

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621:24
DOI 10.17816/transsyst20217443-51

© А. Н. Яшнов, Л. А. Васильчук, П. Ю. Кузьменков, И. В. Чаплин
Сибирский государственный университет путей сообщения
(Новосибирск, Россия)

ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СТРУННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Цель: Обеспечить изучение и контроль напряженно-деформированного состояния несущих конструкций в процессе эксплуатации магнитолевитационных транспортных систем.

Методы: Экспериментально-теоретические исследования динамических параметров.

Результаты: Для оценки напряженно-деформированного состояния основных несущих конструкций магнитолевитационных транспортных систем с применением струнных пролетных строений предложено измерять частоты собственных колебаний.

Заключение: Организация диагностики или мониторинга изменения частот собственных колебаний несущих конструкций обеспечивает необходимый уровень эксплуатационной надежности «маглев».

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние конструкций, частота собственных колебаний.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrical complexes and systems

© A. N. Yashnov, L. A. Vasilchuk, P. Yu. Kuzmenkov, I. V. Chaplin
Siberian Transport University
(Novosibirsk, Russia)

TRANSPORT SYSTEMS LOAD-BEARING STRUCTURES STATE DIAGNOSTICS AND MONITORING

Aim: To provide the study and control of the stress-strain state of load-bearing structures during the operation of magnetolevitation transport systems.

Methods: Experimental and theoretical studies of dynamic parameters.

Results: To assess the stress-strain state of the main load-bearing structures of magnetolevitation transport systems using string superstructure it is proposed to measure the natural vibration frequencies.

Conclusion: The organization of diagnostics or monitoring of changes in the natural vibration frequencies of load-bearing structures ensures the operational reliability of load-bearing structures for Maglev.

Key words: stress-strain state of structures, natural vibration frequency.

ВВЕДЕНИЕ

Действующая на территории Российской Федерации нормативно-правовая база (ФЗ № 384, СП 274.1325800.2016, ГОСТ 31937-2011) регламентирует необходимость установки систем мониторинга технического состояния для сооружений, удовлетворяющих хотя бы одному из следующих условий:

- высота более 100 м;
- пролеты более 100 м;
- мосты, построенные как экспериментальные, в том числе из новых материалов или с применением новых технологий;
- мосты в условиях плотной городской застройки при расположении конструктивных элементов ближе 20 м от существующих зданий и сооружений.

Очевидно, что искусственные сооружения новой транспортной инфраструктуры «Маглев» будут попадать под эти требования. Кроме того, обоснование конкурентных преимуществ магнитолевитационного транспорта (по критериям надежности и безопасности) над уже существующими традиционными видами транспорта невозможно без организации процесса диагностики и мониторинга основных несущих конструкций [1]. Автоматизированные системы диагностики и мониторинга позволят аккумулировать экспериментальные данные об особенностях реальной работы новых конструктивных элементов и формировать «банк» знаний для совершенствования проектных решений в условиях отсутствия опыта эксплуатации [2].

Ключевой проблемой проектирования систем мониторинга технического состояния для объектов, имеющих существенную протяженность, является выбор измерительного оборудования [3], технологии и подходов в организации работ [4].

При проектировании систем мониторинга протяженных конструкций распространены системы с использованием оптоволоконных датчиков [5–8]. Одна из конструктивных особенностей большей части оптоволоконных датчиков заключается в их заделке непосредственно в конструкцию, что исключает возможность выполнения сервисного обслуживания и замены. Исходя из этого при проектировании систем, базирующихся на оптоволоконных датчиках, закладывают определенный процент дублирующего оборудования на случай его потери в процессе монтажа или старения в процессе эксплуатации. Так согласно данным крупнейшего в Европе производителя оптоволоконного оборудования для геотехнического и структурного мониторинга (Smartec) выживаемость в случае заделки датчиков при монтаже составляет порядка 90–100 %, потери связанные со старением оборудования в результате воздействия

агрессивной среды, составляет порядка 1–2 % в год [8]. Соответственно ежегодные потери по оборудованию в случае большого объема датчиков могут составлять значительные суммы. Поэтому необходимо совершенствовать подходы к организации мониторинга технического состояния.

МОНИТОРИНГ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Учитывая дороговизну стационарных систем мониторинга, существенно снижающую их эффективность, возможно развитие альтернативных подходов. Например, для мониторинга состояния протяженных объектов, имеющих высокую степень повторяемости конструктивных элементов, будет целесообразным использование мобильных диагностических комплексов [9]. При таком подходе оборудование не закрепляют за объектом для непрерывного мониторинга, а переставляют его по элементам по специально разрабатываемой программе мониторинга или по мере необходимости. Мониторинг в этом случае – это набор периодически выполняемых в единой системе автоматизированных диагностических процедур. Таким образом, можно достигнуть значительной экономии средств на оборудование для мониторинга. Кроме того, мобильные системы обеспечивают возможность выполнения сервисного обслуживания оборудования и его проверок.

Основной проблемой эффективного функционирования такой системы будет выбор контролируемых параметров, которые должны быть информативны для обеспечения корректной оценки, а их количество ограничено для обеспечения мобильности и уменьшения стоимости. Если принять в качестве основных несущих конструкций пролетных строений струнные системы, то выбор основного контролируемого параметра становится очевидным – это частоты собственных колебаний.

Известна зависимость между частотой поперечных колебаний нити v_n и усилием ее натяжения N :

$$v_n = \frac{n}{2L_s} \sqrt{\frac{N}{m_s}}, \quad (1)$$

или

$$N = \frac{m_s \cdot (2L_s \cdot v_n)^2}{n^2}, \quad (2)$$

где n – порядковый номер моды колебаний (число полуволн);

L_s – длина пролета струны;

m_s – погонная масса струны.

Изменение собственной частоты колебаний конструкции струны будет индикатором возникновения повреждений в пролетном строении. Зафиксировать эти изменения можно с помощью вибродатчиков существующих сертифицированных измерительных систем. Например, специалисты СибНИИ мостов СГУПС используют для этих целей систему «Тензор МС» (Рис. 1).

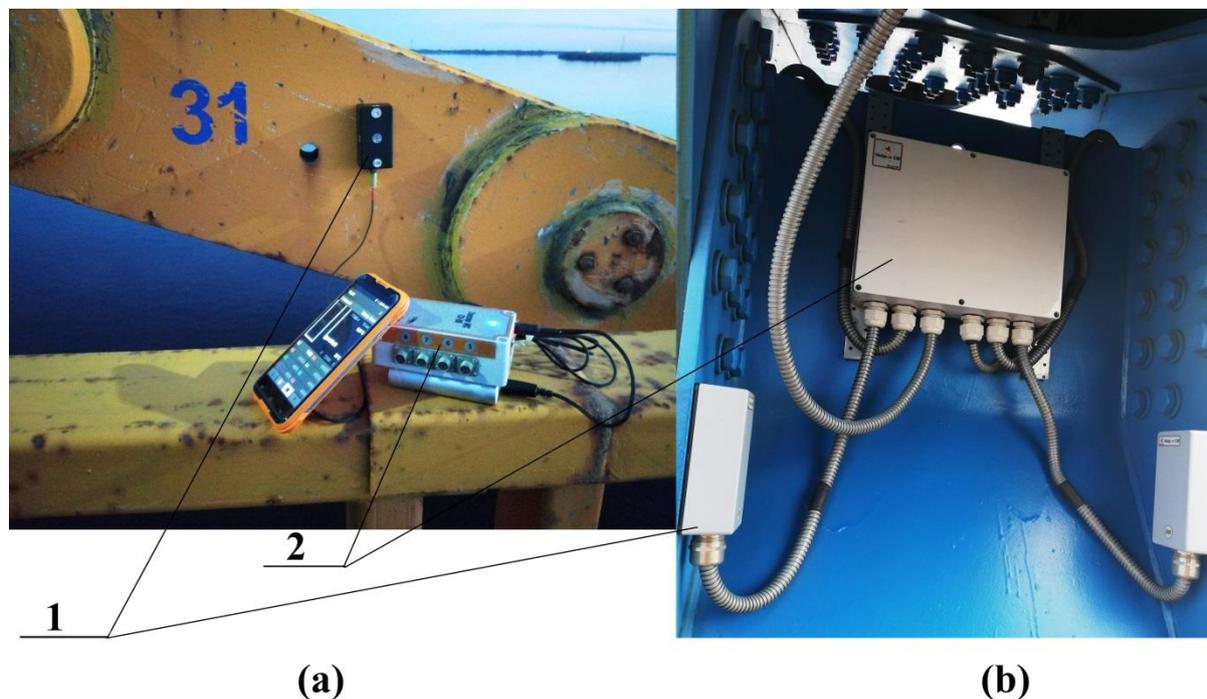


Рис. 1. Автоматизированный измерительный комплекс «Тензор МС» для диагностики и мониторинга:
а – в мобильном исполнении на ванте Югорского моста через р. Обь
1 – вибродатчик;
2 – коммутационно-измерительный блок.
б – в стационарном исполнении для непрерывного мониторинга на подвеске моста через р. Енисей на обходе г. Красноярска

Методы, основанные на анализе динамических параметров [10–12] позволяют осуществлять неразрушающую диагностику преднапряженной струны. По характеру своей динамической работы преднапряженные струнные элементы схожи с вантами [10]. Заметим, что отличительной чертой динамической работы вант является целочисленная кратность частот собственных колебаний, что позволяет идентифицировать их при обработке графиков широкого спектра частот мостового сооружения в целом. На Рис. 2 приведен пример спектра частот, зафиксированных на пролетном строении, и выделенный спектр для вантового элемента. Выделение собственных частот происходит при отсутствии временной подвижной нагрузки на пролетном строении, возбуждение колебаний при

этом происходит от «шумовых» (ветер, проезд транспорта около сооружения и т.п.) внешних воздействий.

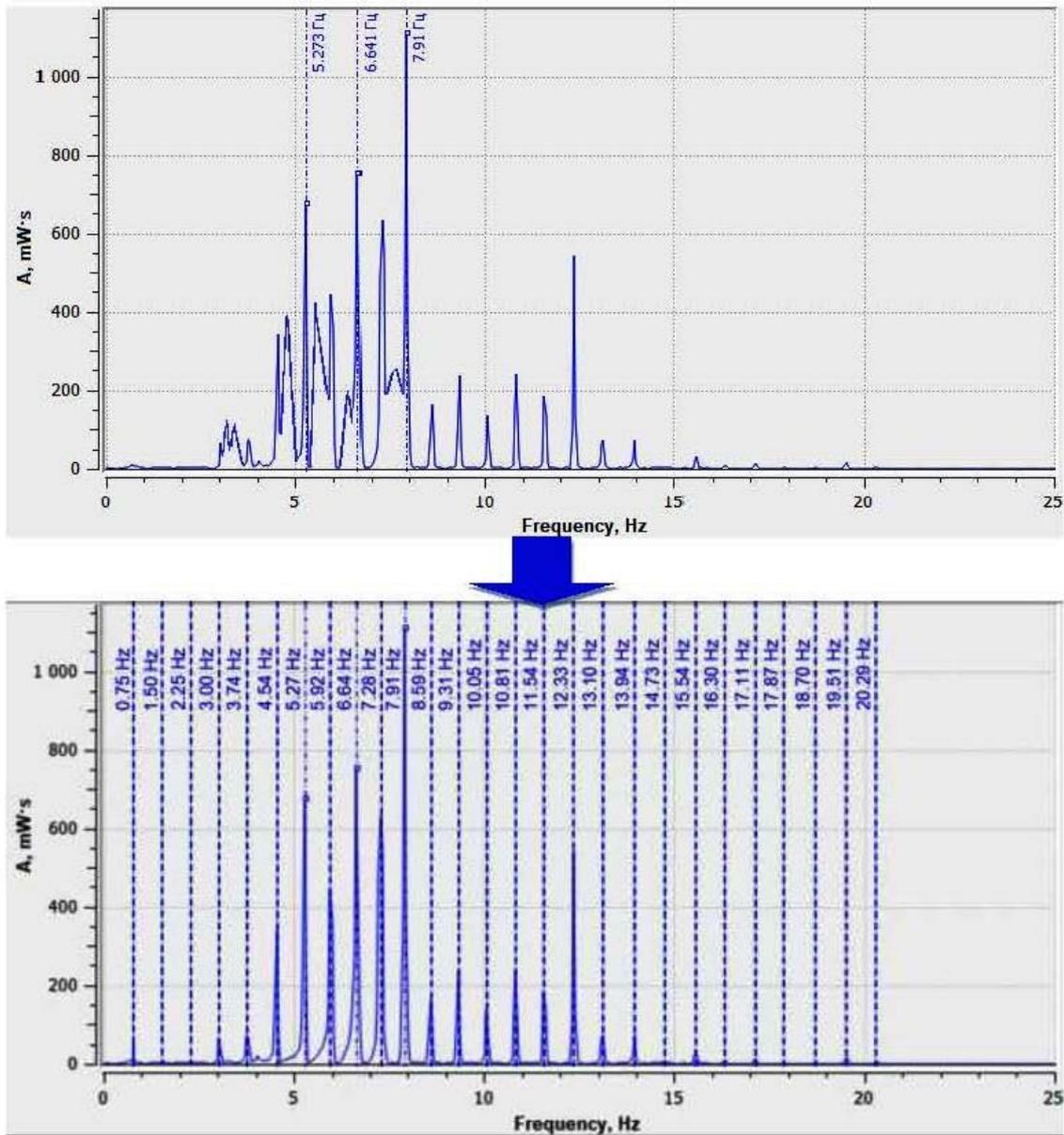


Рис. 2. Выделение спектра частот колебаний ванты (струны)

Выбор места для установки вибродатчика осуществляют исходя из необходимости фиксации максимально возможного количества форм колебания струны, т.е. в месте заделки или опирания струны.

МОНИТОРИНГ ОПОР

Учитывая, что вибродатчик для диагностики натяжения струны целесообразно ставить над опорой, можно использовать его и для диагностики состояния опор струнной транспортной системы. В качестве расчетной схемы промежуточной опоры применяют вертикальную консоль

с заделкой в грунты основания. Частоту основного (первого) тона собственных колебаний идеальной консоли определяют по формуле:

$$v_n = \frac{0,56}{L_o^2} \sqrt{\frac{EI}{m_o}}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала;
 I – момент инерции поперечного сечения;
 L_o – длина консоли;
 m_o – погонная масса конструкции.

Соответственно при развитии повреждений в опоре будет изменяться и частота собственных колебаний конструкции. Заметим, что для значимого изменения собственных колебаний тело опоры должно получить существенные повреждения, которые могут быть и визуально выявлены службой эксплуатации сооружения. Но фиксация изменения собственных частот позволяет выявить проблемы, которые могут возникнуть в невидимых частях опор (карстовые явления, размывы [13–15], деградация многолетнемерзлых грунтов и т.п.), так как в этом случае изменяются граничные условия в расчетной схеме с соответствующим изменением основной гармоникой собственных колебаний. Иллюстрация процесса мониторинга опоры приведена на Рис.3.

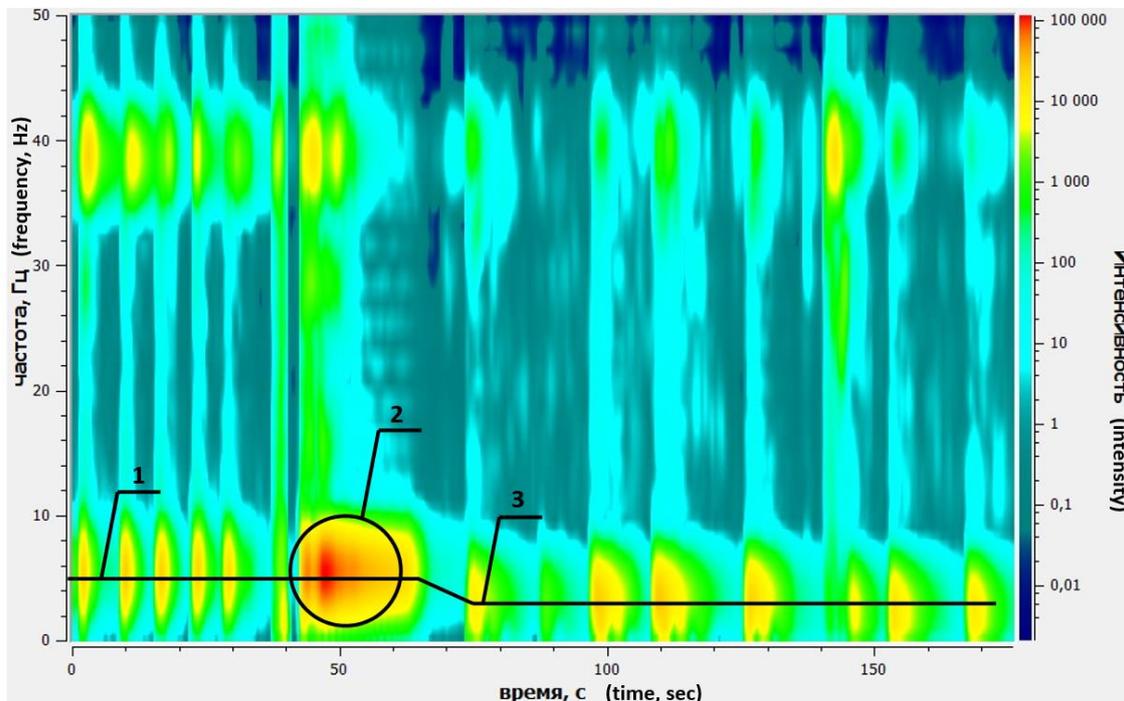


Рис. 3. Диагностика повреждений промежуточных опор в системе мониторинга:

- 1 – исправное состояние;
- 2 – сверхнормативное воздействие;
- 3 – поврежденная конструкция

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки напряженно-деформированного состояния основных несущих конструкций магнитолевитационных транспортных систем с применением струнных пролетных строений предложено измерять частоты собственных колебаний. Организация диагностики или мониторинга изменения частот собственных колебаний несущих конструкций обеспечивает необходимый уровень эксплуатационной надежности «маглев» при применении инновационных струнных систем пролетных строений.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Yashnov A, Kuzmenkov P. Innovative aspects in developing bridge monitoring systems. Abramov AD, Manakov AL, Klimov AA, Khabarov VI, Medvedev VI, editors. MATEC Web of Conferences [Internet]. EDP Sciences; 2018;216:01009. doi: 10.1051/mateconf/201821601009
2. Бокарев С.А., Карапетов Э.С., Чижов С.В. и др. Содержание и реконструкция мостов и водопропускных труб на железных дорогах. ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. [Bokarev SA, Karapetov ES, Chizhov SV, Yashnov AN. Soderzhanie i rekonstrukciya mostov i vodopropusknyh trub na zheleznym dorogah. FGBU DPO “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”, 2019. (In Russ.)].
3. Тулеушова Р., Наурызбаев М.К. Оценка эффективности системы мониторинга мостового сооружения // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7. – № 2. – С. 1–18. [Tuleushova R, Nauryzbayev MK. Evaluating the effectiveness of the monitoring system of bridge structures. Naukavedeniye. 2015;7(2):1-18. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 14.12.2021. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-sistemy-monitoringa-mostovogo-sooruzheniya>
4. Кузьменков П.Ю., Яшнов А.Н. Проектирование систем мониторинга технического состояния внеклассных железнодорожных мостов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2016. – № 1. – С. 470–474. [Kuzmenkov PY, Yashnov AN. Proektirovanie sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya vneklassnyh zheleznodorozhnyh mostov. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*. 2016;(1):470-474. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 14.12.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26416299&>
5. Glišić B, Inaudi D. Fibre optic methods for structural health monitoring. John Wiley & Sons, Ltd, 2007 Oct 26. doi: 10.1002/9780470517819
6. Habel W, Kohlhoff H, Knapp J, Helmerich R. Monitoring system for long-term evaluation of prestressed railway bridges in the new Lehrter Bahnhof in Berlin.

- Third World Conference on Structural Control, 7-12.4.2002, Como, Italy.* Ссылка активна на 20.05.2021. Доступно по: <https://roctest.com/wp-content/uploads/2017/03/c84.pdf>
7. Matos C, Sousa H, Figueiras JA, Casas JR. Structural Health Monitoring (SHM) system implemented in Sorraia River Bridge. Ссылка активна на 20.05.2021. Доступно по: <https://www.academia.edu/>
 8. Inaudi D. Overview of 40 bridge Structural Health Monitoring projects. Ссылка активна на 20.05.2021. Доступно по: <https://smartec.ch/wp-content/uploads/sites/2/2017/01/c197.pdf>
 9. Кравченко А.Я., Роденко С.В., Сафонов О.Н. и др. Экспериментальные исследования динамической работы опор линий электропередачи при разработке измерительного комплекса «Лэптон» для оценки их технического состояния // *Электроэнергия. Передача и распределение.* – 2018. – Т. 6. – № 51. – С. 126–131. [Kravchenko AYа, Rodenko SV, Safonov ON, et al. Eksperimental'nye issledovaniya dinamicheskoy raboty opor linij elektropredachi pri razrabotke izmeritel'nogo kompleksa "Lepton" dlya ocenki ih tekhnicheskogo sostoyaniya. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie.* 2018;6(51):126-131 (In Russ.)]. Ссылка активна на: 14.12.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36456499>
 10. Чаплин И.В. Совершенствование метода контроля усилий в вантах эксплуатируемых мостов по частотам собственных колебаний: дис.... канд. техн. наук. – Новосибирск; 2020. – 157 с. [Chaplin IV. Sovershenstvovanie metoda kontrolja usilij v vantah jekspluatiruemyh mostov po chastotam sobstvennyh kolebanij [dissertation]. Novosibirsk; 2020. 157 p. (In Russ.)].
 11. Cable Assessment with Brimos [Internet]. [cited 12 Dec 2021]. Available from: https://www.bbv-systems.com/fileadmin/con-bbv/Systeme_und_Verfahren/Brimos_KKS/BRIMOS_Cable_Folder_BBV.pdf
 12. Ladysz A, Casas R, Joan R. Structural health monitoring and life-cycle costing of structures. Application to cable-stayed bridges. 2009. 62 p.
 13. Васильчук Л.А., Яшнов А.Н. Диагностика подмывов опор мостов по динамическим параметрам // *Мосты и тоннели: теория, исследования, практика.* – 2020. – № 18. – С. 18–27. [Vasilchuk LA, Yashnov AN. Diagnostics of bridge scour by dynamic parameters. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice.* 2020;(8):18-27. (In Russ)]. doi: 10.15802/bttrp2020/217694
 14. Briaud JL, Hurlbauss S, Chang K, et al. Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology. *Austin.* USA. 2011.
 15. Yao C, Darby C, Yu OY, et al. Motion sensors for scour monitoring: laboratory experiment with a shallow foundation. *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design.* West Palm Beach, USA, GeoFlorida. 2010.

Сведения об авторах:

Яшнов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 4319-4860; ORCID: 0000-0001-7435-3376;
E-mail: yan_andr@mail.ru

Васильчук Любовь Александровна;
eLibrary SPIN: 4206-6929; ORCID: 0000-0001-6332-4211;
E-mail: vasilchuck97@mail.ru

Кузьменков Павел Юрьевич;

eLibrary SPIN: 4985-7938; ORCID: 0000-0002-4498-3761;

E-mail: kpu31@mail.ru

Чаплин Иван Владимирович, кандидат технических наук;

eLibrary SPIN: 1643-0669; ORCID: 0000-0002-9751-079X;

E-mail: ivannumber1_chaplin@mail.ru

Information about the authors:**Andrey N. Yashnov**, PHD in engineering;

eLibrary SPIN: 4319-4860; ORCID: 0000-0001-7435-3376;

E-mail: yan_andr@mail.ru

Lyubov A. Vasilchuk;

eLibrary SPIN: 4206-6929; ORCID: 0000-0001-6332-4211;

E-mail: vasilchuck97@mail.ru

Pavel Yu. Kuzmenkov;

eLibrary SPIN: 4985-7938; ORCID: 0000-0002-4498-3761;

E-mail: kpu31@mail.ru

Ivan.V. Chaplin, PHD in engineering;

eLibrary SPIN: 1643-0669; ORCID: 0000-0002-9751-079X;

E-mail: ivannumber1_chaplin@mail.ru

Цитировать:

Яшнов А.Н., Васильчук Л.А., Кузьменков П.Ю., Чаплин И.В. Диагностика и мониторинг состояния струнных транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 43–51. doi: 10.17816/transsyst20217443-51

To cite this article:

Yashnov AN, Vasilchuk LA, Kuzmenkov PYu, Chaplin IV. Transport systems load-bearing structures state diagnostics and monitoring. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(4):43-51. doi: 10.17816/transsyst20217443-51