7, 11, 15 — те же зависимости железобетонного пролетного строения при проходе электрички из 8 вагонов со скоростью 61 км/ч.

Соответствующие им графики спектральной плотности представлены на рис. 6, 8, 10, 12, 14, 16.

В ходе анализа результатов испытаний определено, что взаимодействие металлического балочного пролетного строения с подвижным составом проявляется в основном при возмущениях, частоты которых находятся в диапазоне $f = 5,34\text{--}7,27$ Гц, а железобетонного — в диапазоне $f = 5,26\text{--}7,82$ Гц. Эти возмущения и определяют, в первую очередь, реакцию пролетных строений. Возмущения, частоты которых не попадают в эти области, как следует из анализа спектров, не играют особой роли в формировании поведения пролетных строений, поскольку их амплитуды очень малы и вносимая ими энергия в систему незначительна.

Анализ опытных данных, характеризующих динамическую работу мостов, позволил установить параметры свободных колебаний незагруженных пролетных строений.

По «хвостам» опытных осциллограмм, полученных после схода поездов (рис. 17, 19), и построенным по ним спектрам

(рис. 18, 20) были определены частоты свободных колебаний незагруженных пролетных строений.

Для металлического и железобетонного балочных пролетных строений они соответственно равны $f_m = 7,08 \pm 0,35$ Гц и $f_{ж.б.} = 7,81 \pm 0,39$ Гц.

Формы спектральных кривых в области резонансов позволяют определить важную при динамических расчётах характеристику сооружения — модальный относительный коэффициент демпфирования. Напомним, что относительный коэффициент демпфирования равен отношению реального демпфирования к критическому. В нормативных документах по расчёту сооружений на сейсмические воздействия регламентируется и используется именно относительный коэффициент демпфирования, а не логарифмический декремент колебаний.

Относительный коэффициент демпфирования ξ при выполнении экспериментальных работ находится по ширине спектральной резонансной кривой в точках половинной энергии (рис. 21) по формуле

$$\xi = \frac{\Delta f}{2f_0}$$

Этот параметр является модальным коэффициентом демпфирования, соответствующим данной частоте и форме собственных колебаний. Интервал частот между точками половинной энергии часто называют шириной спектра системы.



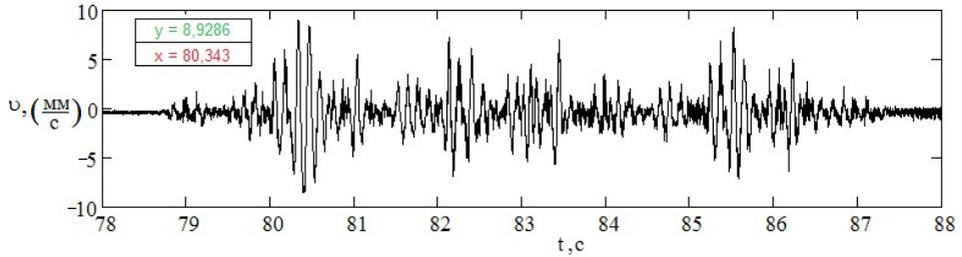


Рис. 7. Скорости вертикальных колебаний железобетонной балки при проходе электрички из 8 вагонов со скоростью 62 км/ч.

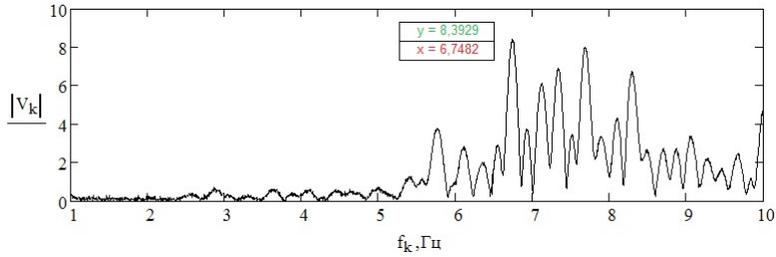


Рис. 8. Спектр скоростей вертикальных колебаний железобетонной балки.

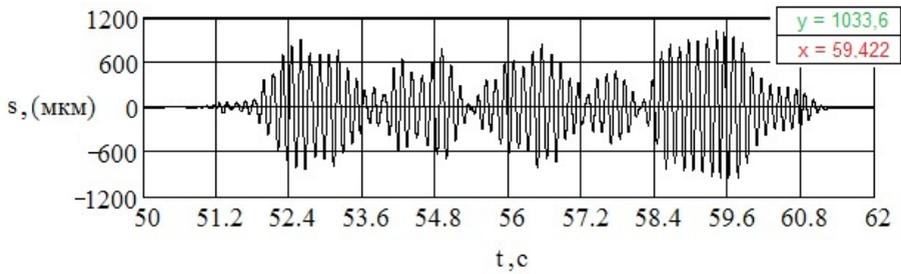


Рис. 9. График вертикальных перемещений металлической балки при проходе электрички из 10 вагонов со скоростью 98 км/ч.

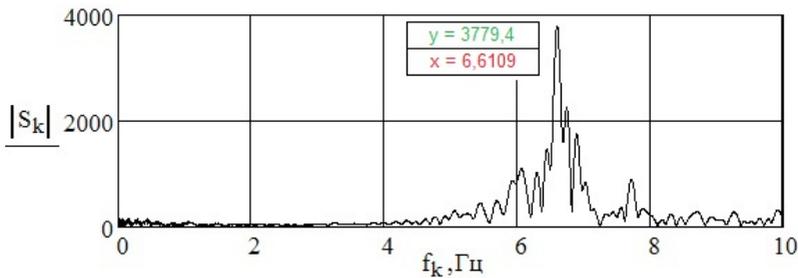


Рис. 10. Спектр вертикальных перемещений металлической балки.

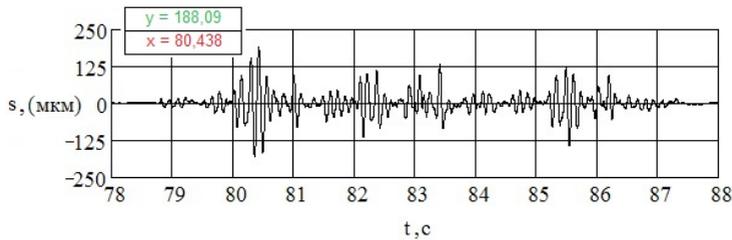


Рис. 11. График вертикальных перемещений железобетонной балки при проходе электрички из 8 вагонов со скоростью 62 км/ч.

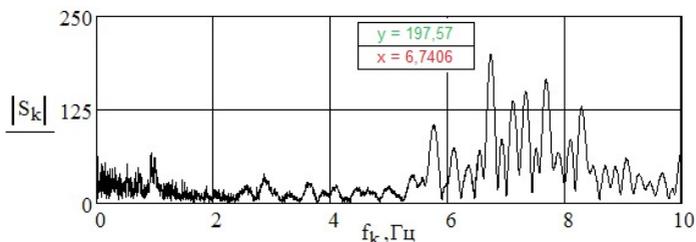


Рис. 12. Спектр вертикальных перемещений железобетонной балки.

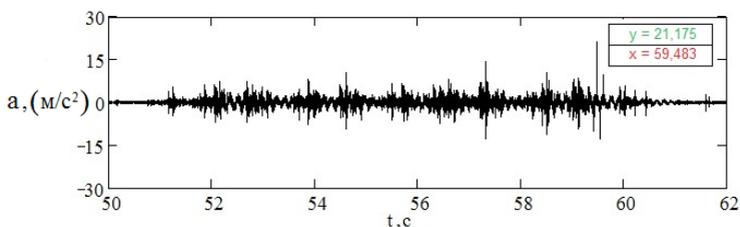


Рис. 13. Акселерограмма вертикальных колебаний металлической балки при проходе электрички из 10 вагонов со скоростью 98 км/ч.

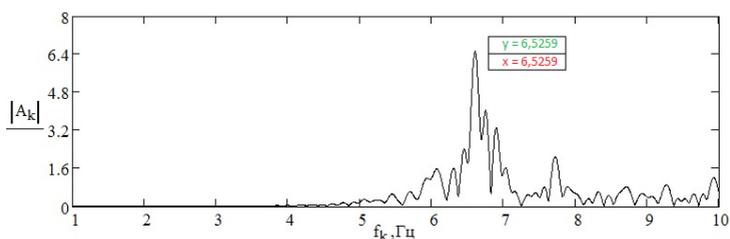


Рис. 14. Спектр ускорений вертикальных колебаний металлической балки.

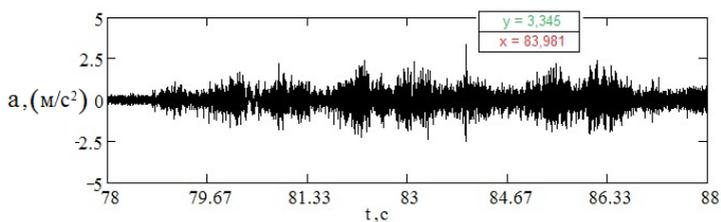


Рис. 15. Акселерограмма вертикальных колебаний железобетонной балки при проходе электрички из 8 вагонов со скоростью 62 км/ч.

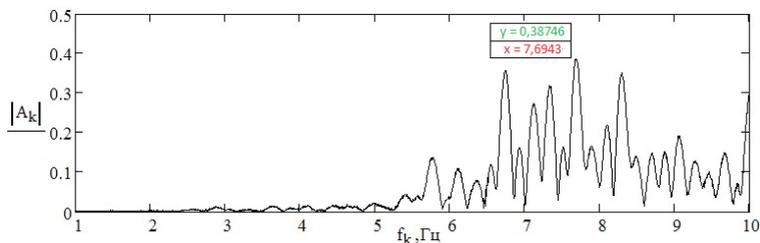


Рис. 16. Спектр ускорений вертикальных колебаний железобетонной балки.



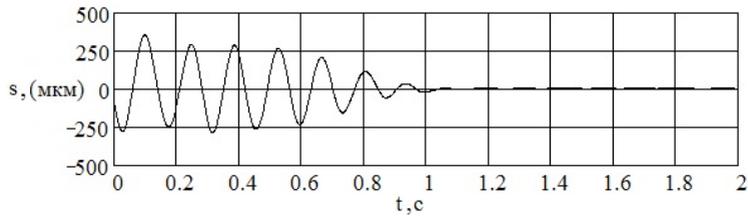


Рис. 17. График свободных колебаний (перемещений) металлической балки после схода нагрузки.

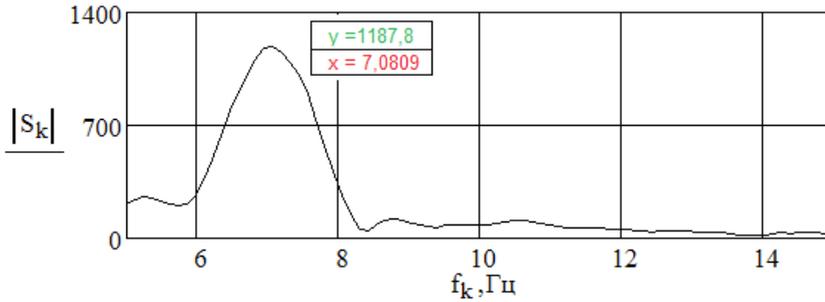


Рис. 18. Спектр свободных колебаний металлической балки после схода нагрузки.

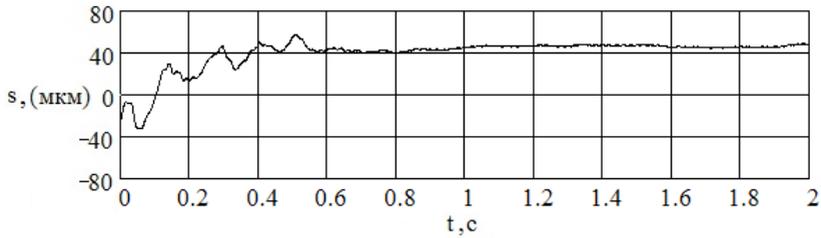


Рис. 19. График свободных колебаний (перемещений) железобетонной балки.

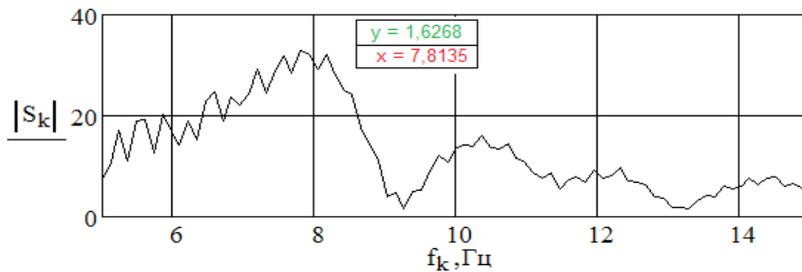


Рис. 20. Спектр свободных колебаний железобетонной балки после схода нагрузки.

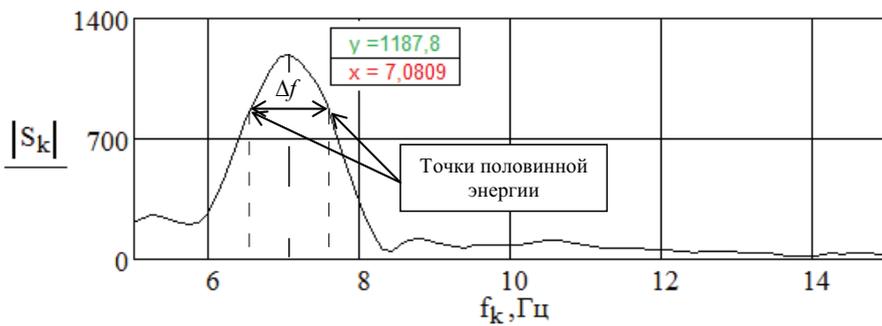


Рис. 21. Пример резонансной кривой с указанием точек половинной энергии

$$|S_k(f)| = \sqrt{1/2} |S_k(f_0)| = 0.707 |S_k(f_0)|.$$

Ширина спектра в точках половинной энергии определяет свойство системы рассеивать энергию при колебаниях. Увеличенная ширина спектра при колебаниях железобетонных конструкций свидетельствует о наличии трещин в бетоне. Например, относительный коэффициент для железобетонных балок без трещин составляет 3%, при наличии трещин — 5-7%.

В нашем исследовании для металлической балки получен широкий спектр в области резонансной частоты, равный 7%, что говорит о том, что рассеяние энергии происходит не только в пролётном строении (в металле и соединениях элементов балки), но и при взаимодействии с опорами и верхним строением пути:

$$\xi = \frac{\Delta f}{2f_0} = \frac{1,05}{2 \cdot 7,08} = 0,07. \text{ Обычно относительный коэффициент демпфирования при колебаниях стальных балок не превышает 3\%.}$$

Для оценки состояния пролетных строений по ширине спектров в области резонансов необходимо знать, какая часть энергии рассеивается именно в пролетном строении, а какая часть — в верхнем строении пути или в опорных частях.

ВЫВОДЫ

Из анализа натуральных измерений процессов колебаний балочных пролетных строений следует, что спектр этих колебаний при взаимодействии элементов моста с движущимся поездом является многомодальным. При этом частота отдельных составляющих существенно зависит от скорости движения поезда, а основная доля энергии процесса колебаний приходится на гармоники, соответствующие частотам собственных колебаний системы «пролётное строение — железнодорожный путь — подвижной состав».

Для оценки состояния пролётных строений можно использовать ширину спектров в точках половинной энергии спектральной кривой в области резонансов. Сопоставляя ширину полученных спектров

со спектрами новых неповрежденных пролётных строений, можно оценить степень износа и степень повреждения элементов конструкций.

Полученные характеристики колебаний системы «пролётное строение — железнодорожный путь — подвижной состав» могут служить исходными данными при калибровке модели сооружения и составлении алгоритмов выявления повреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wenzel, K., Pichler, D. Structural Assessment of Railway Bridges by Ambient Vibration Testing, US-Canada-Europe Workshop on Recent Advantages in Bridge Engineering, Dubendorf and Zurich, 1997. <http://tekhnosfera.com/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-stalezhelezobetonnyh-proletnyh-stroeniy-zheleznodorozhnyh-mostov-po-dinamicheskim-param#ixzz3TzXx3UOE>. Доступ 26.02.2015.
2. Agrati, S. «Estimation of Structural Parameters from Ambient Vibration Test», Master thesis 1994, Danish Technical University. <http://tekhnosfera.com/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-stalezhelezobetonnyh-proletnyh-stroeniy-zheleznodorozhnyh-mostov-po-dinamicheskim-param#ixzz3TzX1oSO0>. Доступ 26.02.2015.
3. Aktan, A. E. «Issues in Instrumented Bridge Health Monitoring», IABSE Symposium San Francisco 1995. <http://tekhnosfera.com/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-stalezhelezobetonnyh-proletnyh-stroeniy-zheleznodorozhnyh-mostov-po-dinamicheskim-param#ixzz3TzWd5HBE>. Доступ 26.02.2015.
4. Aktan, A. E., Lee, K. L., Chuntavan, C., Aksel, T. Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities. In: Proceedings of 12th International Modal Analysis Conference, 1994, pp. 462–468.
5. COSMOSM user manual version 1.75. Santa Monica, CA: Structural Research and Analysis Corporation. 1996. <http://tekhnosfera.com/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-stalezhelezobetonnyh-proletnyh-stroeniy-zheleznodorozhnyh-mostov-po-dinamicheskim-param#ixzz3TzWoNyNY>. Доступ 26.02.2015.
6. Dewolf, J. T., Coon, P. E., O'Leary, P. N. Continuous Monitoring of Bridge Structures, IABSE Symposium San Francisco 1995. <http://tekhnosfera.com/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-stalezhelezobetonnyh-proletnyh-stroeniy-zheleznodorozhnyh-mostov-po-dinamicheskim-param#ixzz3TzXbE19f>. Доступ 26.02.2015.
7. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.
8. Квашнин Н. М. Исследование механических колебаний железнодорожного пути/ Дис... канд. техн. наук. — Алматы, 2010. — 144 с.
9. Бондарь Н. Г., Козьмин Ю. Г., Ройтбурд З. Г., Тарасенко В. П., Яковлев Г. Н. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом. — М.: Транспорт, 1984. — 272 с.

Координаты авторов: Курбацкий Е. Н. — usd.miit@gmail.com, Бондарь И. С. — ivan_sergeevich_08@mail.ru, Квашнин М. Я. — kvashnin_mj55@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 02.03.2015, принята к публикации 11.05.2015.

