

Первая система масса — пружина на высокоскоростной линии

Образование шума при движении поезда является результатом его взаимодействия с конструкцией пути. В области борьбы с шумом проведено много исследований. Анализ полученных результатов показал, что потенциал снижения уровня шума за счет совершенствования конструкции пути еще далеко не исчерпан. Из предлагавшихся решений наибольший интерес представляет использование системы масса — пружина. Успешное сотрудничество в этой области компании Ed. Züblin и инженерного бюро Uderstädt + Partner позволило найти оптимальное решение для снижения уровня шума и вибраций, издаваемых проходящими поездами. На новой железнодорожной линии Кёльн — Рейн/Майн, где скорость движения превышает 250 км/ч, впервые применена система масса — пружина, разработанная компанией Ed. Züblin для магистральной высокоскоростной линии. Эта бесстыковая система уложена на подошве тоннеля на эластомерных опорах. Измерения показали, что в конструкции пути соблюдены самые строгие геометрические требования к жесткому основанию; кроме того, был подтвержден факт снижения корпусного шума.

Пригородные и дальние перевозки пассажиров железнодорожным транспортом быстро развиваются. Население приветствует реконструкцию действующих

и строительство новых линий, но одновременно высказывает опасение в отношении увеличения шумовых нагрузок. Мероприятия, направленные на снижение шума и

вибраций, связаны с повышенными материальными затратами. Требования об ограничении шума внесены в соответствующие документы, имеющие законодательную силу. Эти требования необходимо соблюдать и учитывать при проектировании и строительстве.

Протяженные шумозащитные стенки возводятся на всех реконструируемых и новых линиях и хорошо видны пассажирам. Устройства для защиты от вибраций, как правило, невидимы.

Защита от колебаний в наибольшей степени необходима в тоннелях мелкого заложения, проходящих под зданиями. Это относится прежде всего к новым линиям городских железных дорог и метрополитена в плотно заселенных районах или внутри городских кварталов. Снижению вибраций и шума способствует применение системы масса — пружина. Впервые она была реализована компанией Ed. Züblin на новой высокоскоростной линии Кёльн — Рейн/Майн в тоннеле города Санкт-Аугустин.

Участок новой линии

Проектирование новой линии относится к 1970-м годам, однако соответствующие согласования были начаты железными дорогами Германии (DB) только в 1990-х годах. Руководство проектом выдало инженерному бюро Uderstädt + Partner (Эссен) заказ на проведение шумо- и вибротехнических исследований для второго этапа проекта. Этот этап относился к участку линии, проходящему через Тройсдорф, Зигбург и Санкт-Аугустин. В первых двух городах проектируемая линия вписывалась в существующее путевое развитие, поэ-

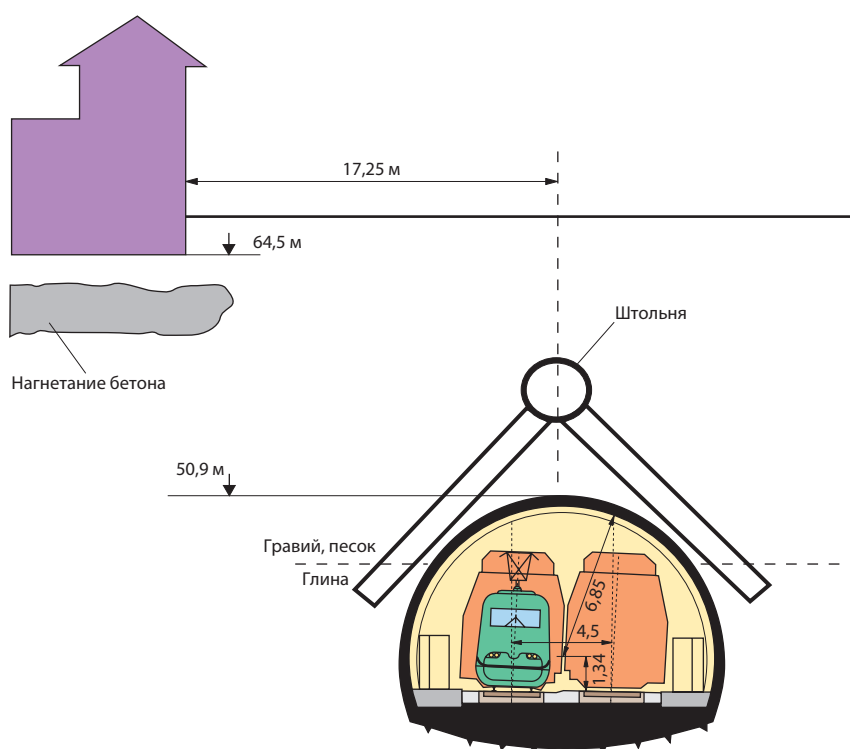


Рис. 1. Пространство с железнодорожным тоннелем под собором

тому на ней планировалось применение верхнего строения пути на щебеночном балласте. На границе между городами Зигбург и Санкт-Аугустин новая линия ответвляется на юг: отсюда начинается участок пути на жестком основании.

В г. Санкт-Аугустин было решено частично проложить путь в тоннеле, который проходит под центром города. В непосредственной близости от тоннеля находятся собор Св. Мартина и несколько жилых зданий. В этой зоне тоннель сооружался методом горной проходки. Собор является охраняемым памятником архитектуры. Поскольку его здание чувствительно к осадкам грунта, в качестве стабилизирующего мероприятия было предусмотрено нагнетание под его основание цементного раствора (рис. 1).

После утверждения проекта вновь созданная компания DB BauProjekt, вошедшая в состав холдинга железных дорог Германии, провела тендер на строительство участка пути, пересекающего г. Санкт-Аугустин. Этот заказ получила строительная компания Ed. Züblin. На нее была возложена ответственность за соблюдение установленных проектом уровней вибрации и корпусного шума.

Вибротехнические исследования

Для участка пути, проходящего через Санкт-Аугустин, как и для других участков, проектом предусматривались дополнительные вибротехнические исследования. Если для участка Тройсдорф — Зигбург базой для вибротехнических прогнозов послужили результаты измерений, проводившихся на существующем пути, то для участка, проходящего через Санкт-Аугустин, этот прогноз был чисто теоретическим. Он был дополнен результатами измерений, которые бюро Uderstädt + Partner провело в тоннеле Мюльберг на линии Ганновер — Вюрцбург.

Прогноз вибраций, полученный для пяти зданий, четыре из которых

Таблица 1

Результаты прогноза вибраций

Расположение пути	Скорость вибраций, мм/с	Коэффициент силы вибраций по стандарту DIN		Стандартные показатели вибраций в ночное время		
		Максимально допустимый	Приемлемый	A_u	A_0	A_r
Тоннель	0,09	0,05	0,005	0,1	0,6	0,06
	0,16	0,09	0,008			
	0,14	0,09	0,008			
	0,25	0,15	0,014			
Вблизи зданий	0,02	0,01	0,001	0,15	0,60	0,07

Примечание. В таблице A_u , A_0 и A_r — основные значения, принятые в стандарте DIN 4150/2.

находятся в зоне тоннеля, показал, что во всех зданиях следует ожидать выполнения основных требований стандарта DIN 4150/2. Отсюда следовало, что защитные мероприятия здесь не требуются (табл. 1).

В дополнение к вибротехническим исследованиям для пяти указанных зданий был выполнен прогноз корпусного шума. При расчетах в качестве исходного спектра L_v для участка, проходящего через Санкт-Аугустин, были приняты результаты измерений на одной из первых в Германии высокоскоростных линий Ганновер — Вюрцбург. На этой линии курсируют поезда ICE, скорость движения которых достигает 250 км/ч. Учитываемые параметры распространения колебаний и конструкции зданий приведены в табл. 2, а результаты прогнозных расчетов — в табл. 3.

Для оценки излучений корпусного шума, обусловленного подземными железнодорожными путями, не существовало законодательно установленных методов. Соответствующие стандарты DIN или рекомендации VDI также отсутство-

вали. Более 20 лет назад в связи со строительством тоннеля городской железной дороги в земле Северный Рейн-Вестфалия были приняты допустимые ориентировочные значения для уровня корпусного шума, внесенные в приложение к документу VDI 2058. Решающим показателем считался максимальный уровень шума от проезжающего поезда в ночное время. Согласно VDI 2058 он составляет $25 + 10 = 35$ дБ (A), что и было принято в соответствующем разделе проекта. Значение 35 дБ (A) выдерживается не везде, поэтому появилась необходимость предусмотреть защитные мероприятия, снижающие колебания верхнего строения пути. На основании прогнозных результатов были разработаны требования в отношении снижения уровня этих колебаний.

В диапазоне частот начиная с 40 Гц верхнее строение пути должно обеспечивать заметное ослабление колебаний. При этом следовало учитывать, что в соборе Св. Мартина регулярно проходят службы. В связи с этим его община потребовала, чтобы шум от проходящих

Таблица 2

Параметры и факторы, влияющие на прогнозные расчеты

Параметры	Учитываемые факторы	Характеристика
Передача корпусного шума	Расстояние от наружного контура тоннеля	В 19 м от собора, в 8,5 м от здания
	Тип основания и фундаментов зданий	Тоннель проходит в глине. Пути распространения: по гравию, песку, цементу фундамента церкви
Проникновение	Конструкция здания	Собор: типичная для культовых зданий архитектура, компактное основание, глубина фундамента около 1 м. Здания: этажность от 2 до 11, стены из кирпича, перекрытия из железобетона, ленточные фундаменты

Таблица 3

Результаты прогноза корпусного шума

Объекты	Максимальный уровень звукового давления, обусловленного корпусным шумом, дБ (А)	
	от	до
Собор	30	40
Общинный центр	37	42
Жилое здание на Фридрихштрассе	38	45
Жилое здание на Мартинускирхштрассе	40	45

поездов не был слышен во время служб. Кроме того, было высказано желание снизить указанное значение уровня шума до 25 дБ (А) независимо от норм Федерального бюро железных дорог Германии (ЕВА). В связи с этими обстоятельствами вопрос выбора конструкции верхнего строения пути оставался открытым.

Выбор верхнего строения пути

Дополнительно к прогнозным экспертным оценкам инженерное бюро Uderstädt + Partner в 1996 г. высказало свое мнение о мероприятиях по возможному снижению уровня колебаний, предложив различные конструкции верхнего строения пути, снижающие вибрации. Применение плоских эластомерных подбалластных матов не рассматривалось, поскольку речь шла о пути на жестком основании.

Из опыта эксплуатации городских железных дорог известно, что значительного снижения уровня шума можно достичь с помощью высокоэластичного опирания рельсов (система HES). В этой системе используются упругие рельсовые подкладки разных изготовителей. Под максимальной нагрузкой они могут сжиматься на 3–4 мм. Эти подкладки решением ЕВА допущены к ограниченному применению. Разработаны были также системы для более высокой скорости (система KES). Подкладки здесь могли сжиматься на величину до 10 мм. Применение этих систем позволяло обеспечивать уровень шума 35 дБ (А), однако возможность достижения уровня 25 дБ (А) была

практически нулевая. Кроме того, существовала сложная проблема с получением разрешения на эксплуатацию этой системы.

Кроме рассмотренных вариантов, изучалась также возможность применения системы масса — пружина (MFS) в различных исполнениях. При оптимальном выборе частоты собственных колебаний и надлежащем исполнении этой системы можно было ожидать значительного снижения вибраций. Применительно к имеющейся ситуации была рекомендована частота $f_{AB} \approx 10$ Гц. С учетом высоких требований к безопасности движения и уровню излучаемых вибраций, а также на основании накопленного опыта компания Ed. Züblin выбрала систему масса — пружина.

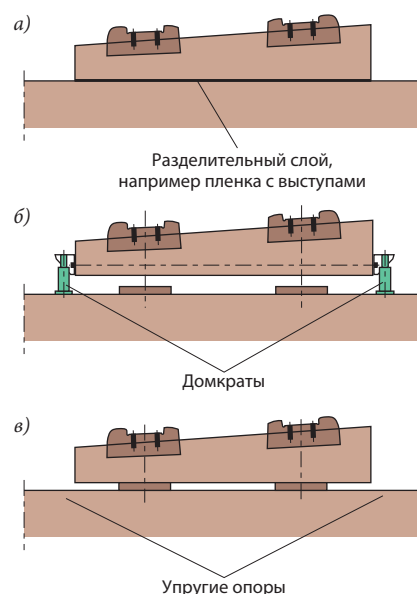


Рис. 2. Фазы монтажа системы масса — пружина:

а — изготовление несущей плиты; б — подъем плиты и укладка упругих опор; в — опускание плиты на опоры

Строительно-технические требования, выбор системы

Участок с системой масса — пружина сооружен в тоннеле Зигауэн, расположенном в переходной кривой радиусом 2380 м, в начале которой возвышение наружного рельса составляет 170 мм, а в конце — 6 мм.

При проектировании, помимо частоты 10 Гц, которая определяет массу и жесткость опор системы MFS, принимались во внимание параметры сложной трассы и скорость поездов до 250 км/ч. Основание было выполнено жестким, как и на всей высокоскоростной линии. Его высокое качество обеспечено на всем протяжении, в том числе и в зонах перехода к участкам с системой MFS. Предложенная компанией Ed. Züblin конструкция пути на жестком основании представляет собой монолитную несущую плиту без корытообразного углубления, в которой забетонированы двухблочные шпалы. С самого начала было принято, что и система MFS будет выполнена таким же образом.

При изготовлении системы MFS на упругих опорах несущую плиту бетонируют непосредственно на подошве тоннеля, проложив разделительную пленку, а затем приподнимают готовую плиту и укладывают под нее упругие опоры (рис. 2). Такой способ строительства отличается повышенной экономичностью.

Обычно система MFS состоит из отдельных либо очень коротких (длиной около 1 м), либо длинных (более 20 м) плит. На стыках плиты соединены упорами с забетонированными в основание вертикальными металлическими стержнями (для восприятия поперечных сил), которые не допускают оседания плит на различную величину. Длительность срока службы этих стержней рассматривается как критическая величина.

Состоящая из рассмотренных элементов система масса — пружина в тоннеле Зигауэн без стыков примыкает к жесткому основанию пути. Благодаря монолитной конструк-

ции устраняется не только разность деформаций в стыках (благодаря упоминавшимся ранее стержням), но и изменение вертикальных и горизонтальных нагрузок на переходах к жесткому основанию. Высокая изгибная жесткость плиты в поперечном направлении в местах ее анкеровки стержнями значительно снижает горизонтальные отклонения. Это является решающим преимуществом при высоких горизонтальных нагрузках, возникающих в тоннеле Зигауэн, а также при малых радиусах кривых, больших возвышениях и высокой скорости (до 250 км/ч). Благодаря жесткому креплению MFS по концам устраняются, кроме того, любые продольные перемещения плиты под действием температуры и процессов разгона/торможения поездов. При этом значительно снижаются напряжения в рельсах.

Следует отметить как ошибочное мнение о том, что бесстыковое присоединение MFS к пути на жестком основании создает мостик для распространения шума и, следовательно, снижает эффективность системы масса — пружина. Хотя корпусной шум действительно передается на соседние зоны через жесткое соединение, однако это справедливо только для конца участка MFS, идентичного в этом отношении не изолированному от вибраций жесткому основанию пути. При этом конец участка MFS должен быть в достаточной степени удален от критических точек шумоизлучения независимо от вида присоединения.

Планирование процесса реализации проекта

Техническим бюро компании Ed. Züblin в Штутгарте на основе предварительных измерений были назначены размеры железобетонной несущей плиты: ширина — 2,8 м (равна ширине жесткого основания в прилегающих участках), средняя толщина — 50 см (рис. 3).

В качестве опор под плиту были выбраны упругие подкладки

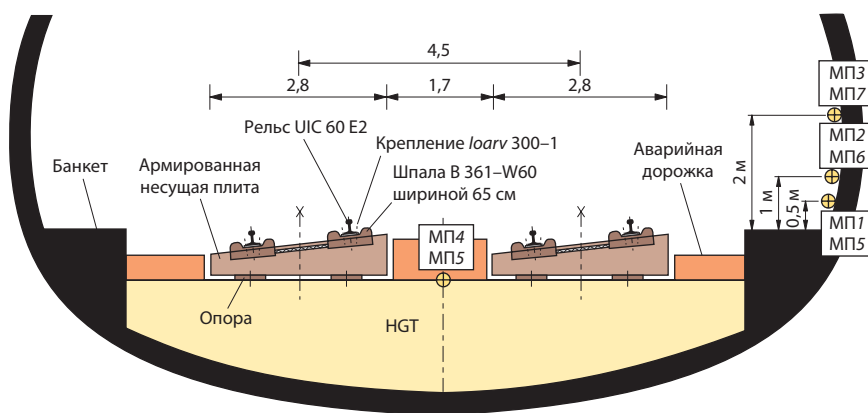


Рис. 3. Сечение системы масса — пружина компании Züblin в тоннеле

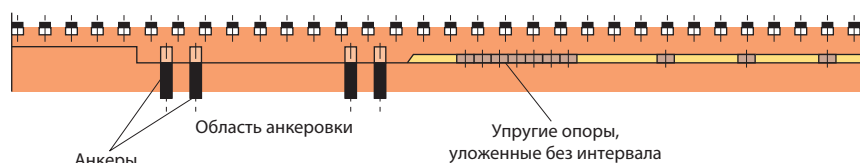


Рис. 4. Опирающие плиты в зоне перехода к жесткому основанию пути

из материала Sylodyn с размерами 500×400×80 мм, разработанные компанией GETZNER. Статическая и динамическая жесткость подкладок равнялась соответственно 10 и 14 кН/мм. Расстояние между ними составило 1,95 м в продольном направлении и 1,7 м в поперечном. Для обеспечения непрерывного перехода и снижения изгибных напряжений в плите упругие опоры на последних 5 м уложили почти без промежуточных интервалов (рис. 4). От горизонтальных опор отказались намеренно на основе результатов предварительных измерений.

В процессе проектирования требовалось обеспечить следующее:

- статическую устойчивость MFS как упруго опертой плиты под нагрузкой, равной регламентированной документом МСЖД-71 величине, умноженной на коэффициент 0,8;
- требуемые величины осадки и горизонтальных отклонений;
- надежное крепление концов плиты с учетом сил, возникающих под действием осадки, температуры, процессов разгона и торможения;
- необходимую упругость опор;
- разработку технологического процесса подъема плиты.

Расчет показал, что под действием собственной массы плиты прои-

зойдет ее осадка на 3–4 мм. Дополнительно она осядет еще на 6–7 мм под максимальной эксплуатационной нагрузкой или на 3–4 мм под нагрузкой, создаваемой поездами ICE. Расчетная осадка была учтена при проектировании и изготовлении с помощью возвышения положения пути в зоне MFS. Это возвышение от начала участка с системой MFS постепенно увеличивается до 3 мм на протяжении первых 12 м. При нормальной эксплуатации поезд ICE вкатывается на участок с системой MFS и сходит с него плавно, что было проверено предварительными расчетами.

Максимальное боковое отклонение плиты составляет примерно 8 мм с учетом ее прочности на сдвиг под действием полной нагрузки. При нормальной эксплуатации отклонение меняется на длине 37 м в пределах от 0 до 6 мм. Этими значениями подтверждается правильность отказа от горизонтальных опор.

Горизонтальные силы на концах плиты системы MFS воспринимаются примыкающими участками жесткого основания, а на остальной длине этой плиты — упругими опорами, обладающими определенной жесткостью на сдвиг. Наряду с продольными силами, вызываемыми процессами разгона и торможения, нужно

Таблица 4

Суммарный уровень звукового давления, обусловленный корпусным шумом

Место измерения	Точка измерения	Значение звукового давления, дБ (А)		
		минимальное	максимальное	среднее
Собор Св. Мартина	1	33,7	43,5	38,2
	2	24,5	33,8	28,4
Жилое здание	1	21,4	23,9	22,8
	3	26,5	32,6	30

Таблица 5

Разности суммарных уровней колебаний

Точки измерения	L_v , дБ		Значение разности	
	неподдресоренная область (FF)	MFS	абсолютное ΔL_v , дБ	относительное l , %
МП1 и МП5	68,8	57,0	11,8	74
МП2 и МП6	68,7	57,0	11,7	74
МП3 и МП7	68,9	58,8	10,1	69
МП4 и МП8	75,0	59,6	15,4	83

Примечание. Здесь $\Delta L = L_v(FF) - L_v(MFS)$; $l = (1 - 10^{-0,05L_v}) 100\%$, где FF — жесткое основание пути.

было особо учитывать силы реакций, которые обусловлены изменением длины плиты, вызываемым температурными и другими факторами.

При расчетах плита рассматривалась как находящаяся под нагрузкой бесконечно длинная балка с трещинами максимальной ширины 0,25 мм. Указанные ранее реакции внутри плиты гасятся в результате образования трещин, а некомпенсированные их величины на концах плиты системы MFS оказались меньше продольных сил, возникающих при торможении.

Оба конца плиты с системой MFS через жесткое основание соединены с подошвой тоннеля с помощью 12 анкеров, исключаящих сдвиг системы. Эти анкера диаметром 30 мм изготавливали вместе с плитами жесткого основания пути.

Суммарная сила реакций воспринимается железобетонной конструкцией MFS и жестким основанием пути, при этом рельсы дополнительных нагрузок не испытывают.

Изготовление системы масса — пружина

Работы начинались с укладки разделительной пленки на очищенную подошву тоннеля. В области будущих опор пленка имела вырезы, бетон подошвы тоннеля в этих местах разглаживали и смачивали разделяющим средством. После монтажа арматуры и установки боковой опалубки устанавливали компоненты жесткого основания пути, т. е. двухблочные шпалы и вспомогательные шины. Рельсошпальную решетку выправляли

с помощью вспомогательной рамы, располагаемой на расстоянии 1,95 м от пути. После комплектации арматуры и дополнительной тщательной проверки геометрии пути спустя сутки заливали бетоном несущую плиту длиной 50–70 м (существенная норма укладки). Бетон подавался насосом по трубопроводу.

Спустя две недели начинали подъем плиты. Предварительно к ранее забетонированным в основание анкерам крепили шесть пар стальных консолей для поддержки плиты. Расстояние между парами консолей составляло 6,85 м. После этого выполняли контролируемый подъем плиты с помощью 12 гидравлических домкратов. Каждой парой домкратов в соответствии со специальной таблицей выполняли подъем на заданную высоту ступенями не более 10 мм. Максимальная высота подъема составляла 95 мм, что вполне достаточно для укладки под плиту опор толщиной 80 мм. Опоры последовательно вдвигали сбоку. В процессе разработки инструкции по подъему плиты особое внимание обращалось на обеспечение строго плоской кривой деформаций и ограничение напряжений в арматуре пределом текучести стали. Создаваемая домкратами сила около 200 кН на практике оказалась едва достаточной, однако при этом удалось избежать чрезмерных деформаций плиты при подъеме.

Над домкратами или в области отверстий с резьбовыми втулками могли возникать небольшие изгибные трещины, однако они смыкались после опускания плиты на опоры. Это служит доказательством того, что арматура плиты при подъеме не удлинялась.

После окончания процесса подъема зоны анкерования, т. е. зазоры между концами плиты с системой MFS и жестким основанием пути, замыкались. Отверстия под анкера в подошве тоннеля подготавливали с помощью колонкового бурения. Последней рабочей операцией была укладка жесткого основания вместе с ходовыми рельсами.

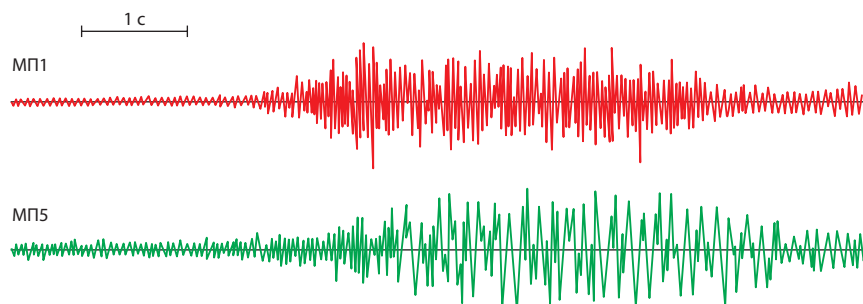


Рис. 5. Запись колебаний в точках МП1 и МП5 при проследовании поезда в тоннеле

Заключительная проверка геометрического положения пути показала незначительные отклонения от заданного положения только в некоторых местах. Необходимую корректировку осуществляли регулированием рельсовых креплений.

Проведение измерений

В 2002 г. на новой линии был введен в эксплуатацию поезд ICE, обращающийся на первом этапе в челночном режиме. С 15 декабря 2002 г. началась нормальная эксплуатация линии с интенсивностью движения 5 поездов в час. Рекламаций на превышение заданных значений колебаний и уровня шума, как и ожидалось, не последовало.

Для подтверждения достаточного вибропонижающего эффекта системы масса — пружина в начале декабря 2002 г. были выполнены метрологические исследования. Измерения проводили в двух зданиях, а затем в тоннеле при челночном движении поездов.

Измерения в зданиях

Измерения проводились в соборе Св. Мартина и жилом здании. Были установлены геофоны (датчики колебаний) и микрофоны для регистрации распространения колебаний в вертикальном направлении. В соборе одна точка измерений располагалась в среднем нефе, вторая — в ризнице. В обеих точках измеряли также уровень звукового давления в диапазоне частот 5–400 Гц. В жилом здании один геофон был установлен недалеко от фундамента, еще два и микрофон — в жилых комнатах цокольного и последнего этажей. В каждом из зданий показания всех датчиков регистрировались одновременно.

На полученной в здании собора записи колебаний выделялись отдельные пики. Однако они приходились на моменты времени, когда поезд по тоннелю не проходили. Было высказано предположение, что пики вызваны движением грузовиков по расположенному поблизости авто-

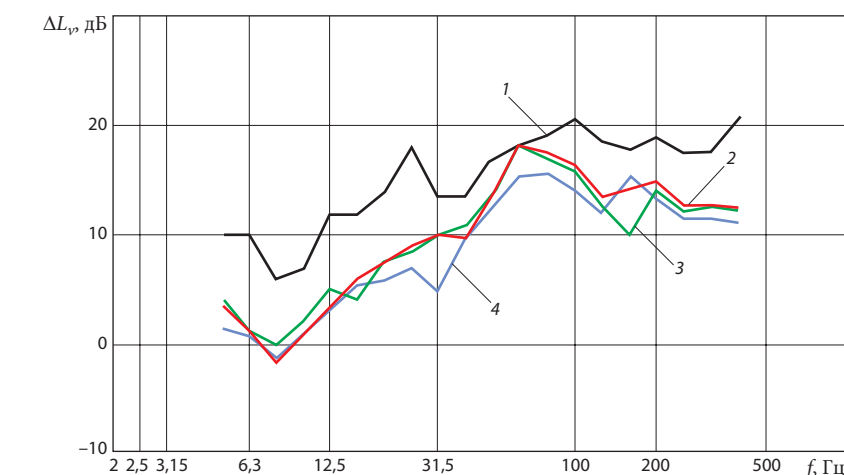


Рис. 6. Разность уровней колебаний в тоннеле при жестком основании пути и системе масса — пружина:

1 — подошва тоннеля; 2, 3, 4 — стенка тоннеля (точка измерения находится на высоте соответственно 0,5, 1 и 2 м)

бану. Это относится и к уровню шума внутри собора (табл. 4).

На записях, сделанных в жилом здании, увеличения скорости колебаний, обусловленных внешними источниками, не обнаружено. Измеренная интенсивность колебаний, воспринимаемая человеком, находилась ниже так называемого порога чувствительности и заметно ниже ориентировочного значения A_w по стандарту DIN 4150/2. Измеренные уровни звукового давления (см. табл. 4) в помещениях отражали уровень шума при закрытых окнах. Субъективно шум от железнодорожного транспорта не воспринимается. В итоге был сделан вывод, что эксплуатация поездов в новом тоннеле Зигуэн практически не вызывает вибраций в прилегающих зданиях.

Измерения в тоннеле

Измерения колебаний выполняли в двух сечениях трубы тоннеля, проходящих через систему масса — пружина и жесткое основание пути. Оба сечения находились в тоннеле, сооруженном методом горной проходки. Геофоны крепили в трех точках на стенке тоннеля (см. рис. 3) и в одной точке на его подошве.

Из записей колебаний, сделанных одновременно в двух точках при проследовании поезда (рис. 5), видно, что сигнал в неподрессо-

ванной области (точка MP1) имеет большую частоту, чем в области MFS (точка MP5).

В среднем в результате применения системы масса — пружина скорость колебаний снижается на 70–80% в диапазоне частот 4–400 Гц (табл. 5). На рис. 6 представлена разность средних (по всем проследовавшим поездам и точкам измерений) уровней колебаний при жестком основании пути и системе масса — пружина.

Выводы

Система масса — пружина компании Ed. Züblin хорошо зарекомендовала себя на линиях со скоростью движения выше 250 км/ч. Она защищает близлежащие сооружения от колебаний и корпусного шума, что подтверждено результатами измерений. Бесстыковое исполнение пути и крепление концов бетонной несущей плиты позволяют значительно снизить вертикальные и горизонтальные деформации. Кроме того, благодаря монтажу верхнего строения пути с возвышением поезда ICE в регулярном сообщении (стандартная нагрузка) вкатывается на участок с системой масса — пружина и сходит с него плавно.

По материалам компании Ed. Züblin и инженерного бюро Uderstädt + Partner.