

УДК 504.064.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ МОСТОВОГО ПРОЛЕТА МОСТА ЧЕРЕЗ РЕКУ ОБЬ С ПОМОЩЬЮ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПО ОПТИЧЕСКОМУ КОНТРАСТУ В ИЗОБРАЖЕНИИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

Е. А. Зрюмов, П. А. Зрюмов, В. С. Падалко, С. П. Пронин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул

Статья посвящена изучению параметров вибрации мостового пролета моста через реку Обь с помощью стробоскопического средства контроля по оптическому контрасту в изображении тест-объекта. Получены параметры вибрации мостового пролета при воздействии легковых и грузовых автомобилей.

Ключевые слова: вибрация, методы контроля, оптический контраст, стробоскопический эффект.

Особое внимание проблеме обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации мостовых конструкций уделяется в Алтайском крае и Республике Алтай. Практически ежегодно весенний паводок сопровождается подтоплением поселков, разрушением дорожного полотна и повреждением мостов. Так в 2015 году по данным краевого информационного канала «Катунь 24» в результате весеннего паводка в регионе разрушено 243 км дорог и 28 мостов, 36 мостов нуждаются в ремонте. Масштабы разрушений оцениваются примерно в 800 млн. рублей. При дальнейшей эксплуатации вновь возведенных или отремонтированных мостовых конструкций необходимо осуществлять контроль параметров вибрации для недопущения их дальнейшего разрушения [1]. Для неразрушающего контроля параметров вибрации на значительном расстоянии до объекта исследования оптимальным является применение стробоскопических методов контроля по оптическому контрасту в изображении тест-объекта из-за высокой точности, большой производительности и мобильности при проведении исследований [2, 3].

Для контроля параметров вибрации мостовых пролетов было разработано стробоскопическое средство контроля по оптическому контрасту в изображении тест-объекта. Структурная схема стробоскопического средства контроля параметров вибрации по опти-

ческому контрасту в изображении тест-объекта представлена на рисунке 1 [4].

К боковой поверхности мостового пролета на его середине жестко крепится тест-объект, представляющий собой восемь параллельных парных черных штрихов, нанесенных на белую бумагу с коэффициентом заполнения каждой пары 0,5. Высота всех штрихов равна 100 мм. Размеры штрихов a составляют: 9; 8; 7; 6; 5; 4; 3; 2 мм с погрешностью $\pm 0,1$ мм и соответствующие им пространственные частоты ν : 0,056; 0,063; 0,071; 0,083; 0,100; 0,125; 0,167; $0,250 \text{ мм}^{-1}$.

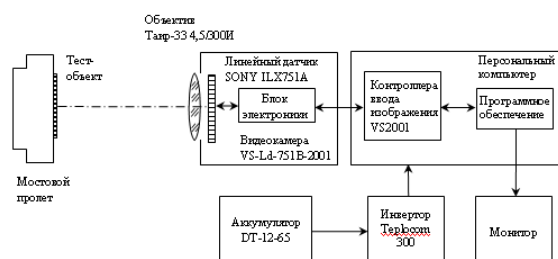


Рисунок 1 – Структурная схема стробоскопического средства контроля параметров вибрации мостовых конструкций по оптическому контрасту в изображении тест-объекта

Видеокамера устанавливается на значительном расстоянии от тест-объекта на смотровой площадке и состоит из объектива Таир-33 4,5/300 и линейного датчика SONY ILX751A с электронным блоком ввода данных в персональный компьютер. С помощью кон-

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ МОСТОВОГО ПРОЛЕТА МОСТА ЧЕРЕЗ РЕКУ ОБЬ С ПОМОЩЬЮ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПО ОПТИЧЕСКОМУ КОНТРАСТУ В ИЗОБРАЖЕНИИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

тронлера ввода изображения можно программно или аппаратно изменять кадровую частоту видеокамеры, время экспозиции и количество получаемых изображений, отображаемых на экране персонального компьютера. ПЗС-фотоприемник видеокамеры расположен параллельно направлению линейной вибрации тест-объекта. Штрихи тест-объекта располагают перпендикулярно направлению вибрации.

На основании соглашения КГКУ «Алтай-автодор» поручил АлтГТУ произвести исследование параметров вибрации мостового пролета моста через реку Обь на автомобильной дороге «Мостовой переход через р. Обь в г. Барнауле».

Мост через судоходную реку Обь на автомобильной дороге «Мостовой переход через р. Обь в г. Барнауле» общей протяженностью 943 м состоит из семи пролетов, ширина моста – 32 м.

Видеокамера была расположена на смотровой площадке на расстоянии 32 м от места крепления тест-объекта на мостовом пролете. Фотография контролируемого мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фотография контролируемого мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

Далее была проведена серия экспериментов для определения параметров вибрации мостового пролета при отсутствии воздействия от автомобильной техники, при проезде легкового автомобиля по мостовому пролету, при проезде грузового автомобиля по мостовому пролету.

На рисунке 3 представлено изображение штрихового тест-объекта при отсутствии автомобилей на мостовом пролете мостового

перехода через р. Обь в г. Барнауле. Как видно из этого рисунка при отсутствии воздействия изображения всех пар штрихов имеют положительный контраст.

Этот факт подтверждается рисунком 4, на котором представлен график изменения оптического сигнала в изображении пар штрихов от номера $\Phi ЧЭ$ при отсутствии автомобилей на мостовом пролете мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле. В изображении всех пар штрихов оптический сигнал на штрихе всегда меньше сигнала между штрихами.

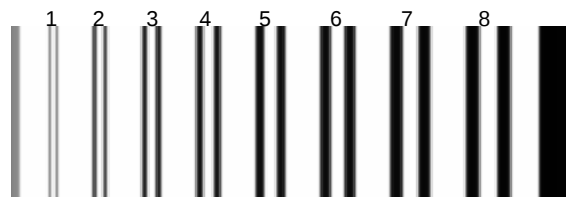


Рисунок 3 – Изображение штрихового тест-объекта при отсутствии автомобилей на мостовом пролете мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

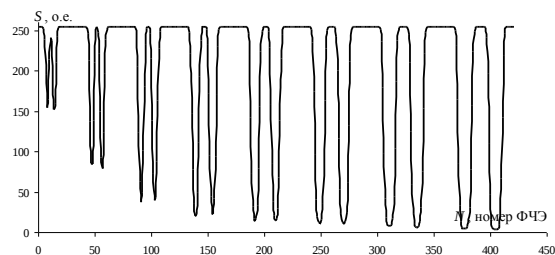


Рисунок 4 – График изменения оптического сигнала в изображении пар штрихов от номера $\Phi ЧЭ$ при отсутствии автомобилей на мостовом пролете мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

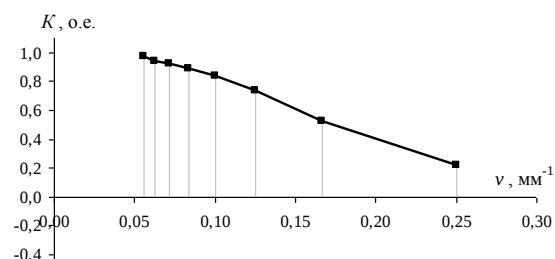


Рисунок 5 – Экспериментальное изменение контраста в изображении пар штрихов при отсутствии автомобилей на мостовом пролете мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

Следовательно, $ЧКХ$ в данном случае ни разу не пересекает ось абсцисс, хотя с увеличением пространственной частоты контраст уменьшается (рисунок 5) [5].

При проезде как легковых, так и грузовых автомобилей по мостовому переходу через р. Обь в г. Барнауле сначала происходит проседание мостового пролета под весом автомобиля, а затем мостовой пролет начинает вибрировать, достигая максимального размаха при проезде автомобиля через середину моста, затем происходит затухание вибрации при удалении автомобиля, и мостовой пролет возвращается в начальное положение до следующего воздействия.

На рисунке 6 приведено динамическое изображение штрихового тест-объекта при кадровой частоте видеокамеры $f_{ТВ} = 2$ кГц, на котором можно проследить вышеописанные стадии вибрации мостового пролета.

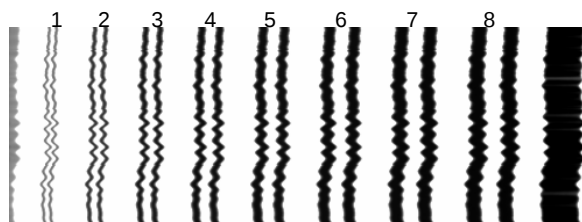


Рисунок 6 – Динамическое изображение штрихового тест-объекта, при проезде легкового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле при кадровой частоте видеокамеры $f_{ТВ} = 2$ кГц

Из рисунка 6 видно, что вибрация мостового пролета имеет сложный характер, однако при проезде автомобиля на середине мостового пролета наблюдается гармоническая вибрация на нескольких периодах, после чего постепенно затухает. Определить спектральный состав по представленному сигналу очень сложно, поэтому применение стробоскопического метода контроля параметров вибрации по оптическому контрасту является оптимальным: по фиксации стробоскопического эффекта в изображении тест-объекта можно определять отклонение частоты вибрации от контролируемого значения, а по изменению оптического контраста в изображении тест-объекта – отклонение размаха от контролируемого значения [6, 7].

Период изменения полученного оптического сигнала в момент максимальной нагрузки равен 0,2010 сек, что соответствует частоте вибрации 4,98 Гц, следовательно, далее будем получать динамическое изображение для кадровой частоты видеокамеры 4,98 Гц. Если серия изображений (четыре изображения) в момент максимальной нагрузки на мостовой пролет не отличаются друг от друга, то фиксируется стробоскопический эффект, и отклонения частоты вибрации мосто-

вого пролета от контролируемого значения нет, иначе отклонение имеется [8, 9].

Далее зафиксировали стробоскопическое изображение тест-объекта при $f_{ТВ} = 4,98$ Гц при проезде легкового автомобиля по мостовому пролету общей массой до 2000 кг (автомобиль Suzuki Grand Vitara).

На рисунке 7 представлено изображение штрихового тест-объекта при фиксации стробоскопического эффекта при проезде легкового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле. Как видно из этого рисунка при проезде легкового автомобиля изображение первой пары штрихов имеет отрицательный контраст, в изображении второй пары штрихов фиксируется нулевой контраст, во всех остальных парах штрихов наблюдается положительный контраст.

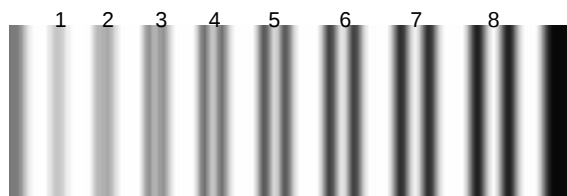


Рисунок 7 – Изображение штрихового тест-объекта при проезде легкового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

Изменение сигнала в изображении пар штрихов от номера ФЧЭ при воздействии на мостовой пролет легкового автомобиля можно проследить на рисунке 8.

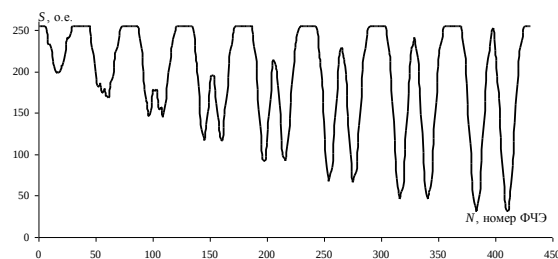


Рисунок 8 – График изменения оптического сигнала в изображении пар штрихов от номера ФЧЭ при проезде легкового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

При воздействии легкового автомобиля на мостовой пролет ЧКХ пересекает ось абсцисс при значении пространственной частоты $\nu = 0,167$ мм⁻¹, следовательно, размах вибрации равен размеру штриха во второй паре штрихов $R = 3$ мм (рисунок 9).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ МОСТОВОГО ПРОЛЕТА МОСТА ЧЕРЕЗ РЕКУ ОБЬ С ПОМОЩЬЮ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПО ОПТИЧЕСКОМУ КОНТРАСТУ В ИЗОБРАЖЕНИИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

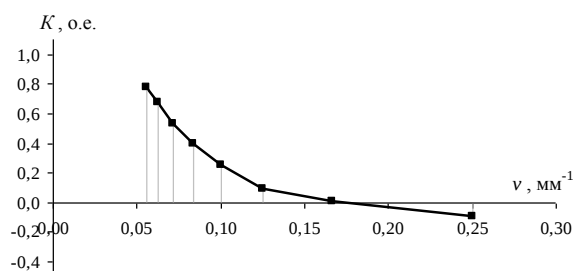


Рисунок 9 – Экспериментальное изменение контраста в изображении пар штрихов при проезде легкового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

Далее было исследовано вибрационное воздействие на мостовой пролет грузового автомобиля. Период изменения полученного оптического сигнала в момент максимальной нагрузки равен 0,2145 сек, что соответствует частоте вибрации 4,66 Гц, следовательно, далее будем получать динамическое изображение для кадровой частоты видеокамеры 4,66 Гц. Если серия изображений (четыре изображения) в момент максимальной нагрузки на мостовой пролет не отличаются друг от друга, то фиксируется стробоскопический эффект, и отклонения частоты вибрации мостового пролета от контролируемого значения нет, иначе отклонение имеется.

Затем было зафиксировано стробоскопическое изображение тест-объекта при $f_{ТВ} = 4,66$ Гц при проезде грузового автомобиля по мостовому пролету общей массой до 15000 кг (автомобиль КАМАЗ 5320).

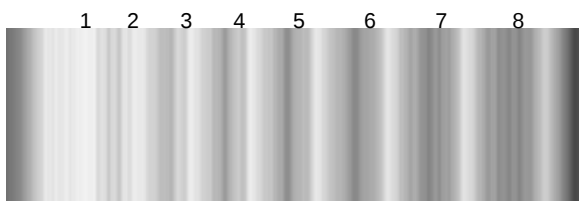


Рисунок 10 – Изображение штрихового тест-объекта при проезде грузового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

На рисунке 10 представлено изображение штрихового тест-объекта при фиксации стробоскопического эффекта при проезде грузового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле. В данном случае положительный контраст не наблюдается в изображении ни одной из пар штрихов (рисунок 11). Изображение первой пары штрихов имеет нулевой контраст, в изображении со второй по седьмую пары

штрихов наблюдается отрицательный контраст, в изображении восьмой пары штрихов фиксируется нулевой контраст.

При воздействии грузового автомобиля на мостовой переход ЧКХ пересекает ось абсцисс при значении пространственной частоты $v = 0,056 \text{ мм}^{-1}$, следовательно, размах вибрации равен размеру штриха в восьмой паре штрихов $R = 9 \text{ мм}$ (рисунок 12).

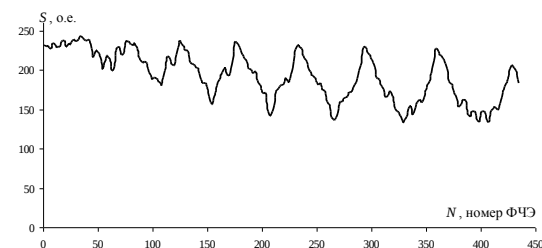


Рисунок 11 – График изменения оптического сигнала в изображении пар штрихов от номера ФЧЭ при проезде грузового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

Следовательно, из проведенного исследования можно сделать следующий вывод. При проезде по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле легкового автомобиля частота вибрации пролета составляет $f_0 = 4,98$ Гц, размах вибрации равен $R = 3 \text{ мм}$. При проезде по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле грузового автомобиля частота вибрации пролета изменяется и составляет $f_0 = 4,66$ Гц, а размах вибрации увеличивается в три раза и равен $R = 9 \text{ мм}$. При большой интенсивности проезда грузового транспорта через мостовой переход через р. Обь в г. Барнауле необходимо уменьшать воздействие автомобильного транспорта на мостовые пролеты путем ограничения количества автомобилей, проезжающих по мосту, либо путем установки дополнительных демпфирующих конструкций.

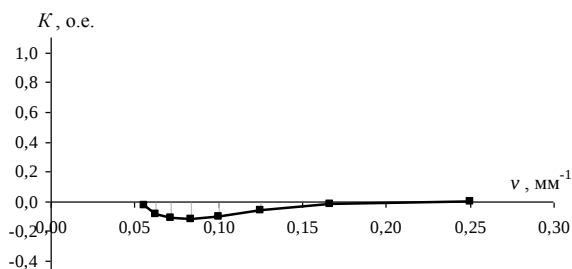


Рисунок 12 – Экспериментальное изменение контраста в изображении пар штрихов при проезде грузового автомобиля по мостовому пролету мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле

Выводы

Разработано стробоскопическое средство контроля параметров вибрации по оптическому контрасту в изображении тест-объекта, состоящее из видеокамеры с изменяемой кадровой частотой, тест-объекта и персонального компьютера. Средство позволяет производить контроль частоты вибрации в диапазоне от 1 до 100 Гц, размаха – от 2 до 9 мм на расстоянии до объекта контроля до 100 м.

Проведено исследование параметров вибрации мостовых пролетов мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле на расстоянии 32 м от мостового пролета. При проезде по мостовому пролету легкового автомобиля частота вибрации мостового пролета составляет 4,98 Гц, размах вибрации составляет 3 мм. При проезде по мостовому пролету грузового автомобиля частота вибрации мостового пролета составляет 4,66 Гц, размах вибрации составляет 9 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52892-2007 «Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию» / Введ. 2008-10-01. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2008. – 16 с.
2. Пронин, С. П. Теоретические основы оптических методов измерения и контроля параметров гармонической вибрации: монография / С. П. Пронин, Е. А. Зрюмов, П. А. Зрюмов; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2011. – 73 с.
3. Keene, L. Real-time anti-node visualization of vibrating distributed systems in noisy environments using defocused laser speckle contrast analysis / Lionel Keene, Fu-Pen Chiang // Journal of Sound and Vibration. – Oxford : Elsevier, 2009. – Volume 320, February. – P. 472-481.

4. Патент 2395792 Российская Федерация. Способ измерения параметров вибрации объекта / С. П. Пронин, Е. А. Зрюмов, А. В. Юденков. – Заявка №2009125845 ; опубл. 27.07.2010.

5. Зрюмов, Е.А. Анализ частотно-контрастной характеристики видеосистемы на основе ПЗС-фотоприемника при вибрации тест-объекта / Е.А. Зрюмов, С.П. Пронин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – СПб. : Изд-во ИТМО, 2013. Т. 57, №3. – С. 81-85.

6. Пронин, С.П. Исследование изменения контраста в изображении вибрирующих парных штрихов с помощью ПЗС-фотоприемника / С.П. Пронин, Е.А. Зрюмов, П.А. Зрюмов // Известия Алтайского государственного университета – Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2012, №1/2. – С. 115-119.

7. Зрюмов, Е.А. Модель смаза изображения при вибрациях / Е.А. Зрюмов, С.П. Пронин, П.А. Зрюмов, А.А. Фадеев // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы – ВИС-2011». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2011. – С. 68-69.

8. Зрюмов, Е.А. Алгоритмы оптического контроля параметров вибрации, основанного на регистрации стробоскопического эффекта в изображении тест-объекта и анализе пространственных фазовых сдвигов в полученном изображении / Е.А. Зрюмов, С.П. Пронин, П.А. Зрюмов // Вестник Алтайской науки – Барнаул : Изд-во ГУЭИ АК, 2014, №4. – С. 319-325.

9. Зрюмов, Е.А. Оптико-электронная стробоскопическая система измерения частоты гармонической вибрации, основанная на применении генетического алгоритма / Е.А. Зрюмов, П.А. Зрюмов, С.П. Пронин // Измерительная техника. – М. : Изд-во ФГУП «Стандартинформ», 2012. №4. – С. 35-38.

Зрюмов Евгений Александрович – к.т.н., доцент, тел. (3852) 29-09-13, e-mail: e.zrumov@mail.ru;

Зрюмов Павел Александрович – к.т.н., доцент;

Падалко Владимир Сергеевич – аспирант;

Пронин Сергей Петрович – д.т.н., профессор.