

УДК 624.21

## Экспериментальные исследования динамической работы железнодорожных мостов при воздействии высокоскоростного подвижного состава

Е. Е. Луковников<sup>1</sup>, Л. К. Дьяченко<sup>2</sup>, И. М. Смирнов<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup> ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений», Россия, 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 113а

**Для цитирования:** Луковников Е. Е., Дьяченко Л. К., Смирнов И. М. Экспериментальные исследования динамической работы железнодорожных мостов при воздействии высокоскоростного подвижного состава // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 217–228. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-217-228

### Аннотация

Вопрос учета динамического взаимодействия железнодорожного подвижного состава и конструкций мостовых сооружений особенно важен при решении задач повышения скоростей движения поездов на действующих железнодорожных линиях, а также при назначении скоростного режима на проектируемых мостовых сооружениях. Рациональный учет параметров динамического взаимодействия позволяет выполнять полные и достоверные расчеты элементов мостовых сооружений, что, в свою очередь, благоприятно сказывается на прогнозировании периода и характера эксплуатации сооружений и, как следствие, на экономической составляющей проектов. Современное решение задачи динамического взаимодействия сводится к определению степени влияния каждого компонента единой механической системы «мост — путь — поезд». **Целью** настоящего исследования является качественное определение параметров динамического взаимодействия посредством экспериментальных измерений напряжений, ускорений и перемещений элементов конструкций мостового сооружения, расположенного на действующей железнодорожной линии с организованным высокоскоростным движением поездов. **Методом** исследования в настоящей работе является экспериментальное измерение при помощи высокочастотных датчиков напряжений, ускорений и перемещений с последующей статистической обработкой и анализом полученных результатов. **Результаты** исследования представлены в виде графиков и таблиц, отображающих изменение измеряемых величин относительных деформаций, ускорений и перемещений во времени. **Практическая значимость** настоящего исследования заключается в оценке степени влияния компонентов динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и мостового сооружения, что позволяет сформировать целостную картину природы процесса динамического взаимодействия.

**Ключевые слова:** ВСМ, высокоскоростная магистраль, динамическое взаимодействие, высокоскоростной поезд, мостовое сооружение, колебания пролетных строений.

### Введение

Исследование динамического взаимодействия подвижного состава и мостовых сооружений является одной из самых важных задач в области проектирования мосто-

вых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях [1]. Характер динамического взаимодействия напрямую влияет на назначение основных параметров

конструкций мостовых сооружений [2], что, в свою очередь, неразрывно связано с экономическими показателями проектов.

Понимание природы процесса динамического взаимодействия мостовых сооружений и железнодорожного подвижного состава [3] позволяет выполнять наиболее эффективные расчеты при конструировании мостовых сооружений, а также назначать оптимальные скорости движения поездов в вопросе комфорта и безопасности проезда пассажиров и грузов.

Настоящее экспериментальное исследование динамического взаимодействия железнодорожного подвижного состава и мостовых сооружений является продолжением исследований, описанных в работах [4] и [5]. В данной статье представлены результаты детального исследования параметров динамической реакции железнодорожного моста при проезде высокоскоростных поездов «Сапсан».

### **Цели экспериментальных измерений**

Исследование посвящено экспериментальному определению параметров динамического взаимодействия подвижного состава и мостового сооружения, расположенного на действующей железнодорожной линии с организованным высокоскоростным движением поездов.

Для создания полной и целостной картины динамического взаимодействия подвижного состава и мостового сооружения при проведении экспериментальных исследований были разработаны несколько схем расположения измерительных датчиков. Измерительное оборудование регистрировало относительные деформации (напряжения), ускорения и перемещения в характерных сечениях и элементах мостового сооруже-

ния при проезде высокоскоростного поезда «Сапсан».

Данные, полученные при измерениях, позволяют выполнить качественный анализ напряженно-деформированного состояния основных конструкций моста [6] при проезде высокоскоростного поезда в динамической постановке. В дальнейшем результаты измерений могут быть использованы при верификации расчетной модели динамического взаимодействия подвижного состава и мостовых сооружений [7], полученной на основе численного моделирования.

### **Объект и средства экспериментальных исследований**

Экспериментальные исследования проводились на двухпутном девятипролетном мостовом переходе (рис. 1) на линии Санкт-Петербург — Москва. Расчетная схема сооружения —  $9 \times 55,00$  м под каждый путь. Пролетные строения — сталежелезобетонные, статическая схема — балочная разрезная, опоры моста — массивные, из монолитного железобетона с фундаментом на свайном основании. Подробное описание конструкции мостового сооружения приведено ранее в работе [4].

Измерительное оборудование включало в себя комплект струнных датчиков относительных деформаций (напряжений) (рис. 2, а) с частотой измерения 100 Гц, индуктивных датчиков перемещений (рис. 2, б) с частотой измерения 100 Гц и трехосных акселерометров (рис. 2, в) с частотой записи 625 Гц.

Измерительные датчики соединяются с блоком сбора данных посредством прокладки временных кабельных линий. Питание измерительной системы осуществляется автономно за счет энергоемких аккумулятор-



**Рис. 1.** Место проведения экспериментальных измерений — мостовой переход на линии Санкт-Петербург — Москва. Фотографии предоставлены автором



**Рис. 2.** Измерительное оборудование, использованное при проведении экспериментальных исследований: а) датчик относительных деформаций; б) индукционный датчик перемещений; в) трехосный акселерометр.  
Фотографии предоставлены автором

ных батарей, установленных в блоке сбора данных. Блок сбора данных подключался к ноутбуку через кабель USB, запуск измерений осуществлялся с ноутбука, при запуске системы измерения обеспечивалась синхронизация регистрации данных всеми датчиками по времени.

Исходя из условий удобства прокладки кабельных линий, а также условий ограничения длины кабельных линий по пропуску высокочастотного сигнала измерительной системы, всего было реализовано 4 экспериментальные схемы измерения с различным порядком установки датчиков.

1. **Первая схема** предусматривала установку на пролетном строении № 1 по 2 датчика относительных деформаций в опорных сечениях (над устоем № 0 и промежуточной опорой № 1) на вертикальных стенках главных балок, 4 датчика относительных деформаций и 1 акселерометр в среднем сечении на горизонтальных листах (верхний и нижний пояс) главных балок, 2 индукционных датчика перемещений со стороны подвижных опорных частей над опорой № 1 и 1 акселерометр на оголовке опоры № 1.

2. При реализации **второй схемы** на пролетном строении № 2 были установлены по 2 датчика относительных деформаций в опорных сечениях (над промежуточными опорами № 1 и 2) на вертикальной стенке главных балок, 4 датчика относительных деформаций и 1 акселерометр в среднем сечении на горизонтальных листах (верхний и нижний пояс) главных балок, 2 индукционных датчика перемещений со стороны подвижных опорных частей над опорой № 2 и 1 акселерометр на опоре № 2.

3. В **третьей схеме** эксперимента в средних сечениях пролетных строений № 2 и № 3 располагалось по 4 датчика относительных деформаций и по 1 акселерометру. На промежуточной опоре № 2 со стороны подвижных опорных частей были установлены 2 индукционных датчика перемещений и 1 акселерометр на оголовке опоры.

4. В **четвертой схеме** эксперимента 4 датчика относительных деформаций располагались в среднем сечении пролетного строения № 2. На нижних поясах пролетных строений № 3 и № 4, в средних сечениях было установлено по 2 датчика относительных деформаций. Акселерометры при данной схеме располагались в серединах пролетных строений № 2, 3 и 4. Индукционные датчики

перемещений были установлены со стороны подвижной опорной части над промежуточной опорой № 2.

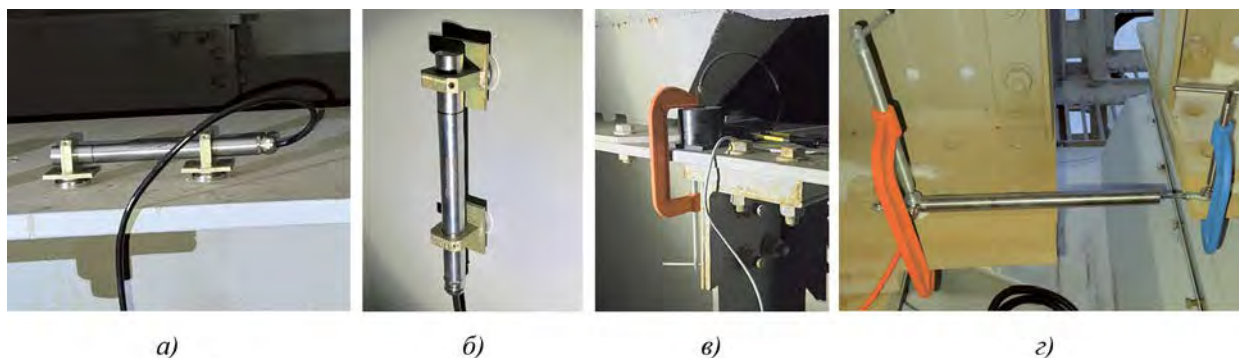
Примеры установки измерительных датчиков представлены на рис. 3. Общая протяженность кабельных линий в максимальной развертке (по 4-й схеме) составила 380 м. Всего было выполнено более 20 экспериментальных измерений проездов поезда «Сапсан» по мостовому сооружению.

### Результаты экспериментальных измерений

По результатам экспериментальных исследований получены данные о динамическом взаимодействии высокоскоростного подвижного состава и рассматриваемого мостового сооружения в объеме, достаточном для их всестороннего анализа. Анализ результатов экспериментальных исследований состоял из нескольких этапов качественной и количественной оценки изменения каждого измеренного параметра во времени, а также установления зависимостей их взаимного влияния на изменение напряженно-деформируемого состояния основных конструкций мостового сооружения [8].

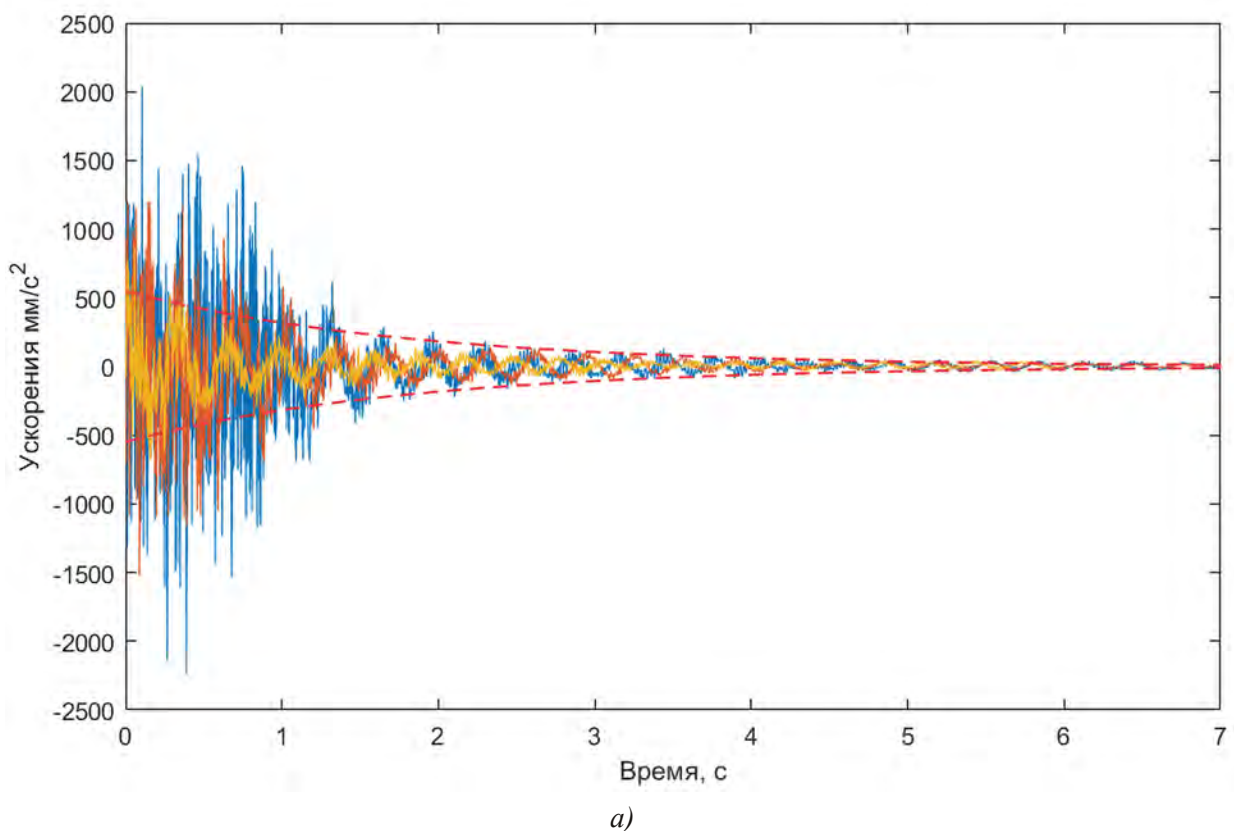
Для определения основных динамических параметров и особенностей колебательного процесса выполнена оценка диссипативных свойств пролетных строений [9] по результатам обработки акселерограмм колебаний пролетных строений в середине пролета и определению эквивалентного коэффициента затухания колебаний (рис. 4).

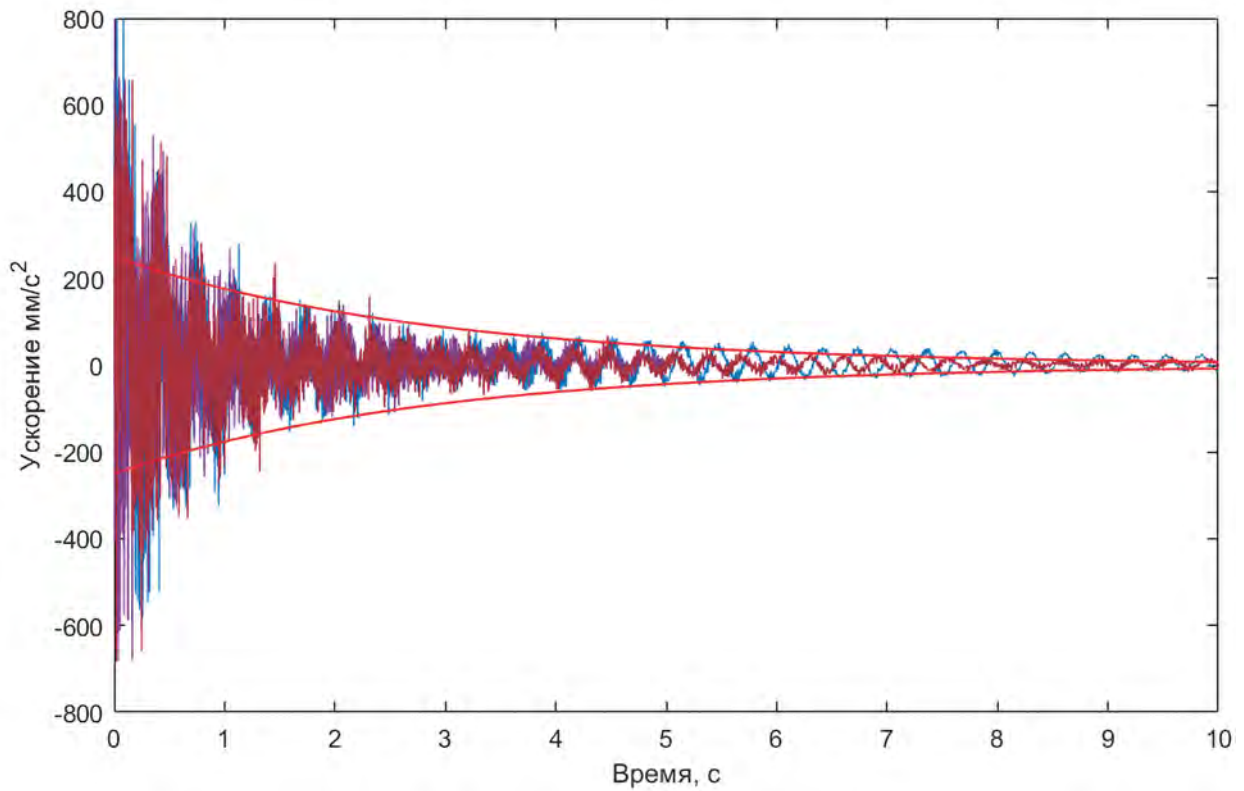
На основании анализа полученных эквивалентных коэффициентов затухания (табл. 1) может быть сделан вывод о наличии тенденции роста коэффициента затухания колебаний пролетных строений с увеличением высоты промежуточных опор.



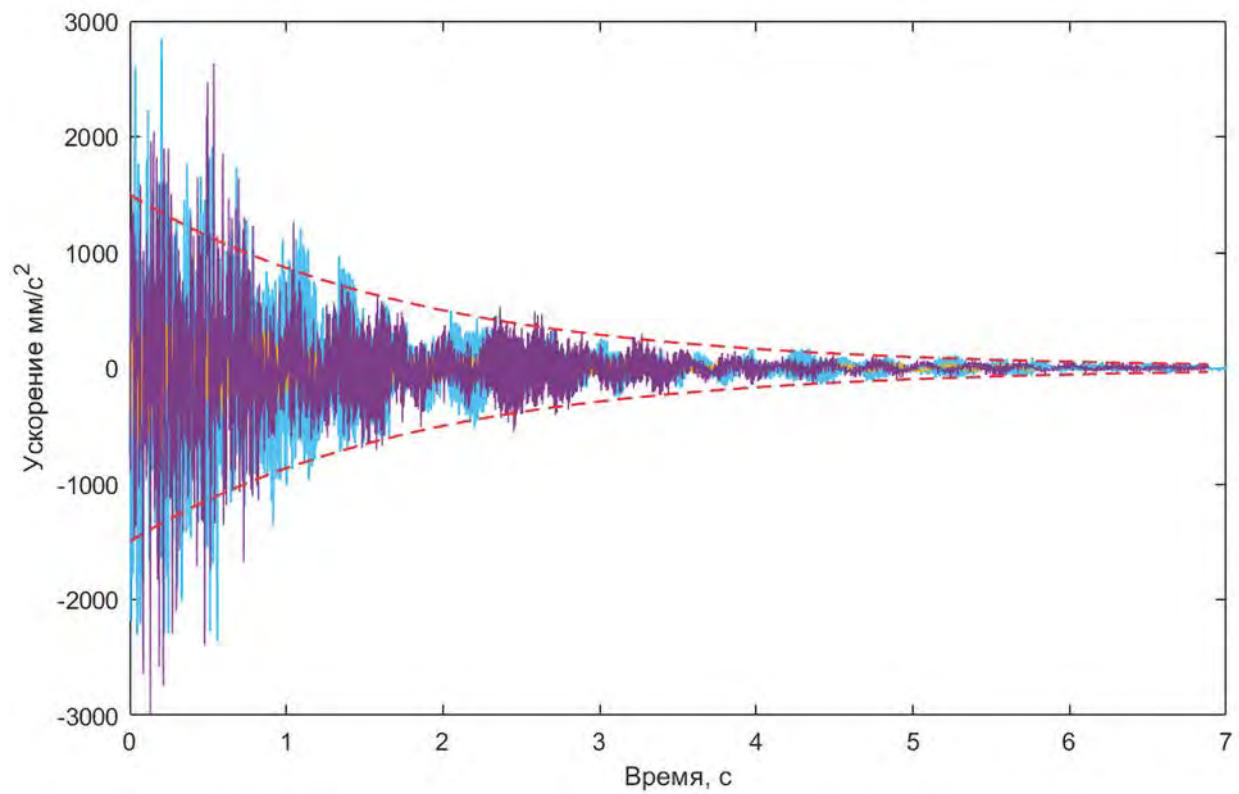
**Рис. 3.** Примеры установки измерительных датчиков:

- а) датчик относительных деформаций на верхнем поясе главной балки пролетного строения;
- б) датчик относительных деформаций на вертикальной стенке главной балки;
- в) трехосный акселерометр на верхнем поясе главной балки;
- г) индукционный датчик перемещений над подвижной опорной частью

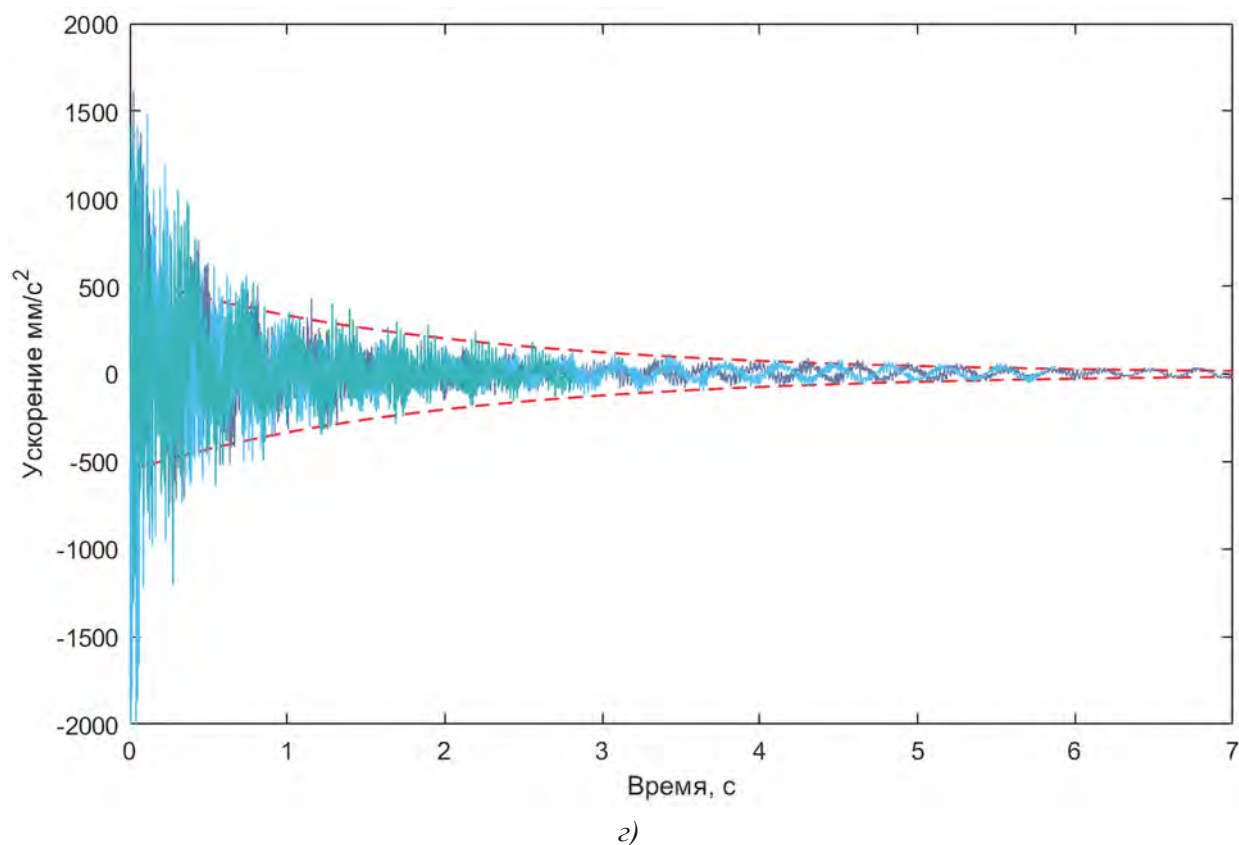




б)



в)



**Рис. 4.** Фрагмент акселерограмм колебаний в середине пролетных строений (свободные колебания после схода поезда): а) пролетное строение № 1; б) пролетное строение № 2; в) пролетное строение № 3; г) пролетное строение № 4

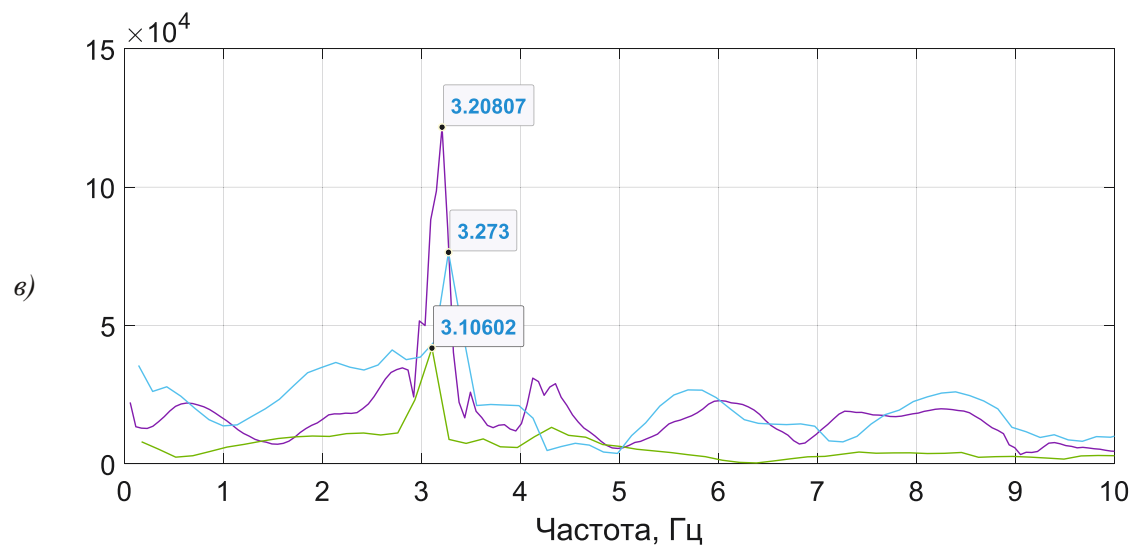
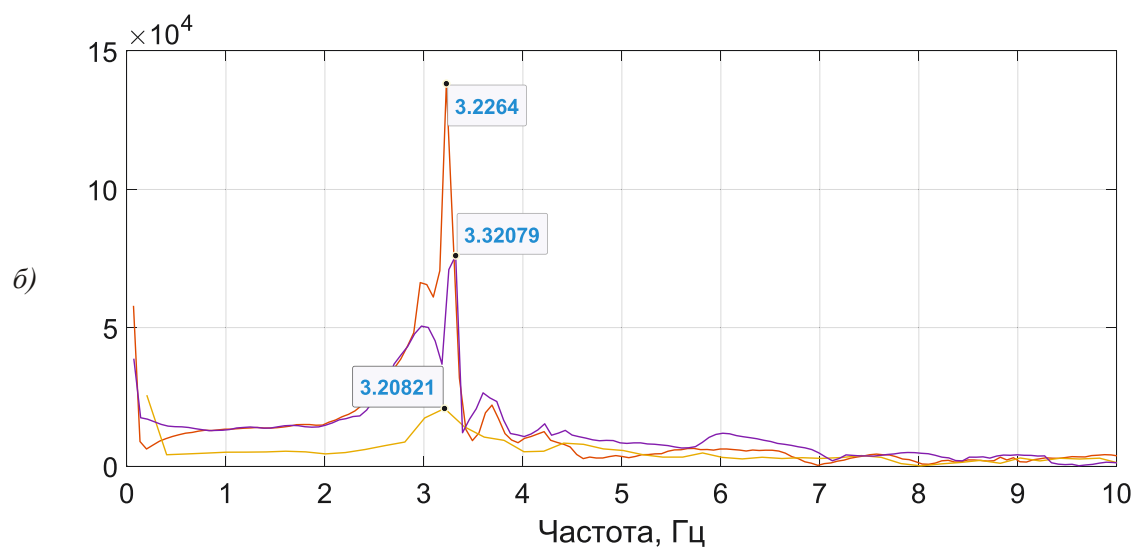
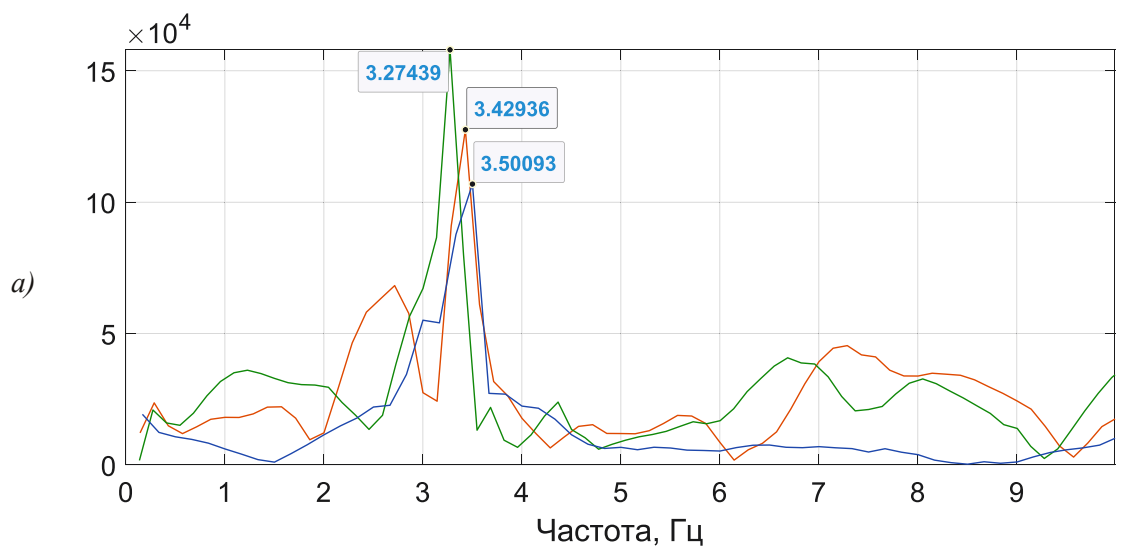
В ходе обработки экспериментальных данных был выполнен их гармонический анализ и определены собственные частоты колебаний пролетных строений (рис. 5).

Сводные результаты определения эквивалентных коэффициентов затухания и основной собственной частоты колебаний пролетных строений представлены в табл. 1.

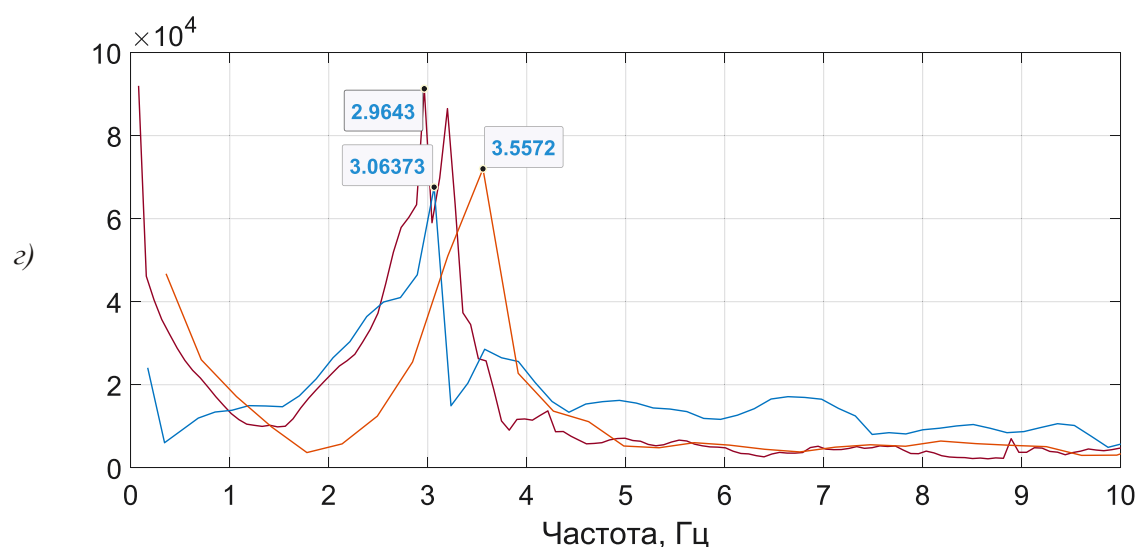
При анализе полученных результатов была выявлена закономерность снижения частоты собственных колебаний пролетных строений при увеличении высоты промежуточных опор. Также наблюдается неко-

торое отличие экспериментальных величин собственных частот колебания конструкций пролетных строений, представленных в исследовании [4], что свидетельствует о влиянии температуры окружающего воздуха на механические параметры верхнего строения пути [10], включающегося в совместную работу с пролетными строениями.

Одной из причин выявленных несоответствий может также являться изменение характера работы опорных частей в зависимости от температурных условий проведения экспериментальных исследований.







**Рис. 5.** Амплитудно-частотная характеристика пролетных строений № 1–4:  
 а) пролетное строение № 1 по схеме 1; б) пролетное строение № 2 по схеме 4;  
 в) пролетное строение № 3 по схеме 4; г) пролетное строение № 4 по схеме 4

ТАБЛИЦА 1. Распределение коэффициента затухания и собственных частот колебаний по каждому пролетному строению

Параметр колебаний		ПС № 1	ПС № 2	ПС № 3	ПС № 4
Частота первой формы собственных колебаний	Схема № 1	3,402	–	–	–
	Схема № 2	–	3,355	–	–
	Схема № 3	–	<b>3,206</b>	<b>3,138</b>	–
	Схема № 4	–	<b>3,252</b>	<b>3,196</b>	<b>3,195</b>
Коэффициент затухания		0,3–0,4	0,3–0,4	0,35–0,5	0,5–0,55

## Заключение

Выполненные в настоящей работе экспериментальные исследования позволили получить данные, предоставившие возможность сделать анализ фактического напряженно-деформированного состояния основных конструкций мостового сооружения при их динамическом взаимодействии с высокоскоростным подвижным составом. В отличие от предыдущих исследований [4–5] впервые измерения выполнялись с целью изучения совместной динамической работы всех элементов мостового сооружения (верхнего строения пути, пролетных строений, опорных частей и опор).

На основе полученных результатов в ходе дальнейших исследований может быть выполнена верификация комплексной эквивалентной численной расчетной модели, что позволит достоверно установить взаимосвязь между определяющими параметрами механической системы «мост — путь — поезд». Подобные комплексные расчетно-экспериментальные исследования являются основой совершенствования и развития нормативной базы по проектированию и эксплуатации мостовых сооружений в условиях высокоскоростного движения.

**Библиографический список**

1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта, в 2 томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, М. Я. Брынь и др.; под ред. И. П. Киселева. Допущено Федеральным агентством железнодорожного транспорта. Т. 1. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2020. 428 с.

2. Смирнов В. Н., Дьяченко А. О., Дьяченко Л. К. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 3. С. 69–81.

3. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др. М.: Транспорт, 1984. 272 с.

4. Исследование динамической работы пролетных строений железнодорожных мостов / Е. Е. Луковников, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин и др. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (66). С. 41–50.

5. Комплексные измерения динамического и аэродинамического воздействий высокоскоростного подвижного состава на мостовые сооружения / Н. А. Лабутин, А. В. Ланг, Е. Е. Луковников и др. // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 2 томах, Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2022 года /

ответств. за выпуск: О. В. Гимазетдинова, М. С. Панова. Т. 1. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. С. 34–38.

6. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов и др.. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2015. 274 с.

7. Иванченко И. И. Динамика транспортных сооружений: высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. М.: Наука, 2011. 574 с.

8. Fryba L. Dynamics of Railway Bridges. Praha: Academia Praha, 1996. 326 p.

9. Загора А. Л., Казакевич М. И. Гашение колебаний мостовых конструкций / под ред. Н. Г. Бондаря. М.: Транспорт, 1983. 134 с.

10. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовым сооружением на высокоскоростных магистралях. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 96 с.

Дата поступления: 01.02.2024

Решение о публикации: 26.02.2024

**Контактная информация:**

ЛУКОВНИКОВ Егор Евгеньевич — аспирант;  
lee0202@vk.com

ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович —  
канд. техн. наук, генеральный директор;  
lkdiachenko@ebs-spb.tech

СМИРНОВ Иван Михайлович — аспирант;  
sm.ivan00@gmail.com

## Experimental research of the dynamic work of railway bridges under the influence of high-speed rolling stock

E. E. Lukovnikov<sup>1</sup>, L. K. Diachenko<sup>2</sup>, I. M. Smirnov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> “Engineering bureau of structures” LLC, 113A, nab. reki Fontanki, Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Lukovnikov E. E. Diachenko L. K., Smirnov I. M. Experimental research of the dynamic work of railway bridges under the influence of high-speed rolling stock // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 217–228. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-217-228. (In Russian)*

### Abstract

The issue of considering the dynamic interaction of the railway rolling stock and the structures of bridge structures is especially important when solving the tasks of increasing the speeds of trains on the existing railway lines, as well as when prescribing high-speed mode on designed bridges. Rational accounting of the parameters of dynamic interaction allows you to perform complete and reliable calculations of elements of bridge structures, which in turn has a beneficial effect on predicting the period and nature of the operation of structures and, because of the economic component of projects. The modern solution to the problem of dynamic interaction is reduced to determining the degree of influence of each component of the unified mechanical system of the bridge-travel. **Objective:** the purpose of this study is to determine the parameters of dynamic interaction through experimental measurements of stresses, accelerations, and displacements of structures of the bridge structure located on the existing railway line with an organized high-speed traffic movement. **Methods:** experimental measurement using high-frequency voltage sensors, accelerations and movements with subsequent statistical processing and analysis of the results. **Results:** graphs and tables displaying a change in the measured values of relative deformations, accelerations, and movements over time. Practical importance: **The practical significance** of this study is to assess the degree of influence of the components of the dynamic interaction of high-speed rolling composition and the bridge structure, which allows you to form a holistic picture of the nature of the process of dynamic interaction.

**Keywords:** HSR, high-speed line, dynamic interaction, high-speed train, bridge structures, vibrations of spans.

### References

1. Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj transport. Obshchij kurs: ucheb. posobie dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta, v 2 tomah / I. P. Kiselev, L. S. Blazhko, M. Ya. Bryn' i dr.; pod red. I. P. Kiseleva. Dopushcheno Federal'nym agentstvom zheleznodorozhnogo transporta. T. 1. 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. M.: federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”. 2020. 428 s. (In Russian)
2. Smirnov V. N., D'yachenko A. O., D'yachenko L. K. Osobennosti proektirovaniya mostov na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2017. No. 3. S. 69–81. (In Russian)
3. Vzaimodejstvie zheleznodorozhnyh mostov s podvizhnym sostavom / N. G. Bondar', Yu. G. Koz'min, Z. G. Rojtburd i dr. M.: Transport, 1984. 272 s. (In Russian)
4. Issledovanie dinamicheskoy raboty proletnyh stroenij zheleznodorozhnyh mostov / Lukovnikov E. E., Lang A. V., Labutin N. A. i dr. // Vestnik Sibirskogo gosudarst-

vennogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. No. 3 (66). S. 41–50. (In Russian)

5. Kompleksnye izmereniya dinamicheskogo i aerodinamicheskogo vozdeystvij vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava na mostovye sooruzheniya / Labutin N. A., Lang A. V., Lukovnikov E. E. i dr. // Transport: problemy, idei, perspektivy: sb. trudov LXXXII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, v 2 tomah, Sankt-Peterburg, 18–25 aprelya 2022 goda / otvetstv. za vypusk: O. V. Gimazetdinova, M. S. Panova. T. 1. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2022. S. 34–38. (In Russian)

6. Mosty na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah / Smirnov V. N., Baranovskij A. A., Bogdanov G. I. i dr. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2015. 274 s. (In Russian)

7. Ivanchenko I. I. Dinamika transportnyh sooruzhenij: vysokoskorostnye podvizhnye, sejsmicheskie i udarnye nagruzki. M.: Nauka, 2011. 574 s. (In Russian)

8. Fryba L. Dynamics of Railway Bridges. Praha: Academia Praha, 1996. 326 p.

9. Zakora A. L., Kazakevich M. I. Gashenie kolebanij mostovyh konstrukcij / pod red. N. G. Bondarya. M.: Transport, 1983. 134 s. (In Russian)

10. Smirnov V. N. Vzaimodejstvie besstykovogo puti s mostovym sooruzheniem na vysokoskorostnyh magistralyah. M.: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2015. 96 s. (In Russian)

Received: 01.02.2024

Accepted: 26.02.2024

**Author's information:**

Egor E. LUKOVNIKOV — Postgraduate Student;  
lee0202@vk.com

Leonid K. DIACHENKO — PhD in Engineering, Chief Executive Officer “Engineering bureau of structures” LLC.; lkdiachenko@ebs-spb.tech

Ivan M. SMIRNOV — Postgraduate Student;  
sm.ivan00@gmail.com