

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ВИБРАЦИОННОГО
КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Д-р техн. наук, профессор **В.П. Еремеев**,
инженер **П.В. Еремеев**,
инженер **Д.В. Еремеев**
(АО «Спецремпроект»)
Конт. информация: srg-proekt@yandex.ru;
pavil-66@inbox.ru;
daniil-123456@inbox.ru

Статья касается использования методики вибрационного контроля технического состояния мостовых сооружений применительно к пролетным строениям мостов. Особенностью изложенной методики является интегрирование акселерограмм для получения значений перемещений в точке измерения, что позволяет определить напряженно-деформированное состояние.

Приведен пример испытаний металлического пролетного строения автодорожного путепровода. Выполнено сравнение экспериментальных и теоретических величин: коэффициента динамичности, частот собственных колебаний и вертикальных перемещений.

Ключевые слова: *пролетные строения, вибродиагностика, мостовые сооружения, статические испытания, динамические испытания.*

При осуществлении вибродиагностики мостовых сооружений (опор и пролетных строений) в качестве возбудителя гармонического динамического воздействия [1] на исследуемое сооружение применяется временная нагрузка, максимально приближенная по своим весовым параметрам к реально обращающимся по сооружению транспортным средствам, а именно: один или несколько синхронно перемещающихся по проезжей части нагруженных грузовых автомобилей.

Средствами измерения при активной вибродиагностике [2] для регистрации и записи динамических процессов служат трёхкомпонентные вибродатчики ZET 7152-N, жестко закрепленные в контрольной точке на пролетном строении. Характерные спектральные характеристики колебательных процессов [3] записываются в направлении осей X – поперечное относительно оси моста, Y – продольное и Z – вертикальное.

В результате измерений получают акселерограммы и виброграммы колебаний в доступной для анализа цифровой форме.

Рассмотрим далее практический опыт вибродиагностики мостового сооружения.

Так, в августе 2022 г. силами АО «Спецремпроект» были выполнены статические и динамические испытания путепровода на строящейся платной автомагистрали «Алексеевское – Альметьевск» на ПК61+40.

Двухпролетный путепровод (**рис. 1**) с металлическим пролетным строением (косина – 46°) выполнен с неразрезным пролетным строением по схеме $2 \times 36,0$ м, габарит Г-10+2х1,0 м.

Рис. 1. Общий вид путепровода



В поперечном сечении пролетное строение состоит из трех двутавровых металлических балок со сплошной стенкой постоянной высоты 0,98 м, объединенных между собой ортотропной плитой проезжей части и поперечными металлическими балками (**рис. 2**).

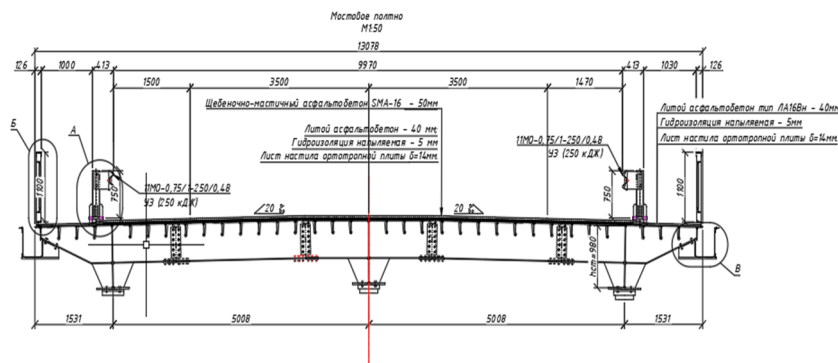


Рис. 2. Поперечное сечение пролетного строения путепровода

Вертикальная стенка главных балок имеет размеры 980x16 мм; нижний лист над опорами №№1, 3 – 640x40 мм, над опорой №2 – 640x60 мм. Ширина ортотропной плиты проезжей части по торцам консолей – 13,079 м. Ортотропная плита проезжей части состоит из верхнего стального листа (настил), продольных ребер, поперечных балок таврового сечения. Вылет консолей ортотропной плиты – 1,53 м; толщина настила – 14 мм; высота поперечных балок – 580 мм; на конце консоль имеет скос к торцу с высотой стенки – 163 мм. Ширина нижнего пояса поперечной балки – 240 мм с уширением до 440 мм над главной балкой; толщина – 12 мм, толщина стенки – 12 мм. Поперечные балки установлены с шагом 2,428 м – 2,488 м. Продольные ребра ортотропной плиты установлены с шагом 350 мм. Ребра высотой 180 мм имеют толщину листа 12 мм.

Пролетное строение балочное неразрезное по длине расчленено на семь монтажных блоков по схеме (по оси путепровода): $9,044+7,8+13,0+12,313+13,0+7,8+9,044 = 72,0$ м.

При статических испытаниях [4] измерены прогибы и нормальные напряжения в поперечных сечениях главных балок пролетных строений, контролировалось возможное раскрытие трещин в бетоне опор и их осадка.

Испытательная нагрузка в виде груженых автосамосвалов весом по 35 т каждый устанавливалась в 6 положений по длине и ширине проезжей части путепровода, определенных на ЭВМ загрузками поверхностей влияния для получения максимальных значений внутренних усилий (изгибающих моментов и поперечных сил) в конструктивных элементах пролетных строений [4] – не менее 60 % от нормативных значений.

Значения конструктивных коэффициентов при различных схемах загрузки (отношение измеренного прогиба к рассчитанному) для главных балок находятся в диапазоне 0,707 – 0,811.

Все расчеты пролетного строения выполнены с использованием программного комплекса Midas Civil. Стержневая модель пролетного строения показана на **рис. 3**.

По результатам статических испытаний пришли к выводу, что путепровод по грузоподъемности соответствует действующим нормативным нагрузкам А-14 и Н-14.

В качестве испытательной нагрузки при динамических испытаниях были использованы движущиеся по проезжей части путепровода с искусственной неровностью («порожек») поочередно один и два предварительно взвешенных груженых автосамосвала со скоростями 20 и 40 км/ч. Вибродатчик был установлен на пролетном строении в створе перил в середине одного из пролетов

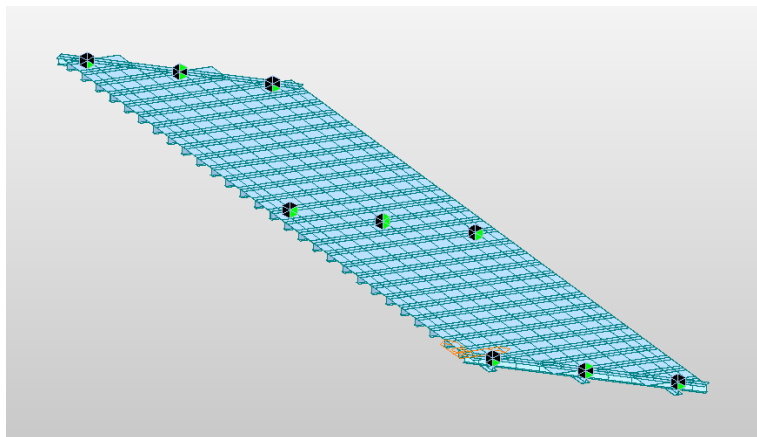


Рис. 3. Стержневая расчетная схема пролетного строения

Измеренные значения максимального вертикального прогиба при динамических испытаниях составили: при движении одного автомобиля – 5 (11,966) мм; двух автомобилей – 10,5 (24,312) мм (в скобках даны рассчитанные значения).

На **рис. 4** приведена виброграмма вертикальных перемещений точек в середине пролета пролетного строения.

На **рис. 5** приведено изображение 1-й формы колебаний, а в **табл. 1** представлены данные сравнения теоретических и фактических частот колебаний.

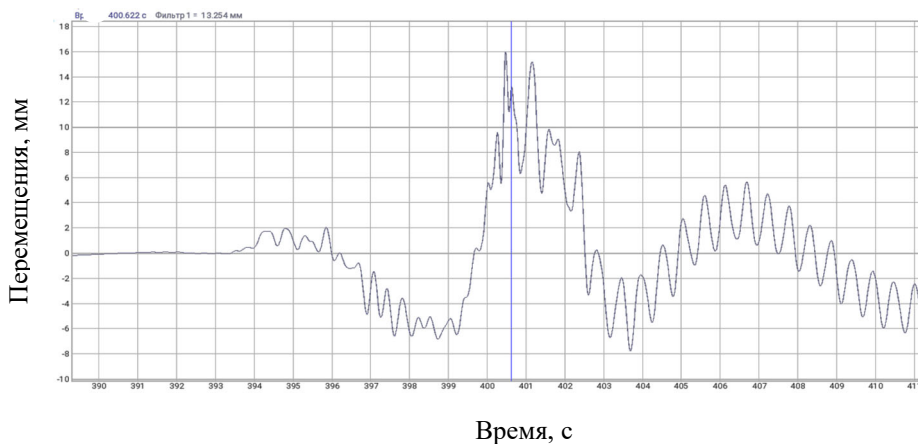


Рис. 4. Виброграмма вертикальных перемещений точки в середине пролета пролетного строения под действием движущихся грузовых автомобилей

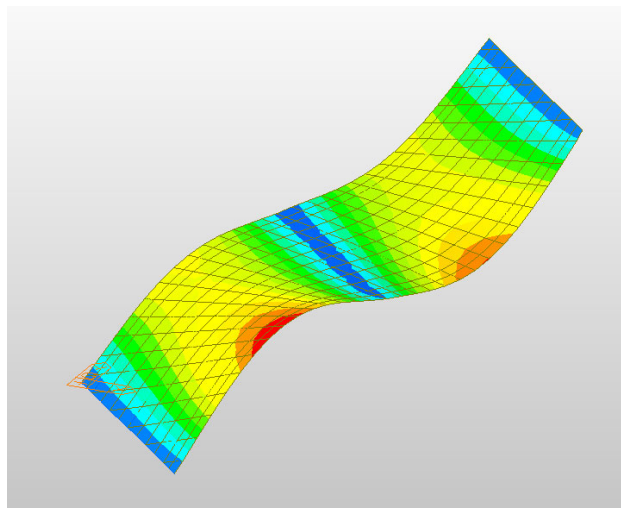


Рис. 5. 1-я форма колебаний пролетного строения

Таблица 1

Сравнение теоретических и фактических частот колебаний

Мода	Теоретические данные		Экспериментальные данные	Отклонение
	Гц	c		
1	1,908195	0,524055	1,9	0,42
2	2,499334	0,400107	2,5	0,026
3	2,671036	0,374389	2,7	1,073
4	3,048739	0,328005	3,1	1,653
...				
84	9,974586	0,100255	10,1	1,247

Логарифмический декремент затухания определялся по формуле

(1):

$$A = \ln x_1/x_2 = \ln 16,5/14,5 = 0,129 \quad (1)$$

где

x_1 и x_2 – две последовательные амплитуды колебания.

Коэффициент динамичности, при наличии неровности на поверхности проезжей части, определялся по формуле (2):

$$\mu = 14,88 / ((14,88 + 6,5) / 2) = 1,39 < 1,4, \quad (2)$$

где

1,4 – нормативное значение;

14,88 мм – максимальное значение колебаний в момент наезда испытательной нагрузки на порожек;

6,5 мм – минимальное значение колебаний в момент наезда испытательной нагрузки на порожек.

Выводы по результатам динамических испытаний

1. Формы и частоты собственных колебаний характеризуют распределение масс и жесткостей системы. Согласно полученным результатам, отклонение теоретических форм и частот колебаний от экспериментальных составляет не более 2 %, что свидетельствует о достаточном соответствии расчетной схемы реальному пролетному строению.
2. Значение полученного динамического коэффициента не превышает нормативное.
3. Периоды свободных колебаний составляют менее 1,5 с, что свидетельствует об устойчивости сооружения к ветровым динамическим воздействиям (ГОСТ Р 59625-2022).
4. Доминирующими формами колебаний являются 1-я и 4-я формы с частотами 1,9 и 3,05 соответственно.
5. Расхождение в значениях экспериментальных и теоретических прогибов обусловлены: влиянием жестких, непрерывных по длине пролетного строения перильных ограждений, согласно расчетам 27 %, несовершенством расчетной модели – применение оболочечной модели дает в данном случае уточнение 1-2 % согласно расчетам, погрешность измерений и обработки сигнала вибродатчика ± 10 % согласно паспорту.

ВЫВОДЫ

1. Вибродиагностика технического состояния мостов позволяет получить необходимые для использования оценки технического состояния мостового сооружения данные с достаточной точностью.
2. Особенностью изложенной методики является интегрирование акселерограмм для получения значений перемещений (в том числе прогибов) в точке измерения, что дает возможность определить напряженно-деформированное состояние конструкции.

Кроме того, сопоставление полученных результатов (п. 2.1.2 [2]) с данными расчетной модели носит не только качественный, но и количественный характер.

3. Оценка технического состояния мостовых сооружений с применением методики возбуждения колебаний нагрузкой в виде движущихся грузовых автомобилей и записи параметров колебаний с применением трехкомпонентных вибродатчиков совместно с расчетами по методу конечных элементов стальных пролетных строений с ортотропной плитой является достаточно простой и доступной в практической работе по испытанию мостов. Для дальнейшего развития такой методики предполагается проведение испытаний пролетных строений мостов с различными статическими схемами и материалами пролетных строений с обработкой и анализом полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремеев В.П. Об оценке технического состояния опор мостовых сооружений / В.П. Еремеев, И.К. Матвеев, П.В. Еремеев, Р.В. Кузнецов // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2021. – Вып. 46/2. – С. 228-244.
2. Методические рекомендации по вибродиагностике автодорожных мостов: [утверждены распоряжением № 266-р Государственной службы дорожного хозяйства (Росавтодор) 07.08.2001]. – М.: Инфортавтомор, 2001. – 26 с.
3. Патент 2767944 Российская Федерация, МПК G01 M02 7/02. Способ вибрационного технического состояния мостовых конструкций / Еремеев В.П., Еремеев П.В., Еремеев Д.В.; заявитель и патентообладатель АО «Спецремпроект» №202 11 26310; заявл. 06.09.2021; опубл. 22.03.2022. – Бюл. № 9.
4. СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследования и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07-86. – М.: Минрегион России, 2012. – 33 с.

L I T E R A T U R A

1. Eremeev V.P. Ob ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya opor mostovykh sooruzhenij / V.P. Eremeev, I.K. Matveev, P.V. Eremeev, R.V. Kuznecov // DOROGI I MOSTY. – 2021. – Вып. 46/2. – С. 228-244.
2. Metodicheskie rekomendacii po vibrodiagnostike avtodorozhnykh mostov: [utverzhdeny rasporyazheniem № 266-r Gosudarstvennoj sluzhby

- dorozhnogo hozyajstva (Rosavtodor) 07.08.2001]. – M.: Informavtodor, 2001. – 26 s.
3. Patent 2767944 Rossijskaya Federaciya, MPK G01 M02 7/02. Sposob vibracionnogo tekhnicheskogo sostoyaniya mostovyh konstrukcij / Eremeev V.P., Eremeev P.V., Eremeev D.V.; zayavitel' i patentoobladatel' AO «Specremprekt» №202 11 26310; zayavl. 06.09.2021; opubl. 22.03.2022. – Byul. № 9.
 4. SP 79.13330.2012. Mosty i truby. Pravila obsledovaniya i ispytaniy. Aktualizirovannaya redakciya SNIП 3.06.07-86. – M.: Minregion Ros-sii, 2012. – 33 s.

**IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR VIBRATION CONTROL OF
BRIDGE STRUCTURES TECHNICAL CONDITION**

*Doctor of Engineering, Professor V.P. Eremeev,
Engineer P.V. Eremeev,
Engineer D.V. Eremeev
(JSC «Specremproekt»)*

*Contact information: srp-proekt@yandex.ru;
pavil-66@inbox.ru;
danil-123456@inbox.ru*

The article concerns the use of the method for vibration control of technical condition of bridge structures as applied to bridge spans. The peculiarity of the described method is the integration of accelerograms to obtain the displacement values at the measurement point, which allows to determine the stress-strain state of the structure.

An example of testing a metal span of a road overpass is given. The comparison of experimental and theoretical values is carried out: dynamic coefficient, frequency of natural oscillations and vertical displacements.

Key words: spans, vibration diagnostics, bridge structures, static tests, dynamic tests.

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор В.В. Столяров (Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.); главный специалист отдела методологии оценки технического состояния искусственных сооружений Б.Ф. Яновский; главный специалист отдела методологии оценки технического состояния искусственных сооружений Т.В. Шишкова (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 23.09.2022 г.