



УДК 625.03

## Экспериментальные исследования колебаний трамвая «Витязь-М»

Е. П. Дудкин, Д. В. Козлов, Я. С. Хомяков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Дудкин Е. П., Козлов Д. В., Хомяков Я. С. Экспериментальные исследования колебаний трамвая «Витязь-М» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 775–782. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782

### Аннотация

**Цель:** На основании экспериментальных исследований колебаний трамвайного вагона «Витязь-М», возникающих на скоростях 50 км/ч и более, в прямых участках пути с рельсами Р65 на железобетонных шпалах оценить влияние поперечных колебаний на безопасность движения и комфорт пассажиров. Показать несоответствие существующей нормативной документации по устройству и содержанию трамвайных путей и ходовых частей трамвая перспективам его развития. **Методы:** Экспериментальные измерения виброускорений кузова трамваев с ходовыми частями, имеющими различный пробег, при движении по экспериментальному участку пути. Замер и анализ геометрических параметров рельсовой колеи экспериментального участка и трамваев. **Результаты:** Выполнены замеры виброускорений, возникающих при движении трамваев со скоростями от 20 до 50 км/ч, а также проведен анализ геометрических параметров рельсовой колеи опытного участка и профилей колес подвижного состава, участвовавшего в испытаниях. Во время заездов замерялись виброускорения, возникающие при движении, по трем направлениям — продольное, поперечное и вертикальное. Подтверждено появление поперечных колебаний кузова трамвая, влияющих на дискомфорт пассажиров и безопасность движения. Получены среднеквадратичные значения амплитуд виброускорений в трех направлениях в долях ускорения свободного падения ( $g$ ) в двух вариантах — при движении тележки между стыками и на стыках. Частотный анализ виброускорений подтвердил резкий рост амплитуды поперечных колебаний на частотах в районе 1–2 Гц при скорости 50 км/ч у трамвая с изношенными колесами. Отмечено соответствие геометрии рельсовой колеи экспериментального участка принятым нормативам, а также соответствие размеров колес подвижного состава конструкторской документации. **Практическая значимость:** Выявлена необходимость в дальнейшем комплексном исследовании взаимодействия пути и подвижного состава при внедрении скоростного трамвая с целью совершенствования существующих норм по устройству и содержанию трамвайных путей и ходовых частей трамвая.

**Ключевые слова:** Трамвай, скоростной трамвай, вибрация подвижного состава, колебания подвижного состава, виброускорение, амплитуда колебаний.



Рис. 1. Трамвай «Витязь-М» в Санкт-Петербурге

Одним из основных направлений развития городского рельсового транспорта является повышение скоростей движения и внедрение скоростного трамвая. При этом обновление подвижного состава является закономерным атрибутом развития. В Санкт-Петербурге с 2015 года стали появляться современные трамваи «Витязь», призванные значительно повысить уровень безопасности и комфорта городского транспорта. Отличительной особенностью этих трамваев является низкопольная конструкция, упрощающая посадку и высадку пассажиров, что особенно важно для маломобильных групп населения.

«Витязь» разработан и производится ООО «ПК Транспортные системы» с 2014 года. Это современная модель, в основе которой лежат тележки новой конструкции, позволившие создать низкопольный трамвай. Трехсекционный трамвайный вагон опирается на три тяговые двухосные тележки, крайние из которых являются поворотными. Конструкционная скорость составляет 75 км/ч.

С 2019 года в трамвайном парке № 8 СПб ГУП «Горэлектротранс» эксплуатируются модернизированные вагоны — 71-931М «Витязь-М», собранные из комплектующих на мощностях Невского завода электрического транспорта (рис. 1).

СПб ГУП «Горэлектротранс», эксплуатирующим трамвайные вагоны «Витязь», выявлена значительная раскочка экипажа при высоких скоростях движения. Данное опасное явление проявлялось примерно после 80 тыс. км пробега у трамваев с новыми колесными парами и после 15–20 тыс. км — с обточенными колесными парами.

Для выявления причин появления раскочки трамвая кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса» ПГУПС были проведены экспериментальные исследования взаимодействия пути и подвижного состава.

В ходе работы выполнены замеры виброускорений, возникающих при движении трамвая со скоростями от 20 до 50 км/ч, а также проведен анализ геометрических параметров рельсовой

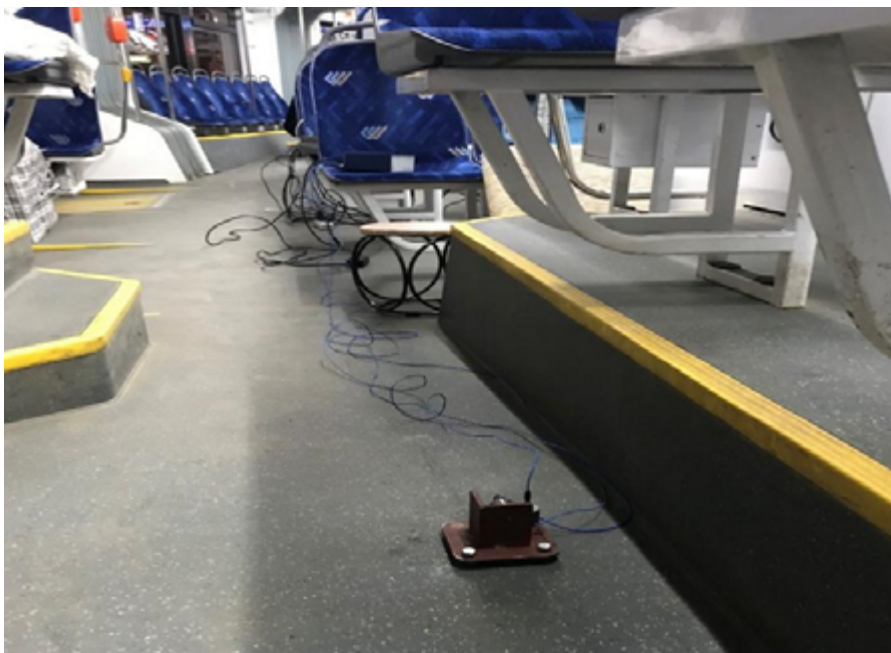


Рис. 2. Установка датчиков в вагоне

колеи опытного участка и профилей колес подвижного состава, участвовавшего в испытаниях.

Для испытаний трамвайным парком № 8 СПб ГУП «Горэлектротранс» были предоставлены две идентичные единицы подвижного состава (трамвайные вагоны 71-931М «Витязь-М»), отличающиеся пробегом колесных пар: первый трамвай с изношенными колесами и второй — с недавно обточенными. Программой испытаний были предусмотрены поочередные заезды трамваев по экспериментальному участку со скоростями 20, 30, 40 и 50 км/ч. Экспериментальный участок — прямая с рельсами Р65 на железобетонных шпалах. Во время заездов замерялись виброускорения, возникающие при движении, по трем направлениям — продольное, поперечное и вертикальное. Виброускорения измерялись с помощью трех акселерометров PCB Piezotronics 393В04, расположенных взаимно ортогонально. Акселерометры, размещенные на жесткой базе, устанавливались на пол вагона в зоне передней, средней и задней тележек соответственно (рис. 2). Регистрация сигналов акселерометров осущест-

влялась через измерительно-вычислительный комплекс МИС-026, оборудованный модулями измерения динамических сигналов МС-201. Интерпретация результатов проводилась с помощью пакета обработки сигналов WinПОСЗ.

Получены среднеквадратичные значения амплитуд виброускорений в трех направлениях в долях ускорения свободного падения ( $g$ ) в двух вариантах — при движении тележки между стыками (оказывающие длительное вибрационное воздействие) и на стыках (имеющие существенно большую амплитуду, но действующие в течение малого промежутка времени, менее 0,1 с, при прохождении колесом стыка). Анализ полученных результатов показывает: средний уровень и «основных» виброускорений, и виброускорений на стыках выше на трамвае с недавно обточенными колесами; однако резкое увеличение амплитуды и изменение характера поперечных колебаний выявлено на скорости 50 км/ч только на трамвае с изношенными колесными парами.

Графики замеров поперечных виброускорений на скорости 50 км/ч для трамваев с изношен-

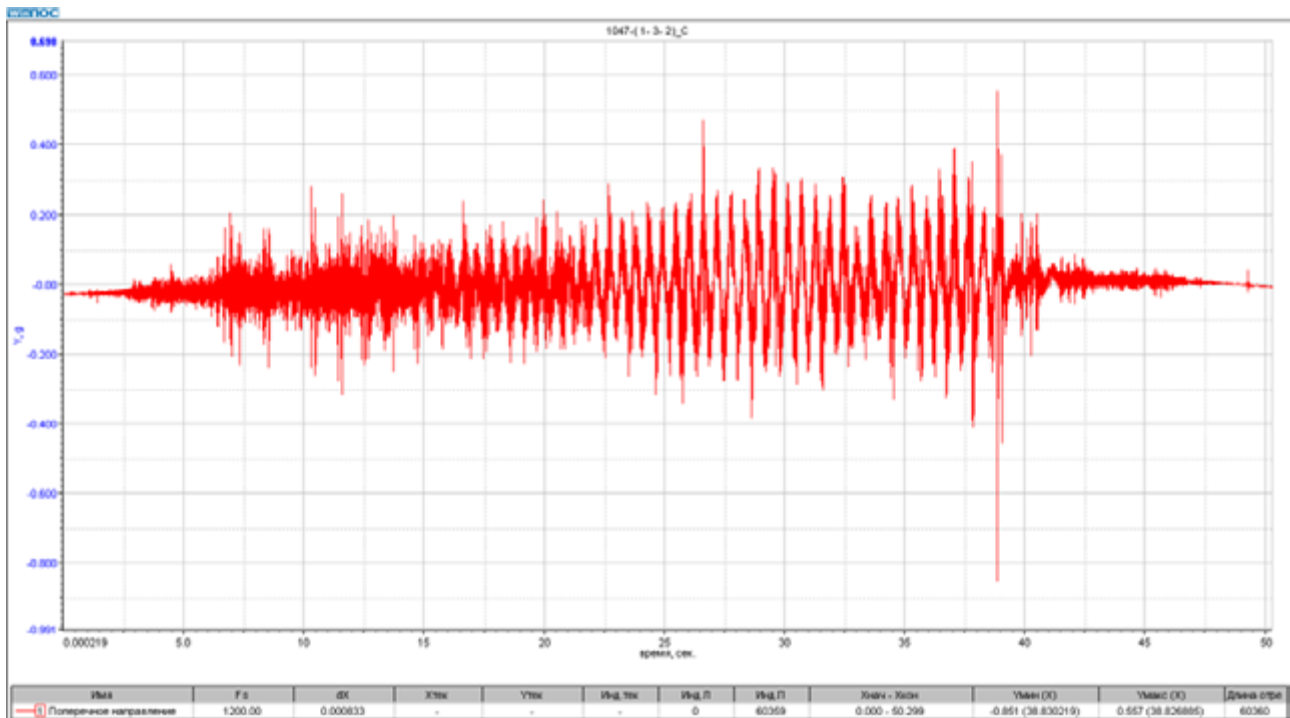


Рис. 3. График поперечных виброускорений трамвая с изношенными колесами при скорости 50 км/ч («раскачка» наблюдается с 22 по 38 с)

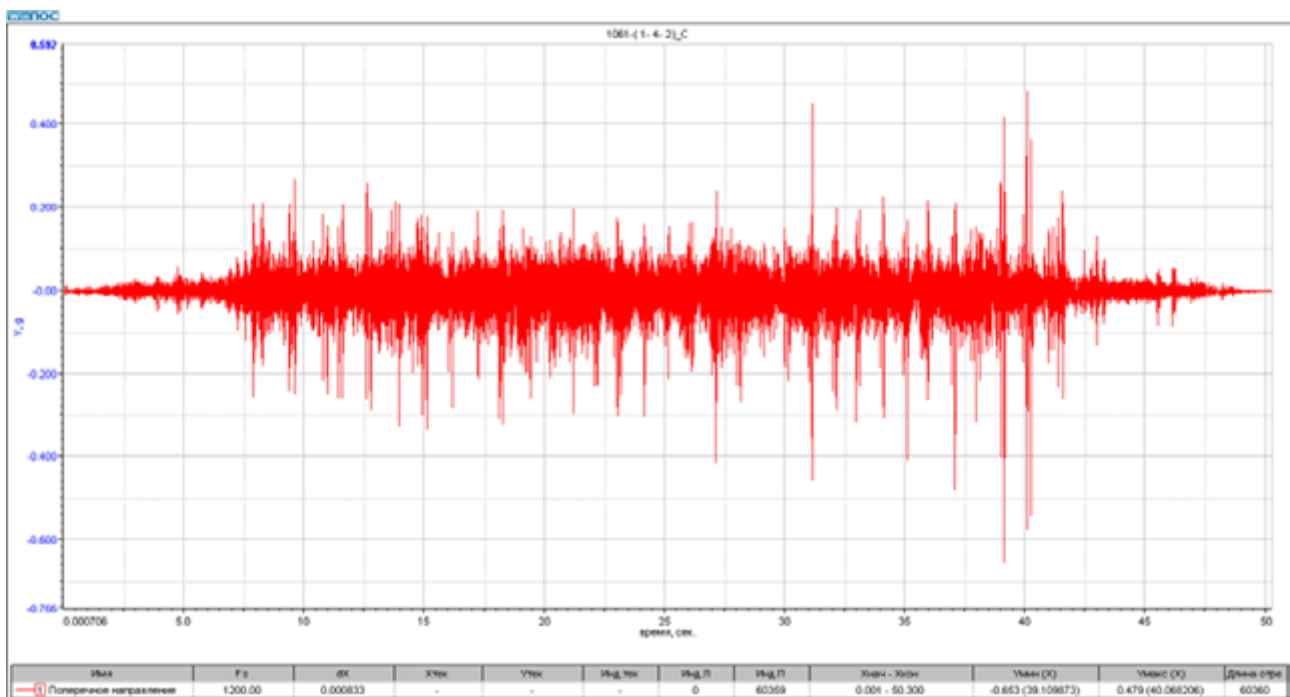


Рис. 4. График поперечных виброускорений трамвая с обточенными колесами при скорости 50 км/ч

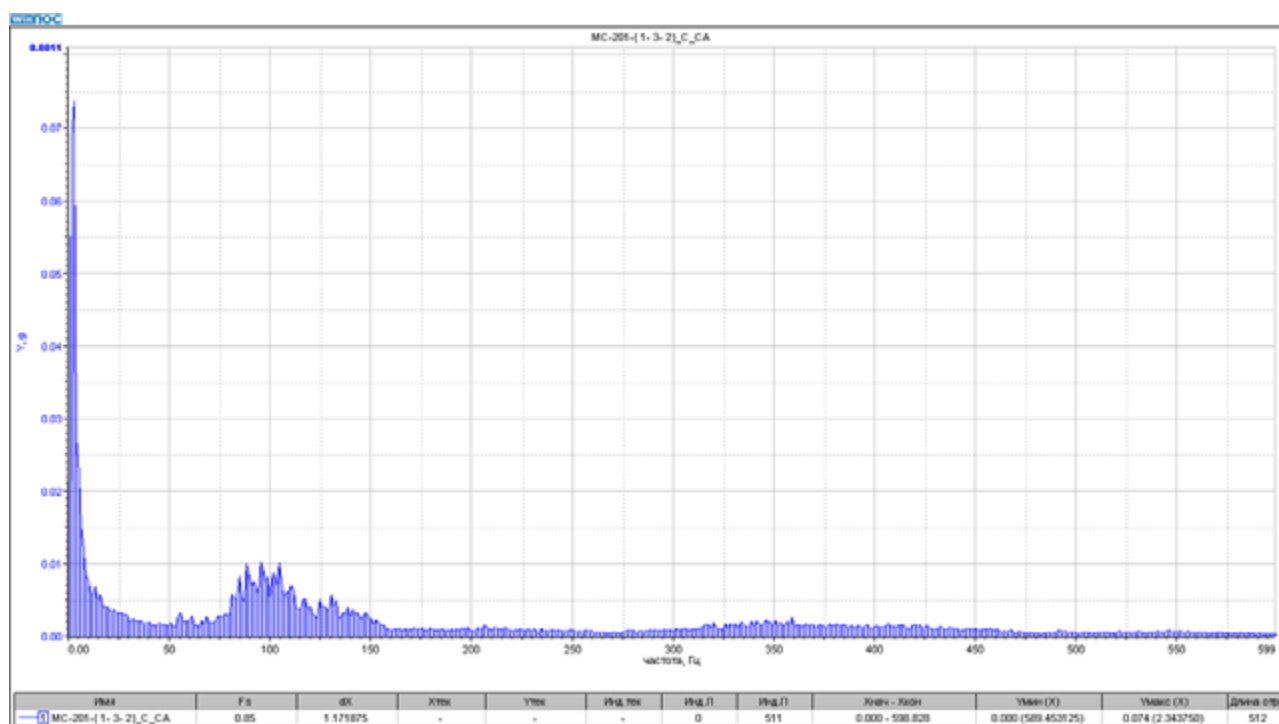


Рис. 5. Частотный анализ виброускорений в момент раскачки трамвая

ными (рис. 3) и обточенными (рис. 4) колесными парами имеют характерное различие при установившемся движении.

Частотный анализ виброускорений подтверждает резкий рост амплитуды поперечных колебаний на частотах в районе 1–2 Гц при скорости 50 км/ч у трамвая с изношенными колесами (рис. 5).

Значительная поперечная раскачка проявляется только на крайних тележках (передней и задней), в районе средней тележки это явление отсутствует, что объясняется различными степенями свободы тележек, так как, в отличие от крайних, средняя тележка неповоротная [1].

Несмотря на то, что среднеквадратичные значения амплитуд виброускорений при резонансных колебаниях (0,2–0,3 g, без разделения по частотам) сравнимы с остальными полученными в ходе эксперимента значениями, данное явление «раскачки» представляется опасным, так как основная энергия колебаний сосредоточена на частотах 1–2 Гц и, помимо дискомфорта пасса-

жиров, может вызвать нарушения безопасности движения.

Частотный анализ показывает, что виброускорения на этих частотах превышают 0,07 g, или 0,7 м/с<sup>2</sup>, согласно СП 2.5.3650—20 «Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры». Предельные уровни виброускорений с разделением по частотам (в 1/3 октавных полос, от 1 до 80 Гц) и для частот 1; 1,25; 1,6 и 2 Гц ограничены величиной 0,2 м/с<sup>2</sup> для горизонтального поперечного направления.

Проведенный анализ геометрических параметров колес трамваев показал, что колесные пары трамвая «Витязь», согласно своей конструкторской документации, не соответствуют какому-либо конкретному типоразмеру по ГОСТ, но имеют перекрестное соответствие по нескольким типоразмерам, за исключением диаметра по кругу катания, который на 90 мм меньше установленного ГОСТом (620 мм вместо 710 мм).

Сравнение фактических размеров бандажей с нормативами показало, что значения лежат в пределах допустимых, согласно Правилам технической эксплуатации трамвая, ГОСТ 25715—88 «Бандажи чистые для вагонов трамвая» и Руководству по эксплуатации вагона трамвайного модели 71-931М [2–5].

На участке испытаний конструкция пути устроена на железобетонных шпалах с промежуточными анкерными скреплениями типа АРС-04, железнодорожными рельсами Р65 и проектной шириной колеи 1524 мм. Измерения ширины колеи показали, что она лежит в пределах от 1522 до 1526 мм с одиночными отклонениями до 1528 мм (на протяжении не более 5 м) при допуске от 1520 мм до 1536 мм.

Рельсовая колея устроена с возвышением внутреннего (междупутного) рельса на величину 10–15 мм, при нормативной величине возвышения — 4 мм. Однако и эти отклонения не выходят за рамки допустимых норм.

Наблюдаемые резонансные явления при движении трамвая могут быть обусловлены как особенностями конструкции ходовых частей подвижного состава, так и особенностями взаимодействия колеса и рельса при определенной геометрии рельсового пути (ширина колеи, уровень расположения рельсовых нитей, тип рельса, подуклонка) и колесной пары (расстояние между внутренними гранями колес, профиль колеса, поверхность катания, гребень) трамвая [6].

Поскольку геометрические параметры ходовых частей исследуемого трамвая и рельсового пути соответствовали существующим нормам, а опасные поперечные колебания появлялись уже при скорости 50 км/ч, в целях обеспечения надлежащего уровня безопасности и комфорта пассажиров необходимо проведение комплексных исследований для пересмотра данных норм, особенно с учетом перспективного повышения скоростей движения трамваев.

## Библиографический список

1. Дудкин Е. П. «Современные конструкции трамвайных путей»: монография / Е. П. Дудкин, К. А. Гмыря, А. В. Колтаков и др. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2021. — 136 с.
2. ГОСТ 25712—88. Бандажи чистые для вагонов трамвая. Технические условия: ГОСТ: издание официальное: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР: дата введения: 28 ноября 1988 г. / Разработан Министерством жилищно-коммунального хозяйства РСФСР. — М.: Издательство стандартов, 1989. — Приложение.
3. Правила технической эксплуатации трамвая: Министерство транспорта Российской Федерации: дата принятия: 30 ноября 2001 г. — М.: 2001. — 20 с.
4. Вагон трамвайный модели 71-931М. Руководство по эксплуатации / ООО «ПК Транспортные системы». — М.: 2017. — 8 с.
5. СП 2.5.3650—20. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры: Санитарно-эпидемиологические правила: введены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации: дата принятия: 16 ноября 2020 г. — М.: 2020. — Приложение 1, таблица 25.
6. Дудкин Е. П. Отдельные аспекты взаимодействия пары «колесо — рельс» рельсового городского транспорта / Е. П. Дудкин, Н. Н. Султанов, С. В. Китаев и др. // Транспорт Российской Федерации. — 2020. — № 3–4(88–89). — С. 63–67.

Дата поступления: 06.07.2022

Решение о публикации: 29.08.2022

### Контактная информация:

ДУДКИН Евгений Павлович — д-р техн. наук, проф.;

ed@pgups-tempus.ru

КОЗЛОВ Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук,

доц.; project@pgups-tempus.ru

ХОМЯКОВ Ярослав Сергеевич — аспирант;

jaro97@mail.ru

## Experimental Studies of Tram “Vityaz–M” Vibrations

E. P. Dudkin, D. V. Kozlov, Ya. S. Khomyakov

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

**For citation:** Dudkin E. P., Kozlov D. V., Khomyakov Ya. S. Experimental Studies of Tram “Vityaz–M” Vibrations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 775–782. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782

### Summary

**Objective:** Based on experimental studies of vibrations of Vityaz-M tram car occurring at speeds of 50 km/h or more on track straight sections with P65 rails on reinforced-concrete sleepers, to evaluate the effect of transversal vibrations on traffic safety and passenger comfort. To show the inconsistency of existing regulatory documentation on the structure and maintenance of tram tracks and tram chassis with the development prospects. **Methods:** Experimental measurements of vibration accelerations of tram body and tram chassis, having different mileage, when moving along track experimental section. Measurement and analysis of geometric parameters of rail track experimental section and of trams. **Results:** Measurements of vibration accelerations occurring during tram motion with 20 to 50 km/h speeds were performed as well as geometric parameter analysis for rail track experimental section and rolling stock wheels' profiles, participated in the tests, was pursued. During the races, vibration accelerations that occur during movement were measured in three directions — longitudinal, transversal and vertical. The appearance of transversal vibrations of tram body affecting passenger discomfort and traffic safety has been confirmed. The root mean-square values of the amplitudes of vibration accelerations towards three directions in acceleration gravity ( $g$ ) fractions have been obtained in two variants — at trolley motion between joints and at joints. Vibration acceleration frequency analysis has confirmed a sharp increase in the amplitude of transversal vibrations at frequencies in the region of 1–2 Hz at a speed of 50 km/h for a tram with worn wheels. The compliance of rail track experimental section geometry with the accepted standards as well as the compliance of rolling stock wheels dimensions with constructive documentation are noted. **Practical significance:** The need for further comprehensive study of the interaction of track and rolling stock while high-speed tram introduction with the purpose to improve existing standards on the structure and maintenance of tram tracks and tram chassis.

**Keywords:** Tram, high-speed tram, vibration of rolling stock, vibrations of rolling stock, vibration acceleration, amplitude of vibrations.

### References

1. Dudkin E. P., Gmyrya K. A., Koltakov A. V., Malakhov M. V., Sultanov N. N. “*Sovremennye konstruksii tramvaynykh putey*” [“Modern designs of tram tracks”]. Moscow: FGBU DPO «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2021. 136 p. (In Russian)

2. *GOST 25712-88. Bandazhi chistye dlya vagonov tramvaya. Tekhnicheskie usloviya: GOST: izdanie ofitsial'noe: Komitet standartov, mer i izmeritel'nykh priborov pri Sovmine*

*SSSR: data vvedeniya 1988-11-28 / razrabotan Ministerstvom zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RSFSR [GOST 25712-88. Bandages are clean for tram cars. Specifications: GOST: official edition: Committee of Standards, Measures and Measuring Instruments under the Council of Ministers of the USSR: introduction date 1988-11-28 / developed by the Ministry of Housing and Communal Services of the RSFSR]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. (In Russian)*

3. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya: Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii: data prin-*

yatiya 2001-11-30 [Rules for the technical operation of the tram: Ministry of Transport of the Russian Federation: date of adoption 2001-11-30]. Moscow: 2001. 20 p. (In Russian)

4. *Vagon tramvaynyy modeli 71-931M. Rukovodstvo po ekspluatatsii / OOO "PK Transportnye sistemy"* [Tram car model 71-931M. Operation manual / PK Transport Systems LLC]. Moscow: 2017. 8 p. (In Russian)

5. *SP 2.5.3650-20. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otdel'nym vidam transporta i ob"ektam transportnoy infrastruktury: Sanitarno-epidemiologicheskie pravila: vvedeny postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiyskoy Federatsii: data prin'yatiya 2020-11-16* [SP 2.5.3650-20. Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities: Sanitary and epidemiological rules: introduced by a decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation: date of adoption 2020-11-16]. Moscow: 2020. (In Russian)

6. Dudkin E. P., Sultanov N. N., Kitaev S. V., Vostrikov O. V. Otdel'nye aspekty vzaimodeystviya pary "koleso-rel's" rel'sovogo gorodskogo transporta [Separate aspects of the interaction of the "wheel-rail" pair of rail urban transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2020, I. 3-4 (88-89), pp. 63–67. (In Russian)

Received: July 06, 2022

Accepted: August 29, 2022

**Author's information:**

Evgeny P. DUDKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ed@pgups-tempus.ru

Dmitry V. KOZLOV — PhD in Engineering, Associate Professor; project@pgups-tempus.ru

Yaroslav S. KHOMYAKOV — Postgraduate Student; jaro97@mail.ru