

УДК 624.21.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-201-219

*А.В. КАРТОПОЛЬЦЕВ¹, В.М. КАРТОПОЛЬЦЕВ¹, С.А. КУХАРЕНКО²,**¹ООО «ДИАМОС»,**²Томский государственный архитектурно-строительный университет*

К ВОПРОСУ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Регулирование динамических характеристик пролетных строений является приоритетным направлением исследования авторов и решает современную общемировую проблему повышения моральной и физической долговечности мостовых сооружений, проявляющихся как на стадии проектирования с перераспределением усилий в несущих элементах пролетных строений с учетом перспективного изменения воздействия временной подвижной нагрузки, так и в условиях длительной эксплуатации.

Техническая диагностика мостов за последние 40 лет показала, что для обеспечения долговечности и длительной безопасной эксплуатации необходимо внедрение фундаментальных положений по совершенствованию расчета, эксплуатации и регулированию основных прочностных и деформативных характеристик при действии сверхнормативных и сверхрасчетных подвижных нагрузок.

Целью исследования является регулирование динамических деформационных и амплитудно-частотных характеристик пролетных строений мостов в условиях гармонических случайных (нестационарных) колебаний системы «пролетное строение + автомобиль» за счет изменения энергетического и напряженного состояния конструкции. Феномен динамической индивидуальности системы «пролетное строение + автомобиль» основан на регулировании амплитудно-частотных характеристик случайных колебаний по осредненным значениям с обеспечением при этом требуемой спектральной плотности.

Использование динамических гасителей в качестве регулирующего звена в элементах системы и жесткости связей между ними обеспечивает противофазность колебаний отдельных элементов пролетных строений, например балок и плиты проезжей части, что приводит к появлению неучтенных инерционных усилий.

Другим важным элементом разбалансирования совместной работы элементов пролетного строения моста при динамическом возбуждении является наличие различных дефектов как в конструкции проезжей части, так и в несущих элементах.

Подтверждается гипотеза, что следует рассматривать плиту проезжей части мостов в качестве передаточного слоя (элемента) колебаний от автомобиля к балкам пролетного строения. Выявленные обстоятельства показали рациональность процесса регулирования динамических характеристик в случае совпадения жесткостей и масс автомобиля и балок пролетного строения на уровне центра жесткости системы.

Пристальное внимание в статье авторы уделяют условиям и зависимостям между параметрами динамического нагружения и характеристиками напряженно-деформированного состояния мостовых балок в упругой и упругопластической стадиях с учетом проявления дополнительной инерционности системы. Направление относится к пионерным в отечественном и зарубежном мостостроении в области экспериментального исследования и испытания мостов на непрерывный случайный поток.

Практическая реализация методологической концепции динамических испытаний пролетных строений мостов случайным транспортным потоком способствует созданию вибрационных диагностических экспресс-лабораторий, используемых при эксплуатации и содержании мостов.

Ключевые слова: мост; пролетное строение; регулирование динамических характеристик; колебания; резонанс; система; диагностика; дефекты; жесткость; проезжая часть.

Для цитирования: Картопольцев А.В., Картопольцев В.М., Кухаренко С.А. К вопросу развития методов регулирования динамических характеристик пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 201–219.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-201-219

V.M. KARTOPOLTSEV¹, A.V. KARTOPOLTSEV¹, S.A. KUKHARENKO²,
¹ООО “DIAMOS”,
²Tomsk State University of Architecture and Building

TOWARDS DYNAMIC PROPERTY CONTROL OF BRIDGE SPANS

Regulation of the dynamic properties of bridge spans is a priority field of this research, which solves the problem of increasing the obsolescence and physical periods of bridge structures manifested both at the design stage of the load redistribution in the load bearing and during long-term operation.

Over the past 40 years, technical bridge diagnostics has shown that the durability and safe long-term operation can be ensured by the improved calculations, operation and stress and strain control under the excess and over-calculated live loads.

The aim of this work is to control the dynamic deformation and amplitude-frequency characteristics of bridge spans under harmonic random (non-stationary) oscillations of the span-vehicle system due to changes in the energy and stress state of the structure. The dynamic behavior of the span-vehicle system is based on the control for the amplitude-frequency characteristics of random oscillations by averaged values, the required spectral density being provided.

The use of dynamic dampers for the system element control and the rigidity of junctions provide antiphase oscillations of the bridge span elements such as beams and decks, that leads to the unaccounted inertial forces.

Another important element of the joint work imbalance of the bridge span elements during the dynamic load, are various defects, both in the deck design and load-bearing elements. It is assumed that the deck is a transfer layer (element) of vibrations induced by a vehicle in the beams. It is shown that the control for the dynamic properties is required in the case of a coincidence between the vehicle and beam stiffness and mass at the center of the system rigidity.

The attention is paid to the conditions and dependencies between the dynamic load parameters and the stress-strain state of the bridge beams at the elastic and elastoplastic stages, with respect to the additional inertia of the system. This approach is the pilot in the Russian and foreign bridge construction in terms of experimental studies and testing of bridges for continuous random traffic.

The dynamic testing of bridge spans for random traffic flow contributes to the creation of vibration diagnostic express laboratories necessary for the operation and maintenance of bridges.

Keywords: bridge; bridge span; dynamic property control; vibrations; resonance; system; diagnostics; defects; stiffness; deck.

For citation: Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kukharenko S.A. K voprosu razvitiya metodov regulirovaniya dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov [Towards dynamic property control of bridge spans]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 6. Pp. 201–219.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-201-219

Мотивированным обоснованием общемировой проблемы повышения моральной и физической долговечности конструкций мостовых сооружений на

стадиях проектирования и эксплуатации является своевременное внедрение, наряду с регулированием напряжения при статическом нагружении, регулирования динамических характеристик пролетных строений мостов с учетом перспективного изменения воздействия временной подвижной нагрузки (рис. 1).

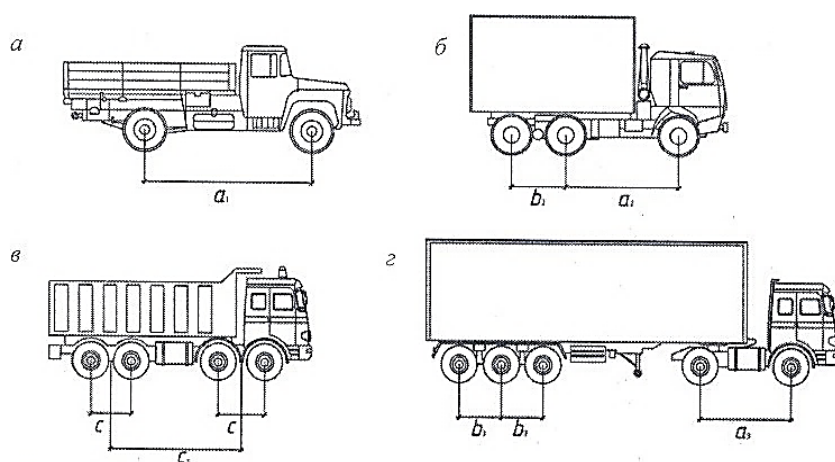


Рис. 1. Эволюция в развитии транспортных средств:

a – двусосный автомобиль; *б* – трехсосный автомобиль; *в* – четырехсосный автомобиль типа Нowo; *з* – тяжелый автофургон

Авторы акцентируют внимание на влиянии дефектности, в частности проезжей части мостов, на увеличение массы и скорости воздействия от временной нагрузки и изменения динамических характеристик.

Рассматривая методологическую концепцию вибродиагностики мостов в условиях регистрации параметров колебательного процесса в предрезонансном или резонансном состоянии реального напряженно-деформированного состояния, можно восполнить существующий пробел в науке и практике [1, 2].

Испытания пролетных строений одиночным автомобилем показали, что среднее значение частот собственных колебаний равно 6 Гц, вынужденных колебаний – 3,8 Гц, тогда как при прохождении транспортного случайного потока частота собственных колебаний – 2,3 Гц и вынужденных – 3,4 Гц при логарифмическом декременте затухания, равном 0,06–0,13. Сближение пиковых значений частот 1–1,2 Гц указывает на резонансное состояние.

В работах Р. Сняды, Фуйино Йозо, Б. Бхартина, Д.Дж. Германа, О. Конора, М. Эссе, Д. Пэйджа, А.Л. Закоры, Ж. Паламана, Ю.П. Федорова, Ю. Фойгта, И.К. Цыпинаса, А.Б. Моргаевского отражены попытки моделирования колебательного процесса при испытании мостов одиночными транспортными средствами. По формулам теории вероятности и математической статистики авторами проведена попытка учесть влияние дефектов пролетных строений на формирование и прохождение процесса колебания. Результаты виброиспытаний показали низкий уровень требований к проблеме, т. к. динамическое воздействие зависит от уровня транспортных средств, их подрессоривания и скорости движения [3] (рис. 1).

Впервые Хонда Хидеуки подверг спектральному анализу колебательный процесс с учетом влияния шероховатостей проезжей части наиболее распространенных четырех категорий мостов. Однако в теоретическом обосновании спектра колебаний рассматривается балка с подвешенным грузом, что несопоставимо с реальной ситуацией. Недостатком экспериментальных исследований этого периода является неточность моделирования мостовых дефектов, в том числе проезжей части, а также использование вибрирующих устройств с одной степенью свободы для возбуждения колебаний.

С использованием численных методов Адамса – Штермера в работах Г.Ф. Кравченко, И.А. Колесника, В.Г. Яцура, Дж. Пензиена и др. предпринята попытка представить движущийся поток подвижной нагрузки в виде упруго-связанных грузов с определенной скоростью, не являющейся критической. Вывод, что наибольший динамический эффект, в этом случае наибольший в момент схода нагрузки с балки, является неправомерным.

Стремление найти современное представление о взаимодействиях изменяющихся во времени подвижных нагрузок и мостовых конструкций и создать реальную научно обоснованную модель их воздействия привело ученых мирового сообщества к выводу об острой необходимости регулирования динамических характеристик хотя бы в стохастическом виде. Исследования И.И. Гольденבלата акцентированы на решения практических задач эффективности воздействия подвижной нагрузки встречного и параллельного движения [5]. Объяснение отчасти противоречивых результатов теоретических исследований о вибрационных характеристиках мостовых конструкций состоит в несовершенных методах и материальной базе практических испытаний моделей и натуральных конструкций. Достаточно объективным подтверждением выявленных расхождений являются экспериментальные исследования, проведенные специалистами на автодорожных мостах различного класса в штате Иллинойс (США, 1964 г.), канадскими специалистами П. Паултре и Ж. Проулисом, а также А.В. Картопольцевым (Россия) и В.М. Сафроновым (Болгария) [4].

Неточность измерений за счет погрешности, связанной с инерционностью механизма, послужила «заглублению» при обработке виброграмм для получения линейных амплитудно-частотных характеристик.

Общим недостатком вибродиагностики мостов в нашей стране и за рубежом следует считать фиксацию одной или максимум двух частей собственных колебаний, ограниченных по диапазону параметров вынужденных колебаний, что частично было устранено в измерительной системе инженера М. Бата, инженерами Р. Кишка, Л. Вэта, А. Соколика НИИ инженерных конструкций и использовано в Высшей школе транспорта и связи в г. Жилино.

За последние 15 лет работы по совершенствованию вибродиагностического оборудования, лишенного недостатков приборного обеспечения предыдущих лет, создан аппаратно-программный виброизмерительный комплект на основе безбазисных низкочастотных пьезоэлектрических вибродатчиков, обладающий свойством выделять электрические заряды на гранях пьезоэлемента под влиянием механических усилий, которому уступают малоинформативные и технически несовершенные средства виброизмерений [5]. Многофункциональность виброкомплекта при скоростях испытания временной нагрузкой

от 20 до 100 км/ч характеризуется погрешностью 1–2 % при оценке амплитудно-частотных характеристик. В качестве примера представлен общий вид спектра частот колебаний пролетного строения при испытании временной нагрузкой (рис. 2).

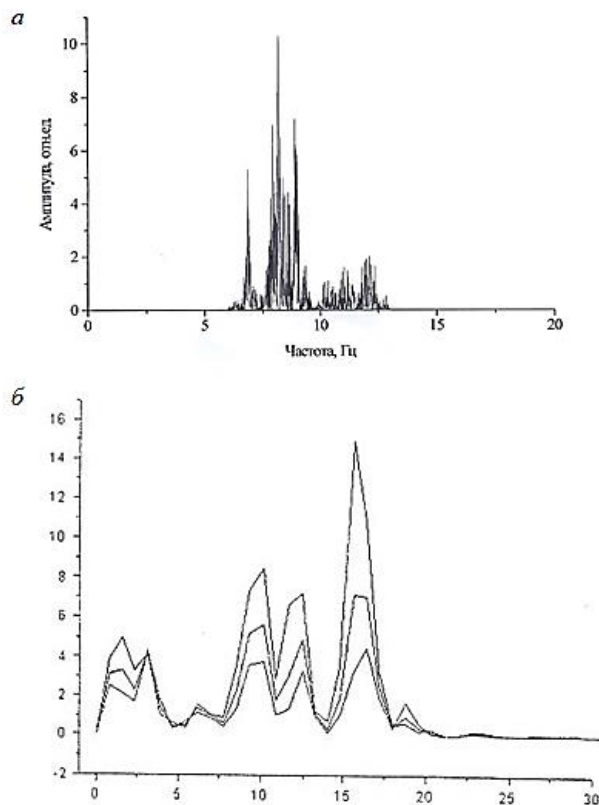


Рис. 2. Общий спектр частот колебаний:

а – спектр частот собственных колебаний; б – спектр частот свободных и вынужденных колебаний

Уникальные возможности виброкомплекта позволили определить экспериментальные динамические характеристики металлических мостов по торцевым колебаниям. Новый метод регистрации колебательного процесса от временной подвижной нагрузки в пролетных строениях позволяет одновременно диагностировать параметрические горизонтальные и вертикальные формы колебаний с последующим их спектральным анализом [6, 7].

Регулирование динамических характеристик пролетных строений мостов, полученных в результате расшифровки виброграмм торцевых колебаний, является новым направлением вибродиагностики мостовых сооружений.

Поскольку прогибы балок мостов ничтожно малы по сравнению с их длиной, линию динамических прогибов с высокой степенью достоверности можно аппроксимировать параболой или дугой окружности. Сближение или расхождение торцевых точек балок позволяет идентифицировать форму колебательного

процесса с его гармониками от воздействия временной подвижной нагрузки. Обширные эксперименты динамических испытаний мостов с пролетами от 40 до 80 м с использованием датчиков торцевых колебаний с записью 29 прогибовиброграмм длительностью по 51,2 с каждая позволили сопоставить результаты аналогичных испытаний виброкомплексом «ДИАМОС». Регистрация гармонических колебаний за счет торцевых датчиков определила приоритетность регистрационных виброкомплектов (рис. 3).

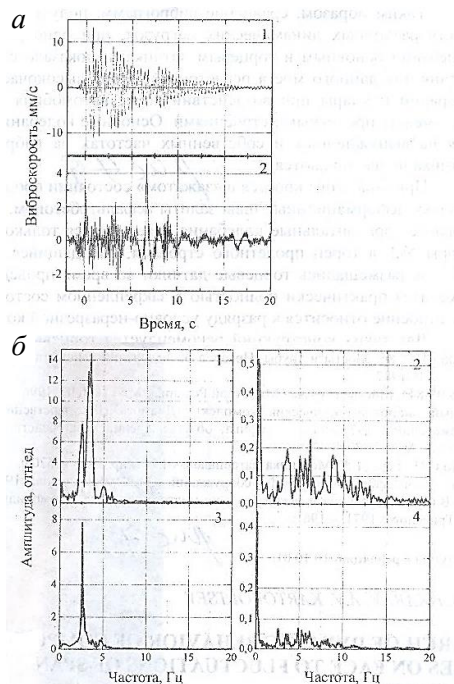


Рис. 3. Торцевые колебания:

а – временная реализация колебаний пролета; б – частотные спектры колебаний пролета

Таким образом, наличие современного высокоэффективного оборудования для регистрации реального колебательного процесса в пролетных строениях мостов позволяет решить проблему регулирования динамических характеристик мостов, переосмысления и переформирования нормативных документов на проектирование, расчет, диагностику и содержание транспортных сооружений в соответствии с выявленными реальными процессами напряженно-деформированного состояния пролетных строений мостов при изменяющемся воздействии временной подвижной нагрузки [8].

Приведенные данные способствуют пересмотру величины реальной критической скорости движения подвижной нагрузки с учетом дефектов мостового сооружения, являющейся регулятором динамических характеристик с учетом проявления различного вида демпфирования и резонансных явлений.

Реализация регулирования динамических характеристик возможна изменением формы гармонических колебаний с синусоидальной до резонанса в ко-

синусоидальную после резонанса за счет того, что в колебательном процессе участвуют два вида колебаний: нестационарные – это колебания в основном подвески автомобиля с выражением синусоидальной формы и случайные колебания этой же нагрузки за счет дефектов проезжей части косинусоидальной формы. Оба вида формы колебательного процесса описываются средними значениями динамических характеристик и спектральной плотности [9, 10].

Расчленив стальное или сталежелезобетонное пролетное строение на элементы с определенными квазиупругими и линейной жесткости коэффициентами, авторы пришли к выводу, что все оси линейной жесткости элементов ($EJ_{ст}$, EJ_6) и квазиупругие коэффициенты центров масс элементов ($C_{ст}$, C_6) в обычном и резонансном состоянии (рис. 4) характеризуются следующим образом [11]:

1. Центр жесткости ($EJ_0\theta$) совпадает с центром масс ($EJ_0\theta$). Здесь ни одна из главных осей жесткости для сталежелезобетона не совпадает ни с одной из главных осей инерции системы.
2. Центр жесткости θ совпадает с центром масс θ – одна из осей жесткости совпадает с одной из осей инерции системы.
3. Центр жесткости θ совпадает с центром масс θ – главные оси инерции совпадают с главными осями жесткости.

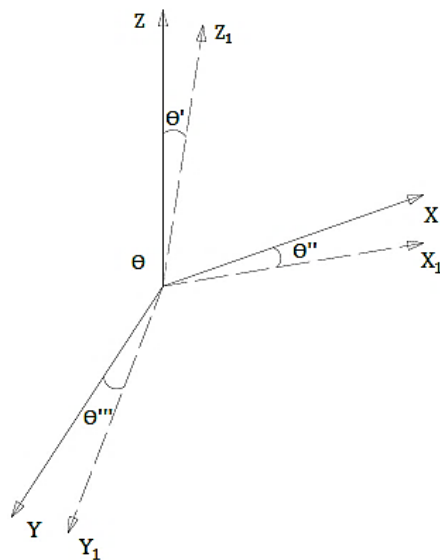


Рис. 4. Векторы главных осей масс и жесткостей

Предрезонансные и резонансные состояния пролетных строений от динамического воздействия временной подвижной нагрузки открыли в науке возникновение самостоятельного направления автоматического регулирования статического и динамического напряженно-деформированного состояния. Построение и обоснование направления основано на том, что динамические характеристики являются не только оригинальными, но и многофункциональными [12]. В свою очередь, многофункциональность критериев регулируемой

динамической системы «пролетное строение + автомобиль» обеспечивает практически замкнутый цикл автоматического регулирования от проектирования до эксплуатации сооружения. Для инерционной системы «пролетное строение + автомобиль» исходное уравнение автоматического регулирования характеристик пролетного строения будет иметь вид

$$X = c \cdot e^{pt}, \quad (1)$$

где X – выходная требуемая величина; c – коэффициент пропорциональности; e^{pt} – произвольная функция во времени, характеризующаяся возмущением системы, является исходной величиной.

При автоматическом регулировании динамических характеристик, прошедших режим резонанса, выражение (1) перепишем в виде

$$X = A \cdot e^{(wt + \theta)}, \quad (2)$$

где θ – угол сдвига фаз между гармониками до резонанса и после резонанса; w – частота вынужденных колебаний основного тона принятой гармоники; A – амплитуда перемещения балок пролетного строения при основной гармонике.

При автоматическом регулировании динамических характеристик после резонансного процесса колебаний справедливо равенство

$$\theta = \operatorname{tg}(wt) \frac{\lg \delta}{w}, \quad (3)$$

где $wt = \operatorname{artg} \frac{\lg \delta}{w} + k_0 - \pi$; $\lg \delta$ – логарифмический декремент затухания; w – частота вынужденных колебаний системы; k_0 – отношение следующих друг за другом амплитуд гармонической формы колебания.

В качестве гипотетического представления «добротность» процесса автоматического регулирования можно характеризовать отношением $\frac{\lg \delta}{w}$, равным

$$\frac{\lg \delta}{w} = e \sqrt{p \cdot T}, \quad (4)$$

где $p = -\lg + iw$, $i = 1, 2, 3 \dots 6$; T – период колебания.

Эмпирическая зависимость, характеризующаяся $\lg e$, принимает вид

$$\lg \delta = e^{\pi} \sqrt{\frac{(1 + \zeta)^2}{w^2} - \frac{\zeta}{w}}, \quad (5)$$

где $e^{\pi} = 23,14$; $\zeta = 0,27$ – когда в процессе саморегулирования частот колебаний в системе сдвиг по фазе синусоидального гармонического колебания составляет 90° по отношению к косинусоидальному.

Процесс автоматического регулирования (саморегулирования) динамических характеристик подразумевает постоянное изменение напряженно-деформированного состояния конструкции. Достоверное подтверждение полученных теоретическим путем результатов основано на следующих видах экспериментальных исследований:

– численное моделирование взаимодействия динамической нагрузки и пролетного строения моста;

– экспериментальное исследование моделей пролетных строений с динамическим нагружением;

– испытание реальных пролетных строений мостов разрезной, неразрезной и балочно-консольных систем мостов;

– в ходе численного моделирования разрабатывались расчетные схемы стальных и сталежелезобетонных пролетных строений по их фактическим геометрическим размерам и свойствам материалов с последующим выполнением динамических расчетов, смоделированных на трех видах нагружения, с моделированием трех форм гармонических колебаний при следующих условиях: временная подвижная нагрузка на подходах к пролетному строению; движется по пролетному строению; съезд с пролетного строения.

Для разрезных и неразрезных пролетных строений спектр частоты собственных колебаний идентичен колебаниям при динамической модели пролетных строений мостов с помощью пластинчатых и стержневых конечных элементов с характеристиками

$$\left. \begin{aligned} V_{кр} &= \frac{\pi}{L} \left(\frac{EJ}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \lg \delta &= 0,05-0,15 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где $\lg \delta = 0,05-0,15$ – для стальных и сталежелезобетонных мостов.

Для уточнения принятых расчетных схем и реализации результатов численного моделирования и математической модели воздействия подвижной временной нагрузки необходимо сравнение теоретических и экспериментальных данных, полученных с помощью моделей и испытания реальных мостовых сооружений. Блок-схема виброизмерительного комплекта приборов типа «ДИАМОС» представлена в аппаратно-программном обеспечении, реализуется в процессе испытания на моделях и реальных сооружениях, выполняет две основные функции:

1) режим просмотра виброграмм общего вида по каждому из каналов непосредственно после записи сигнала (рис. 5, 6);

2) центрирование сигналов в рабочем частотном диапазоне с целью устранения низкочастотных аппаратных трендов (рис. 7).

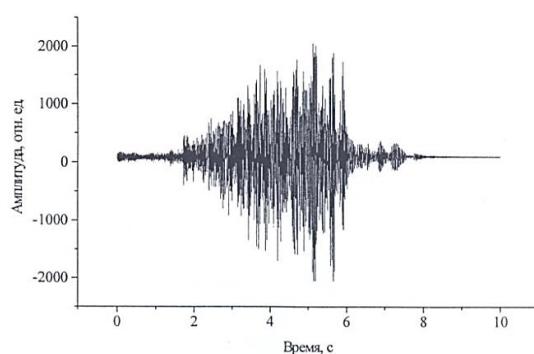


Рис. 5. Общий вид виброграммы, записанной при проведении экспериментальных исследований на моделях металлических мостов

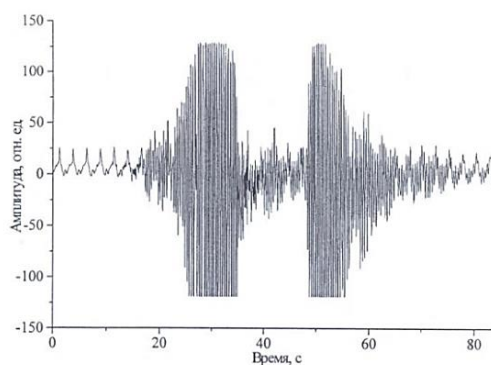


Рис. 6. Общий вид виброграммы, записанной при испытании сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста

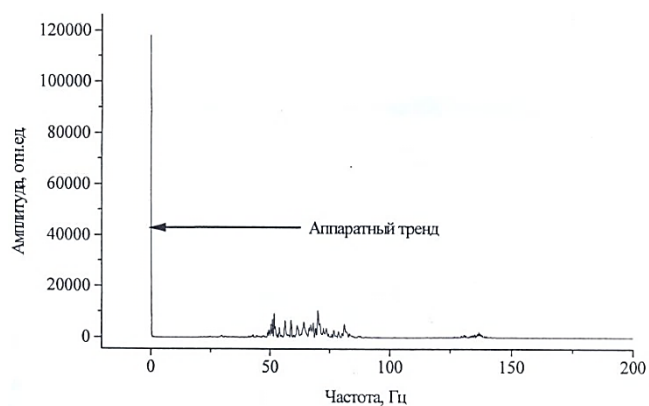


Рис. 7. Аппаратный тренд при спектральной обработке виброграммы

Виброграммы после фильтрации показаны на рис. 8, 9. В основу разработанного метода спектральной обработки виброграмм положен анализ многоканальных систем на основе дискретного и быстрого преобразования Фурье. Спектры частот виброграмм, записанные во время испытания моделей и натуральных мостовых сооружений, представлены на рис. 10, 11.

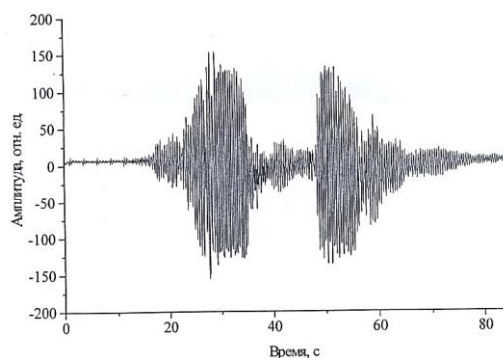


Рис. 8. Виброграмма до фильтрации

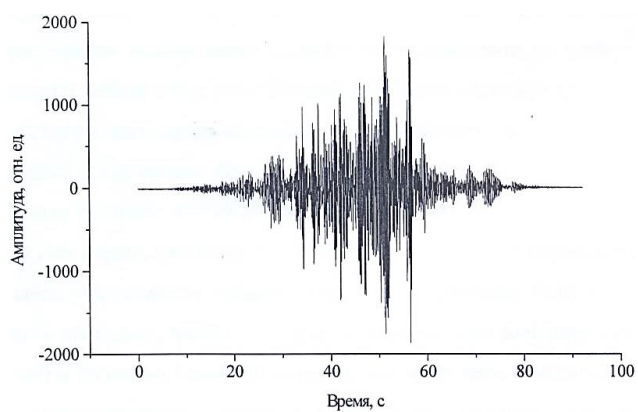


Рис. 9. Вид виброграммы после фильтрации

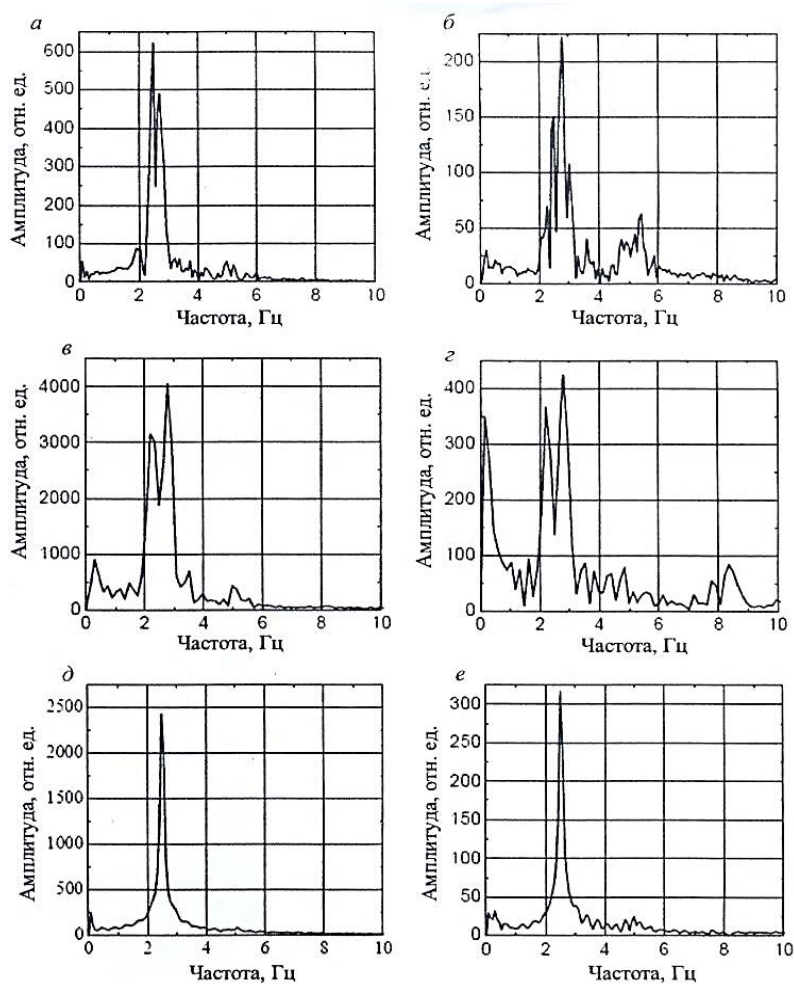


Рис. 10. Общий спектр частот виброграмм от временной нагрузки

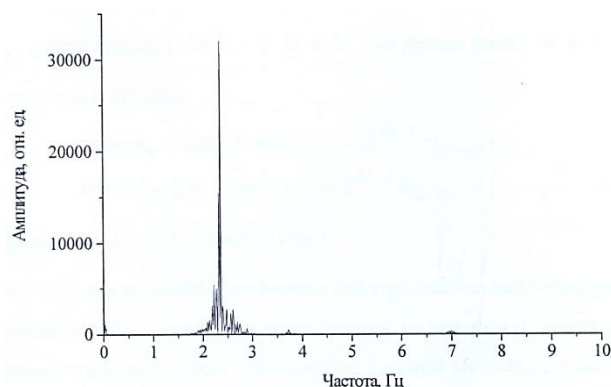


Рис. 11. Спектр частот виброграммы

При испытании сталежелезобетонного моста со схемой $42,6 + 42,6 + 42,6$ м экспериментальное значение w для случайного транспортного потока, состоящего из трех и более автотранспортных средств, составило 3,654 Гц при теоретическом значении $w = 4,0$ Гц. На основании прогибовивброграммы от прохода двух автотранспортных средств и виброграммы, полученной в автоматическом режиме работы комплекта «ДИАМОС», анализ частей свободных и вынужденных колебаний пролетных строений от воздействия системы «пролетное строение + автомобиль» с учетом проявления дефектов проезжей части (рис. 12) указывает на резонансное состояние на 65-й секунде испытания. Данное обстоятельство стало возможным в результате спектрального анализа в условиях центрирования сигнала, устранившего тренд в области инфранизких частот и дальнейшей цифровой фильтрации виброграммы с помощью режекторного фильтра. Из анализа экспериментальных динамических характеристик установлено: на зафиксированной частоте колебаний моста при $v = \frac{w}{\rho} \geq 1$ фаза возму-

щающей силы и вынужденных колебаний отличается на 180° . Подтверждением является практическое совпадение теоретических и экспериментальных значений амплитуд и статического прогиба, полученных в результате расчета и испытания [13].

По мнению авторов, временная продолжительность успокоения пролетного строения за счет диссипативных эффектов приводит не к резонансным явлениям, а лишь к эффекту биения на отметке максимума частот собственных колебаний. Объяснение данного обстоятельства связано с процессом затухания давления от автомобиля за счет срабатывания рессорной части и приспособляемости конструкции. В этом случае биение рассматривается как проявление альтернативного «затухающего» резонанса динамической системы, при котором частотные и амплитудные характеристики и затухание колебаний изменяются не в зависимости от формы колебаний, а по законам изменения масс с учетом их нагруженности. Подтверждением являются результаты испытаний моста со схемой $42,6 + 42,6 + 42,6$ м единичным автомобилем $P_{вр} = 25$ тс с гармонической нагрузкой 2,5 тс (рис. 13), с амплитудой вертикального перемещения $y_c = 0,04$ м и частотой $\rho = 10$ Гц. Авто-

мобиль имеет две подвески и четыре амортизатора с передаточным числом $TR = 0,1$. Частота вынужденных колебаний составила $\omega = 10$ Гц. Общая жесткость подвесок составила 250 тс, одного амортизатора – 62,5 тс/м. Расчетное перемещение амортизаторов равно 0,04 м, что соответствует гармоническому нагружению силой, равной 2,5 тс.

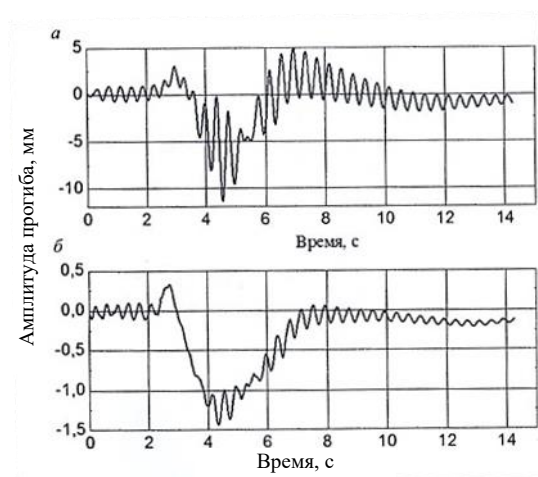


Рис. 12. Прогибовивброграммы с учетом проявления дефектов проезжей части

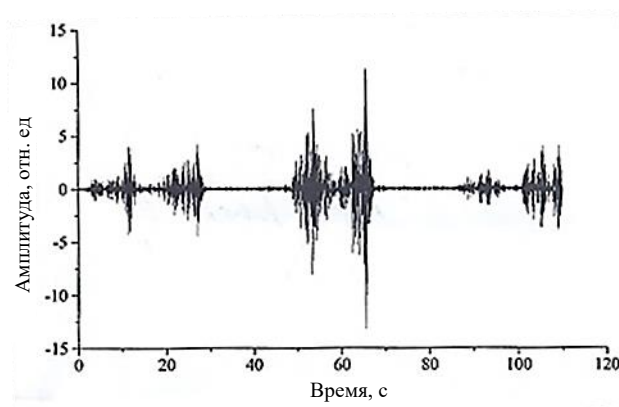


Рис. 13. Экспериментальный спектр частот от единичного автомобиля

Фундаментальные основы теории упругости и пластичности подтверждают условия, при которых в динамических системах в процессе совершенствования и расчета динамических характеристик обычное уравнение движения расширяется включением составляющей диссипативных сил (силы внутреннего трения в виде диссипативной функции), которая напрямую является линейной функцией скорости колебаний [14, 15].

При колебаниях балок за пределом упругости зависимость между коэффициентом неупругого сопротивления ν и параметром внутреннего сопротивления Ψ (поглощение энергии) может быть принята в виде

$$\nu = \frac{\Psi}{2\pi}. \quad (7)$$

Общеизвестно, что Ψ не зависит от σ_i , а $\Psi = \text{const}$ при $\sigma_i < R_n$, и тогда справедлива зависимость

$$\Psi \cong 2 \lg \delta, \quad (8)$$

где $\lg \delta$ – логарифмический декремент затухания; $\Psi = 0,17$ – для стальных мостов (С.А. Бернштейн, С.А. Ильясевич).

Таким образом, закон изменения амплитуды колебания по длине пролета балки с учетом затухания от диссипации выражается в виде $e^{-\nu x}$, x – текущая координата.

С введением в нормативные, проектные, строительные указания и правила обоснованных условий нагруженности мостовых сооружений временной подвижной нагрузкой с учетом возможного ее изменения в большую сторону за счет эксплуатационных дефектов, в том числе и проезжей части, в процессе предельного упругопластического динамического деформирования требуются совершенствования в определении амплитудно-частотных характеристик скоростного режима и диссипативных свойств колебаний системы «пролетное строение + автомобиль», которые составляют достаточный объем управляемых параметров при регулировании динамических характеристик.

Конструктивным примером демпфирования могут служить опорные части с высоким уровнем рассеяния за счет трения скольжения (по принципу гироскопика) [16]. Демпфер трения скольжения трансформирует колебания системы «пролетное строение + автомобиль» в кинетическую энергию перемещения элементов опорной части по трущимся поверхностям прямолинейной и дискообразной формы. Аналогичные исследования были проведены ранее с использованием простого типа резиновых опорных частей (РОЧ) для учета в пространственной динамической работе пролетных строений упругих свойств опорных частей [17]. Опорные части рассматриваются авторами в качестве регуляторов не только динамических характеристик, но и пространственной динамической устойчивости колебательного процесса. Появление действующих на пролетное строение со стороны опорных частей динамических реактивных сил и моментов изменяет характер поведения пролетного строения при воздействии временной подвижной нагрузки. Балки пролетных строений мостов в связи с их линейной протяженностью обладают податливостью поперечного сечения при изгибе с удлинением нижнего пояса, приводящего к смещению дискообразных элементов опорных частей, вызывающих гироскопический эффект. Гироскопический эффект сужает интервал существования колебаний во времени и уменьшает их амплитуду, но может увеличить частоту вынужденных колебаний ω .

Демпфирование, как пример регулирования динамических характеристик, следует рассматривать в изменении формы гармонического колебания в начальной стадии в виде синусоидальной и конечной косиносоидальной. Это не противоречит гипотезе, что движение одного или нескольких транспортных средств по пролетному строению с неровной проезжей частью колебания пролетного строения может быть в противофазе или смещенным на угол θ либо в начале, либо

в процессе движения [18, 19]. Временные подвижные нагрузки в определенный период могут играть роль дебаланса (гиромаятника) в колебании пролетных строений, и, наоборот, в определенных обстоятельствах пролетные строения могут играть роль дебаланса в собственных нестационарных колебаниях временной подвижной нагрузки на принципах динамической совместности и непрерывности деформаций (принцип модальных аппроксимаций). Из известных мировой научной общественности источников делается вывод, что регулирование динамических характеристик пролетных строений металлических мостов составляет ветвь перспективного направления виброзащиты и виброизоляции мостов, обладающих новизной и актуальностью. Достижение цели рассматривается в направлении «развязывания» свободных колебаний пролетного строения, а возбуждение вынужденных колебаний «пролетное строение + автомобиль» рассматривается в направлении одной из координат поперечных гармонических колебаний и не вызывает колебания в направлении других координат, например x, z в двух вариантах: совпадение центра жесткости системы с аналогичным центром пролетного строения; главные оси жесткости пролетного строения совпадают с их главными осями инерции. Выполнение хотя бы одного из двух вариантов относит пролетное строение моста к амортизированному объекту. Регулирование динамических характеристик в этом случае осуществляется в рамках теории пространственной устойчивости колебания системы с амортизаторами длиной ℓ_a , коэффициентами жесткости k, i, j, s , где i – для пролетного строения, j – системы, s – амортизаторов (демпферов). В пролетном строении временная подвижная нагрузка, располагаясь в середине пролета с координатами главных осей X, Y, Z и их моментами инерции J_X, J_Y, J_Z , обеспечивает условие, при котором совпадения главных осей жесткости пролетного строения с их главными осями инерции характеризует систему с динамически устойчивыми параметрами.

Научное направление, рассматриваемое авторами в статье, не имеет пока аналогов и способствует достижению следующих результатов:

1. Входящими параметрами управления эксплуатационным состоянием являются амплитудно-частотные характеристики в условиях гармонических случайных (нестационарных) колебаний системы «пролетное строение + автомобиль».
2. Регулирование динамических характеристик для мостов с конструктивными особенностями пролетных строений (бистальные) основано на чувствительности к скоростям динамических деформаций с учетом задержки.
3. Амплитудно-частотный спектр колебаний пролетных строений рассматривается с учетом диссипации или рассеяния энергии, а также в условиях возможной противофазной формы колебаний.
4. Практическая реализация методологической концепции динамических испытаний мостов случайным транспортным потоком представлена созданием вибрационных диагностических комплектов «ДИАМОС» и экспресс-лабораторий, оснащенных методикой глубокого спектрального анализа прогибовиброграмм, дающего возможность судить о добротности и устойчивости динамической системы в целом.

По мнению авторов, «добротность» колебательного процесса (D_k) является параметром функции ненагруженности, и не функцией какой-либо меха-

нической системы с механическими характеристиками, а функцией энергетического состояния. Тогда в определении амплитудно-частотных характеристик, при упругом и упругопластическом состояниях несущих элементов пролетного строения моста, используется энергетическая составляющая вязкого внутреннего трения h . В этом случае механическая характеристика $(1 + \mu g)$, которая характеризует не что иное, как усиление колебаний в связи с инерционностью системы, становится энергетическим параметром [20]:

$$\beta \approx (1 + \mu g) \cong \frac{1}{1 - w^2 / p^2}. \quad (9)$$

Таким образом, учет эффекта противофазности колебаний отдельных элементов пролетных строений в системе способствует увеличению неучтенных инерционных сил.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В. Регулирование динамических характеристик – фактор повышения эксплуатационного ресурса транспортных сооружений // Природные и интеллектуальные ресурсы (СИБРЕСУРС-25-2019) : доклады (материалы конференции) 25-й Всероссийской научно-практической конференции. Томск : Изд-во Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2019. С. 62–65.
2. Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В. Техническая диагностика динамической работы пролетных строений при возникновении и развитии дефектов в автодорожных мостах // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации : материалы Международного конгресса. Омск : СибАДИ, 2013. С. 178–183.
3. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д. К вопросу автоматического регулирования динамических характеристик пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4. С. 171–176.
4. Kartopoltsev A., Safronov V. Анализ на результат и отизпитванен астоманен пътен мост // Пътища. 2007. 2. Р. 11–16.
5. Бочкарев Н.Н. Мониторинг динамических характеристик пролетных строений мостов с применением мобильного аппаратно-программного комплекса «Диамос» // Техника и технология дорожного хозяйства. 2000. 1. С. 62–66.
6. Kartopoltsev V.M., Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V. Evaluation of dynamic characteristics of a bridge span highway bridges in terms of exposure random traffic flow // Cambridge Journal of Education and Science. 2015. 2 (14). Р. 521–533.
7. Сертификат об утверждении типа средств измерений = Pattern approval certificate of measuring instruments. Ru.E.28.060. AN.7903. Портативный вибродиагностический комплекс «Диамос» (Государственный реестр средств измерений № 19790–00). 30.06.2000. 3 с.
8. Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В., Сафронов В.М., Шендель А.С. Численное моделирование экспериментальных исследований сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов // IX Международная научная конференция. София, Болгария, 2009. СП-226-П-233.
9. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д., Щербинин А.Н. Применение резонансных методов определения динамических характеристик сталежелезобетонных мостов с учетом дефектов проезжей части // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4. С. 126–134.
10. Картопольцев В.М., Кисов Д., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д. Динамические испытания сталежелезобетонных мостов с учетом влияния дефектов проезжей части // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5. С. 178–193.

11. Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д. К вопросу о колебании системы «автомобиль + пролетное строение» при совпадении центров масс и жесткости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 6. С. 251–259.
12. Якубович В.А., Старжинский В.М. Параметрический резонанс в линейных системах. Москва, 1987. 328 с.
13. Картопольцев В.М., Сафронов В.М., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д. Определение динамических напряжений и деформаций в сталежелезобетонных мостах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3. С. 194–204.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 томах. Т. VII. Теория упругости. Москва : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 248 с.
15. Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д., Зголич М.В. К вопросу о диссипативности деформирования балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2. С. 194–199.
16. Всесторонне-подвижная опорная часть ОЧПС-П-410-75. Проект 1815. КМД-101.04. ООО «К° Люмьер ЛТД». Технический паспорт. 2020. № 2. 6 с.
17. Гринев С.Ю., Боровков Д.В. Определение податливости мостовых резинометаллических опорных частей в условиях всестороннего деформирования // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2009. Вып. 1. С. 83–91.
18. Бочкарев Н.Н., Картопольцев А.В. Техническая вибродиагностика пролетных строений автодорожных мостов // Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. Архитектурная и строительная акустика. Шумы и вибрация. Аэроакустика : сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. 27–31 октября 2008. Москва : ГЕОС, 2008. С. 228–233.
19. Ли Д.В., Картопольцев В.М. К вопросу динамической работы пролетных строений мостов со сквозной стенкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 194–201.
20. Чжао Цзянь, Белуцкий И.Ю., Яцура В.Г. Отражение воздействия временной нагрузки в динамическом коэффициенте при расчете автодорожных мостов // Ученые заметки ТОГУ : электрон. науч. изд. 2013. Т. 4. № 4. С. 1657–1661.

REFERENCES

1. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V. Regulirovanie dinamicheskikh kharakteristik – faktor povysheniya ekspluatatsionnogo resursa transportnykh sooruzhenii [Dynamic property control as a factor of increasing the operation of transport facilities]. In: Prirodnye i intellektual'nye resursy: doklady (materialy konferentsii) 25-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. 19th Int. Conf. 'Natural and Intelligent Siberian Resources (SIBRESURS-19-2013)'). 2019. Pp. 62–65. (rus)
2. Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V. Tekhnicheskaya diagnostika dinamicheskoi raboty proletnykh stroenii pri vozniknovenii i razvitii defektov v avtodorozhnykh mostakh [Technical diagnostics of dynamic work of bridge spans during defect formation]. In: Arkhitektura. Stroitel'stvo. Transport. Tekhnologii. Innovatsii: materialy Mezhdunarodnogo kongressa (Proc. 6th Int. Sci. Conf. 'Architecture, Civil Engineering – Modernity'). Omsk. 2013. Pp. 178–183. (rus)
3. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. K voprosu avtomaticheskogo regulirovaniya dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov [Automated control for dynamic parameters of bridge spans]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2017. No. 4 (63). Pp. 171–176. (rus)
4. Kartopol'sev A.V., Safronov V.M. Analiz rezul'tatov ispytaniya stalezhelezobetonnykh avtodorozhnykh mostov [Testing results of steel-concrete composite bridges]. Dorogi P'tishcha. 2007. No. 2. Pp. 11–16. (rus)
5. Kartopoltsev A.V., Bochkarev N.N. Monitoring dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov s primeneniem mobil'nogo apparatno-programmnogo kompleksa "Diamos" [Monitoring of dynamic properties of bridge spans using mobile soft hardware and "Diamos" vibration diagnostic system]. Tekhnika i tekhnologii dorozhnogo khozyaistva. 2000. No. 1. Pp. 62–66. (rus)

6. Kartopoltsev V.M., Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V. Evaluation of dynamic characteristics of bridge spans under random traffic flow. *Cambridge Journal of Education*. 2015. V. 6. No. 2 (14). Pp. 521–533.
7. Portativnyi vibrodiagnosticheskii komplekt “Diamos” [“Diamos” portable vibration diagnostic system] Sertifikat ob utverzhdenii tipa sredstv izmerenii [Pattern Approval Certificate of Measuring Instruments]. N 19790-00, 2000. 3 p. (rus)
8. Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V., Safronov V., Shendel A.S. Chislennoe modelirovanie eksperimental'nykh issledovaniy stalezhelezobetonnykh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov [Numerical modelling of experimental research in steel concrete of flying structures of road bridges]. In: IX Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya VSU (*Proc. 9th Int. Sci. Conf. VSU*). Sofia, 2009. Pp. 226–233. (rus)
9. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D., Shcherbinin A.N. Primenenie rezonansnykh metodov opredeleniya dinamicheskikh kharakteristik stalezhelezobetonnykh mostov s uchetom defektov proezzhei chasti [Determination of dynamic properties of composite bridges with pavement defects using resonance methods]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 4. Pp. 126–134. (rus)
10. Kartopoltsev V.M., Kisov D., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. Dinamicheskie ispytaniya stalezhelezobetonnykh mostov s uchetom vliyaniya defektov proezzhei chasti [Dynamic tests of composite bridges with pavement defects]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. No. 5. 2016. Pp. 178–193. (rus)
11. Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. K voprosu o kolebanii sistemy avtomobil' – proletnoe stroenie pri sovpadenii tsentrov mass i zhestkosti [Vehicle/span system oscillation at coincident centre of mass and stiffness]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 6. Pp. 251–259. (rus)
12. Yakubovich V.A., Starzhinsky V.M. Parametricheskii rezonans v lineinykh sistemakh [Parametric resonance in linear systems]. Moscow, 1987. 328 p. (rus)
13. Kartopoltsev V.M., Safronov V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. Opredelenie dinamicheskikh napryazhenii i deformatsii v stalezhelezobetonnykh mostakh [Stress-strain state of composite bridges]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 3. Pp. 194–204. (rus)
14. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoriya uprugosti. Teoreticheskaya fizika [Theory of elasticity. Theoretical physics], in 10 vol. Moscow: Nauka, 1987. 248 p. (rus)
15. Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D., Zgolichev M.V. K voprosu o dissipativnosti deformirovaniya balok proletnykh stroenii mostov [Dissipative deformation of bridge span beams]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 2. Pp. 194–199. (rus)
16. Vsestoronne-podvizhnaya opornaya chast' OChShS-P-410-75. Projekt 1815. KMD-101.04. ООО “К° Lyum'er LTD”. Tekhnicheskii passport [Movable support part of OCHSHS-P-410-75. Project N 1815. Technical passport]. No. 2. 2020. 6 p. (rus)
17. Gridnev S.Y., Borovkov D.V. Opredelenie podatlivosti mostovykh rezino-metallicheskh opornykh chastei v usloviyakh vsestoronnego deformirovaniya [Rubber-metal yield supports under uniform deformation]. *Nauchnyi vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura bridge*. 2009. No. 1 (13). Pp. 83–91. (rus)
18. Bochkarev N.N., Kartopoltsev A.V. Tekhnicheskaya vibrodiagnostika proletnykh stroenii mostov [Vibration diagnostics of bridge spans]. In: Sbornik trudov XX sessii rossiiskogo akusticheskogo obshchestva: akustika rechi. Meditsinskaya i biologicheskaya akustika. Arkhitekturnaya i stroitel'naya akustika. Shумы i vibratsii. Aeroakustika (*Coll. Papers 20th Session of Russian Acoustical Society' Speech Acoustics. Medical and Bi-ological Acoustics. Architectural and Construction Acoustics. Noises and Vibrations. Aeroacoustics*). Moscow, 2008. V. 3. Pp. 228–233. (rus)
19. Li D.V., Kartopoltsev V.M. K voprosu dinamicheskoi raboty proletnykh stroenii mostov so skvoznoi stenкой [Towards the dynamic behavior of truss bridge spans]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. Pp. 194–201. (rus)
20. Zhao Jian, Belutskiy I.Yu., Yatsura V.G. Otrazhenie vozdeistviya vremennoi nagruzki v dinamicheskom koeffitsiente pri raschete avtodorozhnykh mostov [Impact reflection of temporary load in dynamic coefficient in road bridge analysis]. *Uchenye zametki TOGU*. 2013. V. 4. No. 4 Pp. 1657–1661. (rus)

Сведения об авторах

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Кухаренко Светлана Александровна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf_most@mail.ru

Authors Details

Andrei V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО "DIAMOS", 24/1, Solyanoy Alley, 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, ООО "DIAMOS", 24/1, Solyanoy Alley, 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Svetlana A. Kukhachenko, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kaf_most@mail.ru