

Строительные конструкции, здания и сооружения Structural units, buildings, structures

Научная статья
УДК 691.7(55)
DOI: 10.14529/build260204

ИННОВАЦИОННАЯ ВИБРОЭНЕРГОСБОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПИТАНИЯ ДАТЧИКОВ МОНИТОРИНГА НА МОСТУ ВЕРЕСК

О. Назари

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
✉ eng.omidnazari@gmail.com

Аннотация. В работе представлена виброэнергосборная система для автономного питания датчиков мониторинга технического состояния (structural health monitoring, SHM) на железнодорожном мосту Вереск. Рассмотрена проблема обеспечения надёжного источника энергии для беспроводных сенсоров, размещённых на труднодоступных сооружениях. На основе переходного динамического моделирования проанализированы вибрации, возникающие при прохождении поезда, и оценён потенциал извлекаемой вибрационной энергии. Показано, что параметры вибрационного отклика позволяют обеспечить работу маломощных SHM-датчиков, что делает возможной реализацию автономной сенсорной сети мониторинга.

Ключевые слова: виброэнергосбор, мониторинг технического состояния, беспроводные датчики, мост Вереск, самообеспечение энергией

Для цитирования. Назари О. Инновационная виброэнергосборная система для питания датчиков мониторинга на мосту Вереск // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2026. Т. 26, № 2. С. 31–38. DOI: 10.14529/build260204

Original article
DOI: 10.14529/build260204

INNOVATIVE VIBRATION ENERGY-HARVESTING SYSTEM FOR SHM SENSORS ON THE VERESK BRIDGE

O. Nazari

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
✉ eng.omidnazari@gmail.com

Abstract. This paper presents a vibration energy-harvesting system for autonomous power supply of structural health monitoring (SHM) sensors on the Veresk railway bridge. The study addresses the challenge of providing a reliable energy source for wireless sensors installed on hard-to-access structures. Train-induced vibrations are analyzed using transient dynamic modeling, and the potential harvestable vibration energy is estimated. The results demonstrate that the vibration response parameters are sufficient to power low-consumption SHM sensors, enabling the implementation of a self-sustaining monitoring sensor network.

Keywords: vibration energy harvesting, structural health monitoring, wireless sensors, Veresk Bridge, self-powered systems

For citation. Nazari O. Innovative vibration energy-harvesting system for SHM sensors on the Veresk Bridge. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2026;26(2):31–38. (in Russ.). DOI: 10.14529/build260204

Введение

Железнодорожный мост Вереск эксплуатируется в условиях регулярных динамических воздействий, связанных с прохождением подвижного состава. С учётом сложных природно-климатических условий района и продолжительного срока службы сооружения актуальным становится применение современных систем мониторинга технического состояния.

Одной из основных проблем внедрения беспроводных систем структурного мониторинга (Structural Health Monitoring, SHM) является обеспечение их автономного энергоснабжения, особенно на удалённых и труднодоступных объектах инфраструктуры. В этой связи использование вибрационной энергии, генерируемой при эксплуатации моста, рассматривается как потенциальный источник питания сенсорной сети.

В рамках настоящего исследования выполнен анализ динамического отклика моста Вереск с целью оценки возможности преобразования возникающих вибраций в электрическую энергию для автономного функционирования системы SHM [1]. Общий вид моста и его конструктивные особенности представлены на рис. 1.

1. Цель исследования

Целью настоящей работы является оценка потенциала использования вибрационной энергии, возникающей при прохождении поездов по мосту Вереск, для автономного питания беспроводной системы мониторинга технического состояния. В рамках исследования выполняется анализ динамического отклика конструкции с целью определения доступного уровня вибрационной энергии и её применимости для обеспечения функционирования системы SHM.

2. Обзор литературы

Мониторинг технического состояния железнодорожных мостов является актуальным направлением современной инженерной практики, поскольку динамические нагрузки от подвижного состава формируют переменные напряжения и вибрации, способные влиять на долговечность конст-

рукций. В этой связи широкое распространение получили системы structural health monitoring (SHM), основанные на применении датчиков ускорений и деформаций [2].

Для исследования динамического поведения мостов активно используется численное моделирование на основе метода конечных элементов. Установлено, что арочные конструкции характеризуются сложным динамическим откликом, зависящим от геометрических параметров, жёсткости опор и характеристик нагрузок.

Несмотря на значительное количество работ в области SHM, исследования преимущественно ориентированы на современные сооружения. Железнодорожные арочные мосты первой половины XX века остаются сравнительно малоизученными, что обусловлено их конструктивной спецификой и ограничениями на проведение вмешательства в структуру объекта.

Параллельно развивается направление виброэнергосбора для питания маломощных беспроводных датчиков. Однако большинство исследований посвящено автодорожным мостам либо лабораторным моделям. Потенциал преобразования вибраций железнодорожных арочных мостов в электрическую энергию изучен недостаточно, что определяет научную актуальность и направленность настоящего исследования [3, 4].

3. Геометрические характеристики моста Вереск

Мост Вереск представляет собой железнодорожное арочное сооружение, расположенное на линии Север–Юг национальной железной дороги Ирана в провинции Мазандаран. Высота конструкции над дном ущелья составляет около 110 м, а длина основного пролёта – 66 м. Указанные параметры определяют специфику его динамического поведения при воздействии подвижной нагрузки.

Сооружение выполнено с применением камня, бетона и металлических элементов и опирается на фундаменты, заложенные в скальном основании. Эксплуатация моста в горных условиях и в зоне повышенной сейсмической активности обуславливает необходимость учёта пространственного



Рис. 1. Мост после строительства

характера колебаний при анализе его динамического отклика.

Для проведения расчётных исследований была сформирована геометрическая модель моста на основе имеющихся графических и конструктивных данных. Модель включает арочную часть, пролётное строение и опорные элементы и используется в качестве базы для последующего численного анализа.

На рис. 2 приведено сопоставление реального объекта с разработанной моделью, что подтверждает корректность принятой геометрической схемы для инженерных расчётов [5, 6].

4. Результаты динамического анализа

Динамический отклик моста при прохождении поезда рассматривается в обобщённой форме. Характерные стадии реакции конструкции, соответствующие различным положениям подвижной нагрузки, а также типичные значения перемещений и особенности напряжённого состояния представлены в таблице. Такой формат изложения позволяет систематизировать полученные результаты и исключить избыточное описание отдельных временных этапов расчёта.

После анализа фаз динамического отклика установлено, что максимальные вертикальные перемещения возникают при входе подвижной нагрузки на пролёт, тогда как наибольшие напряжения в арочной системе формируются при расположении поезда в центральной части пролёта. По мере схода нагрузки с пролёта наблюдается затухание колебаний конструкции. Распределения перемещений и напряжений представлены на рис. 3.

На рис. 3 приведена временная зависимость вертикальных перемещений точки в середине пролёта, характеризующая начальную стадию динамического возбуждения конструкции. На рис. 4 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при расположении подвижной нагрузки в центральной части пролёта, соответствующее максимальному напряжённому состоянию арочной системы.

Рис. 5 демонстрирует затухание колебаний и снижение напряжённого состояния конструкции после схода подвижной нагрузки с пролёта.

Снижение эквивалентных напряжений по Мизесу в средней части арки и их перераспределение к концам пролёта свидетельствуют о демпфирующем характере отклика конструкции и



Рис. 2. Моделирование мостов в программе AutoCAD

Фазы динамического отклика моста Вереск

Фаза движения поезда	Время, с	Перемещение в середине пролёта, м	Характер напряжённого состояния
Вход на пролёт	~6,4	$-1,25 \times 10^{-3}$	Локальные напряжения у опор
Подход к центру	~10,2	$-1,05 \times 10^{-3}$	Вовлечение арки
Центр пролёта	~14,9	$-0,75 \times 10^{-3}$	Максимум в арке
Квазистационарная	15–21	$-0,80 \times 10^{-3}$	Стабильное распределение
Выход с пролёта	~25	$-0,10 \times 10^{-3}$	Затухание колебаний

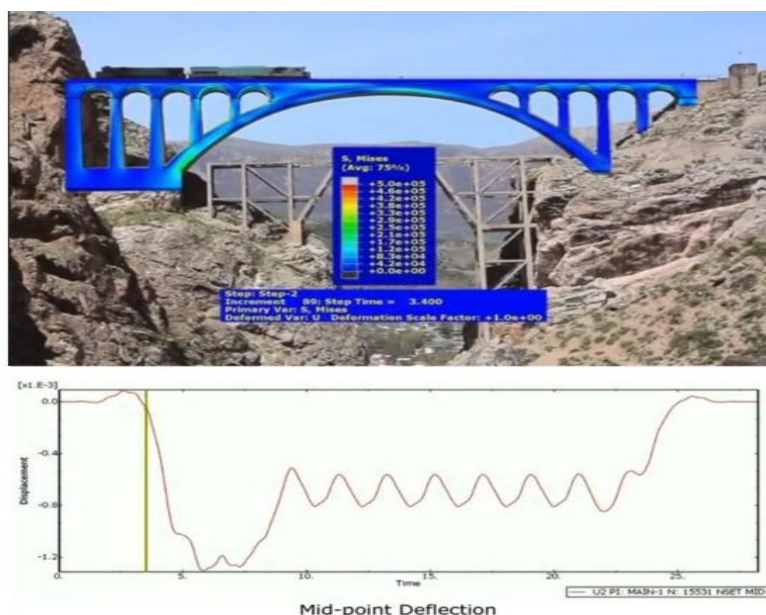


Рис. 3. Динамическая реакция моста в начальный момент

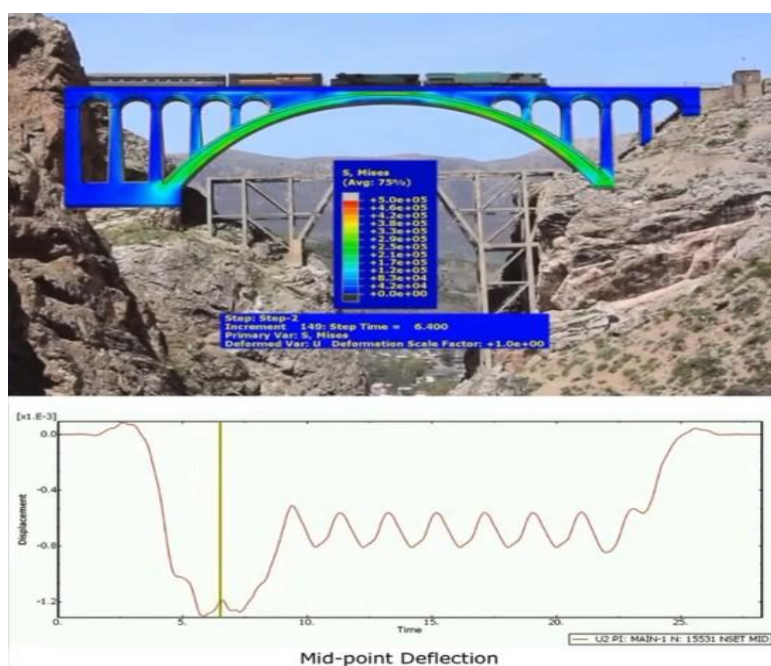


Рис. 4. Развитие вибраций моста

её постепенном возвращении к состоянию равновесия. Указанная стадия может рассматриваться как индикатор динамического состояния сооружения [7, 8].

5. Оценка потенциала сбора вибрационной энергии

Оценка возможности преобразования вибраций моста в электрическую энергию выполнена на основе частотного анализа результатов нелинейного переходного расчёта. Временные зависимости перемещений в середине пролёта показывают

наличие устойчивых низкочастотных колебаний в период прохождения поезда через центральную часть пролёта ($t \approx 14,95-21,00$ с, см. рис. 5). На рис. 6 показано ослабление колебаний и постепенное возвращение конструкции к исходному состоянию.

Амплитуда перемещений в данном интервале составляет порядка $0,75 \times 10^{-3} - 0,80 \times 10^{-3}$ м, что указывает на близость частоты внешнего возбуждения к доминирующей собственной частоте конструкции и сопровождается концентрацией динамической энергии. Анализ отклика показывает, что основной вклад

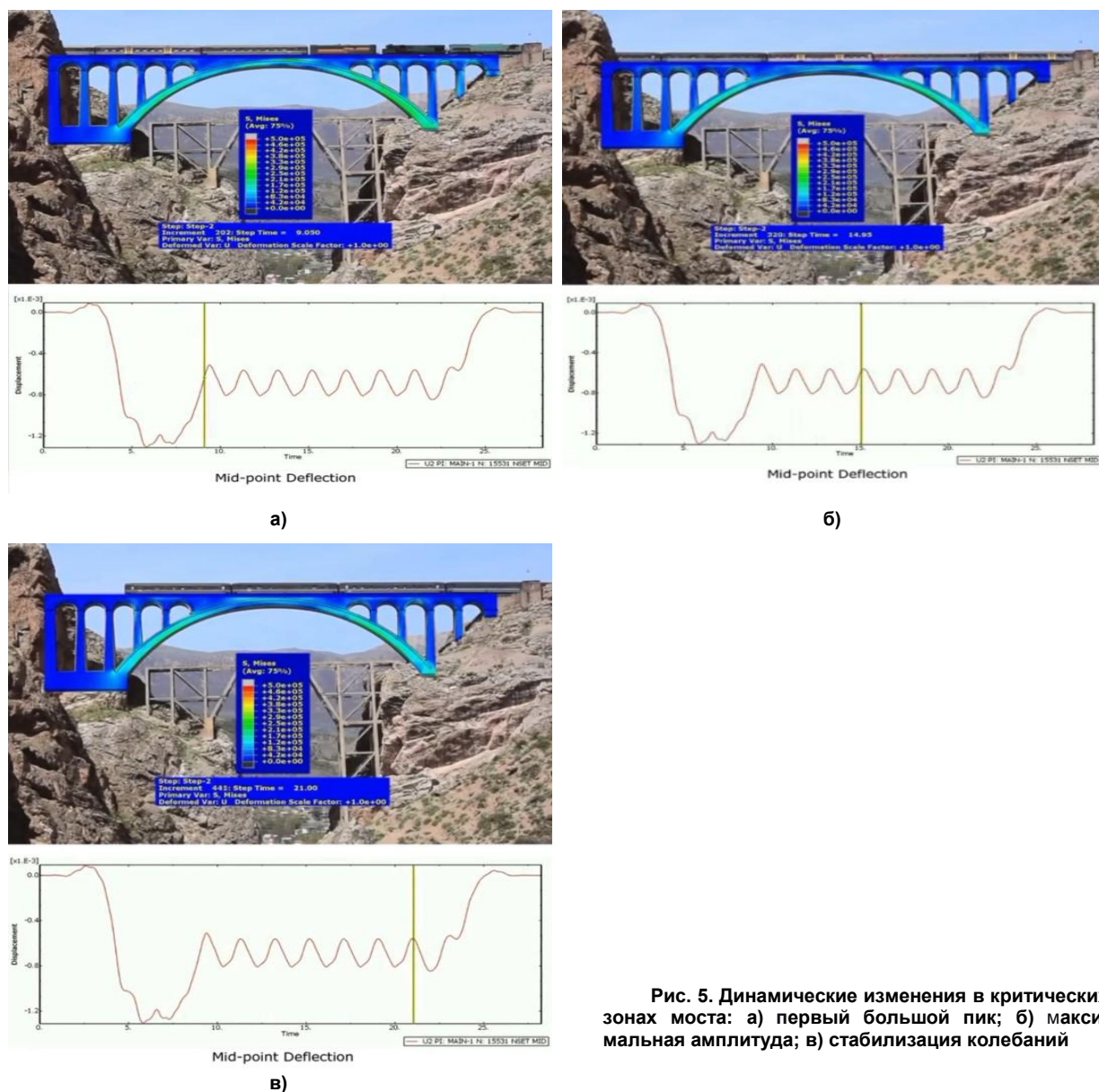


Рис. 5. Динамические изменения в критических зонах моста: а) первый большой пик; б) максимальная амплитуда; в) стабилизация колебаний

в деформацию вносит первая форма собственных колебаний арки, что подтверждается распределением эквивалентных напряжений по Мизесу в замке арки и средней части пролёта [9].

Устойчивые низкочастотные колебания создают предпосылки для применения пьезоэлектрических и электромагнитных преобразователей. Продолжительность динамического воздействия при прохождении поезда позволяет рассматривать возможность генерации энергии, достаточной для автономного питания маломощных элементов системы SHM [10].

6. Обоснование размещения датчиков и устройств сбора энергии

Результаты анализа показывают, что максимальная концентрация вибрационного отклика локализуется в средней части арочного пролёта.

Устойчивый характер колебаний в рассматриваемом временном интервале позволяет выделить данную зону как приоритетную для размещения элементов мониторинга и устройств виброэнергосбора.

Рациональными зонами установки являются: замок арки, где доминирует первая форма собственных колебаний; прилегающие участки с повышенной чувствительностью к изменению напряжённо-деформированного состояния; а также области сопряжения арки с опорами, где целесообразно применение тензометрических датчиков для контроля локальных напряжений. Схема размещения датчиков и преобразователей энергии и зоны локального контроля напряжений представлены на рис. 7.

Размещение преобразователей энергии в арочной зоне минимизирует вмешательство в кон-

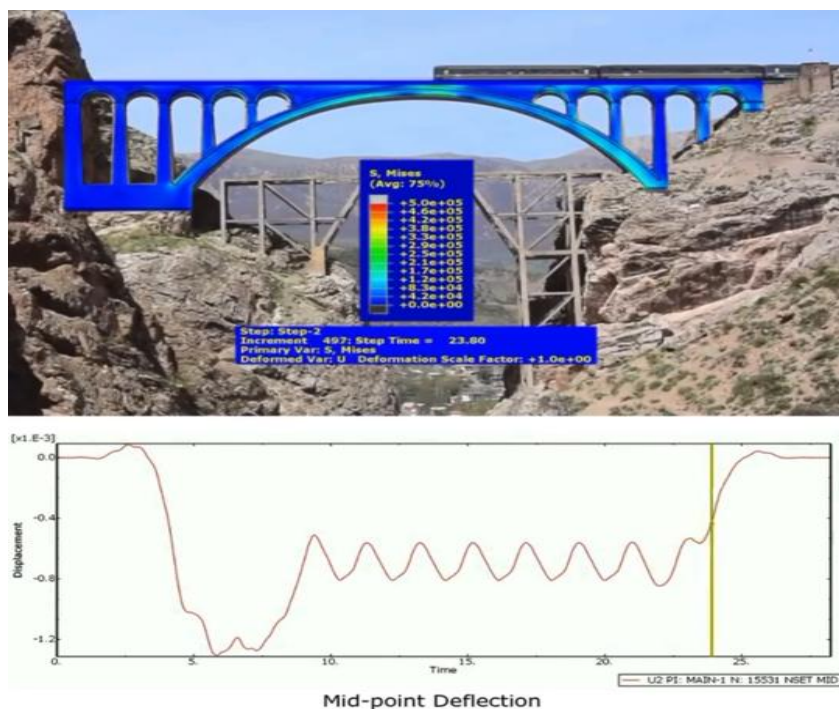


Рис. 6. Ослабление колебаний и постепенное возвращение к исходному состоянию



Рис. 7. Оптимальное размещение датчиков и устройств сбора энергии

струкцию и необходимость прокладки протяжённых кабельных линий, формируя основу для создания автономной системы мониторинга. Реализация такой системы позволяет обеспечить надёжную и долгосрочную эксплуатацию моста Вереск при сохранении целостности его конструкции [11–13].

Для реализации автономной системы мониторинга технического состояния, обеспечивающей надёжную и долгосрочную эксплуатацию моста Вереск при сохранении целостности его конструкции, пред-

ложенная схема размещения преобразователей в арочной зоне является оптимальной. [14, 15].

Выводы

В работе выполнено численное исследование динамического поведения арочного железнодорожного моста Вереск при воздействии подвижной нагрузки. Результаты нелинейного переходного анализа показали, что определяющую роль в формировании вибрационного отклика играет первая форма собственных колебаний арки,

при этом максимальные перемещения и эквивалентные напряжения по Мизесу локализуются в средней части пролёта.

Частотный анализ выявил квазистационарный режим колебаний в период прохождения поезда через центральную часть пролёта, характеризующийся устойчивыми низкочастотными колебаниями с практически постоянной амплитудой. Указанные особенности динамического поведения формируют благоприятные условия для преобразования вибрационной энергии.

Проведённая оценка показала, что аккумулируемый уровень динамической энергии потенциально достаточен для автономного питания маломощных элементов системы SHM. Полученные результаты согласуются с данными опубликован-

ных исследований [16, 17], подтверждающих реализуемость виброэнергосбора на мостовых сооружениях при эксплуатационных динамических воздействиях.

На основании анализа отклика обосновано размещение датчиков и преобразователей энергии в зоне замка арки и прилегающих участках, что обеспечивает высокую чувствительность измерений и эффективность энергоотбора.

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность применения виброэнергосборных технологий для создания на исторических железнодорожных мостах самопитающихся систем мониторинга, обеспечивающих повышение эксплуатационной надёжности при минимальном конструктивном вмешательстве.

Список литературы / References

1. Shabani E., Albarello D., Mahsuli M., Eghbali N., Varzandeh S.H., Farnetani F. Seismic hazard assessment for Iran in terms of macroseismic intensity. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2024, vol. 22, no. 10, pp. 4823–4842. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4007084/v1
2. Назари О. Сравнительный инженерный анализ моста Вереск и виадука Мийо: устойчивость конструкции к землетрясениям и оценка риска // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 3. С. 27–34. [Nazari O. Comparative engineering analysis of the Veresk Bridge and the Millau Viaduct: earthquake resistance and risk assessment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2025;25(3):27–34. (in Russ.)]. DOI: 10.14529/build250303
3. Lin X. Construction processes and strategies of the Millau Viaduct. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2022, vol. 18, pp. 86–92. DOI: 10.54097/hset.v18i.2579
4. Dhabu A.C., Bernauer F., Liao C.-M., Niederleithinger E., Igel H., Hadziioannou C. Characterizing rotational ground motions: implications for earthquake-resistant design of bridge structures. *ArXiv preprint*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2411.02203
5. Javan-Doloei Gh., Sadidkhouy A., Abbassi M., Ataei Sh., Esmaeili M., Movaghari R., Azqandi M. On the importance of seismic health monitoring (SHM) of life line structures (Case study: historical Veresk bridge). 2016. 16th National Geophysical Conference, Tehran, May 2016.
6. Courboux F., Larroque C., Deschamps A., Kohrs-Sansorny C., Gélis C., Got J.L., Charreau J., Stéphan J.F., Béthoux N., Virieux J., Brunel D., Maron C., Duval A.M., Perez J.-L., Mondielli P. Seismic hazard on the French Riviera: observations, interpretations and simulations. *Geophysical Journal International*, 2007, vol. 170, no. 1, pp. 387–400. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03456.x
7. Tadbir. Types of structural analysis methods. [Electronic resource]. Available at: link (accessed 16 February 2025).
8. Shende P., Vishal Ashok W., Limkar S., Kokate M.D., Lavate S., Khedkar G. Assessment of seismic hazards in underground mine operations using machine learning. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2023, vol. 11, no. 2S, pp. 237–243. DOI: 10.17762/ijritcc.v11i2s.6142
9. Gorji A.A. *Building safety against earthquakes*. Tehran, Kiplas Pars Publ., 2020, 26 p.
10. Rahai A.R., Mirzazade Ghalibaf A., Sadeghi N. Seismic assessment of steel frame bridges and comparison with damage indices. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2019, vol. 51, no. 4, pp. 757–766.
11. Afzir. Analysis of the effect of earthquake on bridge Girders. [Electronic resource]. Available at: link (accessed 16 February 2025).
12. Ashianpey. Concrete bridge fatigue. [Electronic resource]. Available at: link (accessed 16 February 2025).
13. Emtiaz22. Environmental challenges in bridge construction. [Electronic resource]. Available at: link (accessed 16 February 2025).
14. Ziaei Ahmadabadi M.H. Management of maintenance and operation of urban bridges. *The Second National Conference on Engineering and Construction Management*, Bandar Abbas, Iran. 2012. [Electronic resource]. Available at: <https://civilica.com/doc/159635> (accessed 16 February 2025).
15. Alusys. Cable structure. [Electronic resource]. Available at: link (accessed 16 February 2025).

16. Cahill P., Hazra B., Karoumi R., Mathewson A., Pakrashi V. Vibration energy harvesting based monitoring of an operational bridge undergoing forced vibration and train passage. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 106, pp. 265–283. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.01.007

17. Zhang H., Qin W., Zhou Z., Zhu P., Du W. Piezomagnetoelastic energy harvesting from bridge vibrations using bi-stable characteristics. *Energy*, 2023, vol. 263, 125859. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125859

Информация об авторе:

Назари Оmid, студент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;
eng.omidnazari@gmail.com

Information about the author:

Omid Nazari, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; eng.omidnazari@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.01.2026, принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 15.01.2026, approved after reviewing 10.02.2026.