

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2022, №1, Том 9 / 2022, N 1, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-1-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS122.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS122 (<https://doi.org/10.15862/02SATS122>)

Исследования городских мостов на динамические воздействия от городского подвижного состава

Хамидуллина Н.В.

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия

Автор, ответственный за переписку: Хамидуллина Наталья Викторовна, e-mail: natasha19720701@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию фактического динамического воздействия подвижных составов на городские мосты. Рассмотрены требования учета динамического воздействия, указанные в отечественных и зарубежных нормативных документах. С использованием мобильного измерительного комплекса, по результатам которого определены собственные частоты вертикальных, горизонтальных поперечных и горизонтальных продольных колебаний. Используемая в эксперименте методика позволяет получать исходные данные для динамического расчета конструкций, уточнять реальную динамику подвижного состава в зависимости от состояния рельсового пути на мосту. Городской подвижной состав — актуальный и необходимый вид общественного транспорта, соответствующий требованиям современного города. Строительство мостовых переходов обеспечит замыкание городских территорий, разделенных препятствиями, в единую сеть. При проектировании таких сооружений важно учитывать воздействия фактических динамических вынуждающих сил. Исследование динамики позволяет, с одной стороны, обоснованно задавать динамическое воздействие нагрузок на мосты, с

другой стороны, осуществлять диагностику состояния сооружений по динамическим параметрам. В данной работе с использованием специализированного мобильного измерительного комплекса авторами проведены измерения параметров колебаний на движущихся транспортных средствах. В результате проведенных экспериментальных исследований продемонстрирована методика по определению динамических характеристик подвижной нагрузки и непосредственно городских мостов.

В результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что предлагаемая методика позволяет получить исходные данные для динамического расчета конструкций на транспортную нагрузку. Кроме того, фиксация динамического воздействия транспортной нагрузки в процессе эксплуатации позволяет уточнять реальную динамику подвижного состава в зависимости от состояния рельсового пути на мосту.

Ключевые слова: пролетное строение; искусственные сооружения; динамическое воздействие; собственные колебания; рельсовый путь; эксперимент; подвижной состав

Urban bridges studies on dynamic impacts from urban rolling stock

Natalya V. Khamidullina

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Corresponding author: Natalya V. Khamidullina, e-mail: natasha19720701@mail.ru

Abstract. The article is dedicated to the actual dynamic impact study of rolling stock on urban bridges. The requirements for recording the dynamic impact specified in domestic and foreign regulatory documents are considered. Using a mobile measuring complex, the results of which determine the natural frequencies of vertical, horizontal transverse, and horizontal longitudinal vibrations. The technique used in the experiment allows us to obtain initial data for the dynamic calculation of structures, to clarify the real rolling stock dynamics depending on the state of the rail track on the bridge. Urban rolling stock is a relevant and necessary type of public transport that meets modern city requirements. The bridge crossings construction will ensure the connection of the urban areas separated by obstacles into a single network. When designing such structures, it is important to take into account the effects of actual dynamic coercitive forces. The dynamics study allows, on the one hand, to reasonably set the dynamic loads impact on bridges, on

the other hand, to diagnose the structures state by dynamic parameters. In this work, using a specialized mobile measuring complex, the authors measured the oscillation parameters on moving vehicles. As a conducted experimental studies result, a methodology for determining the dynamic characteristics of a moving load and directly urban bridges has been demonstrated. As a result of the conducted experimental studies, it can be concluded that the proposed method allows obtaining initial data for the dynamic analysis of structures for the transport load. In addition, fixing the transport load dynamic impact during operation allows you to clarify the real rolling stock dynamics, depending on the state of the rail track on the bridge.

Keywords: superstructure; engineering structures; dynamic impact; natural vibrations; rail track; experiment; rolling stock

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Современная проблема мегаполисов всё чаще сталкиваются с недостаточной пропускной способностью дорожных сетей, большим количеством автомобилей и малой мобильности населения. Развитие системы современного и эффективного общественного транспорта должно решить целый ряд задач: экономических, экологических, вопросов безопасности, доступности и других [1; 2]. Во многих развитых странах с начала XXI века трамвайные системы переживают новый этап развития и популярности [3]. Но в России ситуация полярно противоположная, среди стран бывшего СССР и постсоветского блока Россия количественно лидирует по закрытию действовавших трамвайных сетей в период с последнего десятилетия XX века и по настоящее время [4]. По состоянию на 2017 г. в России осталось менее 60 городов, оснащенных трамвайным движением, из них лишь 3 имеют скоростные трамваи [5]. При этом процесс закрытия сетей и сокращения протяженности путей продолжается. Основные проблемы трамвайных сетей в нашей стране — это неблагоприятные дорожные условия, отсутствие или неудовлетворительное содержание путей и мостовых сооружений, низкий уровень реновации подвижного состава.

Если сравнить состояние перевозок городского подвижного состава в Новосибирске с соизмеримым по плотности и количеству населения европейским городом (табл. 1) становится очевидным, что в российских городах развитие городского подвижного состава движения существенно отстает от современных тенденций. Сложившееся положение должно быть изменено, потому что трамвай облегчает проблемы перевозки пассажиров, являясь при этом экологичным и недорогим видом транспорта [6]. Конечно, городской подвижной состав способен перевести пассажиров в 2–3 раза меньше, чем метро, но при этом он дешевле в 5–10 раз. Стоимость трамвайной инфраструктуры выше, чем автобусной или троллейбусной, но он может перевозить в 3–4 раза больше пассажиров.

Таблица 1 / Table 1

Сравнение трамвайных сетей

Tram networks comparison

Сравниваемые параметры Compared parameters	Варшава, Польша Warsaw, Poland	Новосибирск, Россия Novosibirsk, Russia
1. Население Population	1,8 млн, 3449 чел./км ² 1.8 million, 3449 people/km ²	1,6 млн, 3215 чел./км ² 1.6 million, 3215 people/km ²
2. Число маршрутов Number of routes	26	11
3. Длина сети Network length	254 км	153 км

В Новосибирске, как и во многих городах России, городской подвижной состав переживает не лучшие времена своего развития. В 1992 году было закрыто трамвайное движение по Октябрьскому мосту через р. Обь, таким образом, было разорвано сообщение данного вида транспорта между разными берегами, одним из примеров городского подвижного состава. В соответствии с транспортной стратегией Новосибирской области до 2030 года планируется реализация ряда мероприятий по развитию рельсового городского транспорта [7]. Но эффективное внедрение трамвайного движения требует строительства новых современных развязок, эстакад и мостов, в том числе и через р. Обь. В Ростове-на-Дону также планируется развитие трамвайного сообщения, к 2023 году должны быть спроектированы первые линии скоростного трамвая. Скоростной трамвай в Ростове-на-Дону будет иметь две основные ветки — с севера на юг с пересечением р. Дона и с востока на запад.

Пересечение водных и других препятствий потребует строительства мостовых сооружений с городским подвижным составом. Очевидно, что для пересечения крупных водных препятствий (например, р. Обь или р. Дон) будет рациональнее строить городские мосты с пропуском по одним пролетным строениям и рельсового (трамвай) и автомобильного транспорта. При этом транспортные проезды могут располагаться на одном уровне (на единой или раздельной проезжей части), либо в несколько уровней (ярусов) по высоте [8]. Несмотря на то, что расположение проездов в одном уровне потребует более широких опор и повышенных расходов на проезжую часть, такое решение будет предпочтительнее, чем расположение в разных уровнях, требующее устройства на берегах протяженных эстакад для заезда на верхний ярус, что в условиях плотной городской застройки может оказаться экономически нецелесообразно.

В любом случае при расчете несущих конструкций таких сооружений необходимо будет учитывать совместное действие автомобильных и трамвайных нагрузок. При этом в действующих российских нормах на проектирование мостов (СП 35.13330.2011) динамическое воздействие трамвайной нагрузки определяется как для железнодорожного подвижного состава и не учитываются особенности динамики трамвая. На территории стран Евросоюза применяют Европейские строительные стандарты — документы, позволяющие осуществлять унифицированный подход к проектированию и строительству объектов, независимо от их географического местоположения. Климатические и прочие особенности при этом учитываются в специально разрабатываемых национальных приложениях. EN 1991-2-2009 (02250) Еврокод 1 (воздействия на конструкции, часть 2).

«Транспортные нагрузки на мосты» не регламентируют применение трамвайных нагрузок. Данный тип воздействий рекомендовано рассматривать в национальных приложениях. В России нормативную временную вертикальную нагрузку от трамваев (при расположении трамвайных путей на самостоятельном огражденном или обособленном полотне) принимают с каждого пути — в виде поездов из четырехосных вагонов с осевой схемой (1,9 + 5,6 + 1,9) м, с расстоянием между крайними осями в соседних вагонах 6,8 м и между крайними осями рядом расположенных поездов — не менее 8,5 м. Общий вес каждого загруженного вагона составляет 300 кН, порожнего — 150 кН. Загружения моста указанными нагрузками должны создавать в рассчитываемых элементах наибольшие усилия, в установленных нормами местах конструкции — максимальные перемещения (деформации). Следует отметить, что такая расчетная нагрузка от трамваев достаточно условная, при проектировании будет целесообразно ориентироваться на фактически существующий подвижной состав.

Во время движения городского подвижного состава на сооружение действуют динамические нагрузки, возникающие от взаимодействий между ходовыми частями и верхним строением пути, от действия сил инерции при разгоне и торможении трамвая, при колебаниях от взаимодействия между отдельными звеньями трамвайного поезда. Их можно разделить на ударные воздействия и колебания. Пролетные строения при этом могут испытывать вертикальные, горизонтальные и крутильные колебания [9].

Возникновение колебаний в вертикальной плоскости вызывается динамическим воздействием подвижной временной нагрузки. Можно выделить несколько причин этих колебаний:

- неровности рельсового пути и колес, что при движении приводит к толчкам, ударам;
- колебания отдельных неуравновешенных частей подвижного состава.

Колебания в горизонтальной плоскости могут возникнуть от воздействия ветра, если его порывы будут чередоваться с определённым интервалом. Крутильные колебания пролетного строения возникают от несимметричного приложения вертикальных и горизонтальных нагрузок [10; 11].

Естественно, для проектирования новых мостов необходимо принимать нагрузки согласно действующей нормативно-технической документации. При этом нужно учитывать, что и конструкция реальных трамвайных поездов, и их динамика существенно отличаются от

установленных в нормах. Поэтому целесообразно провести исследования динамики трамваев для учета воздействия фактических динамических вынуждающих сил на мостовые сооружения [12]. В связи с этим были проведены натурные исследования динамических характеристик в г. Новосибирске с помощью мобильного измерительного комплекса. Данные, полученные с датчиков измерительного комплекса, позволяют вычислить собственные частоты колебаний, построить виброграммы и спектрограммы колебаний. Таким образом, представленная методика позволяет получить исходные данные для динамического расчета конструкций на городской подвижной состав.

Метод

Method

Программа исследования включала в себя постановку цели и задач, выбор оборудования, порядок проведения работ. Цель, как уже было отмечено выше, — уточнить фактическое динамическое воздействие городского подвижного состава. Основная задача, которую необходимо для этого решить, — определить собственные частоты колебаний трамвайного вагона. В первую очередь, это касается колебаний подрессоренной массы, так как колебания, связанные с ударами колес подвижного состава, носят систематический характер и могут быть смоделированы для расчета расстояниями между осями нагрузок и скоростью движения. Колебания же подрессоренной массы можно рассматривать как набор гармоник. В качестве основного оборудования был принят мобильный измерительный комплекс «Тензор МС», разработанный в СГУПС. К измерительным блокам комплекса подключаются первичные преобразователи — цифровые датчики-акселерометры, с помощью которых можно записать виброграммы ускорений при движении городского подвижного состава. Датчики устанавливаются внутри салона (рис. 1). Обработка полученного сигнала путем разложения в ряд Фурье позволяет выделить частоты собственных и вынужденных колебаний трамвайного вагона. Полученные результаты служат исходными данными для выполнения динамического расчета в конечно-элементном расчетном комплексе. Исследования динамического воздействия необходимо провести для разных типов подвижного состава, в час пик при полной загрузке и порожнего, на участках рельсового пути с различными неисправностями и исправного. Информация об изменении динамики вагонов в зависимости от состояния пути будет полезна и в эксплуатации для назначения скоростных режимов движения городского подвижного состава по искусственным сооружениям и уточнения фактического напряженного состояния конструкций.

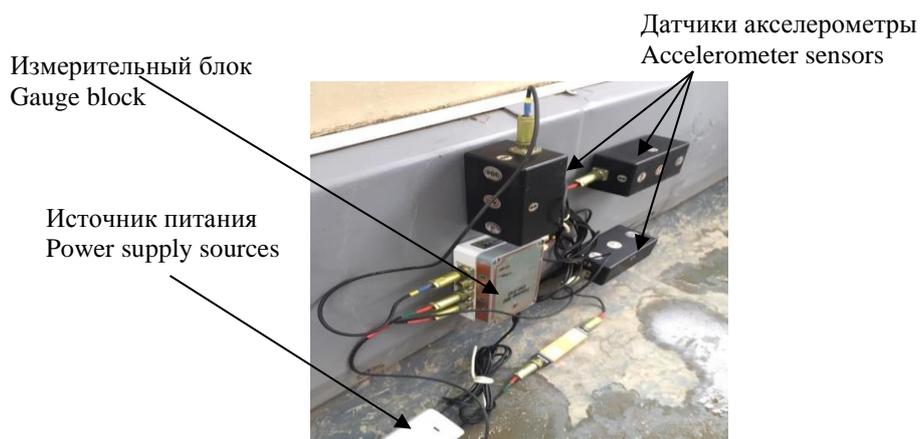


Рисунок 1. Оборудование для проведения экспериментов
Figure 1. Equipment for conducting experiments

Результат

Result

В соответствии с задачами работы для апробации предложенной методики были проведены исследования на двух типах городского подвижного состава. В результате проведения эксперимента с использованием датчиков-акселерометров были получены данные о перемещениях (колебаниях), по которым построены виброграммы этих колебаний. Пример записи виброграммы в течение 25 минут показан на рисунке 2, где красным цветом отображена виброграмма вертикальных колебаний, зелёным — продольных, жёлтым и сиреневым — поперечных. Увеличенный участок для анализа свободных колебаний приведен на рисунке 3.

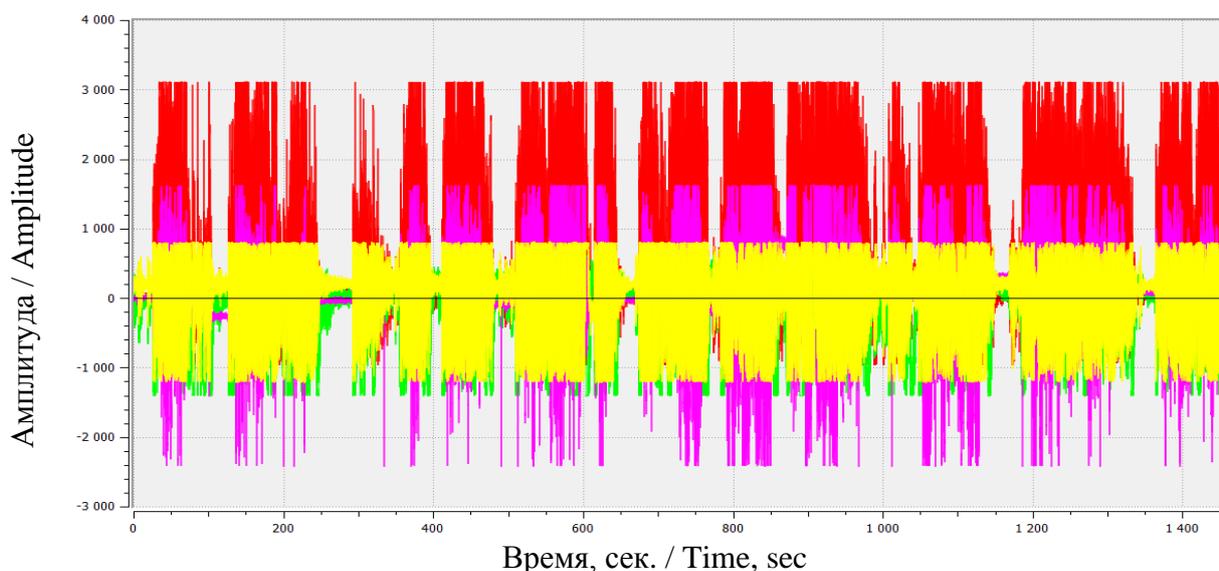


Рисунок 2. Виброграмма колебаний вагона трамвая
Figure 2. Tram car vibration record

Вид спектрограмм, получаемых разложением виброграмм в ряд Фурье с помощью оконных функций, показан на рисунке 4. Значения частот собственных колебаний, полученные по результатам обработки спектрограмм сведены в таблицу 2.

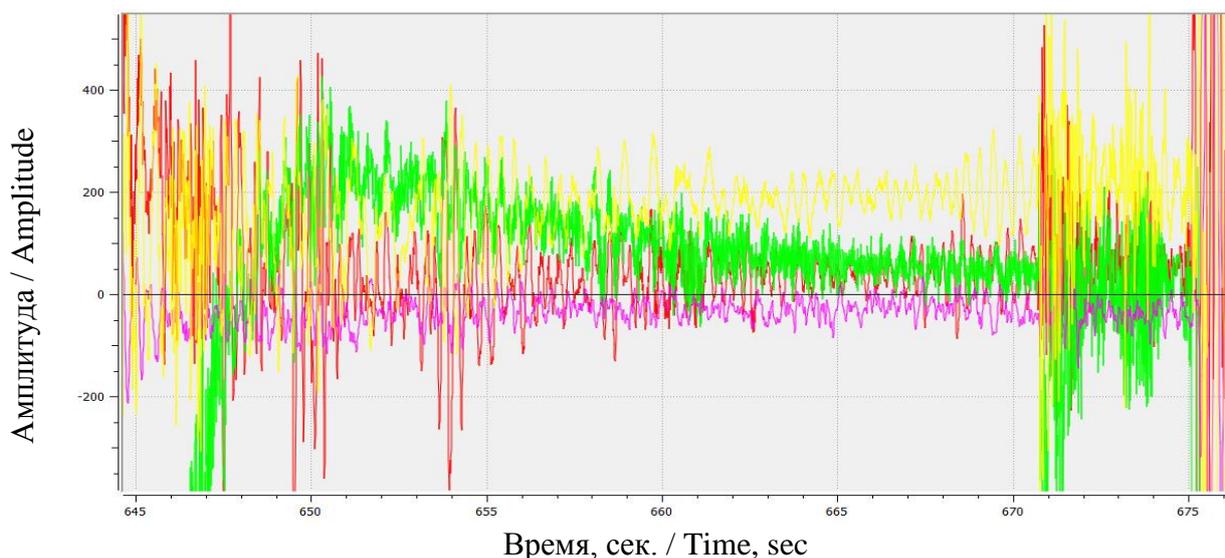


Рисунок 3. Виброграмма на участке собственных колебаний трамвая

Figure 3. Vibration record on the site of the natural tram oscillations

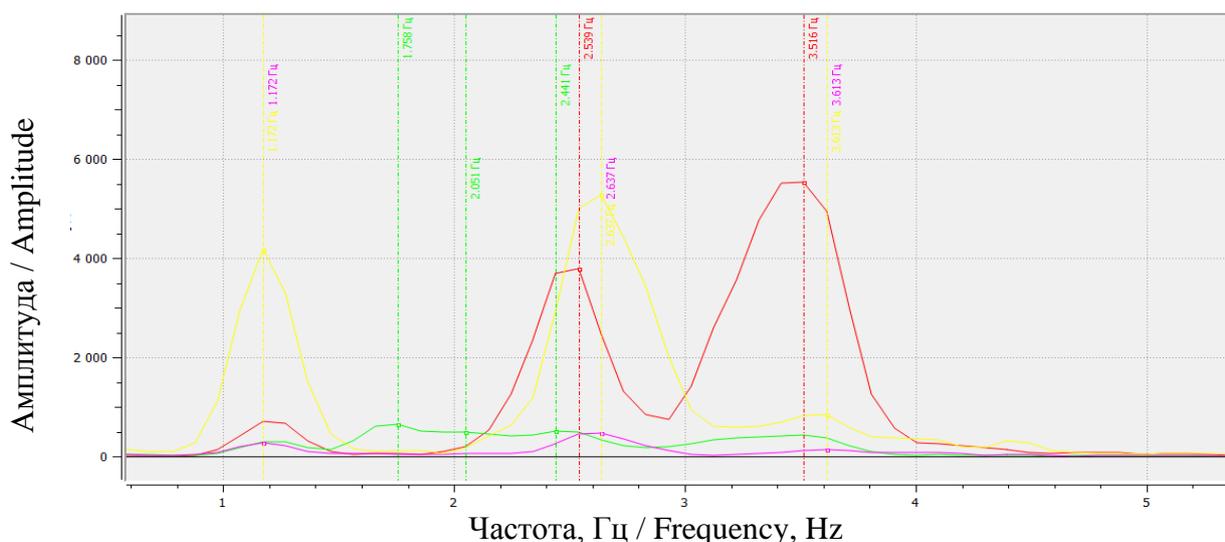


Рисунок 4. Спектрограмма собственных колебаний трамвая

Figure 4. Natural tram oscillations spectral recording

Таким образом, получены данные о вертикальных, горизонтальных поперечных и горизонтальных продольных колебаниях. Совпадения показаний вертикальных и поперечных датчиков свидетельствует о наличии крутильной формы колебаний, вертикальных и продольных — о галопировании. Сравнивая полученные значения частот собственных колебаний для нового и старого вагонов, можно заметить, что частоты старого вагона ниже, чем частоты нового во всех направлениях колебаний,

соответственно будет отличаться и вызываемое ими воздействие на путь и искусственные сооружения.

Таблица 2 / Table 2

Значения частот собственных колебаний
Natural oscillations frequencies values

Порядковый номер формы колебаний Oscillations index number	Вертикальные колебания Vertical oscillation	Продольные горизонтальные колебания Longitudinal horizontal oscillation	Поперечные горизонтальные колебания Transverse horizontal oscillation
Модель 71-619К 2003 года выпуска Model 71-619K production year 2003			
1	1,25	1,27	1,20
2	2,39	2,28	2,39
3	3,38	3,26	2,88
4	4,28	3,98	3,73
Модель 71-605 1988 года выпуска Model 71-605 production year 1988			
1	0,98	1,95	0,64
2	1,86	2,73	0,98
3	2,25	-	1,66
4	2,73	-	2,64

Спектрограммы вынужденных колебаний — более сложные. При движении состояние пути и другие внешние факторы вызывают дополнительные колебания. Большие возбуждающие воздействия полностью перекрывают спектр собственных частот. Необходимо отметить, что измерения вынужденных колебаний проведены на участках рельсового пути в неудовлетворительном техническом состоянии, требующем выполнения капитального ремонта. Естественно, что для такого состояния пути динамические воздействия существенно выше нормативных.

Обсуждение

Discussion

В результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что предлагаемая методика позволяет получить исходные данные для динамического расчета конструкций на транспортную нагрузку. Кроме того, фиксация динамического воздействия транспортную нагрузки в процессе эксплуатации позволяет уточнять реальную динамику подвижного состава в зависимости от состояния рельсового пути на мосту.

Но это не единственное возможное приложение получаемых результатов. Пролетные строения мостов при выведении из равновесия совершают колебательные движения. Известно, что колебания с наибольшими амплитудами происходят на низших частотах по модам,

требующим минимальных затрат энергии. При развитии в конструкциях каких-либо повреждений происходит изменение жесткости, что в свою очередь сказывается на собственных частотах колебаний конструкции [13]. Например, для разрезной балки шарнирно опертой по концам частота собственных колебаний определяется по формуле:

$$\omega_i = \frac{i^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (1)$$

где i — порядковый номер моды колебаний;

l — расчетная длина балки;

E — приведенный модуль упругости материала балки;

J — момент инерции поперечного сечения балки;

m — масса балки.

Эту зависимость используют в вибродиагностике при оценке состояния конструкции. С помощью автоматизированных измерительных комплексов производится фиксация изменения частот свободных колебаний, и получаемые результаты сравнивают с эталонными значениями, которыми могут быть как результаты расчетов (например, методом конечных элементов), так и результаты ранее выполненных испытаний (например, исправного сооружения при сдаче его в эксплуатацию) [14]. Отклонение значений выбранного параметра от эталона будет “сигналом”, который предупреждает о возможных повреждениях.

Если у нас есть запись виброграммы колебаний по датчикам, установленным на транспортном средстве при движении по искусственному сооружению, то отделив собственные колебания транспортного средства, можно выделить набор собственных частот пролетного строения. Чем продолжительнее время записи виброграмм, тем выше достоверность получаемых результатов. При измерениях на объектах, подверженных «шумовым» помехам (к таким объектам относятся транспортные сооружения, реагирующие на проезд транспортных средств) требуется предварительная обработка для исключения влияния шумов на конечный результат обработки данных. Конечно, есть определенные ограничения в использовании такого метода. Например, данный метод практически неприменим для выявления незначительных неисправностей. Кроме того, при выполнении диагностических работ необходимо учитывать климатические условия (температура влияет на изменение модуля упругости материалов).

Традиционно датчики для фиксации колебаний расставляют на пролетном строении в характерных точках и производят записи

виброграмм колебаний [15–17]. Акселерометры были установлены в четвертях и в середине пролета по обеим сторонам моста и по оси проезжей части, чтобы выявить возможные формы колебаний (рис. 5). Кроме того, акселерометры были установлены на движущемся по мосту транспортном средстве.

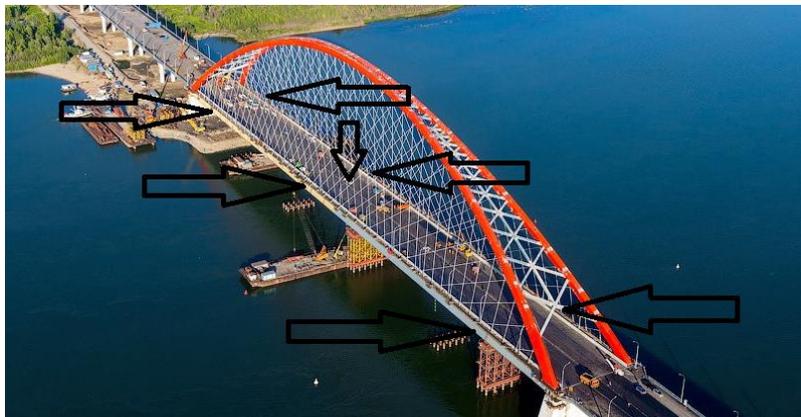


Рисунок 5. Расстановка акселерометров на Бугринском мосту

Figure 5. Accelerometers arrangement on the Bugrinsky bridge

Показания акселерометров (виброграмма), установленных на движущемся транспортном средстве, приведены на рисунке 6. Результаты обработки в виде спектральной матрицы, наглядно отражающей показания датчиков на пролетном строении и на транспортном средстве, представлены на рисунке 7 и в таблице 3.

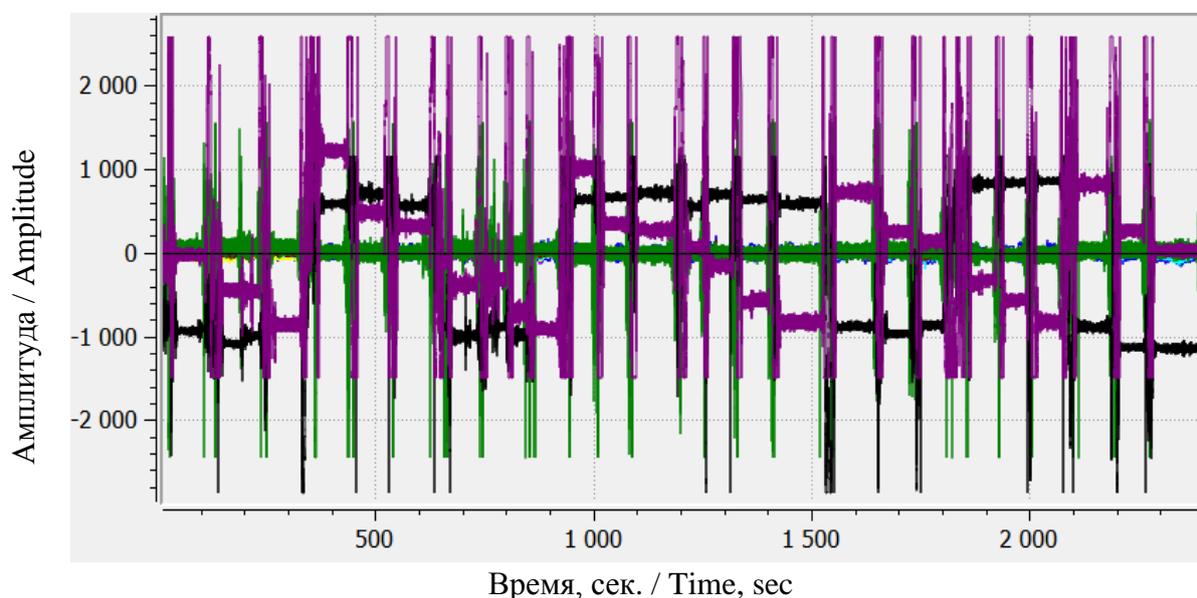
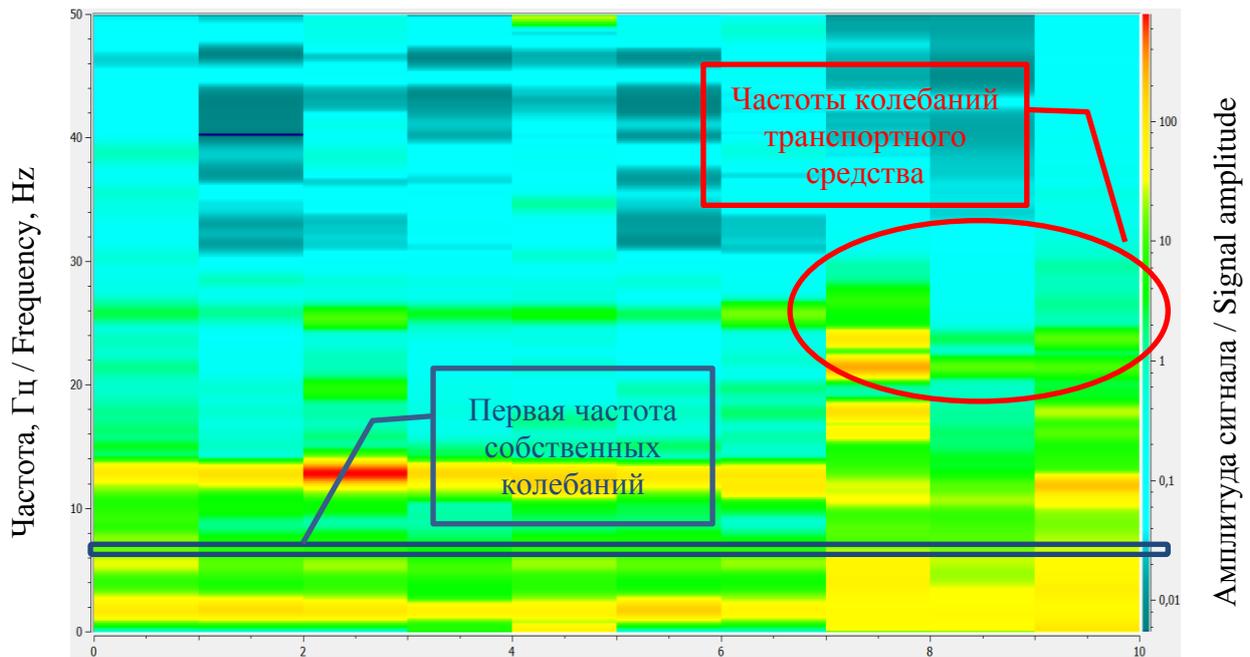


Рисунок 6. Виброграмма колебаний движущегося транспортного средства

Figure 6. Moving vehicle oscillations vibration record



Номера датчиков (1–7 — установлены на пролетном строении; 8–10 — на транспортном средстве: 8 — вертикальный, 9 — горизонтальный поперечный; 10 — горизонтальный продольный)

Sensor numbers (1–7 — installed on the span; 8–10 — on the vehicle: 8 — vertical, 9 — horizontal transverse; 10 — horizontal longitudinal)

Рисунок 7. Спектральная матрица

Figure 7. Spectral matrix

Таблица 3 / Table 3

Результаты измерений (частота, Гц / интенсивность, относительные единицы)

Measurement results (frequency, Hz / intensity, relative units)

Порядковый номер моды колебаний по интенсивности Index number of oscillation mode in intensity	Местоположение датчиков: Sensors location:							
	в 1/4 пролета, справа 1/4 span, right	в 1/2 пролета, справа 1/2 span, right	в 3/4 пролета, справа 3/4 span, right	в 1/2 пролета, посередине in 1/2 span, in the middle	в 1/4 пролета, слева 1/4 span, left	в 1/2 пролета, слева 1/2 span, left	в 3/4 пролета, справа 3/4 span, right	на транспорте in transport
1	1,86*/3015	1,86/18959	1,86/5299	12,70**/804	1,86/4131	1,86/12832	1,86/3026	21,58***/3549
2	12,7/121	12,7/536	12,7/4803	1,86/304	12,7/537	12,6/445	12,79/397	1,86/787

Примечания: * — крутильные колебания пролетного строения; ** — вертикальные колебания пролетного строения; *** — вертикальные колебания диагностического транспортного средства

Notes: * — torsional vibrations of the span; ** — vertical vibrations of the span; *** — vertical oscillations of the diagnostic vehicle

Из рисунка 7 хорошо видно наличие дополнительных частот колебаний транспортного средства (выделено красным цветом). При этом на всех датчиках (стационарных и подвижных) выделяется низшая частота колебаний 1,86 Гц (на рисунке 7 выделено синим цветом). Таким образом, результаты проведенного исследования демонстрируют возможность

осуществлять вибродиагностику с помощью виброакселерометров, находящихся на движущемся транспортном средстве, например, в вагоне трамвая.

Выводы

Conclusion

Городской подвижной состава — актуальный и необходимый вид общественного транспорта, соответствующий требованиям современного города. Строительство мостовых переходов обеспечит замыкание городских территорий, разделенных препятствиями, в единую сеть. При проектировании таких сооружений важно учитывать воздействия фактических динамических вынуждающих сил. Исследование динамики позволяет, с одной стороны, обоснованно задавать динамической воздействию нагрузок на мосты, с другой стороны, осуществлять диагностику состояния сооружений по динамическим параметрам. В данной работе с использованием специализированного мобильного измерительного комплекса авторами проведены измерения параметров колебаний на движущихся транспортных средствах. В результате проведенных экспериментальных исследований продемонстрирована методика по определению динамических характеристик подвижной нагрузки и непосредственно городских мостов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Petkov, D.** Tramway Renaissance in Western Europe. A Socio-technical Analysis / D. Petkov. — DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28879-2>. — Висбаден Springer VS, Wiesbaden, 2020. — 369 с. — URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-28879-2> (дата обращения: 10.12.2021).
2. **Khelf, M.** The effect of noise on the comfort of passengers inside the tramway and its impact on traffic congestion in the urban area / M. Khelf, S. Boukebbab. — DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18196> // Journal of Vibroengineering. — 2018. — Т 20. — № 1. — С. 530–540. — URL: <https://www.extrica.com/article/18196> (дата обращения: 14.01.2022).
3. **Doménech-Carbó, A.** Rise and fall of historic tram networks: Logistic approximation and discontinuous events / A. Doménech-Carbó. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.02.002> // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2019. — Т 521. — С. 315–323. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378437119301554> (дата обращения: 14.01.2022).
4. **Ryzhkov, A.** Local public transport in Russia: Regulation, ownership and competition / A. Ryzhkov. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.04.010> // Research in Transportation Economics. — 2018. — Т 69. — С. 207–217. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0739885917302287> (дата обращения: 14.01.2022).

5. Транспорт в России. 2018: Статистический сборник / Росстат / Л.И. Агеева, И.В. Акимова, М.А. Акимова, Л.Н. Кобринская и др. — М. Федеральная служба государственной статистики, 2018. — 101 с. — URL: https://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/transp18.pdf (дата обращения: 10.12.2021).
6. **Dudkin, E.P.** Method of Tram Track Structures Feasibility Study / E.P. Dudkin, E.N. Zaitsev, S.V. Kolankov. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.133> // Procedia Engineering. — 2017. — Т 189. — С. 854–859. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817322580> (дата обращения: 17.01.2022).
7. Научно-исследовательская работа «Разработка транспортной стратегии Новосибирской области до 2030 года» / В.И. Хабаров [и др.]. — Новосибирск Министерство транспорта и дорожного хозяйства Новосибирской области, 2017. — 74 с. — URL: http://mintrans.nso.ru/sites/mintrans.nso.ru/wodby_files/files/news/2019/03/buklet_ts_nso.pdf (дата обращения: 10.12.2021).
8. **Stragys, M.** The preliminary design and technical-economic efficiency of the two-level branched cable-stayed bridge / M. Stragys. — DOI <https://doi.org/10.3846/est.2019.8858> // Engineering Structures and Technologies. — 2019. — Т 11. — № 1. — С. 17–24. — URL: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/EST/article/view/8858> (дата обращения: 17.01.2022).
9. **Museros, P.** Free vibrations of simply-supported beam bridges under moving loads: Maximum resonance, cancellation and resonant vertical acceleration / P. Museros, E. Moliner, M.D. Martinez-Rodrigo. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.08.008> // Journal of Sound and Vibration. — 2013. — Т 332. — № 2. — С. 326–345. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X12006293> (дата обращения: 17.01.2022).
10. **Fujino, Y.** Bridge monitoring in Japan: the needs and strategies / Y. Fujino, D.M. Siringoringo. — DOI <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.498282> // Structure and Infrastructure Engineering. — 2010. — Т 7. — № 7–8. — С. 597–611. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2010.498282> (дата обращения: 20.01.2022).
11. **Capsoni, A.** Stability of dynamic response of suspension bridges / A. Capsoni, R. Ardito, A. Guerrieri. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.01.009> // Journal of Sound and Vibration. — 2017. — Т 393. — С. 285–307. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X17300093> (дата обращения: 20.01.2022).
12. **Kuras, P.** GB-SAR in the Diagnosis of Critical City Infrastructure—A Case Study of a Load Test on the Long Tram Extradosed Bridge / P. Kuras, Ł. Ortyl, T. Owerko, M. Salamak, P. Łaziński. — DOI <https://doi.org/10.3390/rs12203361> // Remote Sensing. — 2020. — Т 12. — № 20. — С. 3361. — URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/20/3361> (дата обращения: 20.01.2022).
13. **Rahmatalla, S.** Finite element modal analysis and vibration-waveforms in health inspection of old bridges / S. Rahmatalla, K. Hudson, Y. Liu, H.-C. Eun. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.finel.2013.09.006> // Finite Elements in Analysis and Design. — 2014. — Т 78. — С. 40–46. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168874X13001595> (дата обращения: 22.01.2022).
14. **Olaszek, P.** Diagnostic load testing and assessment of existing bridges: examples of application / P. Olaszek, M. Łagoda, J.R. Casas. — DOI <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.772212> // Structure and Infrastructure Engineering. — 2014. — Т 10. — № 6. — С. 834–842. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2013.772212> (дата обращения: 22.01.2022).
15. **Chaplin, I.** Specifics of determining the tension forces of the cable-stayed bridge elements / I. Chaplin, A. Yashnov. — DOI <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905011> // Siberian Transport Forum — TransSiberia 2018 / Под ред. А.Д. Abramov, V. Murgul Новосибирск: IOP Publishing Ltd, 2018. — С. 5011. — URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/98/mateconf_ts2018_05011/mateconf_ts2018_05011.htm (дата обращения: 10.12.2021).

16. **Dolzhikov, P.** Investigations of the regularity of the formation of a dip over the mine / P. Dolzhikov, A. Prokopov, M. Prokopova, N. Hamidullina. — DOI <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819603008> // XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018) / Под ред. V. Andreev, T. Matseevich, A. Ter-Martirosyan, A. Adamtsevich Ростов-на-Дону, Россия: IOP Publishing Ltd, 2017. — С. 3008. — URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_03008/mateconf_rsp2018_03008.h tml (дата обращения: 10.12.2021).
17. **Yashchuk, M.** Reinforced Concrete Elements Strengthened by Pre-stressed Fibre-reinforced Polymer (FRP) / M. Yashchuk, D. Smerdov. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.060> // Transportation Research Procedia. — 2021. — Т 54. — С. 157–165. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521002246> (дата обращения: 22.01.2022).

Сведения об авторах:

Хамидуллина Наталья Викторовна — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: natasha19720701@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6723-1442>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=739852

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203964240>

Статья получена: 04.02.2022. Принята к публикации: 07.04.2022. Опубликовано онлайн: 21.04.2022.

REFERENCES

1. Petkov D. Tramway Renaissance in Western Europe. A Socio-technical Analysis. Wiesbaden: Springer VS; 2020. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-28879-2> (accessed 10th December 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28879-2>.
2. Khelf M., Boukebbab S. The effect of noise on the comfort of passengers inside the tramway and its impact on traffic congestion in the urban area. *Journal of Vibroengineering*. 2018; 20(1): 530–540. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18196>.
3. Doménech-Carbó A. Rise and fall of historic tram networks: Logistic approximation and discontinuous events. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2019; 522: 315–323. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.02.002>.
4. Ryzhkov A. Local public transport in Russia: Regulation, ownership and competition. *Research in Transportation Economics*. 2018; 69: 207–217. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.04.010>.
5. Ageyeva L.I., Akimova I.V., Akimova M.A., Kobrinskaya L.N., Savost'yanova T.N., Uvarova G.A. [Transport in Russia. 2018: Statistical collection / Rosstat]. Moscow: Federal State Statistics Service; 2018. Available at: https://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/transp18.pdf (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
6. Dudkin E.P., Zaitsev E.N., Kolankov S.V. Method of Tram Track Structures Feasibility Study. *Procedia Engineering*. 2017; 189: 854–859. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.133>.
7. Khabarov V.I. et al. [Research work "Development of the transport strategy of the Novosibirsk region until 2030"]. Novosibirsk: Ministry of Transport and Road Facilities of the Novosibirsk Region; 2017. Available at: http://mintrans.nso.ru/sites/mintrans.nso.ru/wodby_files/files/news/2019/03/buklet_ts_nso.pdf (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
8. Stragys M. The preliminary design and technical-economic efficiency of the two-level branched cable-stayed bridge. *Engineering Structures and Technologies*. 2019; 11(1): 17–24. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3846/est.2019.8858>.
9. Museros P., Moliner E., Martínez-Rodrigo M.D. Free vibrations of simply-supported beam bridges under moving loads: Maximum resonance, cancellation and resonant vertical acceleration. *Journal of Sound and Vibration*. 2013; 322(2): 326–345. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.08.008>.

10. Fujino Y., Siringoringo D.M. Bridge monitoring in Japan: the needs and strategies. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010; 7(7–8): 597–611. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.498282>.
11. Capsoni A., Ardito R., Guerrieri A. Stability of dynamic response of suspension bridges. *Journal of Sound and Vibration*. 2017; 393: 285–307. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.01.009>.
12. Kuras P., Ortyl Ł., Owerko T., Salamak M., Łaziński P. GB-SAR in the Diagnosis of Critical City Infrastructure — A Case Study of a Load Test on the Long Tram Extradosed Bridge. *Remote Sensing*. 2020; 12(20): 3361. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12203361>.
13. Rahmatalla S., Hudson K., Liu Y., Eun H-C. Finite element modal analysis and vibration-waveforms in health inspection of old bridges. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2014; 78: 40–46. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2013.09.006>.
14. Olaszek P., Łagoda M., Casas JR. Diagnostic load testing and assessment of existing bridges: examples of application. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014; 10(6): 834–842. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.772212>.
15. Chaplin I., Yashnov A. Specifics of determining the tension forces of the cable-stayed bridge elements. In: A.D. Abramov and V. Murgul (Eds.). *Siberian Transport Forum — TransSiberia 2018*. Novosibirsk, Russia: IOP Publishing Ltd; 2018. p. 5011. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/98/mateconf_ts2018_05011/mateconf_ts2018_05011.html (accessed 10th December 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905011>.
16. Dolzhikov P., Prokopov A., Prokopova M., Hamidullina N. Investigations of the regularity of the formation of a dip over the mine. In: V. Andreev, T. Matseevich, A. Ter-Martirosyan and A. Adamtsevich (Eds.). *XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018)*. Rostov-on-Don, Russia: IOP Publishing Ltd; 2017. p. 3008. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_03008/mateconf_rsp2018_03008.html (accessed 10th December 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819603008>.
17. Yashchuk M., Smerdov D. Reinforced Concrete Elements Strengthened by Pre-stressed Fibre-reinforced Polymer (FRP). *Transportation Research Procedia*. 2021; 54: 157–165. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.060>.

Information about the authors:

Natalya V. Khamidullina — Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: natasha19720701@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6723-1442>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=739852

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203964240>

Submitted: 04th February 2022. Revised: 07th April 2022. Published online: 21st April 2022.