

дежность деталей машин : межвузовский сб. научных трудов. – 1978. – № 7. – С. 3–16.

7. **Назначение** режимов резания по заданным параметрам качества поверхностного слоя : учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный. – Ярославль : РАТИ, 1978. – 87 с.

8. **СТО 22-04-02.** Руководство по отбору микропроб, проб и определению механических свойств сталей в металлических конструкциях неразрушающим методом : утв. 30.10.02. – М. : Научно-производственный консорциум «Ресурс», 2002. – 30 с.

УДК 625.46

**Н. В. Романовская, В. В. Свитин**

Петербургский государственный университет путей сообщения

## **РАСЧЕТ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ТРАМВАЙНОГО ПУТИ С УСТАНОВКОЙ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Одним из основных методов снижения вибрации в источнике его образования является виброизоляция путем установки упругих профилей на основе полиуретана. Для расчета оптимальных параметров данных вкладышей с помощью программного комплекса *Autodesk Robot* создана математическая модель. Модель построена из объемных конечных элементов и максимально приближена к реальному объекту. В модели задаются динамические и статические нагрузки, действующие на путь, и производится расчет. Разработанная математическая модель позволяет отслеживать динамическое воздействие колеса трамвая и степень демпфирования упругих материалов, окружающих рельс.

упругие профили, трамвайный рельс, конструкция трамвайных путей, динамическое воздействие.

### **Введение**

Вибрационные воздействия, обусловленные движением трамваев, могут являться существенным фактором, влияющим на комфортность проживания для жителей домов, расположенных в непосредственной близости к трамвайным путям, и на прочность строительных конструкций. Вибрация при движении трамваев передается через рельсы на верхнее строение пути и далее через грунт на окружающие постройки; она является самостоятельным источником воздействия и порождает переизлученный шум. Динамические воздействия возникают также из-за дефектов колес и рельсов, таких как неровности от торможения, ползуны, отслоение и выкрашивание металла на поверхности катания головки, вертикальное и горизонтальное расслоение головки рельса, смятие и верти-

кальный износ, волнообразные неровности на головке рельса. Решению этой проблемы уделяется внимание во всем мире.

### **1 Методы снижения шума и вибрации**

Ведущие европейские компании: *TINES* (Польша), *PDT profiles* (Германия), *Sika* (Швейцария) и различные российские компании: ЗАО «ЭЛАСТ», ГСК «Красный треугольник», ОАО «Сланцевский завод “Полимер”», ОАО «КурскРезиноТехника», ЗАО «Завод путевых конструкций» разрабатывают современные системы, позволяющие снизить уровень данного вида отрицательного воздействия от легкорельсового транспорта.

Одним из основных методов снижения шума и вибрации в источнике его образо-

вания является снижение звукоизлучения рельса и его виброизоляция. Этого можно добиться путем установки упругих профилей на основе полиуретана. Существуют два вида полиуретановых профилей для рельсов трамвайных путей: подошвенные, предназначенные для установки под подошву рельса, и боковые, предназначенные для установки в пазухе рельсов при укладке новых и ремонте старых трамвайных путей.

Для данных прирельсовых вкладышей необходимо рассчитать оптимальные параметры упругих, прочностных и геометрических характеристик, в зависимости от величины и характера воздействия сил на рельс.

## 2 Разработка математической модели

Задача решается с помощью программного комплекса *Autodesk Robot*. Модель строится из объемных конечных элементов и максимально приближена к реальному объекту (рис. 1).

Геометрические параметры модели были приняты следующие.

Модель представляет собой прямоугольный параллелепипед шириной  $B = 2,28$  м, глубиной от головки рельса  $H = 4,7$  м, длиной вдоль рельса  $L = 10$  м. Размеры модели определены конструкцией верхнего строения трамвайного пути, размерами тележки

вагона и геологическими характеристиками подстилающих грунтов. Модель включает трамвайный рельс  $Ri60$  высотой  $h_1 = 0,18$  м, железобетонную плиту толщиной  $h_2 = 0,39$  м, лежащую на упругом основании, слой щебня толщиной  $h_3 = 0,31$  м, ниже расположен слой песка  $h_4 = 1,5$  м, под ним суглинки ленточные с толщиной слоя  $h_5 = 2,50$  м.

Рельс – из стали  $S900A$ , предел прочности которой  $R = 70$  кг/мм<sup>2</sup>. Класс бетона плиты принят  $B35$ . Расчетные параметры грунтов взяты из результатов проведенных ранее изысканий и введены в программный комплекс *Robot*.

При разработке математической модели учитывается технология укладки рельса в железобетонную плиту. Упругие профили вокруг рельса и упругая подкладка под подошвой рельса не приклеиваются к бетонным поверхностям. Иными словами, упругие профили работают на сжатие при их смещении в сторону бетона и не работают на растяжение при их смещении от бетона. Учет явления «отлипания» в модели производится путем изменения свойств материала на границе между упругими профилями и бетоном.

## 3 Расчет математической модели

В математической модели конструкция, масса и геометрические параметры вагона

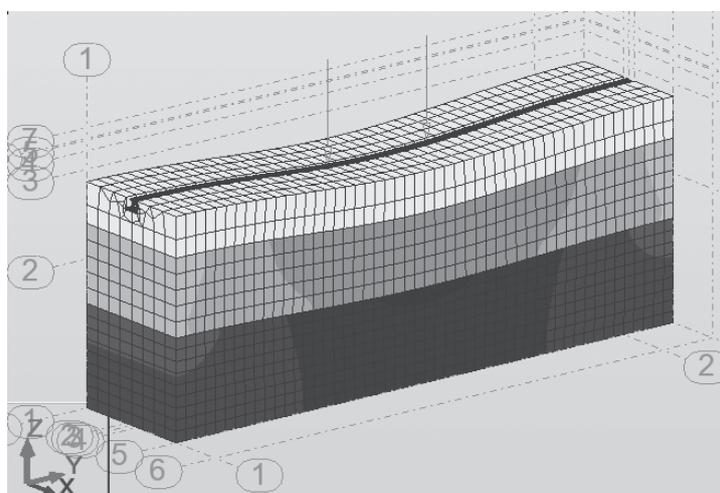


Рис. 1. Расчетная модель объекта

трамвая взяты из справочников и Интернета, величины и характер воздействий на рельс колесной пары – из отчетов по научным исследованиям кафедры «Промышленный и городской транспорт» ПГУПС.

Полученные результаты отражены в таблицах и графиках (табл. 1 и др.).

Расположение выделенных точек в сечении приведены на рис. 2.

Ниже на графиках (рис. 3, 4, 5) изображены перемещения во времени выделенных точек по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  при динамическом воздействии колеса трамвая.

На рис. 3, 4, 5 наибольшие значения амплитуды перемещений отмечены для выделенной точки № 12070, расположенной на головке рельса. Для выделенных точек в железобетонной плите, окружающих рельс, значения амплитуд значительно меньше. По данным расчета составим таблицу отношений максимальной амплитуды в точке, располо-

женной на головке рельса, к максимальным амплитудам окружающих точек (табл. 2).

Анализируя уровни амплитуд колебаний, можно сделать следующие выводы: для направления  $X$  максимальная амплитуда колебаний в точке 12070 превышает максимальные амплитуды колебаний окружающих точек в 8–9 раз; для направления  $Y$  в той же точке – в 11–30 раз; для направления  $Z$  – в 9 раз.

Анализ показывает, что колебания, идущие от рельса к точкам в железобетонной плите, резко уменьшаются (для точек на поверхности плиты колебания уменьшаются в 9 раз, для точек расположенных под подошвой рельса в железобетонной плите, колебания уменьшаются в 30 раз) за счет упругих профилей и подкладок.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния элементов железобетонной плиты при динамических и статических воздействиях представлены в табл. 3, 4.

ТАБЛИЦА 1. Собственные колебания модели

Нагружение/ собств. форма	Частота (Гц)	Период (с)	Отн. мас. $UX$ (%)	Отн. мас. $UY$ (%)	Отн. мас. $UZ$ (%)	$T_j/T_i$
3/1	3,2556	0,3072	0,0000	0,0000	84,0500	0,9964
3/2	3,2672	0,3061	0,0000	39,0343	84,0500	0,5793
3/3	5,6396	0,1773	0,0000	44,4577	84,0500	0,9403
3/4	5,9974	0,1667	0,0000	44,4578	84,0500	0,7979
3/5	7,5167	0,1330	0,0000	57,5783	84,0500	0,9581
3/6	7,8452	0,1275	0,0000	58,6158	84,0500	0,9847
3/7	7,9672	0,1255	0,0000	58,6166	84,0500	0,9414
3/8	8,4634	0,1182	0,0000	58,6166	84,0500	0,9962
3/9	8,4953	0,1177	0,0000	58,6166	84,0500	0,9191
3/10	9,2430	0,1082	0,0000	58,6167	84,0500	0,9978
3/11	9,2634	0,1080	0,0000	58,6167	84,0500	0,9390
3/12	9,8647	0,1014	1,7157	58,6167	84,0522	0,9856
3/13	10,0085	0,0999	1,7157	58,6167	84,0522	0,9759
3/14	10,2559	0,0975	1,7157	58,6167	84,0522	0,9954
3/15	10,3032	0,0971	1,7157	62,4970	84,0522	CQC

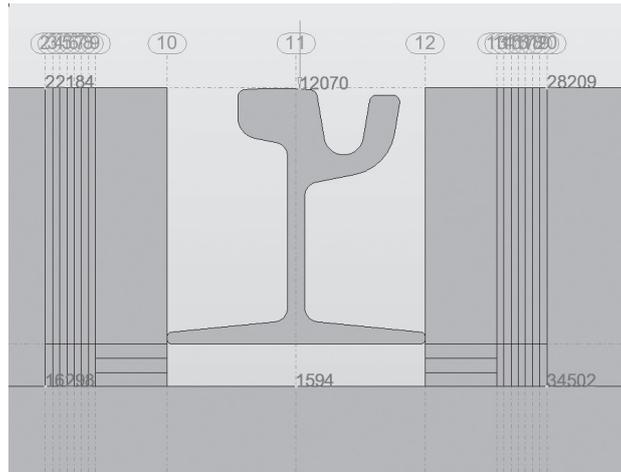


Рис. 2. Выделенные точки в сечении расчетной модели



Рис. 3. Перемещения выделенных точек по оси X во времени



Рис. 4. Перемещения выделенных точек по оси Y во времени



Рис. 5. Перемещения выделенных точек по оси Z во времени

ТАБЛИЦА 2. Отношения амплитуд колебаний

№ точки	Отношение $U_{Xmax}$ в точке 12070 к $U_{Xmax i}$		
	Ось X	Ось Y	Ось Z
22 184	9/83	1/11	4/37
28 209	5/42	2/25	1/9
1594	1/46	3/94	1/9
16 298	1/65	3/94	9/83
34 502	3/94	1/35	1/9

Сопоставление результатов позволяет заключить, что динамические воздействия (см. табл. 3) оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние элементов железобетонной плиты по сравнению со статическим воздействием (табл. 4), причем эти значения получены с учетом фиксации рельса упругими профилями и подкладкой.

## Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель позволяет отслеживать динамическое воздействие колеса трамвая и степень демпфи-

рования упругих материалов, окружающих рельс.

2. Возбуждаемые колесом трамвая колебания рельса демпфируются упругими профилями и подкладкой. Амплитуда колебаний в элементах железобетонной плиты в 8–9 (по оси X), в 11–30 (по оси Y) и в 9 (по оси Z) раз меньше амплитуды колебаний головки рельса.

3. Несмотря на демпфирующие материалы, окружающие рельс, напряженно-деформированное состояние элементов железобетонной плиты при динамических воздействиях значительно выше, чем при статической нагрузке.

4. Необходимо дальнейшее исследование характеристик упругих материалов, окружающих трамвайный рельс.

ТАБЛИЦА 3. Экстремальные напряжения и относительные деформации в элементах железобетонной плиты при динамическом воздействии

Наименование	$s_{XX}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$s_{YY}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$s_{ZZ}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$e_{XX}$	$e_{YY}$	$e_{ZZ}$	$s_{Mises}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$e_{Mises}$
МАХ	17,7466	2,2469	3,4747	0,0001	0	0	20,1557	0,0001
Твердое тело	468	440	439	468	468	468	468	468
Узел	28 209	28 209	28 209	28 209	28 209	28 209	28 209	28 209
Нагружение	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний
МИН	-15,5399	-5,9783	-3,2811	-0,0000	-0,0000	-0,0000	-0,00001	-1E-05
Твердое тело	468	440	440	468	468	468	439	439
Узел	28 209	28 209	34 502	28 209	28 209	28 209	1594	1594
Нагружение	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний	Расчет колебаний

ТАБЛИЦА 4. Экстремальные напряжения и относительные деформации в элементах железобетонной плиты при статическом воздействии

Наименование	$s_{XX}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$s_{YY}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$s_{ZZ}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$e_{XX}$	$e_{YY}$	$e_{ZZ}$	$s_{Mises}$ (кг/см <sup>2</sup> )	$e_{Mises}$
МАХ	0,3187	0,1836	0,2286	0,0000	0,0000	0,0000	4,0184	0,0000
Твердое тело	442	439	439	442	439	442	468	468
Узел	22 184	34 502	34 502	22 184	1594	22 184	28 209	28 209
Нагружение	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо
МИН	-0,8971	-3,8235	-0,1834	-0,0000	-0,0000	-0,0000	0,6640	0,0000
Твердое тело	439	440	439	439	440	439	440	439
Узел	1594	28 209	1594	1594	28 209	1594	34 502	1594
Нагружение	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо	Колесо

**Библиографический список**

1. **Информационные** материалы по применению современных конструкций верхнего строения трамвайных путей / Отчет о НИР ПГУПС [рук. Е. П. Дудкин ; исп. Ю. Г. Параскевопуло и др.]. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2006. – 87 с.
2. **Параметрическое** моделирование строительных конструкций : учеб. пособие / В. В. Свитин. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – 47 с.
3. **Разработка** моделей конструкций и сооружений : учеб. пособие / В. В. Свитин. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 85 с.
4. **Текущий** ремонт трамвайных путей / Отчет о НИР. № 318 ФГБОУ ПГУПС [под ред. М. В. Малахова ; исп. Е. П. Дудкин, Ю. Г. Параскевопуло и др.]. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения.
5. **Защита** от повышенного шума и вибрации : сб. докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (26–28 марта 2013 г., СПб.) / Под ред. Н. И. Иванова. – СПб. : Изд-во БГТУ (Военмех), 2013. – 743 с.
6. **Альбом** «Дорожные конструкции для Ленинграда» А-385-88. – СПб. : Изд-во Института «Ленгипроинжпроект», 1990. – 82 с.
7. **Альбом** типовых конструкций трамвайных путей применяемых в Санкт-Петербурге (классификация конструкций). – СПб. : Генеральная строительная корпорация, 2000. – 63 с.
8. **ГОСТ Р ИСО 14837-1-2007**. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. – Введ. 2008-10-01. – Н. Новгород : ОАО НИЦ КД, 2008. – 39 с.
9. **СП 98.13330.2012**. Свод правил. Трамвайные и троллейбусные линии. Актуализированная редакция СНиП 2.05.09.90. – Введ. 2013-01-01. – М., 2013. – 78 с.
10. **ТУ 2539-001-03222089-2011**. Профили резиновые подошвенные под рельс трамвайных путей. – Введ. 2012-03-29. – СПб. : СПБ ГУП «Горэлектротранс», 2012. – 13 с.
11. **ТУ 2539-002-03222089-2011**. Профили резиновые боковые для рельсов трамвайных путей. – Введ. 2012-03-29. – СПб. : СПБ ГУП «Горэлектротранс», 2012. – 13 с.

УДК 681.518.5:004.052.32

**Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, А. А. Блюдов**

Петербургский государственный университет путей сообщения

**ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВ БЕРГЕРА И ХЭММИНГА  
В СХЕМАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Анализируются свойства кодов Бергера и Хэмминга, применяемых при синтезе схем функционального контроля. Рассматриваются свойства данных кодов в случае искажений в информационных разрядах при безошибочности контрольных разрядов. Приводится метод построения разделимых кодов в виде таблиц, характеризующих соответствие информационных векторов контрольным. На его основании найдены и обоснованы формулы расчета числа обнаруживаемых ошибок в информационных разрядах кодов Бергера и Хэмминга. Введено два критерия оценки качества кодов в схемах функционального контроля: обнаруживающая способность и коэффициент эффективности кода. Коды Бергера и Хэмминга сравниваются по способности к обнаружению искажений в информационных векторах и эффективности в виде каталога свойств для кодов с длинами информационных векторов  $m \leq 31$ . Приводятся графики изменения обнаруживающей способности и эффективности кодов Бергера и Хэмминга при увеличении длины информационного вектора. Показано, что с увеличением числа информационных разрядов доля