

Received: 28.02.2023

Revised: 24.04.2023



Accepted: 28.04.2023



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.2.065-074



THE IMPACT OF BRIDGE CROSSING SPAN DAMAGE UNDER MOVING LOAD

V. V. Korepanov^{a)*}, T. O. Korepanova^{b)}, and R. V. Tsvetkov^{c)}

*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Ak. Koroleva St., Perm, 614013, Russia*

^{a)}  <https://orcid.org/0009-0007-5224-820X>  kvv@icmm.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0009-0001-4202-0734>  tansan2002@mail.ru;

^{c)}  <https://orcid.org/0000-0001-9617-407X>  flower@icmm.ru

*Corresponding author. E-mail: kvv@icmm.ru

Address for correspondence: ul. Ak. Koroleva Street, 1, Perm, 614013, Russia

Tel.: 8 (342) 237-8330

The structure of the bridge crossing span structure is simulated in order to determine the most informative parameters, which need to be measured in the process of monitoring system operation. To assess the influence of structural component integrity on the static deflections and dynamic response, damages were introduced into the model, which were simulated by removal of a part of the structural components. On the basis of a numerical model of calculating a span structure under static and dynamic moving load, it is shown how increasing damage changes deflection and natural frequencies, which can be reliably recorded by the monitoring system.

Keywords: damage, span, numerical calculation, monitoring system, moving load.

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment to the Perm Federal Research center, UB RAS, theme No. AAAA-A19-19012290100-8.

References

1. Aganov I.A., Osadchiy G.V., Efanov D.V., Kiselev M.V., Kallistov A.S. Structured monitoring system on a road bridge across the Ob River near Surgut. *Mir Dorog*, 2021, vol. 139, pp.108–110. (In Russian).
2. Yashnov Andrey N., Baranov Timofey M. Monitoring of dynamic behavior of bridge across the Angara in Irkutsk. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Arkhitektury i Stroitelstva*, 2017, vol. 1, pp. 199–209. (In Russian).
3. Nepomnyashchiy V.G., Yashchenko A.I., Osadchiy G.V. Continuous monitoring of the bridge over the Golden Horn Bay. *Dorogi. Innovatsii v Stroitelstve*, 2012, vol. 19, pp. 30–34. (In Russian).
4. Ovchinnikov I.G., Kosaurov A.P., Surov D.I. Continuous remote monitoring and diagnostics of technical condition of bridges. *Inzhenerno-Stroitelny Vestnik Prikaspiya*, 2019, No. 3 (29), pp. 16–24. (In Russian).
5. Shcheglova N.N. The analyses of natural frequencies of the bridge structures in the process of crippling. *Nauka i Obrazovanie*, 2012, No. 3, p. 40. (In Russian). Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/311032.html>
6. Zabelin A.V., Pyhalov A.A. Analysis of correlation of own frequencies and vectors of oscillations of finite-element models of a framework of bridges. *Izvestiya Vuzov. Investitsii*.

Stroitelstvo. Nedvizhimost, 2018, vol. 8, No. 1, pp. 143–159. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2917-2018-1-143-159.

7. Loktev A.A., Loktev D.A., Illarionova L.A., Barakat A. Features of the dynamic behavior of the span structure of low-water bridges. *Transport. Transportnyye Sooruzheniya. Ekologiya*, 2022, No. 2, pp. 72–81. (In Russian). DOI: 10.15593/24111678/2022.02.09 10.15593/24111678/2022.02.09.

8. Jenkins G.M., Watts D.G. *Spectral Analysis and Its Applications*, San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam, Holden-Day, 1968, 525 p.

9. Marple S. Lawrence. *Digital Spectral Analysis: With Applications*, Prentice-Hall, 1987, 492 p. ISSN 1050-2769.

10. Valeev S.G., Faskhutdinova V.A. The cross-spectral analysis of time series. *Vestnik Ulyanovskogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2006, No. 4, pp. 30–33. (In Russian).

11. Krutikov O.V., Gershuni I.Sh., Ryzhov D.I. Evaluation of the self-induced vibrations modes of bridge superstructure during monitoring. *Transportnye Sooruzheniya*, 2022, vol. 9, No. 2, pp. 1–23. (In Russian). DOI: 10.15862/01SATS222. Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS222.pdf>

12. Kurakina E., Evtiukov S. Impact of static and dynamic loads of vehicles on pavement. In: *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019)*, Moscow, Russia, 19–22 November, 2019, E3S Web of Conferences, A. Zheltenkov, A. Mottaeva, eds., EDP Sciences, 2020, vol. 164, p. 03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403025.

13. Safronov V.S., Antipov A.V. Pilot design investigation of deflected mode of road metal box span. *Stroitel'naya Mekhanika i Konstruktsii*, 2011, No. 2 (3), pp. 63–73. (In Russian).

14. Belutsky I.Y., Kudryavtsev S.A., Lazarev I.V. Justification of the parameters of regulation of forces for steel-reinforced concrete span structures from project “43282 km” by TSNIIPSK. *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy*, 2022, vol. 18, No. 5, pp. 407–416. DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-5-407-416. (In Russian).

15. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V. Regulation of dynamic characteristics of bridge spans in the conditions of the changing impact of the temporary moving load. *Professorskiy Zhurnal. Seriya Tekhnicheskie Nauki*, 2021, No. 1 (4), pp. 4–19. DOI: 10.18572/2686-8598-2021-4-1-4-19. (In Russian).

16. Averin A.N. Experimental and theoretical study of continuous bridge span vibrations under mobile load. *Stroitel'naya Mekhanika i Konstruktsii*, 2019, No. 1 (20), pp. 41–51. (In Russian).

17. Tsvetkov R.V. Vibration-based diagnostics of the Krasavinskiy bridge over the Kama river. In: *Trudy konferentsii molodykh uchenykh “Pozdeevskie chteniya”* [The Pozdeev Readings Conference of Young Scholars, Perm, March 23–24, 2006: Proceedings]. Perm, 2006, pp. 132–136. (In Russian).

Подана в журнал: 28.02.2023



УДК 534.16



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.2.065-074



ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

В. В. Корепанов^{а)*}, Т. О. Корепанова^{б)}, Р. В. Цветков^{в)}

*ФГБУН Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия*

^{а)}  <https://orcid.org/0009-0007-5224-820X>  kvv@icmm.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0009-0001-4202-0734>  tansan2002@mail.ru;

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0001-9617-407X>  flower@icmm.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: kvv@icmm.ru
Адрес для переписки: ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013, Россия
Тел.: 8 (342) 237-83-30; факс: 8 (342) 237-84-87

Выполнено моделирование конструкции пролетного строения мостового перехода с целью определения наиболее информативных параметров, которые нужно измерять в процессе работы системы мониторинга. Для оценки влияния целостности конструктивных элементов на статические прогибы и динамический отклик в модель были внесены «повреждения», которые моделировались удалением части конструктивных элементов. На основе численной модели расчета пролетного строения при действии статической и динамической подвижной нагрузки показано, как с ростом поврежденности изменяются прогиб и собственные частоты, которые можно надежно регистрировать системой мониторинга.

Ключевые слова: поврежденность, пролетное строение, численный расчет, система мониторинга, подвижная нагрузка.

1. Введение

В настоящее время, в связи с увеличением числа автомобильного транспорта и вводом в эксплуатацию новых автодорожных объектов, приобретают большое значение вопросы безопасной эксплуатации мостовых переходов, которые являются сложными инженерными сооружениями и имеют большое социальное значение. В связи с этим вопрос безопасной эксплуатации имеет высокую значимость, и актуальным становится мониторинг таких объектов [1–4]. Основное целевое предназначение системы мониторинга – своевременная регистрация эволюций деформационного состояния, которая позволит оценить текущее деформационное состояние элементов конструкций и определить их остаточный ресурс.

Опыт создания и эксплуатации систем деформационного мониторинга сооружений показывает важность этапа предварительного моделирования конструкции с целью определения наиболее информативных параметров, которые нужно измерять в процессе работы системы мониторинга.

Поэтому в работах, посвященных мониторингу мостовых переходов, особое место уделяется созданию различных расчетных моделей и проводятся оценки основных параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние рассматриваемых объектов.

Так, в работе [5] выявляются признаки, по которым можно было бы определить место расположения опасного сечения пролета мостового перехода с точки зрения его разрушения. Для анализа выбиралась частотная математическая модель – модель колебаний системы с

распределенными параметрами. Пролет моста был представлен в виде прямолинейного стержня или балки, шарнирно опертой на концах.

Исследование эффективности использования собственных частот и векторов колебаний конечно-элементных моделей пролетных строений мостов для анализа их корреляции проведено в работе [6].

В работе [7] рассматриваются особенности эксплуатации низководных мостов с одним пролетным строением. Анализируются колебания пролетного строения моста с учетом его взаимодействия с другими элементами конструкции и окружающей среды (грунт, вода). В качестве характеристики, по изменению которой можно судить об изменении состояния мостового сооружения, предложено использовать собственную частоту колебаний.

Динамические характеристики конструкции могут быть получены из данных мониторинга методами спектрального анализа [8, 9]. Кросс-спектральный анализ для двух временных рядов, реализованный в виде модуля, включенного в автоматизированную систему, и результаты исследования зависимостей между гармоническими составляющими моделей динамики двух временных рядов описаны в работе [10].

В работе [11] рассматривается методика оценки динамических характеристик моста – частот и амплитуд форм собственных колебаний – с использованием экспериментальных данных.

Построена математическая модель динамической системы, совершающей свободные колебания. Приведены формулы частотной характеристики модели и ее составляющих: амплитудной и фазовой характеристик системы.

Исследование статических и динамических нагрузок от транспортных средств, воздействующих на дорожное покрытие, с целью выявления признаков его раннего износа рассмотрено в [12].

Идеи контроля динамических параметров конструкции мостовых переходов не новы, и они широко отражены в литературе. Также много работ посвящено идентификации форм колебаний по данным измерений и определению динамического отклика на различные подвижные динамические нагрузки [13–16]. Однако нет определенного ответа на вопрос, какие формы и в каких пропорциях будут возникать в конструкции от действия эксплуатационных нагрузок, таких как движение транспорта. Поэтому моделирование динамического отклика конструкции пролетных строений представляет практический интерес в связи с оценкой потенциального влияния тех или иных повреждений рассматриваемой конструкции на его параметры. Динамический (вибрационный) отклик в определенном месте конструкции фактически представляет собой виброграмму, снятую с установленного там датчика. Таким образом, такой численный эксперимент помогает перед установкой систем мониторинга понять, каким образом и где на конструкции лучше использовать вибродатчик.

Поэтому целью исследований в данной работе является численный анализ поведения рассматриваемого пролетного строения мостового перехода с учетом различных вариантов повреждений на статическую и подвижную динамическую нагрузку.

2. Постановка задачи и методы решения

2.1. Объект исследования

Мостовые переходы, как правило, подразделяются на русловую и эстакадную части. Эстакадная часть представляет собой строения типовой планировки, а конструкция русловой части, в связи с большим размером пролетов между опорами, нередко уникальна и, как правило, имеет отличительные особенности. Поэтому она является наиболее важной с точки зрения деформационной безопасности и мониторинга всего сооружения.

Рассмотрим русловую часть моста в виде неразрезного коробчатого металлического пролетного строения, активно применяемого в мостостроении, и опирающегося на него до-

рожного полотна. Именно эта коробчатая конструкция и обеспечивает несущую способность мостового перехода. Расчетная модель конструкции данного пролетного строения представлена на рис. 1. В модели железобетонные опоры моста считались абсолютно жесткими в сравнении с другими металлическими элементами конструкции, а в месте контакта неразрезного пролетного строения с опорой предполагалась заделка по перемещениям.

В модели были заданы следующие основные геометрические параметры: общая протяженность мостового перехода составляет 966 м; рассмотрено 9 точек опирания, что соответствует 8 пролетам, из которых самый протяженный имеет длину $L = 147$ м (рис. 1). Основные геометрические параметры расчетной модели были взяты с реальной конструкции мостового перехода.

Коробчатое строение моделировалось с помощью оболочечных и балочных элементов, а дорожное полотно – в виде оболочечных элементов.

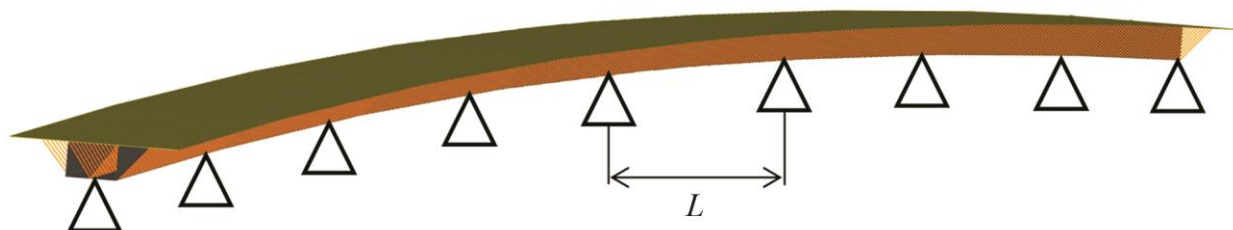


Рис. 1. Модель неразрезного пролетного строения мостового перехода

2.2. Методы решения

С данной расчетной моделью неразрезного пролетного строения был проведен ряд численных экспериментов, включающих решение статических и динамических задач, таких как модальный анализ и анализ переходных процессов. Численное решение данных задач реализовано в конечно-элементном пакете ANSYS.

Для оценки возможности контроля целостности конструкции в модель вносились повреждения, которые моделировались с помощью ослабления жесткости коробчатой конструкции пролетного строения. Следует отметить, что жесткость короба обеспечивается как оболочечными, так и балочными элементами. Ослабление конструкции моделировалось с помощью удаления части продольных балочных элементов в области самого длинного пролета.

В рамках статической постановки решалась задача нахождения прогиба пролетного строения мостового перехода под действием его собственного веса в упругой постановке.

Для анализа динамического отклика системы была рассмотрена задача при действии динамической нагрузки, которая возникает естественным образом при движении транспортных средств. Представим нагрузку в виде сил, возникающих при движении одного транспортного средства с постоянной скоростью. Принимается допущение, что нагрузка, равная весу автомобиля, имеет только вертикальную составляющую и передается на полотно дороги в месте контакта четырех колес. При движении нагрузки с постоянной скоростью в каждый момент времени вычисляется положение четырех колес автомобиля. Затем оценивается положение колеса относительно узлов сетки, и в случае положения колеса между узлами нагрузка распределяется на соседние узлы по линейному закону (рис. 2).

В начальный момент времени нагрузка располагалась над одной из опор мостового пролета длиной $L = 147$ м (рис. 3) и перемещалась в направлении другой опоры. В процессе численного эксперимента фиксировались компоненты вектора перемещений в разных частях конструкции мостового перехода.

Решение динамической задачи с заданной подвижной нагрузкой было выполнено с использованием схемы прямого интегрирования по времени, которая базируется на методе Ньюмарка.

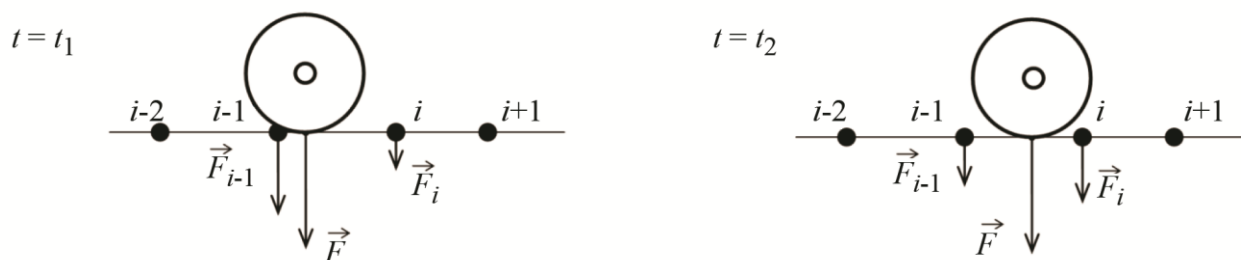


Рис. 2. Схема задания динамической нагрузки

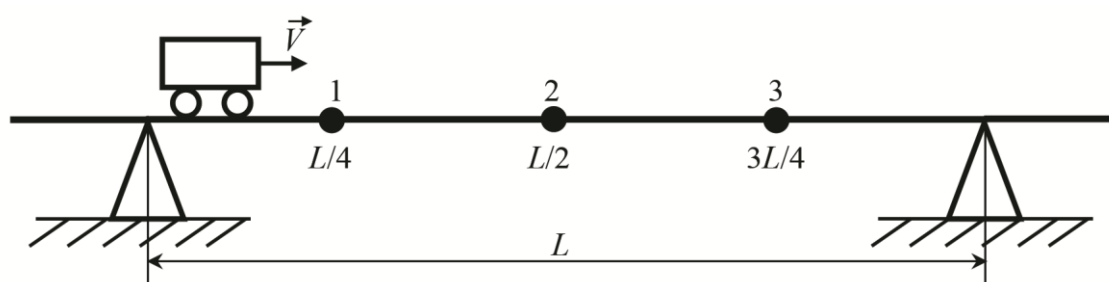


Рис. 3. Схема численного эксперимента

3. Результаты и обсуждение

3.1. Подбор параметров модели

Для более точной идентификации физико-механических параметров модели были использованы данные с приемо-сдаточных испытаний мостового перехода, в ходе которых производились статические и динамические нагружения [17] в окрестности самой протяженной части пролетного строения. Так, например, при испытаниях контролировался прогиб 147-метрового пролета под действием статической нагрузки. Эксперименты зафиксировали прогиб величиной около 20 см, соответствующий нагрузке 9 груженых автомобилей общей массой 200 тонн в середине пролета.

Решение соответствующей статической задачи в упругой постановке при силовой нагрузке от стоящего транспорта на элементы мостового перехода для различных граничных условий на опорах позволяло получить вертикальные смещения элементов конструкции. На основе проведенных численных расчетов этой задачи и сравнения полученных результатов с экспериментом был осуществлен подбор жесткостных характеристик элементов конструкции.

Также в ходе сдаточных испытаний проводилось динамическое нагружение конструкции мостового перехода, которое включало несколько режимов движения транспорта. При помощи соответствующих трехкомпонентных датчиков фиксировались виброскорости и ускорения конструкций в середине пролета и на опоре. Измеренные в эксперименте низшие собственные частоты использовались для уточнения массовых характеристик модели. Для этого решалась задача на собственные значения в той же постановке и с учетом тех же граничных условий, что и для статической задачи.

Полученные жесткостные и массовые характеристики использовались в дальнейшем при моделировании динамического отклика пролетного строения на подвижную нагрузку.

3.2. Численный расчет модели мостового перехода

Ниже представлены результаты статических и динамических задач, в которых становится заметно влияние степени поврежденности пролетного строения. Рассмотрено несколько сценариев: целая конструкция и 4 варианта ослабления конструкции (поврежденности), локализованные в первой половине пролета от 0 до $L/2$ (рис. 3). В качестве интегральной оценки степени поврежденности конструкции была использована величина относительного изменения максимального прогиба рассматриваемого пролета под собственным весом. Нормирование проводилось по отношению к величине прогиба поврежденной конструкции. Например, степень поврежденности, составляющая 50 %, соответствует двукратному увеличению максимального прогиба пролета под собственным весом. В рассмотренных вариантах появление поврежденности снижало жесткость пролета с 2 до 15 %.

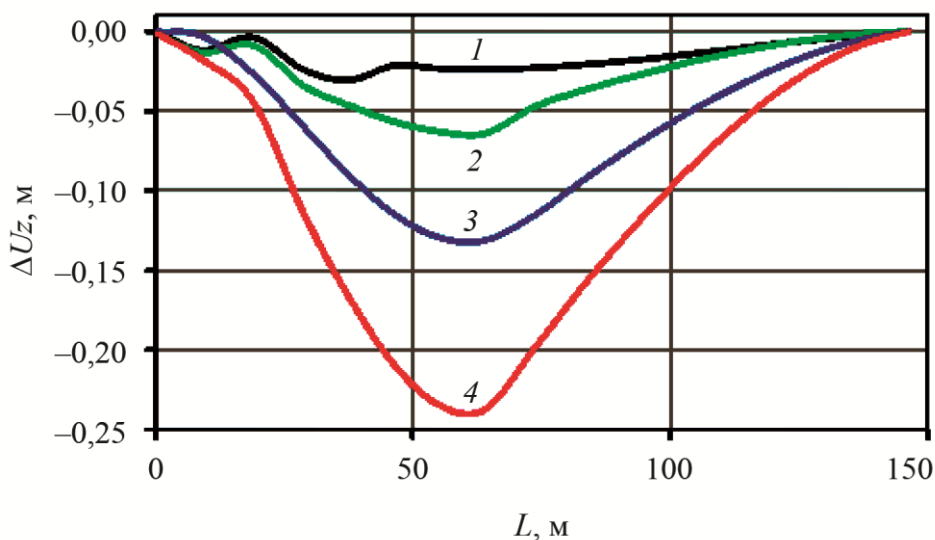


Рис. 4. Изменение прогиба пролета в зависимости от степени его поврежденности

На рис. 4 представлены численные расчеты по изменению статического прогиба U_z самого длинного пролета моста под действием его собственного веса при разной степени поврежденности по сравнению с моделью без повреждений, где 1 – это кривая изменения прогиба, соответствующая снижению жесткости пролета на 2,1 %, 2 – на 4,2 %, 3 – на 9,8 %, 4 – на 15,8 %. Как видно из приведенных результатов, ослабление конструкции ведет к увеличению прогиба; также можно отметить и влияние местоположения повреждения на кривую изменения прогиба. Увеличение максимального прогиба на 23 см для четвертого варианта поврежденности сопоставимо с результатом, полученным при испытаниях мостового перехода.

Для оценки влияния целостности конструктивных элементов на динамический отклик на подвижную нагрузку были сделаны численные эксперименты с учетом различных повреждений. В расчете моделировалось движение одного транспортного средства массой 20,1 тонн (по 5 кН на колесо) по центральной полосе со скоростью 10 м/с. На рис. 3 показаны точки, в которых фиксировались колебания конструкции пролетного строения мостового перехода.

На рис. 5 представлены графики вертикальной компоненты виброперемещений в точке 2 (рис. 3) при моделировании движения автомобиля со скоростью 10 м/с с различной степенью поврежденности. Полученные результаты (рис. 5) показывают, что с ростом поврежденности квазистатический прогиб увеличивается.

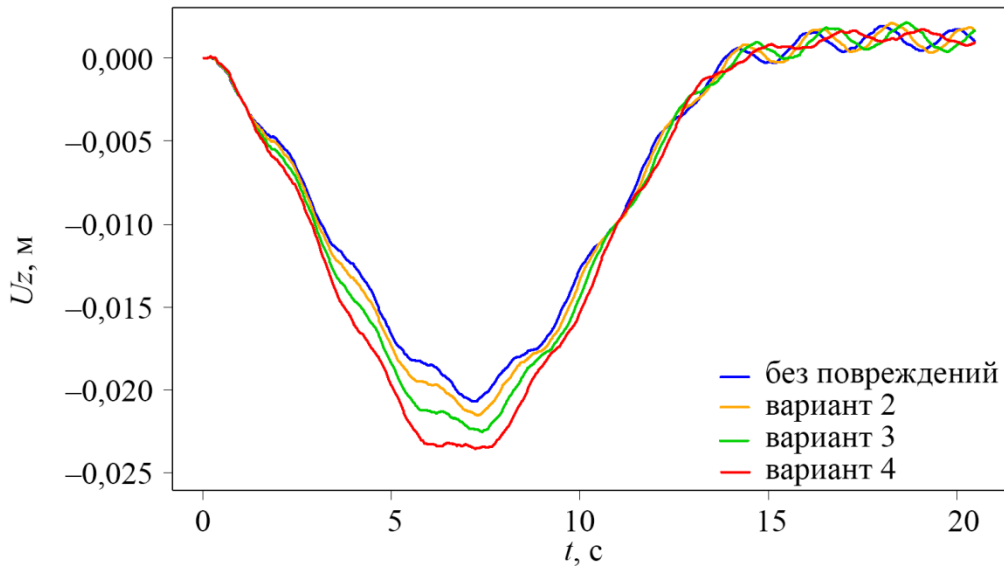


Рис. 5. Вертикальные компоненты виброперемещений U_z в точке 2 при моделировании движения автомобиля со скоростью 10 м/с

Для оценки амплитудно-частотного отклика конструкции использовалось фурье-преобразование для виброскоростей, полученных путем численного дифференцирования перемещений. Это сделано, чтобы исключить на фурье-спектре влияние квазистатического прогиба.

На рис. 6 представлены фурье-образы $Fur(V_z)$ вертикальной компоненты виброскорости V_z отклика конструкции в точке 3 (рис. 3) на подвижную нагрузку. На графиках заметно смещение некоторых частот при наличии поврежденности в конструкции. Дополнительный модальный анализ позволяет уточнить значения данных частот (см. табл.). В приведенной таблице представлены результаты изменения четырех собственных частот при разной степени поврежденности относительно целой конструкции. Наблюдаемые в численном эксперименте формы колебаний соответствуют номерам полувольт в таблице. Частота № 1 – одна полуволна, № 2 – две полуволны и т. д.

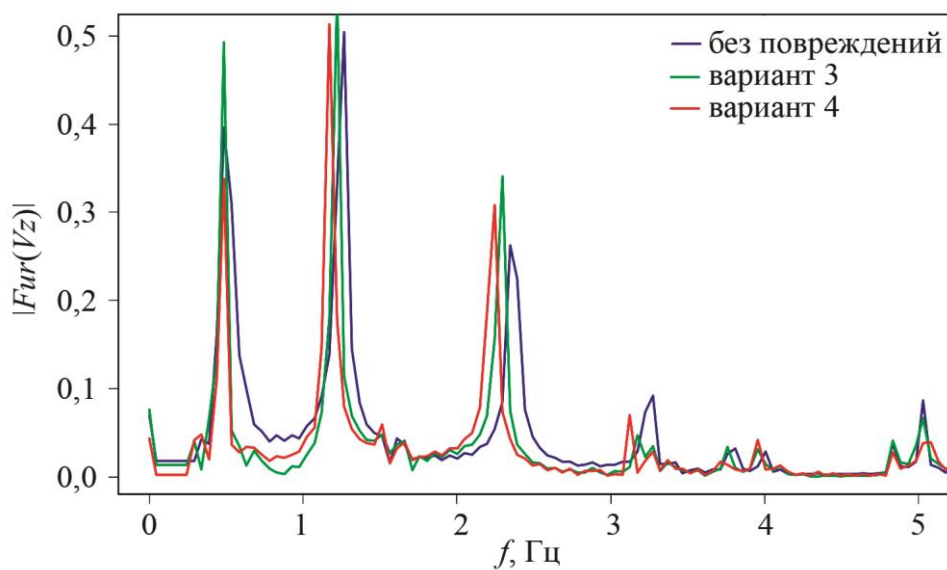


Рис. 6. Фурье-спектры вертикальной компоненты виброскоростей в точке 3

Таблица

Сдвиг частот для четырех собственных форм

№	Без повреждений f , Гц	1 вариант Δf , %	2 вариант Δf , %	3 вариант Δf , %	4 вариант Δf , %
1	0,5126	1,0%	1,8%	4,3%	7,1%
2	1,252	0,6%	1,3%	3,10%	3,9%
3	2,386	0,7%	1,5%	3,7%	6,0%
4	3,282	0,4%	0,9%	2,2%	3,4%

Расчеты показали, что основной спектр частот конструкции располагается ниже 10–15 Гц.

Анализируя результаты численных расчетов для динамических задач при действии подвижной нагрузки, можно обратить внимание на то, что собственные частоты по-разному реагируют на появление повреждений. Заметный сдвиг по частотам можно увидеть для второй и третьей форм колебаний как на графиках (рис. 6), так и в приведенной таблице. Однако заметный сдвиг частот в модальном анализе не всегда можно зарегистрировать в реальном эксперименте. Так, низшая собственная частота 0,51 Гц в данном примере за 20 секунд измерений методом фурье-анализа определяется с шагом 0,02 Гц, что недостаточно для оценки степени поврежденности конструкции. Измерения необходимо проводить на более длительном интервале времени, за который автомобиль уедет за пределы пролета. Также можно отметить, что при нахождении датчика вблизи узла формы колебаний сильно снижается ее информативность (на рис. 6 четвертая форма колебаний при частоте 3,2 Гц малозаметна).

4. Заключение

Проведены численные исследования по расчету модели пролетного строения моста, включающие в себя решения статических и динамических задач, в том числе с учетом подвижной нагрузки от транспорта. Анализ результатов с учетом введенных в модель повреждений позволил оценить их влияние на деформационную реакцию конструкции, выраженную в виде прогибов и собственных частот. Полученные результаты можно использовать для выбора параметров и положения датчиков для системы мониторинга мостового перехода.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ПФИЦ УрО РАН (номер темы АААА-А19-19012290100-8).

Литература

1. Система структурированного мониторинга на автодорожном мосту через реку Обь вблизи Сургута / И. А. Аганов, Г. В. Осадчий, Д. В. Ефанов, М. В. Киселёв, А. С. Каллистов // Мир дорог. – 2021. – № 139. – С. 108–110.
2. Яшнов А. Н., Баранов Т. М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга Академического моста через р. Ангару в Иркутске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1. – С. 199–209.
3. Непомнящий В. Г., Ященко А. И., Осадчий Г. В. Непрерывный мониторинг мостового перехода через бухту Золотой Рог // Дороги. Инновации в строительстве. – 2012. – № 19. – С. 30–34.

4. Овчинников И. Г., Косауров А. П., Сувор Д. И. Непрерывный удаленный мониторинг и диагностика технического состояния мостов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2019. – № 3 (29). – С. 16–24.
5. Щеглова Н. Н. Анализ собственных частот конструкций мостов при нарушении их целостности // Наука и образование. – 2012. – № 3. – С. 40.
6. Забелин А. В., Пыхалов А. А. Анализ корреляции собственных частот и векторов колебаний конечно-элементных моделей пролетных строений мостов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 143–159. – DOI: 10.21285/2227-2917-2018-1-143-159.
7. Особенности динамического поведения пролетного строения низководных мостов / А. А. Локтев, Д. А. Локтев, Л. А. Илларионова, А. Баракат // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 2. – С. 72–81. – DOI: 10.15593/24111678/2022.02.09.
8. Jenkins G. M., Watts D. G. Spectral Analysis and Its Applications. – San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam : Holden-Day, 1968. – 525 p.
9. Marple S. L. Digital Spectral Analysis with Applications. – Prentice-Hall, 1987. – 492 p.
10. Валеев С. Г. Кросс-спектральный анализ временных рядов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2006. – № 4. – С. 30–33.
11. Крутиков О. В., Гершуни И. Ш., Рыжов Д. И. Оценка форм собственных колебаний пролетных строений моста при мониторинге // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2022. – Т. 9, № 2. – С. 1–23. – DOI: 10.15862/01SATS222. – URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS222.pdf>
12. Kurakina E., Evtiukov S. Impact of static and dynamic loads of vehicles on pavement // Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019), Moscow, Russia, November 19–22, 2019 : proceedings. – E3S Web of Conferences / ed. by A. Zheltenkov, A. Mottaeva. – EDP Sciences, 2020. – Vol. 164. – P. 03025. – DOI: 10.1051/e3sconf/202016403025.
13. Сафронов В. С., Антипов А. В. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния металлического коробчатого пролетного строения автодорожного моста // Строительная механика и конструкции. – 2011. – № 2 (3). – С. 63–73.
14. Белуцкий И. Ю., Кудрявцев С. А., Лазарев И. В. Обоснование параметров регулирования усилий сталежелезобетонных пролетных строений разработки ЦНИИПСК «43282 км» // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Т. 18, № 5. – С. 407–416. – DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-5-407-416.
15. Картопольцев В. М., Картопольцев А. В. Регулирование динамических характеристик пролетных строений мостов в условиях изменяющегося воздействия временной подвижной нагрузки // Профессорский журнал. Серия «Технические науки». – 2021. – № 1 (4). – С. 4–19. – DOI: 10.18572/2686-8598-2021-4-1-4-19.
16. Аверин А. Н. Экспериментально-теоретические исследования колебаний неразрезного пролетного строения моста под действием подвижной нагрузки // Строительная механика и конструкции. – 2019. – № 1 (20). – С. 41–51.
17. Цветков Р. В. Вибродиагностика Красавинского мостового перехода через реку Кама // Научная конференция молодых ученых по механике сплошных сред, посвященная 80-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР Александра Александровича Поздеева «Поздеевские чтения», Пермь, 23–24 марта 2006 г. : сборник научных трудов. – Пермь, 2006. – С. 132–136.