

УДК 624.021

## Влияние параметров мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей на динамические свойства системы «мост — бесстыковой путь»

**В. Н. Смирнов, Е. Е. Луковников**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра 1, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Смирнов В. Н., Луковников Е. Е. Влияние параметров мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей на динамические свойства системы «мост-бесстыковой путь» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 449–456. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-449-456

### Аннотация

**Цель:** определить влияние на частоты и формы свободных колебаний многопролетных мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей таких факторов, как продольный модуль упругости связи рельса с подрельсовым основанием, жесткость опор в направлении вдоль моста и массивность промежуточных опор. **Методы:** в статье рассматривается четырехпролетный мост с бесстыковым путем, моделируемым в виде упругого бруса на упругом основании, для которого определены формы колебаний и соответствующие им собственные частоты при различных параметрах системы «мост — бесстыковой путь». **Результаты:** приведенные в статье данные позволяют учитывать при проектировании мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралах наличие бесстыкового пути на мосту и его участие в работе мостового сооружения, чем достигается возможность более обоснованно принимать конструктивные решения элементов объекта. **Практическая значимость:** поскольку динамическая реакция сооружения целиком определяется его динамическими свойствами, то чрезвычайно важным становится выявление спектра собственных частот и форм колебаний мостового сооружения при учете работы бесстыкового пути на мосту, который объединяет сооружение в единую систему, обеспечивая совместность работы элементов системы «мост — бесстыковой путь» при продольных поездных и температурных воздействиях, что дает возможность отразить фактическую работу сооружения и в конечном счете позволяет возводить более экономичные опоры мостового сооружения.

**Ключевые слова:** собственные частоты и формы свободных колебаний, бесстыковой путь, мостовое сооружение, высокоскоростные железнодорожные магистрали (ВСМ).

### Введение

Исследование динамических свойств мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралах необходимо при изучении процессов взаимодействия высокоскоростной подвижной нагрузки и мостового сооружения в системе «мост — поезд», а также при анализе динамической реакции мостового сооружения на различ-

ного рода возмущения типа сейсмических или воздействий временной подвижной нагрузки в режиме торможения или троганья с места [1]. Динамический ответ сооружения целиком определяется свойствами системы, и чем достовернее они определены, тем большая гарантия в получении достоверной информации о поведении сооружения

в реальных условиях [2]. Применительно к мостовым сооружениям на ВСМ особенно важно точное знание динамических свойств системы «мост — бесстыковой путь» (МБП) для виадуков, мостов с высокими опорами, эстакад. Широкому внедрению на ВСМ промежуточных опор немассивной экономичной конструкции в определенной мере может препятствовать недостаточная изученность их динамической работы, особенно при продольных (вдоль моста) воздействиях [3]. Сложность решения задачи динамического расчета моста заключается в том, что железнодорожный мост на ВСМ представляет собой систему, динамические свойства которой определяются не только инерционными, жесткостными и диссипативными параметрами опор и пролетных строений, но и работой рельсового бесстыкового пути на мосту [4–5]. Необходим учет указанной особенности сооружения как системы МБП и анализ ее влияния на динамические свойства мостового объекта.

### **Расчетная схема и математическая модель для анализа свободных колебаний многопролетного мостового сооружения в виде эстакады**

Собственные частоты и соответствующие им формы свободных колебаний многопролетного мостового сооружения определяются при учете ряда допущений:

1. Мостовое многопролетное сооружение (мост, виадук, эстакада) моделируется в виде системы с конечным числом степеней свободы [5], равным  $n$ .

2. Основания мостовых опор принимаются упругими.

3. Бесстыковой рельсовый путь на мосту с ездой на балласте представляется в виде упругого бруса, уложенного на упругое в на-

правлении вдоль оси пути подрельсовое основание и упруго закрепленного по концам моста (жесткость упругого закрепления характеризуется величиной  $R$ ). Это допущение возможно для балластного мостового полотна на бесстыковом пути [6], поскольку, как показывают исследования, при укатанном щебеночном балласте с клеммными промежуточными скреплениями сопротивление основания продольному сдвигу носит линейный характер при значительных относительных перемещениях рельса и подрельсового основания (от 5 до 25 мм). Однако надо иметь в виду, что в общем случае функция погонного сопротивления основания сдвигу имеет нелинейный вид диаграммы Прандтля [7], определяясь конкретными условиями, в частности типом мостового полотна и его конструктивным решением.

Расчетная схема многопролетного моста при принятых выше допущениях имеет вид, показанный на рис. 1. Уравнения колебаний такой системы можно получить, составив уравнения Лагранжа второго рода [8], которые имеют вид:

$$d/dt (dk/dq_j^*) + dn/dq_j = 0 \quad (1)$$

где  $q_j$  — перемещение точки сооружения по направлению  $j$ -й обобщенной координаты;

$n$  — потенциальная энергия деформации мостового сооружения, которая включает потенциальную энергию деформации рельсового пути, упругих связей между рельсами и балками пролетных строений, а также балок пролетных строений и мостовых опор;

$k$  — кинетическая энергия колебаний моста, состоящая из кинетической энергии балок пролетных строений и мостовых опор.

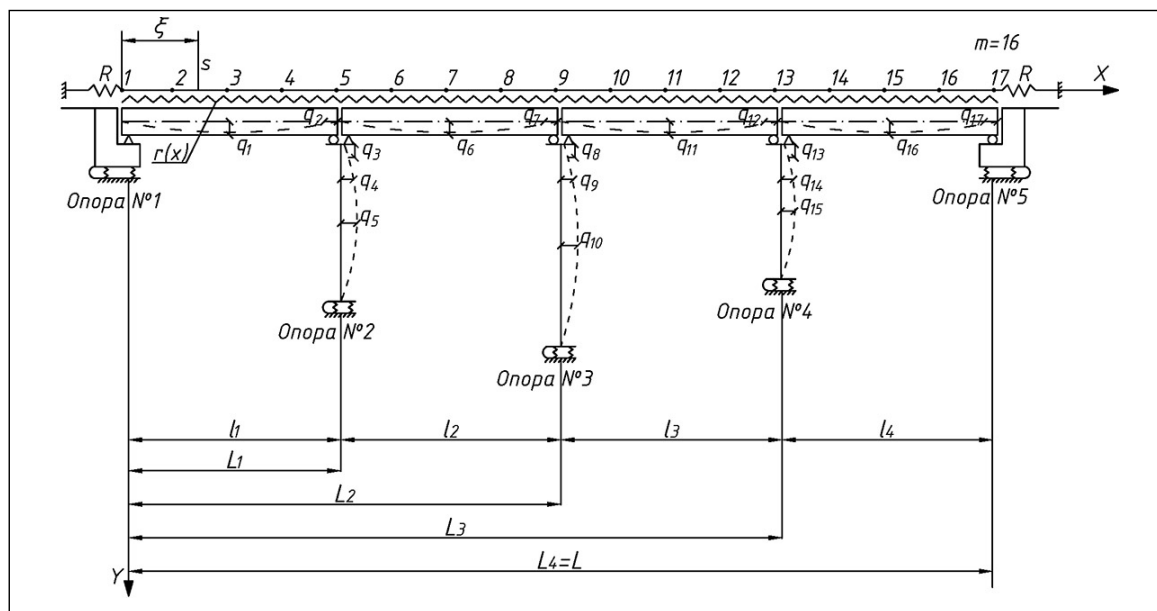


Рис. 1. Расчетная схема моста

Чтобы определить потенциальную и кинетическую энергии, необходимо выявить зависимости смещения сечений рельсового пути  $u(x)$  от смещений сооружения по направлениям обобщенных координат  $q$  (рис. 1). Выражения для перемещения точек бесстыкового пути в системе с  $n$  степенями свободы можно представить в виде:

$$u = \Phi q, \tag{2}$$

где  $\Phi$  — матрица  $m+1$ -го порядка коэффициентов влияния смещений верха пролетного строения на смещения точек рельсового пути на мосту, где  $m$  — количество участков разбиения рельсовой плети на всей длине моста (на рис. 1  $m = 15$ );

$q$  — вектор обобщенных координат.

Если подставить полученные выражения для потенциальной энергии деформаций и кинетической энергии колебаний в уравнения Лагранжа второго рода, получаем систе-

му обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$Tq^* + \Pi q = 0, \tag{3}$$

где  $T$  — матрица коэффициентов при векторе  $q^*$ ;

$\Pi$  — матрица коэффициентов при обобщенных координатах  $q$ .

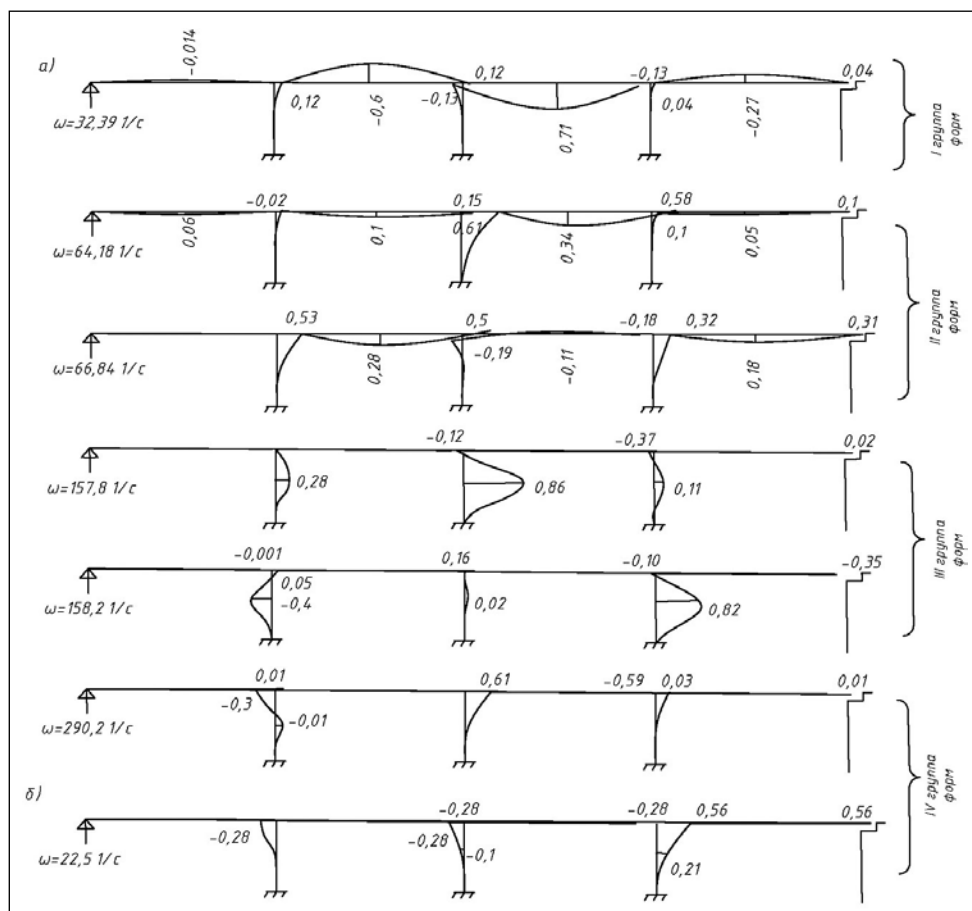
Решение уравнений (3) выполняется общеизвестными методами [8–9]. В результате достигается возможность исследовать свободные колебания моста с учетом влияния бесстыкового рельсового пути для конкретных сооружений.

### Анализ форм и частот свободных колебаний балочного моста с бесстыковым путем при езде на балласте

Анализ динамических свойств мостового сооружения выполнен на примере четырехпролетного виадука балочно-разрезной системы с высотой бетонных опор 17,85 м

и с пролетными строениями из железобетона длиной по 26,9 м при езде на балласте (рис. 1). Виадук рассматривается как система с  $n$  степенями свободы. Устои приняты жесткими. Непрерывная рельсовая плеть уложена на упругое подрельсовое основание. Связь между рельсом и подрельсовым основани-

ем характеризуется величиной продольного модуля упругости  $U$ , который представляет собой коэффициент пропорциональности между равномерно распределенной продольной нагрузкой и смещением точек рельса. По концам рельсовой плети предполагается упругое закрепление с жесткостью  $R$ .



**Рис. 2.** Формы свободных колебаний четырехпролетного моста и соответствующие им собственные частоты

На рис. 2 показаны формы свободных колебаний виадука и соответствующие им частоты при  $U = 4500$  кН/м<sup>2</sup> (рис. 2, а) и при  $U = 0$  (рис. 2, б). Во втором случае рельсовый путь на мосту при продольных колебаниях сооружения не учитывается (опоры колеблются как одиночные стойки). В расчетах

для приведенного примера принято  $R = 0$ , то есть предполагается устройство в рельсах бесстыкового пути над устоями уравнивательных приборов или разрушение подходов (при сейсмических воздействиях). Из рис. 2 видно, что подобные формы свободных колебаний виадука, объединенного бесстыковым

путем в единую систему, объединяются по группам, существенно различающимся величинами собственных частот. Можно также видеть, что собственные частоты, соответствующие определенным формам колебаний сооружения с бесстыковым путем, существенно отличаются по величине от собственной частоты опоры, моделируемой в виде консольного, изолированно стоящего стержня (без учета работы рельсового пути на мосту, как это предписывается действующими

нормами) — в этом случае  $U = 0$  (рис. 2, б). Даже в случае разрыва рельсовой плиты по концам виадука (именно здесь обычно возникают наибольшие по величине усилия в рельсах бесстыкового пути при действии поездной или температурной нагрузки) в системе не реализуется низшая (основная) частота опоры.

Представляет интерес оценка влияния на собственные частоты виадука величины продольного модуля упругости  $U$  (рис. 3).

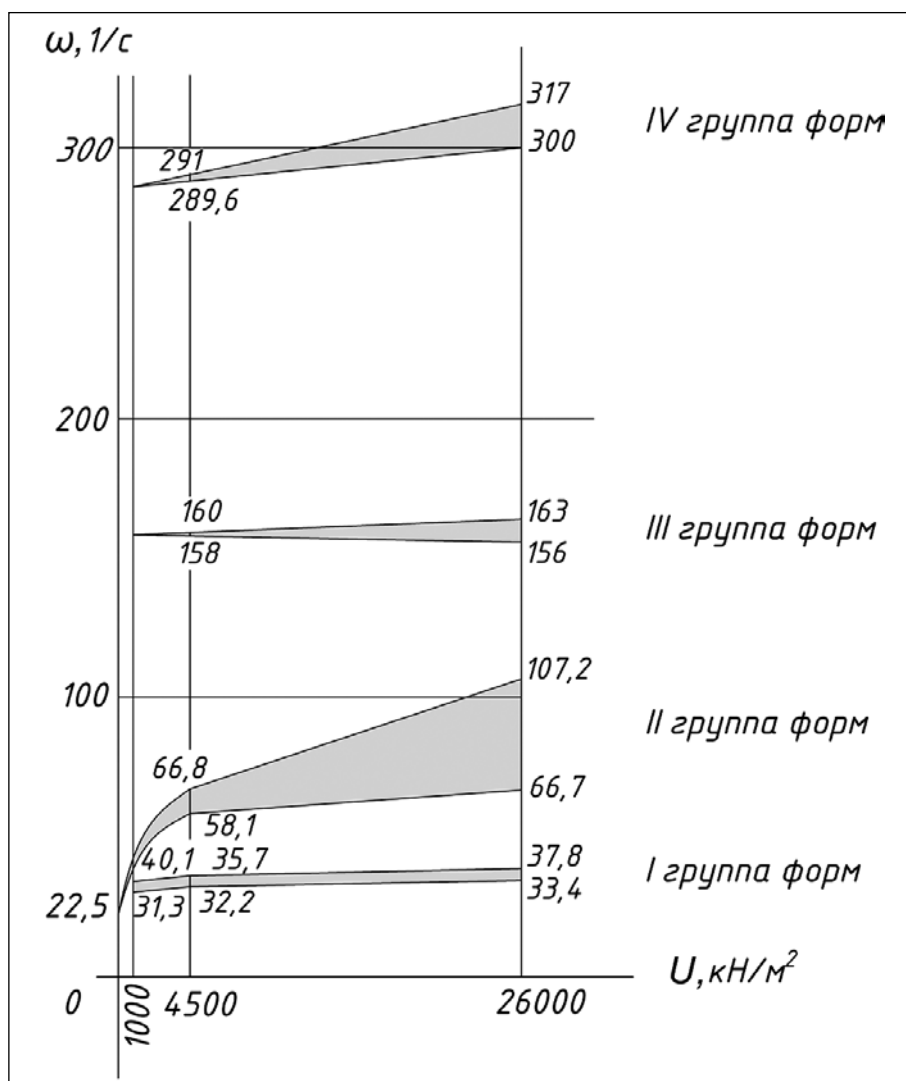


Рис. 3. Влияние продольного модуля упругости пути на собственные частоты моста

Из рис. 3 следует, что собственные частоты образуют некие «зоны сгущения», которым соответствуют группы подобных форм колебаний сооружения. Примечательно, что уже при сравнительно небольших значениях величины  $U$  величины собственных частот колебаний виадука по второй группе форм значительно выше аналогичных частот, получаемых без учета рельсового пути на виадуке. Видно, что весьма значительное увеличение величины  $U$  в 6 раз приводит к повышению собственных частот всего в 1,1–1,6 раза. Следовательно, при исследовании колебаний виадука для получения результатов первого приближения не требуется высокой точности в определении величины продольного модуля упругости подрельсового основания.

Интересно отметить, что наличие на виадуке рельсового пути не столь существенно влияет на собственные частоты свободных колебаний балок пролетных строений в вертикальном направлении: при повышении продольного модуля упругости  $U$  от нуля до  $U = 26\,000$  кН/м<sup>2</sup> собственная частота пролетного строения возросла всего на 12% (см. рис. 2). Тем не менее при жестком мостовом полотне (безбалластном, например) и жестких связях между рельсом и подрельсовым основанием в динамических расчетах повышение собственных частот балок целесообразно учитывать.

При анализе свободных колебаний моста с промежуточными опорами высотой от 17 до 54 м оказалось, что весьма значительное уменьшение продольной жесткости промежуточных опор при этом (с 228 460 до 26 310 кН/м, в 8,6 раза) приводит к снижению собственных частот сооружения по второй группе форм колебаний (рис. 2), характерных наибольшими

отклонениями верха опор, всего на 13%. Это объясняется наличием рельсового пути на мосту. Более заметное влияние на снижение величины собственных частот наблюдается при третьей группе форм колебаний, характерных изгибными колебаниями опор в средней части по ее высоте (рис. 2). На основании расчетов установлено, что даже весьма значительное гипотетическое увеличение массивности опор втрое при учете работы бесстыкового пути на мосту приводит в рассматриваемом примере к уменьшению собственной частоты по второй форме колебаний всего на 23%. Таким образом, можно сделать вывод, что бесстыковой путь на мосту, объединяя сооружение в единую систему, позволяет в конечном счете применять менее материалоемкие немассивные конструкции опор [10].

### Заключение

1. Рассмотрена методика определения собственных частот и отвечающих им форм свободных колебаний мостового сооружения балочной разрезной системы с ездой поверху на балласте на высокоскоростной железнодорожной магистрали при учете работы бесстыкового пути на мосту.

2. Получены формы и соответствующие им частоты свободных колебаний четырехпролетного виадука на высокоскоростной железнодорожной магистрали с учетом работы сооружения как единой связанной системы благодаря уложенному бесстыковому пути на сооружении.

3. Дана оценка влияния на динамические свойства мостового сооружения с бесстыковым путем таких факторов, как продольный модуль упругости подрельсового основания, характеризующий продольную жесткость упругих связей между рельсами

бесстыкового пути и балками пролетных строений, массивность и жесткость промежуточных опор вдоль оси пути.

4. Сделан вывод, что наличие бесстыкового пути приводит к существенному изменению динамических свойств мостового сооружения по сравнению с традиционным подходом, когда мостовая опора моделируется отдельно стоящей стойкой. Это создает предпосылки для проектирования более экономичных конструкций.

### Библиографический список

1. Смирнов В. Н., Барановский А. А. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях // СПб.: ПГУПС. 2015. С. 274.

2. Смирнов В. Н. Собственные частоты и формы продольных колебаний балочного железнодорожного виадука // Вопросы проектирования и эксплуатации искусственных сооружений: сборник трудов ЛИИЖТ / под ред. д. т. н., профессора Ю. Г. Козьмина. Ленинград, 1983. С. 56–62.

3. Смирнов В. Н. Исследование работы мостов с бесстыковым путем // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 4. С. 15–17.

4. Бесстыковой путь / Под ред. В. Г. Альбрехта и Е. М. Бромберга. М.: Транспорт, 1982. 205 с.

5. Альбрехт В. Г., Бромберг Е. М., Иванов К. Е. и др. Бесстыковой путь и длинные рельсы. М.: Транспорт, 1967. 260 с.

6. Prommersberger G., Rojek R., Hommel D. Grundsatzuntersuchung zur Abtragung der Langkraft auf Nalbrücken / Eisenbahningenieur, 1981. 32. No. 9.

7. Крюков Е. П. Брус в упругой среде, сопротивляющейся продольным смещениям. М.: ЦНИИС, № 137, 1958, 86 с.

8. Матвеев Н. М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Высшая школа. 1967. 564 с.

9. Бабаков И. М. Теория колебаний. М.: Наука. 1968. 559 с.

10. Смирнов В. Н. Опоры мостовых сооружений (проектирование, строительство, ремонт и реконструкция). Учебное пособие. СПб.: Издательство ДНК. 2013. 568 с.

Дата поступления: 28.03.2024

Решение о публикации: 07.05.2024

### Контактная информация:

ЛУКОВНИКОВ Егор Евгеньевич — аспирант кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО ПГУПС; lee0202@vk.com

СМИРНОВ Владимир Николаевич — докт. техн. наук, проф. кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО ПГУПС; svn193921@rambler.ru

## The influence of the parameters of bridge structures of high-speed railways on the dynamic properties of the bridge-freeway system

V. N. Smirnov, E. E. Lukovnikov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Smirnov V. N., Lukovnikov E. E. The influence of the parameters of bridge structures of high-speed railways on the dynamic properties of the bridge-freeway system // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 449–456. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-449-456

## Abstract

**Objective:** to determine the influence on the frequencies and shapes of free vibrations of multi-span bridge structures of high-speed railways of such factors as the longitudinal modulus of elasticity of the connection of the rail with the sub-rail base, the stiffness of the supports in the direction along the bridge and the massiveness of the intermediate supports. **Methods:** the article considers a four-span bridge with a jointless path modeled as an elastic beam on an elastic base, for which the oscillation forms and their corresponding natural frequencies are determined for various parameters of the bridge-jointless path system. **Results:** the data presented in the article make it possible to take into account the presence of a jointless track on the bridge and its participation in the work of the bridge structure when designing bridge structures on high-speed railways, which makes it possible to make constructive decisions of the elements of the object more reasonably. **Practical significance:** since the dynamic reaction of a structure is entirely determined by its dynamic properties, it becomes extremely important to identify the spectrum of natural frequencies and oscillation patterns of a bridge structure when taking into account the operation of a jointless track on a bridge, which unites the structure into a single system, ensuring the compatibility of the elements of the bridge-jointless track system under longitudinal train and temperature influences, which It makes it possible to reflect the actual operation of the structure and, ultimately, allows you to build more economical bridge supports.

**Keywords:** natural frequencies and forms of free oscillations, jointless track, bridge structure, high-speed railway lines (HSR).

## References

1. Smirnov V. N., Baranovskij A. A. Mosty` na vy`sokoskorostny`x zheleznodorozhny`x magistralyax // SPb.: PGUPS. 2015. S. 274. (In Russian)
2. Smirnov V. N. Sobstvenny`e chastoty` i formy` prodol`ny`x kolebanij balochnogo zheleznodorozhnogo viaduka. // Voprosy` proektirovaniya i e`kspluatacii iskusstvenny`x sooruzhenij: sbornik trudov LIIZhT / pod red. d. t. n., professora Yu.G. Koz`mina. Leningrad, 1983. S. 56–62. (In Russian)
3. Smirnov V. N. Issledovanie raboty` mostov s bessty`kovy`m putem // Put` i putevoe xozyajstvo. 2018. № 4. S. 15–17. (In Russian)
4. Bessty`kovej put` / Pod red. V.G. Al`brexta i E. M. Bromberga. M.: Transport, 1982. 205 s. (In Russian)
5. Al`brext V. G., Bromberg E. M., Ivanov K. E. et. al. Bessty`kovej put` i dlinny`e rel`sy`. M.: Transport, 1967. 260 s. (In Russian)
6. Prommersberger G., Rojek R., Hommel D. Grundsatzuntersuchung zur Abtragungder Langskrafte auf Nalbrucken / Eisenbahningenieur, 1981. 32. No. 9.
7. Kryukov E. P. Brus v uprugoj srede, soprotivlyayushhejsya prodol`ny`m smeshheniyam. / M.: CzNIIS, № 137, 1958, 86 s. (In Russian)
8. Matveev N. M. Metody` integrirovaniya oby`knovenny`x differencial`ny`x uravnenij. M.: Vy`s-shaya shkola. 1967. 564 s. (In Russian)
9. Babakov I. M. Teoriya kolebanij. M.: Nauka. 1968. 559 s. (In Russian)
10. Smirnov V. N. Opory` mostovy`x sooruzhenij (proektirovanie, stroitel`stvo, remont i rekonstrukciya). Uchebnoe posobie. SPb.: Izdatel`stvo DNK. 2013. 568 s. (In Russian)

Received: 28.03.2024

Accepted: 07.05.2024

### Author's information:

Egor E. LUKOVNIKOV —  
postgraduate student department of Bridges,  
Emperor Alexander I St. Petersburg State  
Transport University;  
lee0202@vk.com

Vladimir N. SMIRNOV —  
Dr. Sci. in Engineering, Professor department  
of Bridges, Emperor Alexander I St. Petersburg State  
Transport University;  
svn193921@rambler.ru