

УДК 625.421:620.1.051

В.В. КОМИССАРОВ, канд. техн. наук

заместитель начальника Испытательного центра железнодорожного транспорта¹

E-mail: vickom@tut.by

А.С. ЛАПУШКИН

старший преподаватель кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов»¹

E-mail: artyom.lapushkin.1992@tut.by

¹Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15.09.2021.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНЫХ БЛОКОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Объектом исследования являются различные конструкции опорных блоков с промежуточными скреплениями для метрополитенов как отечественного, так и зарубежного производства. Предложен и реализован комплексный подход к испытаниям конструкций блочного пути: моделирование циклического нагружения, характерного для всей конструкции пути, а также ударного — характерного для промежуточных стыковых рельсовых скреплений. Установлено значение испытательной частоты 10 Гц при циклическом нагружении. Представлен способ доработки испытательного оборудования в рамках моделирования передачи нагрузок от колеса на рельс в плоскости контакта поверхностей катания колеса и рельса. Приводятся основные результаты испытаний. При динамическом нагружении максимальные усилия в рельсе возникают в конструкции с обычной прокладкой (порядка 50–55 кН), для деревянного блока «Метро» характерен более сложный спектр изменения усилия с максимальной амплитудой порядка 20–25 и размахом 30–40 кН. Наиболее низкие значения виброускорений при осуществлении данного подхода показывает блок «LVT». Конструкции с виброизолирующей прокладкой имеют наибольшие значения виброускорений в диапазоне частот от 10 до 31,5 (40) Гц. В зоне более высоких частот исследуемые конструкции имеют соизмеримые значения виброускорений. Выполнен анализ вибрационных характеристик на основании зарегистрированных значений виброускорений в характерных измерительных точках. Приведены значения виброускорений и их относительное сравнение в зависимости от позиции установки измерительных каналов и в зависимости от вида конструкции. Отмечено, что в зоне 10 Гц значения виброускорений минимальны при использовании виброизолирующей прокладки твердостью 65 по Шору А. Представлены сравнительные результаты по частотам 31,5 и 63 Гц. Рекомендовано для вариантов конструкций, показавших лучшие результаты, провести эксплуатационные испытания в условиях метрополитена.

Ключевые слова: опорные блоки, железнодорожный путь, метрополитен, упругие элементы, подвижной состав, осевая нагрузка, частота, испытательное оборудование, виброускорение, вертикальные силы

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-33-40>

Введение. Развитие метрополитена в Республике Беларусь и за рубежом осуществляется главным образом за счет строительства новых линий способом мелкого заложения, который имеет существенный недостаток: в прилегающих к ним зданиях уровень шума и вибраций от обращающихся поездов часто превышает санитарные нормы [1].

Основным типом конструкции верхнего строения пути на бетоне в метрополитене является деревянная полушпала со скреплением типа

«Метро» (рисунок 1) [2]. Вопрос об улучшении виброзащитных свойств железнодорожного пути в тоннеле метрополитена предполагает разработку новых конструкций. При соблюдении всех требований безопасности новые решения могут быть использованы на строящихся линиях, а при удовлетворительных показателях эксплуатации может быть осуществлена модернизация существующих линий.

Поиски способов решения данной проблемы идут по разным направлениям: совершенствова-

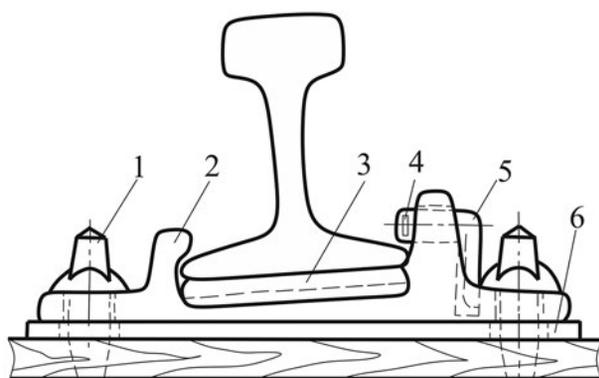


Рисунок 1 — Типовая конструкция железнодорожного пути метрополитена: 1 — путевого шуруп; 2 — подкладка; 3 — прокладка под рельс; 4 — шплинт; 5 — маятниковый штырь; 6 — прокладка под подкладку

Figure 1 — Typical design of the underground railway track: 1 — screw track-spike; 2 — lining; 3 — rail pad; 4 — keeper pin; 5 — pendulum pin; 6 — lining pad

ние ходовых частей подвижного состава, улучшение виброзащитных свойств железнодорожного пути, применение виброзащитных обделок и экранов, устанавливаемых между тоннелем и зданиями, и разработка виброзащитных конструкций зданий [1].

Основную роль в решении данной задачи играют узлы промежуточных рельсовых скреплений. Их функция заключается в обеспечении в течение нормативной наработки тоннажа стабильного проектного положения рельсовой колеи, предотвращающего повышенный износ деталей железнодорожного пути [3]. Прокладки и изолирующие втулки узлов должны обладать необходимой упругостью для снижения уровня вибраций.

В Испытательном центре железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта были проведены испытания по оценке вибрационных параметров на 21 образце различных конструкций пути для метрополитенов.

Процедура испытаний. До начала испытаний производился монтаж узлов рельсовых скреплений на блоках. Объектами исследования являлись конструкции верхнего строения безбалластного железнодорожного пути для метрополитенов.

Монтаж блоков осуществлялся в соответствии с [2, 4] и техническими условиями на соответствующие конструкции. Блоки с узлами скреплений помещались под пульсатор испытательной машины (рисунок 2).

Конструкции представлены бетонными блоками Vossloh, LVT, БО-М (различных модификаций) и деревянной полушпалой со скреплением типа «Метро».

Испытания конструкций блоков БО-М производились при их различных модификациях с изменением вида изолятора, твердости подрельсовых прокладок и диаметра клемм.

Уровни вибрации в характерных точках (рисунок 3) определялись для случаев циклическо-

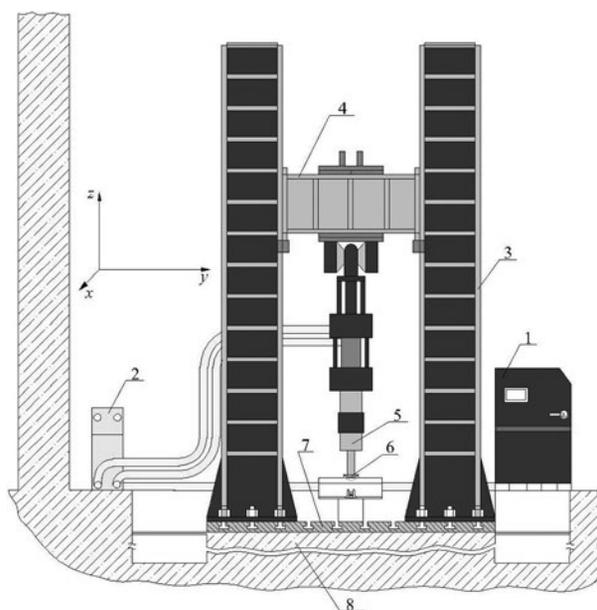


Рисунок 2 — Общий вид испытательной установки: 1 — насосная станция низкого давления; 2 — насосная станция высокого давления; 3 — вертикальные стойки; 4 — балка с подвешенным цилиндром-пульсатором; 5 — цилиндр-пульсатор; 6 — приспособление, имитирующее контакт колеса и рельса; 7 — металлическая плита с пазами; 8 — железобетонное основание

Figure 2 — General view of the test installation: 1 — low pressure pumping station; 2 — high pressure pumping station; 3 — vertical racks; 4 — beam with suspended pulsator cylinder; 5 — pulsator cylinder; 6 — device simulating wheel and rail contact; 7 — metal plate with grooves; 8 — reinforced concrete base

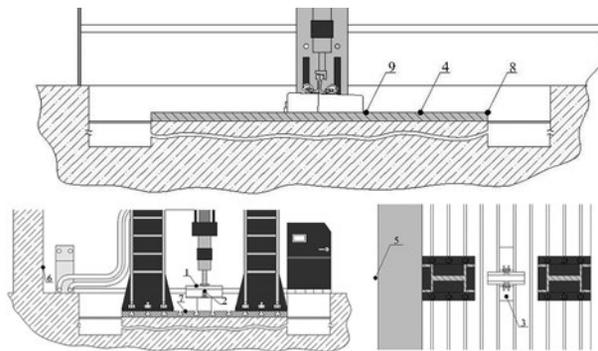


Рисунок 3 — Схема расположения измерительных точек

Figure 3 — Layout of the measuring points

го и ударного нагружений. В качестве характерных точек принимались точки, расположенные на рельсе, блоке опорном, металлической плите, парапете ямы для испытательного оборудования и стене цеха лаборатории. Подробный анализ проведен для точек 1, 3 и 9 (см. рисунок 3).

При ударном нагружении виброускорения измерялись в точке, расположенной на расстоянии 1 м от оси падения груза.

Циклическое нагружение. Воздействие циклической нагрузкой на опорные блоки было реализовано через специальный имитатор колеса подвижного состава (рисунок 4). В результате было осуществлено силовое моделирование контакта колеса с головкой рельса, приближенного к эксплуатационному.

В процессе данных испытаний на головку рельса прикладывалась нагрузка 65 ± 10 кН. На-

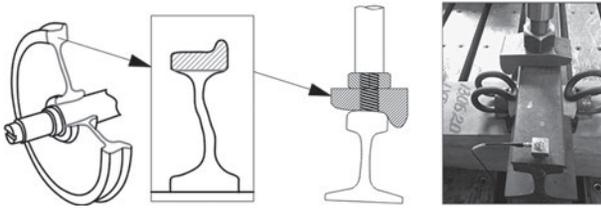


Рисунок 4 — Имитация контакта колеса подвижного состава и рельса на испытательной машине
 Figure 4 — Simulation of the contact of a rolling stock wheel and a rail on a test machine

гружение осуществлялось с частотой 10 Гц, что соответствует частоте прохода колеса тележки подвижного состава метрополитена базой 2,1 м на максимальной скорости 80 км/ч.

Циклическое нагружение производилось с применением пульсатора сервогидравлической универсальной разрывной машины ТС244.31А. Подача и контроль испытательных параметров циклического нагружения производились посредством программного комплекса Station Manager “MTS Flextest 40”.

Для определения численных значений уровней вибрации проводилось измерение трехканальным датчиком с помощью виброметра общей и локальной вибрации ОКТАВА 101ВМ, виброметра-анализатора спектра ЭКОФИЗИКА-110А в режиме автоматической регистрации среднеквадратичных уровней виброускорений со временем усреднения 1 с. Каналы датчика вибрации X, Y и Z сориентированы по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

Датчики вибрации крепились к исследуемым конструкциям в соответствии с требованиями [5].

Обработка результатов измерений уровней вибрации проводилась в лабораторных условиях на ПК с использованием ПО «ОКТАВА» и с помощью электронных таблиц MS Excel.

Испытываемым конструкциям перед испытаниями были присвоены номера от 1 до 21. Образцы № 1, 6–10 — конструкция блока «БО-М» с анкерами под рельсовое крепление СБ-3, в состав которого входят полиуретановая подрельсовая прокладка (постоянный элемент), изоляторы

и пружинные клеммы типа СБ-3 (переменные элементы). Так образец № 1 включал прокладку, клеммы Ø 16 мм и изолятор из полиамида ПА-6. В образце № 10 при том же составе использовался изолятор из полиамида ПА-6 стеклонаполненного, в образцах № 6 и 8 заменены пружинные клеммы на клеммы из прутков Ø 14 и 15 мм соответственно. В образцах № 7 и 9 с клеммами из прутков Ø 14 и 15 мм применялся изолятор из полиамида ПА-6 стеклонаполненного.

Образец № 2 — конструкция блока LVT с рельсовым креплением типа APC.

В образцах № 3, 11–21, в отличие от группы образцов № 1, 6–10, переменными являлись подрельсовая прокладка с различным значением твердости по Шору А (56 и 65 единиц), изолятор и клемма. Так в конструкциях № 3, 17, 21, при использовании прокладки твердостью 56 единиц по Шору А и изоляторов из полиамида ПА-6 стеклонаполненного устанавливались клеммы Ø 16, 15 и 14 мм соответственно. В конструкциях № 14, 16, 20 совместно с прокладкой данной твердости использовались изоляторы из полиамида ПА-6 и клеммы различных диаметров 14, 15 и 16 мм соответственно. Состав элементов образцов № 11–13, 15, 18 и 19 соответствует составу группы № 3, 17, 21, 14, 16, 20, однако в конструкциях используется подрельсовая прокладка 65 единиц по Шору А.

Деревянной полушпале с промежуточным рельсовым креплением типа «Метро» был присвоен № 4. Образец № 5 — блок Vossloh.

Сравнительные результаты работы конструкций под циклической нагрузкой представлены на рисунках 5–9.

На рисунках 5–8 представлены графики зависимости уровней виброускорений по видам испытываемых конструкций на частотах 10, 20, 31,5 и 63 Гц. Графики получены наложением значений виброускорений в точках 1, 3 и 9 друг на друга. Верхняя часть графиков показывает зарегистрированные значения виброускорений на головке рельса, средняя часть — в торце блоков, нижняя часть — на металлической плите.

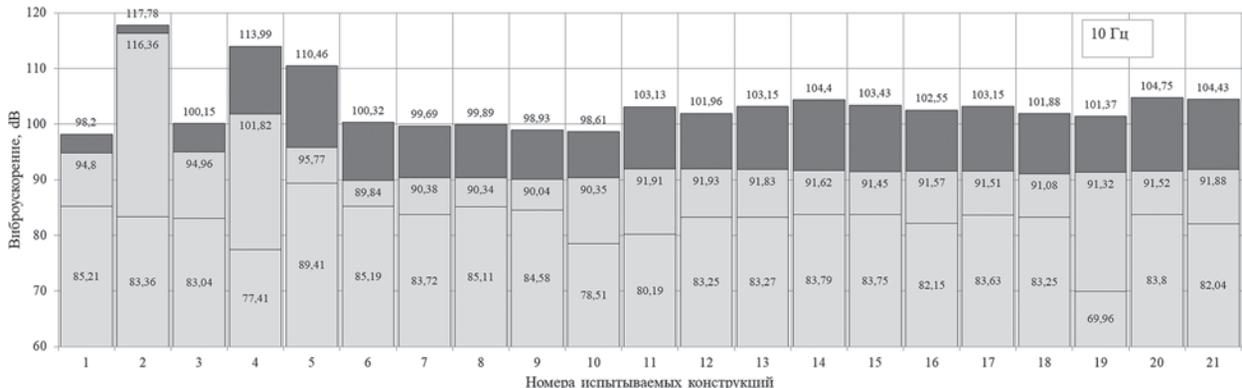


Рисунок 5 — Эквивалентные значения виброускорений, регистрируемые на частоте 10 Гц
 Figure 5 — Equivalent values of vibration accelerations recorded at a frequency of 10 Hz

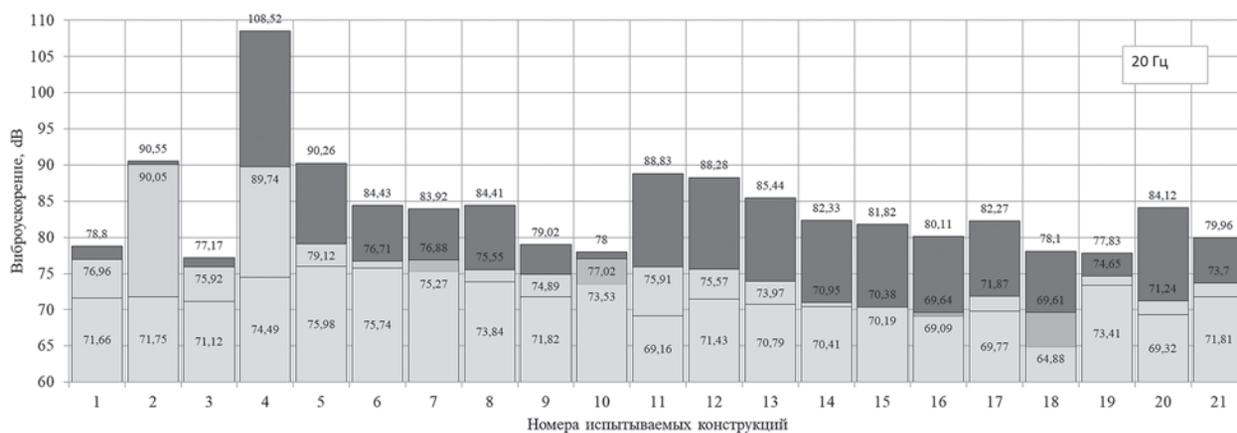


Рисунок 6 — Эквивалентные значения виброускорений, регистрируемые на частоте 20 Гц
Figure 6 — Equivalent values of vibration accelerations recorded at a frequency of 20 Hz

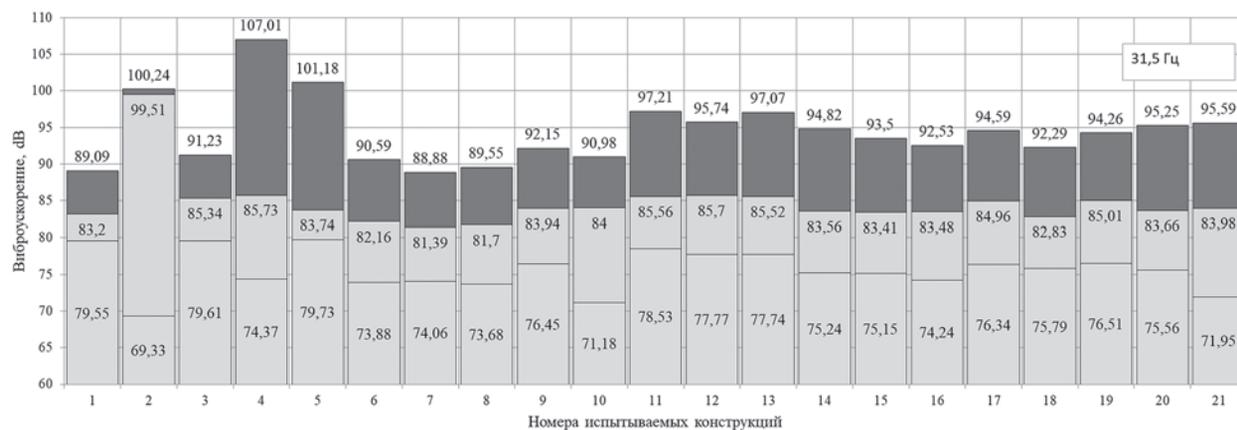


Рисунок 7 — Эквивалентные значения виброускорений, регистрируемые на частоте 31,5 Гц
Figure 7 — Equivalent values of vibration accelerations recorded at a frequency of 31.5 Hz

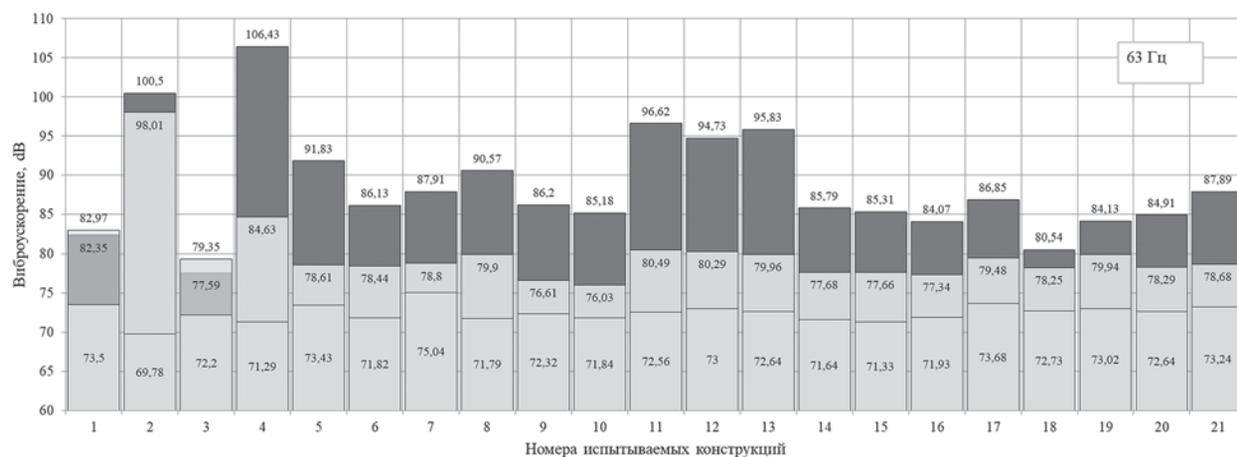


Рисунок 8 — Эквивалентные значения виброускорений, регистрируемые на частоте 63 Гц
Figure 8 — Equivalent values of vibration accelerations recorded at a frequency of 63 Hz

На частоте 10 Гц наблюдается устойчивое снижение значений виброускорений от головки рельса до металлической плиты по всем видам конструкций. Самые низкие значения, регистрируемые на металлической плите, наблюдаются при воздействии на конструкцию № 19, остальные конструкции уступают блоку «Метро» (№ 4), который является и в современных условиях основным типом конструкции пути в метрополитенах.

На частоте 20 Гц виброускорения снижаются практически на всех конструкциях, однако при воздействии на блоки № 7, 10, 16 и 18 наблюдается превышение значений виброускорений, регистрируемых на металлической плите, над значениями, зарегистрированными на торцах данных блоков. В то же время для конструкций № 1–3, 9, 11–18, 20 наблюдается снижение значений виброускорений по сравнению с блоком «Метро».

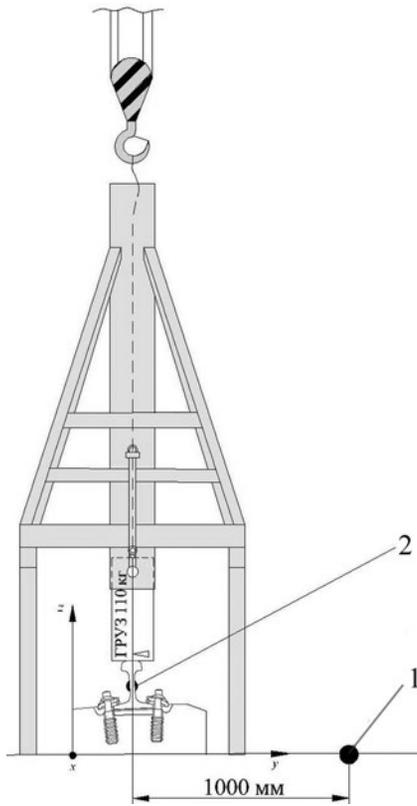


Рисунок 9 — Схема проведения испытаний при воздействии ударной нагрузкой: 1 — измерительная точка с 3-канальным вибродатчиком; 2 — место регистрации вертикальных сил
 Figure 9 — Scheme of testing under impact load:
 1 — measuring point with a three-channel vibration sensor;
 2 — place of registration of vertical forces

На частоте 31,5 Гц также отмечается устойчивое снижение значений виброускорений от головки рельса до металлической плиты по всем видам конструкций. Превышение по сравнению с блоком «Метро» регистрируется для конструкций № 1, 3, 5, 11–13, 17, 19. Снижение наблюдается для конструкций № 2, 10.

На частоте 63 Гц значения виброускорений снижаются и наблюдаются их превышения на торце блока над значениями головки рельса у конструкций № 1 и 3. Для конструкции № 2 наблюдается снижение, а для конструкции № 7 — явное превышение по сравнению с блоком «Метро». Для остальных конструкций наблюдаются соизмеримые значения.

Также можно отметить некоторое сходство с результатами, полученными в работах [6–8].

Ударное нагружение. Ударное нагружение является частным случаем работы рельсов в районе стыковых скреплений. В лабораторных условиях ударная нагрузка имитировалась падением нагрузочного элемента на головку рельса [6–9]. Ударная установка представляет собой полую трубу, в которой размещен груз и его ограничитель. Установка и схема проведения испытаний приведены на рисунке 10.

Измерение вертикальных сил при ударном нагружении производилось с использованием тензорезисторов, размещенных на шейке рельса, и из-

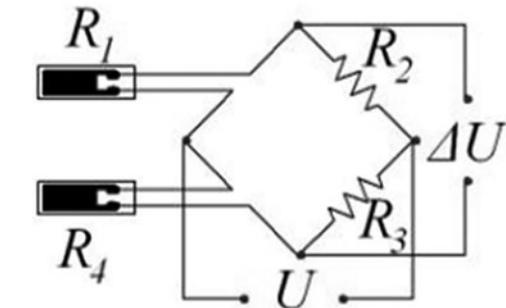
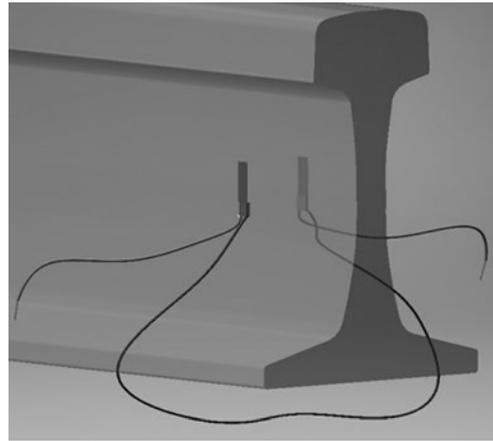


Рисунок 10 — Схема расположения тензорезисторов при регистрации вертикальных сил
 Figure 10 — Layout of the strain gauges when registering vertical forces

мерительных усилителей серии MGCplus с ПО НВМ Catman 6.0.

Согласно [10] рельсовую опору оборудуют двумя тензорезисторами, однако значения сил и характер колебаний, возникающих в рельсе, представляют не менее значимый практический интерес.

Массу нагрузочного элемента и высоту падения определяют расчетным путем, исходя из не превышения 80-процентной статической трещиностойкости рельсовой опоры в местах нахождения тензорезисторов [10].

Монтаж тензорезисторов на рельс осуществляется в соответствии с рисунком 9 [11].

Анализ динамического нагружения (рисунок 11) показывает, что максимальные усилия в рельсе возникают в конструкции блока № 1 БО-М без виброизолирующей прокладки (порядка 50–55 кН), для блока № 5 Vossloh и блока № 3 БО-М с виброизолирующей прокладкой наблюдаются соизмеримые значения (30–40 кН), а для блока «Метро» характерен более сложный спектр изменения усилия с максимальной амплитудой порядка 20–25 кН и размахом 30–40 кН.

Анализ средних значений виброускорений в октавных полосах частот по различным осям (рисунки 12–14) показывает, что полученные зависимости имеют схожий характер для всех конструкций, кроме блока БО-М без виброизолирующей про-

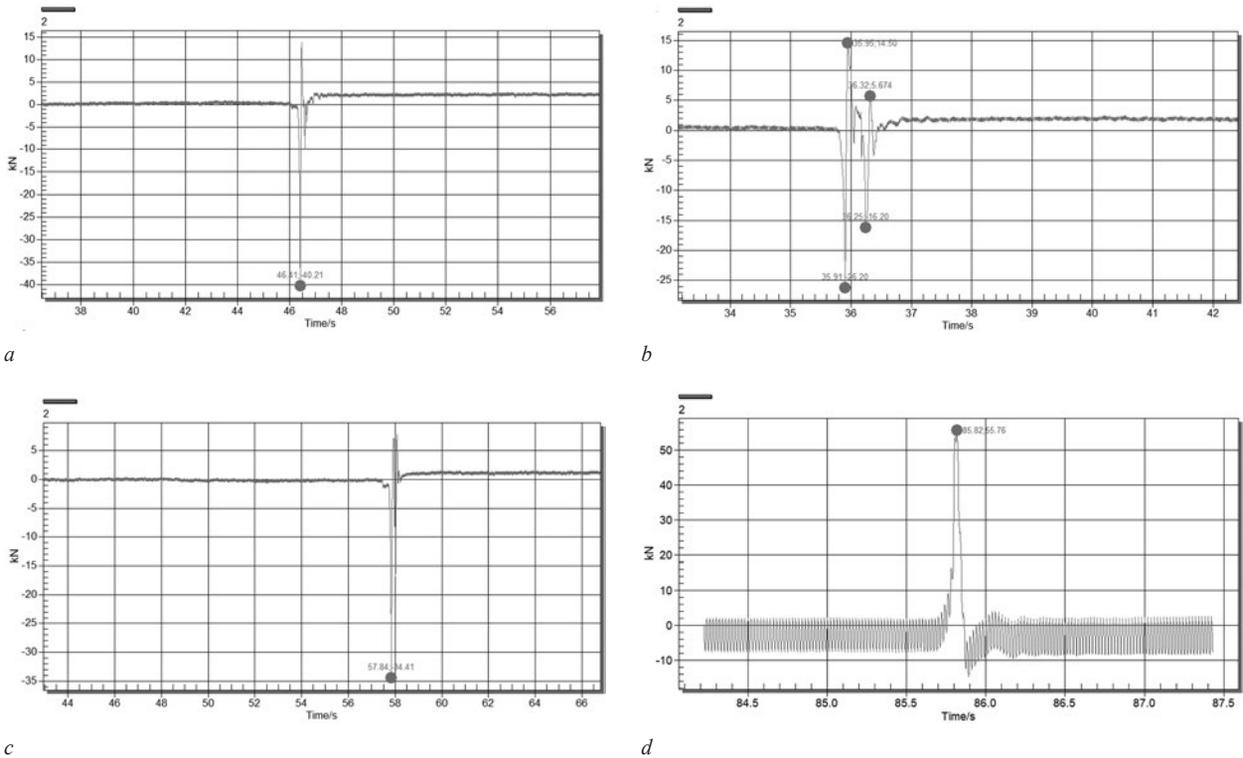


Рисунок 11 — Графики регистрации вертикальных сил: *a* — блок Vossloh; *b* — деревянная шпала со креплением типа «Метро»; *c* — блок БО-М с виброизолирующей прокладкой; *d* — блок БО-М без виброизолирующей прокладки
Figure 11 — Graphs of registration of vertical forces: *a* — Vossloh block; *b* — wooden sleeper with Metro type fastening; *c* — BO-M (BO-M) block with vibration-isolating pad; *d* — BO-M block without vibration-isolating pad

кладки. Для данной конструкции наблюдаются завышенные значения виброускорений в диапазоне частот от 2 до 8 Гц. Здесь наиболее низкие значения показывает блок LVT. Блок БО-М с виброизолирующей прокладкой имеет наибольшие значения виброускорений в диапазоне частот от 10 до 31,5 (40) Гц. В зоне более высоких частот исследуемые конструкции имеют соизмеримые значения виброускорений.

Выводы. Выполнен анализ работоспособности по критерию снижения уровня вибрации для широкого круга используемых и проектируемых конструкций верхнего строения пути для метрополитена.

Апробирована методика комплексного нагружения исследуемых конструкций как динамическим воздействием (которое является предельным случаем для эксплуатационного нагружения), так и циклическим нагружением (характерным для нормального периода эксплуатации).

Анализ динамического нагружения показывает, что максимальные усилия в рельсе возникают в конструкции блока БО-М без виброизолирующей прокладки (порядка 50–55 кН), для блока Vossloh и блока БО-М с виброизолирующей прокладкой наблюдаются соизмеримые значения (30–40 кН), а для блока «Метро» характерен более сложный спектр изменения усилия с максимальной амплитудой порядка 20–25 кН и размахом 30–40 кН.

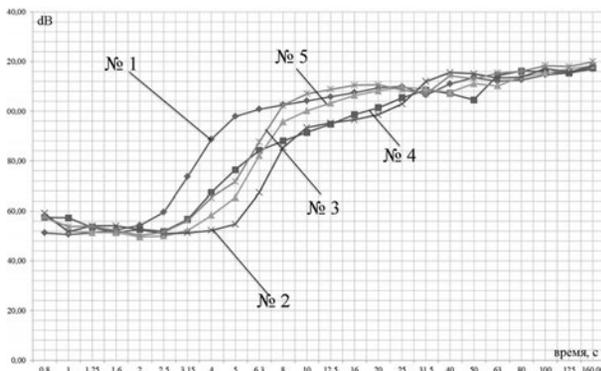


Рисунок 12 — Зависимости средних значений уровня виброускорений в конструкциях верхнего строения пути № 1–5 (ось Z)

Figure 12 — Dependences of the average values of the vibration acceleration level in the structures of the track No. 1–5 (Z axis)

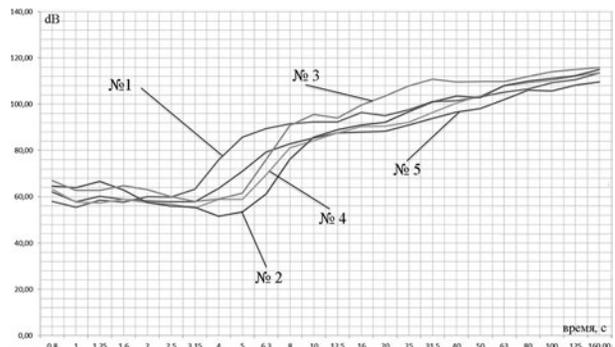


Рисунок 13 — Зависимости средних значений уровня виброускорений в конструкциях верхнего строения пути № 1–5 (ось X)

Figure 13 — Dependences of the average values of the vibration acceleration level in the structures of the track No. 1–5 (X axis)

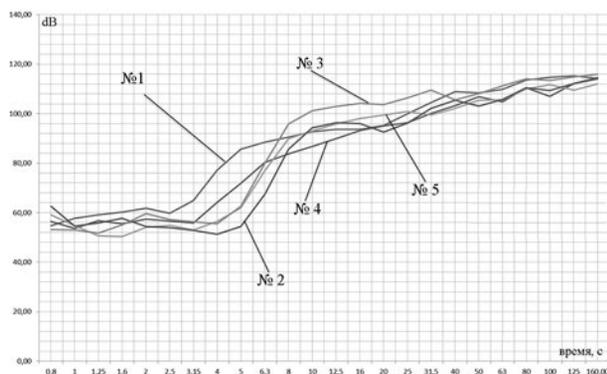


Рисунок 14 — Зависимости средних значений уровня виброускорений в конструкциях верхнего строения пути № 1–5 (ось Y)

Figure 14 — Dependences of the average values of the vibration acceleration level in the structures of the track No. 1–5 (Y axis)

Анализ средних значений уровней вибрации в октавных полосах частот по различным осям показывает, что полученные зависимости имеют схожий характер для всех конструкций, кроме блока БО-М без виброизолирующей прокладки. Для данной конструкции наблюдается завышенные значения виброускорений в диапазоне частот от 2 до 8 Гц. Здесь наиболее низкие значения показывает блок LVT. Блок БО-М с виброизолирующей прокладкой имеет наибольшие значения виброускорений в диапазоне частот от 10 до 31,5 (40) Гц. В зоне более высоких частот исследуемые конструкции имеют соизмеримые значения виброускорений.

Анализ результатов циклического нагружения показывает, что:

- в зоне 10 Гц значения виброускорений минимальны для блока БО-М с виброизолирующей прокладкой твердостью 65 по Шору А; для других конструкций наблюдается превышение данных значений по сравнению с блоком «Метро»;
- в зоне 20 Гц наблюдаются соизмеримые значения по сравнению с блоком «Метро», а для конструкций № 1–3, 9, 11–18, 20 наблюдается даже некоторое соизмеримое снижение;
- в зоне 31,5 Гц наблюдается превышение по сравнению с блоком «Метро» для конструкций № 1, 3, 5, 11–13, 17, 19; для конструкций № 2, 10 наблюдается снижение на 3–5 дБ;

- в зоне 63 Гц для конструкции № 2 наблюдается снижение, а для конструкции № 7 превышение по сравнению с блоком «Метро»; для остальных конструкций наблюдаются соизмеримые значения.

Выполненный анализ результатов исследования показывает, что используемые и проектируемые конструкции верхнего строения пути для метрополитена имеют соизмеримые показатели по критерию снижения уровня вибрации. Для вариантов конструкций, показавших лучшие результаты, необходимо провести исследования в натуральных условиях метрополитена, что позволит произвести их полную оценку по выбранным критериям и уточнить методику ускоренных лабораторных испытаний.

Список литературы

1. Современное состояние и перспективы развития конструкции пути для метрополитена / Д.И. Бочкарев [и др.] / Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 2(19). — С. 94–99.
2. Инструкция по текущему содержанию пути и контактного рельса Минского метрополитена: утв. 07.06.19. — Минск, 2019. — 196 с.
3. Шахунянец, Г.М. Железнодорожный путь: учеб. для студ. и аспирантов вузов ж.-д. транспорта / Г.М. Шахунянец. — 3-е изд., доп и перераб. — М.: Транспорт, 1987. — 479 с.
4. Инструкция по эксплуатации пути с промежуточным креплением Vossloh W21, UTS300 и содержанию контактного рельса на бетонных блоках в минском метрополитене: утв. 31.08.2020. — Минск, 2020. — 57 с.
5. Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров: СТБ ИСО 5348-2001. — Введ. 25.04.2001. — Минск: Госстандарт, 2001. — 15 с.
6. Kouroussis, G. Structural impact response for assessing railway vibration induced on buildings / G. Kouroussis, H.P. Mouzakis, K.E. Vogiatzis // Mechanics & Industry. — 2017. — Vol. 18, no. 8. — 11 p. — DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2017043>.
7. Guidelines for noise and vibrations, Metro rail transit system: СТ-38. — Ministry of Railways, India, 2015. — 94 p.
8. Vogiatzis K.E. Athens metro extension project to Piraeus ground borne noise and vibration assessment and control / K.E. Vogiatzis // International journal of mechanics. — 2012. — Vol. 6, iss. 2. — Pp. 130–139.
9. Cao, Z. Vibration measurement in a metro depot with trains running in the top story / Z. Cao, T. Guo 2, Z. Zhang // Journal of vibroengineering. — 2017. — Vol. 19, iss. 1. — Pp. 502–519. — DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17304>.
10. Крепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Общие технические условия: ГОСТ Р 59428-2021. — Введ. РФ 20.04.2021. — М.: Стандартинформ, 2021. — 28 с.
11. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: ГОСТ Р 55050. — Введ. РФ 01.07.2013. — М.: Стандартинформ, 2013, 2019. — 25 с.

KOMISSAROV Viktor V., Ph. D. in Eng.
Deputy Head of the Test Center for Railway Transport¹
E-mail: vickom@tut.by

LAPUSHKIN Artem S.
Senior Lecturer of the Department “Design, Construction and Operation of Transport Facilities”¹
E-mail: artyom.lapushkin.1992@tut.by

¹Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 15 September 2021.

COMPARATIVE ANALYSIS OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND SUPPORT BLOCKS UNDER DYNAMIC AND CYCLIC LOADING

The object of research is various designs of support blocks with intermediate fasteners for underground areas of both domestic and foreign production. An integrated approach to testing block track structures is proposed and implemented: modeling of cyclic loading typical for the entire track structure, as well as shock loading typical for intermediate butt rail fastenings. The test frequency is set to 10 Hz under cyclic loading. A method is presented for improving the testing equipment in the framework of modeling the transfer of loads from the wheel to the rail in the plane of contact between the rolling surfaces of the wheel and the rail. The main results of the tests are presented. Under dynamic loading, the maximum forces in the rail arise in a structure with a conventional pad (of the order of 50–55 kN), a more complex spectrum of force variation with a maximum amplitude of about 20–25 kN and a span of 30–40 kN is characteristic of the Metro wooden block. The lowest values of vibration accelerations in the implementation of this approach are shown by the LVT block. Structures with a vibration isolating pad have the highest vibration acceleration values in the frequency range from 10 to 31.5 (40) Hz. In the zone of higher frequencies, the investigated structures have comparable values of vibration accelerations. The analysis of vibration characteristics is carried out on the basis of the recorded values of vibration accelerations in characteristic measuring points. The values of vibration accelerations and their relative comparison are given depending on the installation position of the measuring channels and on the type of construction. It is noted that in the 10 Hz zone the values of vibration accelerations are minimal when using a vibration isolating pad with a hardness of 65 Shore A. Comparative results for frequencies of 31,5 and 63 Hz are presented. It is recommended for the design options that showed the best results to conduct operational tests in underground conditions.

Keywords: support blocks, railway track, underground, elastic elements, rolling stock, axial load, frequency, test equipment, vibration acceleration, vertical forces

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-33-40>

References

- Bochkarev D.I., Kebikov A.A., Miroshnikov N.E., Polishchuk V.P., Kazak P.M. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya konstruktivnykh puti dlya metropolitena [Modern level and future trends of metro railway constructions]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 2(19), pp. 94–99 (in Russ.).
- Instruktsiya po tekushchemu sodержaniyu puti i kontaktnogo relsa Minskogo metropolitena [Instructions for the current maintenance of the track and the contact rail of the Minsk Metro]. Minsk, 2019. 196 p. (in Russ.).
- Shakhunyants G.M. *Zhelezodorozhnyy put* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 1987. 479 p. (in Russ.).
- Instruktsiya po ekspluatatsii puti s promezhutochnym skrepleniem Vossloh i sodержaniyu kontaktnogo relsa na betonnykh blokakh v minskom metropolitene [Instructions for track operation with Vossloh intermediate fastening and for maintenance of the contact rail on concrete blocks in the Minsk Metro]. Minsk, 2020. 57 p. (in Russ.).
- Instruktsiya po ekspluatatsii puti s promezhutochnym skrepleniem Vossloh W21, UTS300 i sodержaniyu kontaktnogo relsa na betonnykh blokakh v minskom metropolitene [Instructions for the operation of the track with intermediate fastening Vossloh W21, UTS300 and the maintenance of the contact rail on concrete blocks in the Minsk metro]. Minsk, 2020. 57 p. (in Russ.).
- Kouroussis G., Mouzakis H.P., Vogiatzis K.E. Structural impact response for assessing railway vibration induced on buildings. *Mechanics and industry*, 2017, vol. 18, no. 8 Supplement. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2017043>.
- CT-38. *Guidelines for noise and vibrations. Metro rail transit system*. Ministry of Railways, India, 2015.
- Vogiatzis K.E. Athens Metro extension project to Piraeus ground borne noise and vibration assessment and control. *International journal of mechanics*, 2012, vol. 6, iss. 2, pp. 130–139.
- Cao Z., Guo T., Zhang Z. Vibration measurement in a metro depot with trains running in the top story. *Journal of vibroengineering*, 2017, vol. 19, iss. 1, pp. 502–519. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17304>.
- State Standard R 59428-2021. *Skreplenie relsovoe promezhutochnoe zhelezodorozhnogo puti. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Intermediate rail fastening of railway track. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 28 p. (in Russ.).
- State Standard R 55050. *Zhelezodorozhnyy podvizhnyy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zhelezodorozhnyy put i metody ispytaniy* [Railway rolling stock. Permissible exposure norms to the railway track and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 2019. 25 p. (in Russ.).