

Дашевский М. А., д.т.н., технический директор ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА»

Мондрус В. Л., д.т.н., проф., чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой «Строительная и теоретическая механика» НИУ МГСУ

Моторин В. В., к.т.н., генеральный директор ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА»

Эффективная виброзащита верхнего строения пути метрополитена

Аннотация

В статье представлена новая эффективная конструкция верхнего строения пути метрополитена LVTM/VSP2014 в виде виброзащитной резиновой сборной оболочки VSP на полушпалах типа LVT M, включающей опорный элемент с разновысокими перфорированными выступами и ребристые боковые элементы (разработка 2014 года). Приведены спектры для обычного и виброзащитного пути (предыдущая разработки 2003 года для полушпал типа «АБВ»), а также расчетный прогноз эффективности LVTM/VSP2014 при различных нагрузках на путь (ночью и в часы «пик»). Проанализирована устойчивость вагона при движении во время прохождения кривых.

I. Введение

Статья посвящена созданию и реализации систем по снижению излучения вибрации и шума конструкцией верхнего строения пути (ВСП) метрополитена – с целью виброзащиты зданий и сооружений, расположенных в санитарной зоне метрополитена. Рассмотрена конструкция ВСП на полушпалах LVT M, снабженных сборными виброзащитными резиновыми оболочками «VSP», разработанными ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА». Система виброзащиты с применением VSP/АБВ рассмотрена в [1], с применением VSP/LVT M1 - в [2].

В качестве исходных расчетных нагрузок, одинаковых для типов ВСП на полушпалах LVT (по ГОСТ), принимаются нагрузки от четырёхосного вагона, передаваемые на путь в ночное время (до **36** пассажиров), дневное время (до **120** пассажиров) и соответствующие ГОСТ (**600 КН**, по 150 КН на каждую ось). Вес пустого вагона составляет **330 КН** (включая 2 тележки с колёсными парами – **2x75 КН**). Эпюра шпал – стандартная, **0,61 м** между осями, база нагрузок соответствует ГОСТ (база тележки между осями колесных пар – **2,1 м**, расстояние между осями внутренних пар колёс - **10,9 м**, расстояние между осями крайних колесных пар соседних вагонов – **4,0 м**, габарит вагона – **19,0 м**). Незначительные колебания в величинах этих параметров для разных вагонов не влияют на итоговую оценку виброзащитных свойств рассматриваемых конструкций ВСП.

II. Определение нагрузок на полушпалу

Вес пустого вагона с 2-мя тележками и 8-ю колесными парами: $P_0 = 330$ КН. Рельс, нагруженный сосредоточенными нагрузками от колёс и опертый на дискретно установленные полушпалы, рассматривается как балка на сплошном (усреднённом) упругом основании. На основании анализа эпюры отпора основания принято, что нагрузка от колеса распространяется на 3 полушпалы, колеблясь в зависимости от усреднённой погонной жесткости виброзащиты на расчетном участке. Эта жесткость и является коэффициентом постели в модели ВСП как бесконечной балки на упругом основании. Расчетный участок – база тележки (**2,1 м**).

Расчетные нагрузки на колесо и полушпалу:

а) **ночной вагон $P_1 = (330 \text{ КН} + 0,75 \text{ КН} \times 36 \text{ чел})/8 = 44,625 \text{ КН}$** ; нагрузка на полушпалу: $P_1^{\text{III}} = 44,625/3,0 = 14,875 \text{ КН}$; с учетом веса рельса и полушпалы $P_1^{\text{III}} = (15,3 + P_{\text{II}}) \text{ КН}$;

б) реальный дневной нагруженный вагон $P_2 = (330 \text{ кН} + 0,75 \text{ кН} \times 120 \text{ чел})/8 = 52,50 \text{ кН}$; нагрузка на полушпалу: $P_2^{\text{III}} = 52,50/3,0 = 17,50 \text{ кН}$; с учетом веса рельса и полушпалы $P_2^{\text{III}} = (17,9 + P_{\text{II}}) \text{ кН}$;

в) нормативный нагруженный вагон $P_3 = 600,00/8 = 75,0 \text{ кН}$; нагрузка на полушпалу $P_3^{\text{III}} = 75,0/3,0 = 25,0 \text{ кН}$; с учетом рельса и полушпалы $P_1^{\text{III}} = (25,4 + P_{\text{II}}) \text{ кН}$;

Предполагается, что в колебательном процессе принимают участие только неподдрессоренные массы тележек с колёсами и масса участка ВСП (рельс длиной 0,61 м, полушпала, крепление; масса участка рельса с полушпалой $m_p = 67,0 \text{ кг}$). Масса собственно вагона с пассажирами, вследствие мягкой подвески, в колебательном процессе не участвует, но вместе с тележками и колёсами является квазистатической нагрузкой для верхнего строения пути. Вес двух колеблющиеся неподдрессоренных тележек (с 4-мя колёсами каждая) $2P_T = 150 \text{ кН}$; масса, в расчете на одно колесо, $m = 150/8/9,81 = 1906,2 \text{ кг}$; масса тележки в расчете на одну полушпалу рассмотрена для случая распределения нагрузки от базы на 3 полушпалы: $m = 635,4 \text{ кг}$, с учётом массы рельса и полушпалы $LVT M m = 751,3 \text{ кг}$.

III. Система VSP – 2003 - 2013

3.1. Для решения задачи уменьшения вибрации, вызываемой движением метропоездов, в НТЦ «Вибросейсмозащита» в 2003 году была разработана конструкция виброзащитной резиновой оболочки для полушпал («VSP-2003»), предназначенная для снижения вибрации, передаваемой на тоннель верхним строением пути (ВСП) [1]. Конструкция защищена патентом РФ. Виброзащитная оболочка размещается на полушпалах из композита (разработанных фирмой «АБВ» или аналогичных), что обеспечивает точную сборку оболочки и гарантирует ее эффективную и надежную работу. Резиновая оболочка представляет собой прилегающий к полушпале нижний опорный элемент с разновысокими выступами и систему боковых ребристых элементов – пластин. Вся конструкция помещена в короб из стеклофибробетона. По результатам реализации система «VSP - 2003» была модифицирована в «VSP-2013» – разница высот выступов увеличена до 3,7 мм, увеличены длины крайних выступов и уменьшена длина среднего.

3.2. Основной принцип виброзащиты – разновысокость крайних и среднего выступов опорного элемента. В конструкции нижнего, опорного элемента были совмещены требования эффективной виброзащиты в ночное время от вертикальной вибрации и требование безопасности движения, а именно, ограничение осадки пути до $\Delta = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$ при движении поезда с максимальной временной нагрузкой по ГОСТ. С этой целью нижний опорный элемент оболочки выполняется в виде резиновой пластины толщиной 10^{-2} м с выступающими из неё тремя прямоугольными разновысокими выступами (два одинаковых крайних и один – средний – ниже крайних на $3,7 \times 10^{-3} \text{ м}$). При прохождении малонагруженного поезда ($Q_v = 60\% Q_{\text{max}}$) происходит упругая осадка только выступов бóльшей высоты - с частичной выборкой зазора $\Delta = 3,7 \times 10^{-3} \text{ м}$, чем обеспечивается минимальная динамическая жесткость и, соответственно, минимальная частота собственных колебаний верхнего строения пути. Эффективность виброзащиты при этом будет максимальной, что и требуется для обеспечения комфорта в ночное время суток. При увеличении статической нагрузки, вызванной прохождением полностью нагруженного ежедневного среднего поезда ($Q_v = 70\% Q_{\text{max}}$) в дневное время, происходит полная выборка зазора 3,7 мм и частичное сжатие среднего элемента ($\Delta_{\text{полн}} = 4,5 \times 10^{-3} \text{ м}$); полное включение в работу выступа меньшей высоты. происходит только при ситуациях, когда вагон максимально нагружен ($Q_v = 100\% Q_{\text{max}}$). Динамическая жесткость опорного элемента при этом существенно возрастет, но, в то же время, полная упругая осадка крайних выступов не превысит величины $5,0 \times 10^{-3} \text{ мм}$, предельно допустимой по условиям безопасности движения. Для этого расчетного случая, за счёт повышения жесткости опорного элемента, эффективность виброзащиты существенно

понижается, но такое снижение происходит только во время прохождения максимально нагруженных составов, с нагрузкой по ГОСТ (150 кН на ось). Виброзащиту от **горизонтальной** вибрации обеспечивают ребристые пластины, вложенные в пространство между боковыми плоскостями шпалы и бортами опорного элемента оболочки. Установленные в коробе боковые элементы с наружной стороны системой «ласточкин хвост» заделаны в путевой бетон, а на внутренней стороне имеют горизонтальные ребра трапецеидального сечения, опёртые на грани полушпалы. При воздействии горизонтальных статических и динамических нагрузок горизонтальные ребра в боковых элементах работают на сжатие, обеспечивая как эффективную защиту от вибраций горизонтального направления, так и защиту от увода пути при колебаниях. Система «ласточкин хвост» предупреждает «выползание» боковых оболочек из короба под действием вибрации. Для изготовления оболочки применяется созданная в России для целей виброзащиты резина специальной марки на основе синтетического каучука, отличающаяся повышенным затуханием колебаний и малой склонностью к старению. Резина марки ИРП 7-30-14-102 имеет твердость 48 - 52ед. (по Шору А), модули упругости «по материалу» (без учёта коэффициента формы рабочих элементов) - равновесный $E_{\infty} = 1,01$ МПа, мгновенный $E_0 = 1,836$ МПа; к-т потерь $\gamma = 0,13$ [3].

На основании результатов УКИ гарантируемый заводом – изготовителем и ООО «Вибросейсмозащита» срок службы изделия из этой резины составляет не менее 40 лет.

3.3. Эффективность реализованной виброизоляции ВСП-2003. Представленные ниже на рис. 1,2 спектры колебаний грунта вблизи трассы при прохождении одного и того же поезда по виброизолированному и обычному участкам наглядно демонстрируют эффективность виброзащитной системы «VSP». Пооктавная эффективность (усредненная по октаве) не может дать полного представления о действительной эффективности виброизоляции ВСП, так как эта эффективность в диапазоне частот 15 – 30 Гц сильно зависит от собственной частоты опорного виброизолятора и от спектра собственных частот тоннельной обделки. Правильную картину эффективности виброзащиты можно получить только с помощью реального спектра с разрешением не более 2 Гц (см. табл. 2).

Эффективность виброизоляции ВСП метрополитена по измерениям на ул. 1905 г (грунт)

Таблица 2.

Частота, Гц	Невиброизолированный путь, L дБ	Виброизолированный путь, L дБ	ΔL дБ
17 - 18	63,9	70,8	+ 6,9*
25 - 27	88,3	82,6	- 5,8**
36-38	93,5	75,4	- 18,1
48 - 50	93,8	71,8	- 22,0
65,2 –68,5	97,2	66,7	- 30,5
76	100,4	66,7	- 33,7

*Всплеск на резонансной частоте виброизолятора $f = 17,8 - 18,1$ Гц

** Первая собственная частота кольца тоннельной обделки $f = 27-28$ Гц

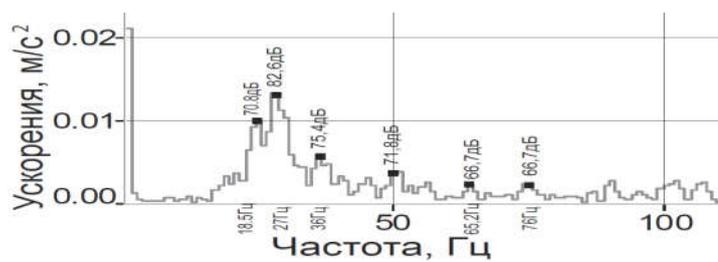


Рис. 1. Т.1. Спектр ускорения. Виброизолированный участок. Ближний поезд.

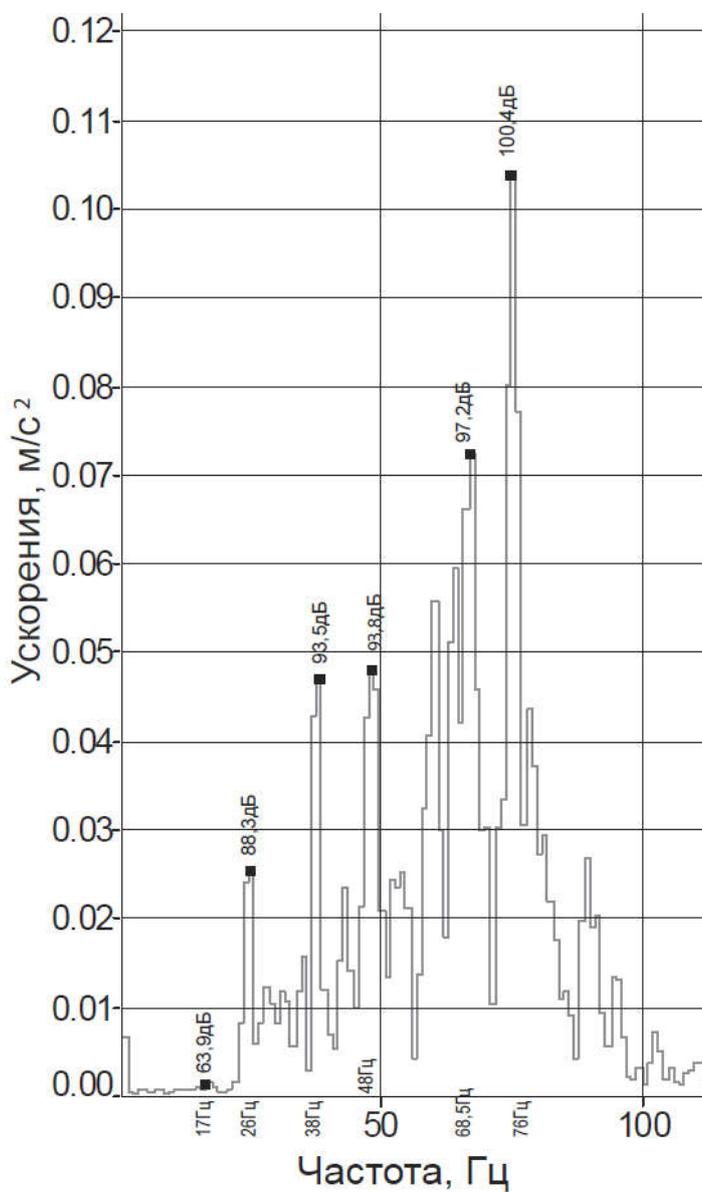


Рис. 2. Т.2. Спектр ускорения. Невиброизолированный участок. Ближний поезд.

IV. Система VSP - 2014 на полушпалах LVT-M. Корректировка системы ВСП

4.1. Конструктивное решение. применительно к полушпале LVT – М.

Основная корректировка конструкции «VSP» для полушпал типа LVT стала возможной вследствие увеличения размеров опорной поверхности полушпал и состояла в применении перфорации в опорном элементе (рис. 3). Дополнительная свободная поверхность опорного элемента снизила его динамическую жесткость и собственную частоту «VSP». Необходимость усовершенствования системы LVT/VSP М1 [2] применительно к задачам устройства виброзащиты верхнего строения пути вызвана принятием полушпал LVT-M в качестве основных. На этих полушпалах так же устанавливается система VSP в виде сборной резиновой ребристой оболочки и опорного элемента в виде трёх перфорированных разновысоких выступов, объединённых общей резиновой пластиной. Полушпала LVT М уже и длиннее полушпалы LVT М1 и не симметрична в продольном направлении, так как имеет наклон верхней плоскости по длине полушпалы и трапецевидную форму в плане, поэтому вся геометрия оболочки потребовала коррекции. В задачу корректировки входило сохранение основных функциональных параметров сборной резиновой оболочки – эффективности, технологичности монтажа и минимально возможного расхода резины.

4.2. Применение системы VSP/LVT-M для защиты от вертикальной вибрации.

Геометрия опорного элемента. На рис.3 приведены план и разрез опорного элемента «VSP» для полушпалы LVT М. Подстилающая резиновая пластина имеет трапецевидную форму в плане и размеры, аналогичные размерам основания полушпалы. Весь опорный элемент также разбивается на 3 выступа, в которых, для обеспечения деформативности резины при сжатии, предусмотрены внутренние свободные поверхности - вертикальные отверстия (перфорация). Методика расчета коэффициента формы изделия приведена в [3]. Крайние выступы (выше среднего на 4 мм) воспринимают всю нагрузку как от ночных, так и от дневных поездов, а средний выступ включается только при действии нормативной нагрузки (ГОСТ), после чего все три части работают совместно.

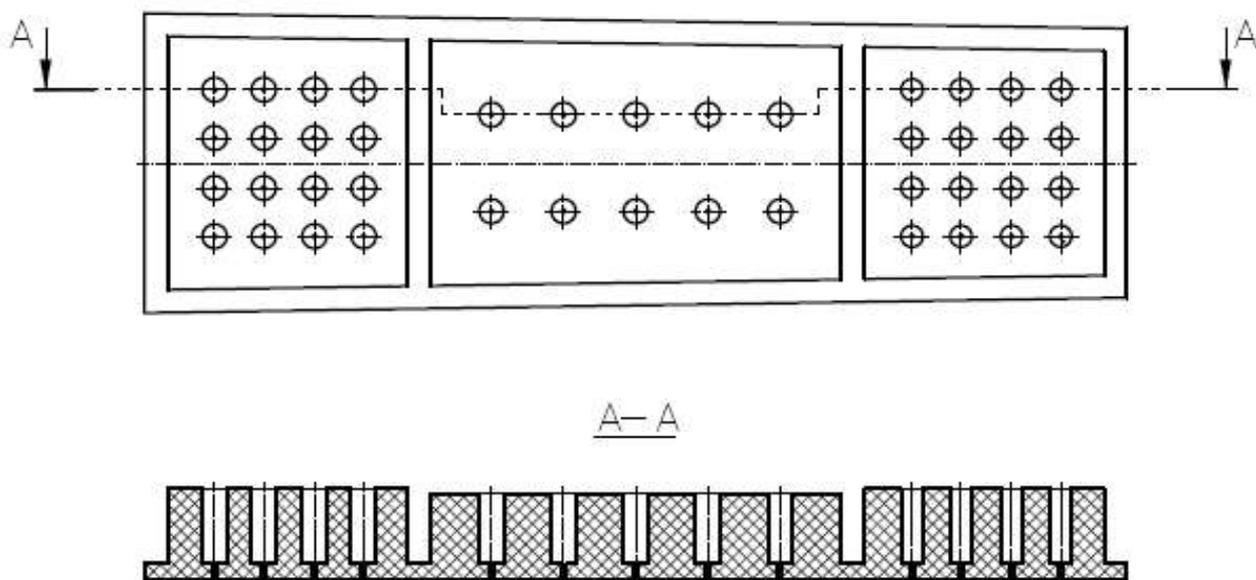


Рис. 3. Опорный элемент VSP на полушпале LVT-M

Параметры предельной (нормативной) поездной нагрузки соответствуют стандартам России: нагрузка на полушпалу от подвижного состава $P^{III} = 75\text{кН}/3,0 = 25\text{кН}$.

Предполагается, что в колебательном процессе принимают участие только неподрессоренные массы тележек с колёсами и масса участка ВСП (рельс длиной 61 см, полушпалок, крепление). Масса участка рельса с полушпалком LVT-M $m_p = 116$ кг. Масса тележки в расчете на один полушпалок составляет $m_T = 635,3$ кг; полная масса, с учётом массы рельса и полушпалка, $m_{\Pi} = 751,3$ кг.

Эффективность виброзащиты в ночное время при вертикальных колебаниях.

Нагрузка на полушпалу $P = 15035$ Н; $(F_1E_1 + F_3E_3) = 223,7 \times 4,648 \times 10^2 + 209,4 \times 4,724 \times 10^2 = 202900$ Н; $S = P/(F_1E_1 + F_3E_3) = 0,0741$; $C_{\text{дин}} = C_{(1+3)} = (F_1E_1 + F_3E_3)(S + 1)^2/H_0 = 4681677$ Н/м; масса нагруженной полушпалы для **ночного** и **дневного** поездов $m = 116 + 635,3 = 751,3$ кг; $\omega^2 = C/m = 6231,435$; $\omega = 78,94$ рад/с; $f_0 = \omega/2\pi \approx 12,6$ Гц. Эффективность виброзащиты в октаве 31,5 Гц $L = 20\lg[(31,5/f_0)^2 - 1] = 14,4$ дБ. Эффективность виброзащиты в октаве 31,5 Гц при ударе (прохождение стыка) составляет $L = 40\lg(31,5/12,6) = 15,9$ дБ. При **дневной** нагрузке (120 человек в вагоне, полная нагрузка на полушпалу 18,64 кН) зазор между выступами также не выбирается и средний выступ в работу не вступает.

4.3. Эффективность системы VSP/LVT M при защите от горизонтальной вибрации

Как и в системе VSP/LVT M1 [3], деталями системы, обеспечивающими защиту от горизонтальной вибрации, являются опорный элемент (учёт работы на сдвиг) и боковые пластины (две продольные и две поперечные, торцевые) с тремя рядами прерывистых внутренних ребер переменной высоты (см. рис. 4, 5). Полная вертикальная нагрузка на полушпалу от «ночного» поезда с учетом рельса и полушпалы $P_1 = 15,035$ кН, для «дневного» поезда $P_2 = 18,64$ кН; неподрессоренная масса с учетом рельса и полушпалы, приходящаяся на 1 полушпалу, для **ночного** и **дневного** поезда $m = 751$ кг. Свойства резины приведены в п. 3.2.

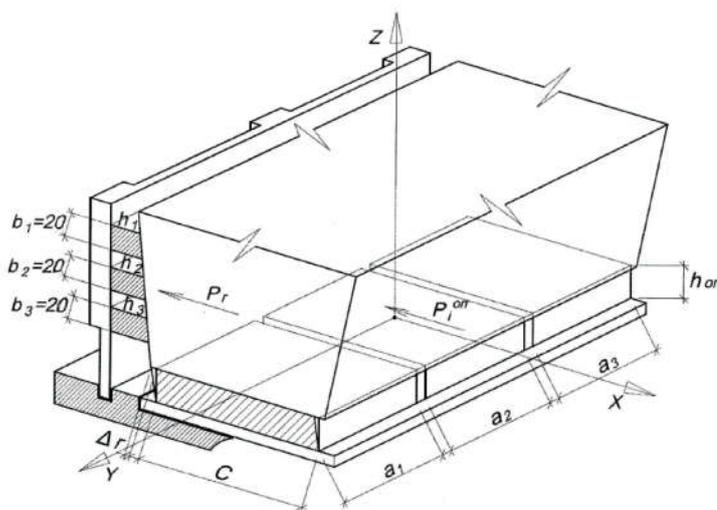


Рис. 4. Расчет полушпалы VSP/LVT M при горизонтальных колебаниях

При расчете горизонтальной жесткости оболочки учтена работа двух крайних выступов опорного элемента на сдвиг и ребер вертикальных пластин – на сжатие.

а) Жесткость **опорного** элемента на **сдвиг** при $\Delta_{x,y} = 1$ см (в «ночном» режиме работают крайние выступы) $C_{x,y}^{\text{оп}} = G_{\text{дин}}/h^{\text{оп}} \times (F_1^{\text{оп}} + F_3^{\text{оп}}) = 530,1$ кН/м.

б) Жесткость ребер, собственная частота и эффективность виброзащиты при колебаниях вдоль пути.

Вдоль пути жесткость $C_y^{сумм} = 6602 \text{ КН/м}$. Собственная частота горизонтальных колебаний $f_{01}^y = 1/2\pi * (6602000/751)^{0,5} = 14,93 \text{ Гц}$, Эффективность в октаве 31,5 Гц $L_y^{31,5} \approx 10,8 \text{ дБ}$, при ударе $L_y^{31,5} \approx 13,0 \text{ дБ}$.

в) Жесткость ребер, собственная частота и эффективность виброзащиты при колебаниях поперек пути.

Поперек пути жесткость $C_y^{сумм} = 2071 + 1782 + 530,0 = 4383 \text{ КН/м}$. Собственная частота горизонтальных колебаний $f_{01}^y = 1/2\pi * (4383000/751)^{0,5} \approx 12,2 \text{ Гц}$, Эффективность в октаве 31,5 Гц $L_y^{31,5} = 15,1 \text{ дБ}$, при ударе $L_y^{31,5} = 16,5 \text{ дБ}$.

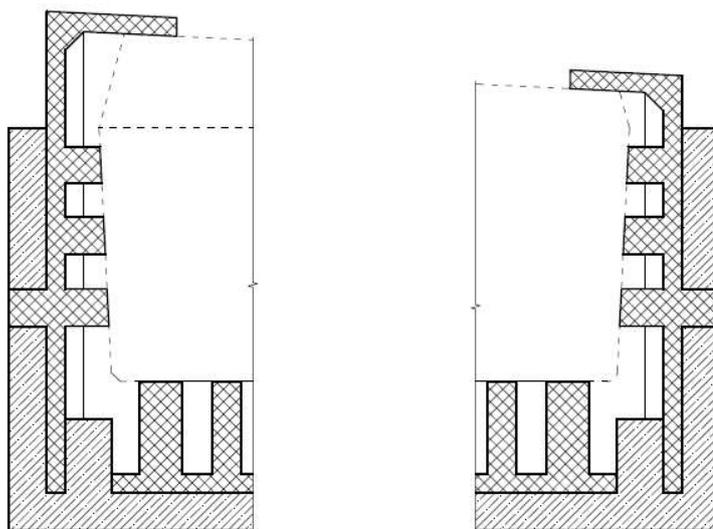


Рис. 5. Система VSP. Пластины и опорный элемент на полушпалке LVT M

Сравнительная эффективность виброзащитных систем типа «VSP»

Таблица 3

№	Тип системы	Эффективность системы в дБ		
		25 Гц	Октава 31,5 Гц	Октава 63 Гц
1	Проектный прогноз VSP/АБВ – 2003 $f_{0z} = 17,5 \text{ Гц}$	- 0,35	- 7,0	- 21,5
2	Реализация на перегоне Беговая - ул. 1905 г, ($f_{0z} = 17,8 \text{ Гц}$) с учетом резонанса тоннельной обделки на частотах 25 – 27 Гц	+ 5,7 резонанс!	- (18 – 22)	- (31,5 – 33,7)
5	Проект VSP / LVT M $f_{0z} = 12,6 \text{ Гц}$ $f_{0x} = 14,9 \text{ Гц}$ $f_{0y} = 12,2 \text{ Гц}$	- 9,7 - 5,2 - 10,1	- 14,7 - 10,8 - 15,1	- 27,9 - 24,5 - 28,2

У. Выводы и рекомендации.

5.1. Наиболее перспективной конструкцией верхнего строения пути является система LVT. Однако, эта система в варианте стандартной поставки не приспособлена к решению задачи снижения вибрации применительно к грунтовым условиям московского региона, поскольку здесь отсутствуют скальные участки и преобладают песчанно – глинистые грунты. Для таких грунтов характерно преобладание в спектре низких частот (20-40 Гц), близких к собственным частотам стандартных полушпал LVT НА и LVT М (22 – 27 Гц). Вследствие близости этих частот собственным частотам перекрытий указанные системы могут явиться **дополнительными усилителями вибрации**. Поэтому **применение** невibroизолированных полушпал LVT НА и LVT М для виброзащиты является рискованным.

5.2. На тех участках, где требуются виброзащитные мероприятия, **целесообразно применять высокоэффективную систему VSP**, реализованную в г. Москве в 2003 году на участке трассы ст. «Беговая» – ст. «Улица 1905 года», и **модифицированную для установки на системах LVT-М1 или LVT М**.

5.3. Для полного перехода к системе LVT-М1 или LVT-М с креплением рельса типа APC необходимо осуществить **комплекс проектных и научно - практических работ**, связанных с выпуском **скорректированных ТУ** на резиновые изделия модифицированных систем VSP для LVT-М/М1.

5.4. Приведенные расчеты [2] подтвердили соблюдение всех **норм СНИП 32-02-2003** (Актуализированная редакция) по устойчивости на криволинейных участках и в режиме торможения.

Литература.

1. М.А.Дашевский, Н.А.Антонов, М.В.Мамажанов, Е.М.Миронов, В.В.Моторин, Е.Д.Ройфман (НТЦ «Вибросейсмозащита»), В.В.Котов, А.Н.Насибов, В.Р.Савельева (АО Метрогипротранс), А.В.Жигарев (ТО – 6). Виброзащитная конструкция верхнего строения пути. «Тоннели и метрополитены», 2005 год, №4, стр. 41 - 43.
2. М.А.Дашевский, В.В.Моторин. Эффективная конструкция виброзащитного верхнего строения пути метрополитена. «Тоннели и метрополитены», 2015 год, №2, стр. 28 - 33.
3. М. А. Дашевский. Инженерный метод нелинейного расчета резинометаллических виброизоляторов для зданий. (Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006г.№6. стр. 37 – 41; Строительные материалы XXI века, 2006, №6, стр. 64 – 65.).