



Рациональный выбор параметров виброзащиты пути метрополитена



Евгений ТИТОВ
Evgeny Yu. TITOV

Сергей ХАРИТОНОВ
Sergey S. KHARITONOV



Титов Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, учёный секретарь Объединённого учёного совета ОАО «РЖД», доцент кафедры мостов и тоннелей Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Харитонов Сергей Сергеевич – аспирант кафедры мостов и тоннелей Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Rational Choice of Vibration Protection Parameters of the Metro Track

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 233)

Авторы рассматривают вопросы, связанные с выбором рациональных параметров виброзащитных конструкций верхнего строения пути метрополитена. Приведены результаты оценки способов повышения эффективности виброзащитных свойств блоков LVT-M. Даны предложения по совершенствованию методики такой оценки, которая должна в большей мере учитывать деформационные характеристики пути, конструкционные особенности тоннеля и других сооружений в метрозоне. Особый акцент сделан на важности применения материалов, динамическая жесткость которых незначительно выше статической в диапазоне исследуемых частот 2–63 Гц.

Ключевые слова: виброзащита, верхнее строение пути, метрополитен, жёсткость пути, эффективность виброизоляции.

Повышенный уровень вибраций вблизи тоннелей метрополитена мелкого заложения – одна из актуальных проблем мегаполисов [1]. Наиболее часто эта угроза возникает для жилых зданий, расположенных на расстоянии менее 40 метров до оси подземного тоннеля.

Очевидно, что на стадии проектирования мы обладаем наиболее широким спектром возможностей для решения задачи по снижению уровней вибраций, чем после ввода объектов в эксплуатацию. Применение виброзащитных конструкций в метро и подвижного состава с меньшим динамическим воздействием на путь значительно бы облегчило жизнь людям в районе жилой застройки, которая тяготеет к объектам подземной трассы.

Однако зачастую проблему приходится решать виброзащитными конструкциями непосредственно в проектах зданий, а это мешает творчеству архитекторов и увеличивает стоимость строительства, хотя экономически более выгодно минимизировать эффекты виброакустического влияния метрополитена в самом источнике вибраций.

В этом случае, искусственно снизив уровни вибраций и шума, генерируемых

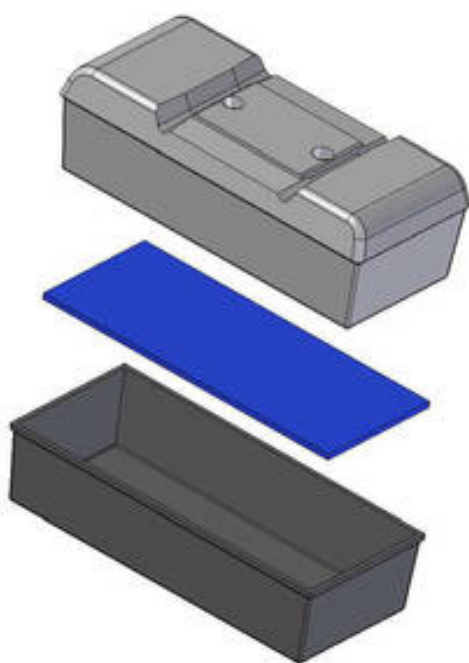


Рис. 1. Полушпалок LVT.

поездами метрополитена, для территорий вдоль трасс можно расширить возможности их использования в соответствии с современными требованиями терраэффективности [2].

То есть при прочих равных условиях более эффективным способом решения поставленной задачи является изоляция источника вибраций [8], особенно на стадии проектирования метрополитена, позволяющая уйти от необходимости в будущем искать сложные технические варианты по борьбе с транспортными вибрациями.

Надо заметить, что стоимость сооружения виброзащитной конструкции верхнего строения пути метрополитена выше стоимости сооружения типовой конструкции. Однако использование виброзащиты способствует уменьшению эксплуатационных затрат, о чём свидетельствует применение в конструкциях виброгасящих рельсовых креплений, подбалластных матов, блоков LVT и других средств. Кроме того, у города существует возможность компенсировать капитальные затраты на виброзащиту сооружений метрополитена посредством внесения в стоимость земли вблизи перегонных тоннелей разницы затрат на стандартную конструкцию верх-

него строения пути и виброзащитную с учётом большей комфортности такой земли для застройки.

Сейчас, когда зона покрытия метро мелкого заложения, а вместе с ней и зона повышенных вибраций стремительно разрастаются и есть возможность заранее подготовить территорию близ метрополитена для будущей застройки, целесообразно расширить полигон применения виброзащитных конструкций верхнего строения пути.

Существует большое количество виброзащитных средств, отвечающих современным требованиям. В частности, используются такие технологии борьбы с повышенным уровнем вибраций, как устройство виброзащитных подрельсовых прокладок, виброзащитных плит, матов и систем, состоящих из нескольких элементов [3].

Каждое средство виброзащиты имеет свою зону положительной эффективности (интервал частот колебаний, в котором виброзащита понижает уровень колебаний) и зону отрицательной эффективности (интервал частот, когда виброзащита повышает уровень колебаний или не меняет его) [9]. Наличие зоны отрицательной эффективности связано с резонансными явлениями, возникающими при совпаде-



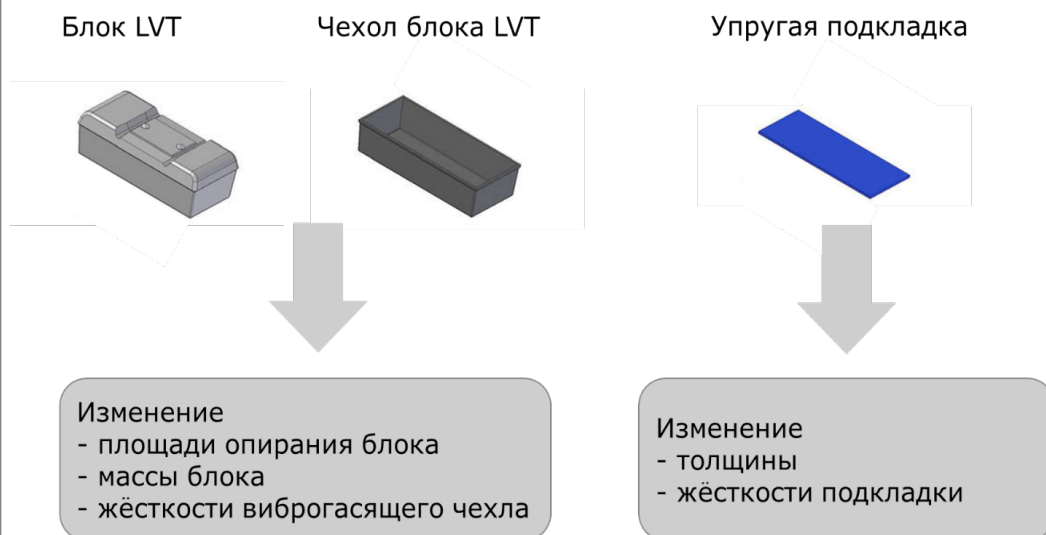


Рис. 2. Изменяемые под условия проекта элементы системы LVT.

нии частоты колебаний вынуждающей силы и собственной частоты колебаний виброзащитных средств.

При этом важно уметь адаптировать характеристики средств виброзащиты для эффективной работы в каждом из случаев.

Одной из виброзащитных систем, позволяющих в достаточно широком интервале менять и подстраивать под каждый отдельный случай свои характеристики, является верхнее строение пути типа LVT (Low Vibration Track) [4, 6]. Эта система имеет большие перспективы в отечественном метростроении, пройдя проверку на железных дорогах России (первый участок с применением технологии LVT открыт в 2011 году), она адаптирована к условиям метрополитена и уже применяется на нескольких участках в Москве и Петербурге.

LVT – безбалластная технология укладки пути, представляющая собой полушпалки, уложенные в специальные виброгасящие чехлы и замоноличенные в бетонное основание (рис. 1).

По данным, представленным московским метрополитеном [7], срок службы LVT-путей до капитального ремонта должен составить 40 лет, в то время как их содержание обойдётся на 20 % дешевле по сравнению с обслуживанием стандартных конструкций, что делает эту систему выгодной с точки зрения стоимости жизненного цикла.

Авторами проанализированы возможные случаи динамики параметров LVT на примере блоков LVT-M (модификация для метрополитена) с целью установления параметров, наиболее эффективных относительно влияния их изменения на изменение собственной частоты колебаний блока и простоты коррекции этих параметров. Расчёт предполагал и установление способности к управлению эффективностью виброзащиты для всех блоков типа LVT.

На рис. 2 представлены рассматриваемые варианты изменения параметров виброзащиты и элементы конструкции, которые они характеризуют.

Главными характеристиками для подбора конструкции элемента виброзащиты с точки зрения его реакции на динамические воздействия являются масса и динамическая жёсткость [5], поскольку именно они определяют собственную частоту колебаний (f) виброзащиты:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{Ж}{M}}, \quad (1)$$

где $Ж$ – жёсткость системы; M – масса системы.

Изменения жёсткости виброзащиты блоков типа LVT можно добиться при помощи изменения свойств материала (E – модуль упругости) и геометрии (S_0 , h) упругой подкладки под блоком:

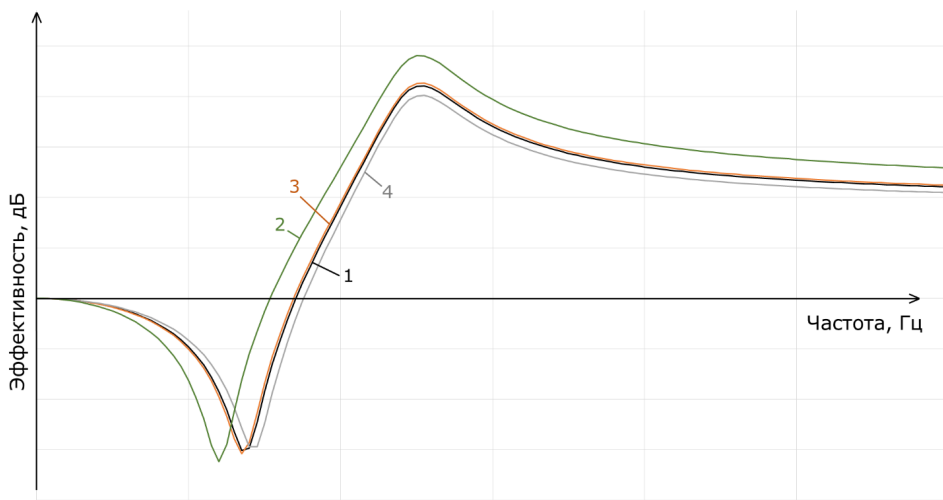


Рис. 3. Изменяемые под условия проекта элементы системы LVT:

1 – базовые параметры блока, принятые к расчёту; 2 – изменены толщина и жёсткость упругой подкладки блока LVT (толщина увеличена на 25 %, жёсткость уменьшена на 25 %); 3 – масса блока LVT увеличена на 25 %; 4 – площадь опорения блока увеличена на 25 %.

$$E = \frac{2G(1 + \mu)K_{\Phi}}{0,25}; \quad (2)$$

$$Ж = \frac{ES_o}{h}, \quad (3)$$

где S_o – опорная площадь упругого элемента со стороны рифлей (при их наличии); G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона; K_{Φ} – коэффициент формы упругого элемента.

Опирируя этими параметрами, можно добиться оптимальной эффективности применительно к конкретному случаю, так как собственная частота колебаний виброзащиты и её параметры рассеивания энергии колебаний полностью определяют передаточную функцию виброзащиты (характеристику изменения уровня вибраций в системе с виброзащитой относительно системы без неё):

$$w = 20 \cdot \log_{10} \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot k_{st} \cdot f}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot k_{st} \cdot f}{f_0}\right)^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2}, \quad (4)$$

где w – передаточная функция; k_{st} – демпфирование; f_0 – собственная частота колебаний системы; f – частота колебаний вынуждающей силы.

Можно рассматривать изменение массы блока LVT (за счёт применения раз-

личных типов бетона), изменение геометрии блока (увеличение опорной площадки блока LVT), изменение материала упругой подкладки блока и изменение толщины упругой подкладки блока. На рис. 3 показаны кривые эффективности виброзащиты w по отношению к типовой конструкции пути.

Из анализа представленных диаграмм видно, что кривые эффективности отличаются при применении различных конструкций виброзащиты не только уменьшением или увеличением уровня вибраций, но и частотами, на которых проявляются пиковые значения эффективности виброзащиты.

Следует обратить внимание и на состав частот, в которых эффективна или неэффективна виброзащита, ведь представляется возможным улучшить её работу не за счёт увеличения пикового значения эффективности, а за счёт «сдвига» кривой эффективности виброзащиты по горизонтали. Поэтому важен рациональный, обоснованный подбор параметров виброзащитных средств в каждом случае.

Наиболее эффективным по результатам проведённых расчётов показали себя изменение материала и толщины подкладки.

Ориентируясь на характеристики материала Sylomer, проведён расчёт с изме-



нением материала виброзащиты. Количественные значения не приводятся, на этом этапе используется оценка, позволяющая учесть степень разнообразия свойств существующих материалов. Так, для типовой линейки материала Sylomer, представленной на сайте производителя, модуль сдвига меняется в пределах от 0,03 до 0,9 (в 30 раз). Пропорционально G изменится E (2), а соответственно и J (3), определяющая собственную частоту колебаний.

В ходе операций максимумы отрицательной и положительной эффективности виброзащиты изменились всего лишь на 4 дБ и 1 дБ соответственно, максимум положительной эффективности увеличился на 3 дБ. На рис. 3 также видно, что в области частот выше 25 Гц эффективность виброзащиты возросла на всём отрезке рассматриваемых частот.

Очевидным является то, что уменьшение жёсткости виброзащитной системы, вследствие чего понижается собственная частота её колебаний и отдалается от частот вынуждающей колебания силы, приведёт к увеличению эффективности виброзащиты.

Однако стоит отметить, что уменьшение жёсткости и увеличение толщины подкладки под блоком LVT увеличивает деформацию пути, и излишнее необоснованное изменение этих параметров может ухудшить учитываемые показатели.

Почеркнем: проводимый расчёт служит только для оценки характера изменений эффективности виброзащитной конструкции верхнего строения пути метрополитена и не согласуется с прочими эксплуатационными характеристиками пути (допустим представленное уменьшение жёсткости подкладки или увеличение её толщины может привести к нарушению норм деформативности пути).

Выводы

Исходя из анализа вариантов рационального выбора параметров виброзащитной конструкции пути метрополите-

на, целесообразно разработать критерии и формализовать методику выбора наиболее приближенных к существующим требованиям параметров и выполнить количественные оценки для условий конкретных проектов.

Итогом должна стать методика, позволяющая учесть не только необходимость уменьшить уровень вибраций в диапазоне частот, характерном для рельсового транспорта, но и учитывать деформационные характеристики пути, особенности конструкции тоннеля и конструкций защищаемых зданий и сооружений, расположенных в зоне воздействия вибраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чучула В. Шум и механические вибрации в метрополитенах — основные проблемы // Труды I-й международной конференции «Интерметро». — М.: МИИТ, 2015. — С. 11–15.
2. Лапидус Б. М., Мачерет Д. А. Методология оценки и обеспечения эффективности инновационных транспортных систем // Экономика железных дорог. — 2016. — № 7. — С. 16–25.
3. Титов Е. Ю., Пестрякова Е. А. Виброзащитные конструкции верхнего строения пути для метрополитенов в Казани: Сборник трудов. — Астрахань, 2012. — Т. 2. — С. 68–73.
4. Екимов Н. Н. Проектирование, строительство и эксплуатация верхнего строения пути метрополитена // Труды I-й международной конференции «Интерметро». — М.: МИИТ, 2015. — С. 3–4.
5. Курбачкий Е. Н., Титов Е. Ю., Емельянова Г. А., Рысаков Г. А. Эффективность виброзащитной конструкции железнодорожного пути в тоннеле под пл. Гагарина // Вестник МИИТ. — 2004. — Вып. 11. — С. 48–53.
6. Дорот Е. В., Романчева Т. Г., Никитин С. В. Перспективы использования подрельсового основания LVT при реконструкции и строительстве пути и стрелочных переводов в метрополитене // Труды I-й международной конференции «Интерметро». — М.: МИИТ, 2015. — С. 6–9.
7. Московский метрополитен. Уровень шума на станциях московского метро снизится на 8 децибел [Электронный ресурс]: <http://www.mosmetro.ru/press/news/2061/>. Доступ 14.07.2017.
8. Титов Е. Ю., Харитонов С. С. Тенденции применения виброзащитных решений для повышения качества жизни в рамках градостроительных задач // Труды международной научно-технической конференции «Тенденции, проблемы и перспективы развития подземного строительства». — М.: МИИТ, 2016. — С. 53–57.
9. Харитонов С. С. Выбор эффективных параметров виброзащитной конструкции пути метрополитена // Безопасность движения поездов: Сборник трудов. — М.: МИИТ, 2016. — С. II-112-II-113. ●

Координаты авторов: **Титов Е. Ю.** — etitov80@gmail.com, **Харитонов С. С.** — mr.kharitonov.94@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 05.10.2016. актуализирована 18.02.2017, принята к публикации 14.07.2017.