Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №2, Том 6 / 2019, No 2, Vol 6 <https://t-s.today/issue-2-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS219.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS219 (<http://dx.doi.org/10.15862/15SATS219>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Пестрякова Е.А., Курбацкий Е.Н., Нгуен Ч.Т. Спектры максимальных реакций экипажей поездов на землетрясения // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №2, <https://t-s.today/PDF/15SATS219.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS219

For citation:

Pestriakova E.A., Kurbatskiy E.N., Nguyen Tr.T. (2019). Response spectra of trains to earthquakes. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS219.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/15SATS219

УДК 624.19.034.5

ГРНТИ 67.11.59

Пестрякова Екатерина Алексеевна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия
Кафедра «Мосты и тоннели»
Старший преподаватель
E-mail: Kate.pestriakova@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=898914

Курбацкий Евгений Николаевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия
Кафедра «Мосты и тоннели»
Профессор
Доктор технических наук, доцент
E-mail: Usd.miit@gmail.com

Нгуен Чонг Там

Хошиминский университет транспорта, Хошимин, Вьетнам
Зав. кафедрой «Железнодорожный путь и метрополитен»
Кандидат технических наук
E-mail: trongtam.nguyen@ut.edu.vn

Спектры максимальных реакций экипажей поездов на землетрясения

Аннотация. В настоящее время интенсивно развивается строительство железных дорог, предназначенных для пропуска высокоскоростного движения. Преодоление водных препятствий осуществляется путем строительства искусственных сооружений, таких как мосты и тоннели. Часто возникает необходимость пересечения железнодорожными линиями районов с повышенной сейсмической активностью. Что, в свою очередь, увеличивает вероятность нахождения экипажей на мостах и в тоннелях во время землетрясений. При неблагоприятных сочетаниях динамических параметров во время землетрясений могут возникнуть колебания, угрожающие безопасности движения. В связи с этим возникает необходимость оценить реакции подвижного состава на воздействия такого рода. Вертикальные и горизонтальные колебания подвижного состава при землетрясениях могут достигать больших величин, что чревато серьезными последствиями. Динамические характеристики локомотивов и вагонов имеют существенные различия. Локомотивы и вагоны могут быть различных марок, кроме

того, вагоны могут быть порожними и груженными. Параметры землетрясений, которые могут произойти в данной местности могут быть так же разнообразными.

Для решения столь сложной задачи авторами статьи используется широко используемая за рубежом, концепция спектров ответов, которая позволяет оценить реакцию объектов с различными собственными частотами на все возможные землетрясения.

Амплитудные спектры Фурье и спектры максимальных реакций в скоростях имеют одинаковые размерности. Между этими функциями существует зависимость, которая используется для построения спектров ответов, если известен амплитудный спектр Фурье функции ускорений грунта. Поэтому для построения спектров ответов экипажей на землетрясения в качестве исходных данных использовались амплитудные спектры Фурье ускорений колебаний основания.

Результаты, изложенные в статье, являются частью диссертационного исследования «Оценка динамических воздействий техногенного и природного происхождения на подводные тоннели» Пестряковой Е.А.

Ключевые слова: спектры Фурье; преобразование Фурье; спектры ответов; спектры максимальных реакций; сейсмостойкость тоннелей; колебания экипажей при землетрясениях; высокоскоростное движение; динамические воздействия

Введение

При эксплуатации железнодорожных трасс в районах с повышенной сейсмической активностью не исключена вероятность нахождения экипажей на мостах, в тоннелях, на высоких насыпях или глубоких выемках во время землетрясений. Естественно, возникает необходимость оценить реакции подвижного состава на воздействия такого рода. Воздействие землетрясений на наземные и подземные сооружения разных типов исследовалось во многих странах, где землетрясения происходят довольно часто [7; 8; 9; 10]. Это такие страны, как Япония, США, Канада и др.

На рисунке 1 представлены типичные акселерограммы, характеризующие колебания грунта и колебания элементов наземных и подземных сооружений при землетрясениях.

Рисунок 1. Примеры типичных акселерограмм колебаний (разработано автором)

Параметры землетрясений, которые могут произойти в данной местности могут быть разнообразными. Параметры колебаний верхнего строения пути на мостах, в тоннелях, на равнинной местности, в выемках и на насыпях при землетрясениях могут существенно отличаться.

Вертикальные и горизонтальные колебания локомотивов и вагонов при землетрясениях могут достигать больших величин, что чревато серьёзными последствиями. Динамические характеристики локомотивов и вагонов имеют существенные различия. Локомотивы и вагоны могут быть различных марок, кроме того, вагоны могут быть порожними и гружёнными, поэтому оценка реакций на землетрясения должна иметь обобщённый характер.

При оценке сейсмических воздействий на сооружения разного типа широко используется концепция спектров ответов (реакций) на землетрясения [1], которая может успешно использоваться и при оценке воздействия на подвижной состав.

Концепция спектров ответов позволяет оценить максимальные перемещения, максимальные скорости и ускорения экипажей при вертикальных и горизонтальных колебаниях верхнего строения пути, возникающих в результате воздействия сейсмических волн. Параметры колебаний подвижного состава при воздействии землетрясений зависят от динамических характеристики локомотивов и вагонов, а также характеристик сейсмических волн.

В качестве исходных сейсмических воздействий можно использовать акселерограммы возможных землетрясений, предлагаемых сейсмологами для данной местности [2; 3]. Будем полагать, что известна акселерограмма колебаний коренной породы при возможном землетрясении и характеристики расположенных на коренной породе поверхностных слоёв грунта. Как известно и как будет показано ниже на примере, параметры колебания слоя грунта, расположенного на коренной породе, могут существенно отличаться от параметров колебаний поверхности коренной породы.

1. Исходные данные

1.1 Характеристики грунтового массива

В качестве исходных данных воспользуемся характеристиками грунтов, представленными в научно-техническом отчёте «Предварительное определение расчетных сейсмических воздействий (акселерограмм, спектров, пиковых ускорений и макросейсмических интенсивностей колебаний грунта) на участках предполагаемого железнодорожного перехода через пролив Невельского» (таблица 1).

Для определения параметров колебаний слоистого грунтового массива при землетрясениях разработана методика расчёта для массива, состоящего из любого количества слоёв. Тем не менее, представляет интерес упрощённое решение, когда мягкие слои грунта, расположенные на жёстком коренном слое, заменяются одним с эквивалентными характеристиками. Замена нескольких слоёв грунта одним слоем с эквивалентными средневзвешенными характеристиками не приводит к большим ошибкам при определении параметров волн, распространяющихся в слоистой среде, в тех случаях, когда длины волн существенно превышают мощности слоёв.

При замене n слоёв грунта одним со средневзвешенными характеристиками скорость распространения поперечных волн определяется по формуле:

$$\tilde{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n h_i / \beta_i} \quad (1)$$

Средние значения плотностей и коэффициентов демпфирования определялись по формулам:

$$\tilde{\rho}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

Таким образом, шестислойная модель, включающая полубесконечный слой коренной породы, была представлена двухслойной моделью.

Кроме того, для каждого слоя с эквивалентными характеристиками были подсчитаны скорости распространения продольных волн, которых не было в исходной таблице. Для определения скоростей распространения продольных волн использовалась формула, определяющая соотношение между скоростями распространения продольных волн α и скоростями распространения поперечных волн β :

$$\frac{\alpha}{\beta} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (3)$$

Как следует из выражения (3) отношение продольных волн к поперечным зависит от коэффициента Пуассона. Значения коэффициентов Пуассона для разных грунтов приняты в соответствии с данными СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений.

Напомним, что скорости распространения продольных и поперечных волн в упругих средах определяются выражениями:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{и} \quad \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4)$$

λ и μ – коэффициенты Лямэ, ρ – плотность грунта.

Таблица 1

Характеристики грунтового массива

№ слоя	Грунты	Скорость поперечных волн (м/с)	Плотность (кг/м ³)	Коэффициент демпфирования	Мощность
1	Переслаивание песка мелко и тонкозернистого водонасыщенного и ила	120	1550	9,55 %	6
2	Песок среднезернистый, средне-и слабоуплотненный, водонасыщенный	180	1650	8,75 %	12
3	Переслаивание песка водонасыщенного среднезернистого с супесью	250	1720	7,16 %	14
4	Переслаивание суглинка мягкопластичного с супесью текучей	300	1850	6,37 %	25
5	Супесь пластичная с прослоями, суглинка, песка и гравия	400	1950	6,37 %	30
6	Коренные породы («скальное основание»)	1700	2300	5 %	∞

Используя выражения (1) и (2), найдём параметры двухслойного массива.

Таблица 2

Средневзвешенные характеристики грунтового массива

№ слоя	Грунты	Скорость продольных (числитель) и поперечных волн (м/с)	Плотность (кг/м ³)	Коэффициент демпфирования	Мощность
1	Поверхностный слой со средневзвешенными характеристиками	550/320	1840	8,0 %	90
2	Коренные породы («скальное основание»)	3020/1700	2300	6 %	∞

Составлено автором

1.2 Параметры сейсмического воздействия

Так как в качестве примера будет рассматриваться ж.д. трасса в районе пролива Невельского, для выбора расчётного сейсмического воздействия рассмотрим параметры двух сильных землетрясений, произошедших сравнительно недалеко от пролива Невельского:

- землетрясение в Нефтегорске с магнитудой 7.6, произошедшее на Сахалине 28 мая 1995 (глубина гипоцентра 9.0 км);
- землетрясение СНИ-СНИ с магнитудой 7.7, произошедшее на Тайване 21 сентября 1999 года (глубина гипоцентра 8,0 км).

Основные параметры, характеризующие эти землетрясения практически не отличаются. В качестве расчётного выберем землетрясение СНИ-СНИ, так как характеристики этого землетрясения можно найти в литературных источниках и в интернете¹.

¹ Center for Engineering Strong Motion Data <https://cesmd.org/>.

Функции ускорений, скоростей, перемещений и их амплитудные спектры Фурье представлены на рисунке 2. На этом же рисунке представлены пиковые значения ускорений, скоростей и перемещений.

Рисунок 2. Акселерограмма, велосиграмма, функция перемещений грунта при землетрясении CHI-CHI и их амплитудные спектры Фурье (разработано автором)

На рисунке 3 представлены спектры ответов (реакций) в ускорениях, в скоростях и перемещениях:

Рисунок 3. Графики спектров ответов при землетрясении Chi-Chi в ускорениях, скоростях и перемещениях (разработано автором)

2. Определение параметров колебания слоистого массива грунта при воздействии сейсмических волн

При определении параметров колебаний верхнего строения пути будем считать, что параметры колебаний верхнего строения пути не отличаются от параметров колебаний основания, на котором оно уложено [11; 12; 13; 14; 15]. Поэтому необходимо разработать методику и программы, позволяющие определять параметры колебаний слоистого массива по заданным ускорениям коренной породы, которые считаются заданными.

Для определения параметров волн, распространяющихся в слоистой среде, будем использовать метод, представленный в работе [4]. Кратко опишем существо метода.

Дифференциальные уравнения колебаний слоёв грунта записываются в обобщённых финитных функциях, т. е. в виде функций, которые определяют перемещения точек внутри слоя, и которые равны нулю вне слоя. При таком представлении уравнений в правых частях уравнений присутствуют граничные функции, умноженные на дельта-функции и их производные.

Применяется преобразование Фурье по двум переменным: по времени и по пространственной координате.

Определяется изображение функции перемещений, которая представляет собой частное от деления двух функций.

Так как перемещение представляет собой финитную функцию по вертикальной пространственной переменной z , изображение Фурье этой функции по теореме Винера-Пэли-Шварца [5] должно быть целой функцией. Из этого следует, что числитель должен делиться на знаменатель без остатка. Другими словами, числитель должен быть равен нулю при значениях, равных корням знаменателя. Это условие позволяет найти соотношения между функциями, описывающими условия на границах и на поверхности, которое представляется виде системы уравнений, неизвестными которой являются функции на границах слоёв.

Формируется система уравнений для всего слоистого массива. При этом учитывается, что на границах слоёв напряжения равны, а перемещения непрерывны. Напряжения на поверхности верхнего слоя принимаются равными нулю, на нижней границе нижнего слоя задаются расчётные перемещения.

2.1 Построение систем уравнений для определения параметров колебаний слоистого грунтового массива при распространении поперечных волн

Представим дифференциальное уравнение колебаний слоя грунта, мощностью h_j , при распространении поперечных волн в обобщённых финитных функциях [4]:

$$\frac{\partial^2 U_j(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\beta_{jj}^2} \frac{\partial^2 U_j(z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial u_j(0, t)}{\partial z} \delta(z) - \frac{\partial u_j(h_j, t)}{\partial z} \delta(z - h_j) + u_j(0, t) \delta'(z) - u_j(h_j, t) \delta'(z - h_j) \quad (5)$$

Для каждого слоя выберем локальные пространственные системы координат, совместив начало координат с верхней границей.

$U_j(z, t)$ – финитная функция, совпадающая с функцией $u_j(z, \omega)$ на интервале $(0, h_j)$:

$$U_j(z, t) = u_j(z, t) (\theta(z) - \theta(z - h_j)) \quad (6)$$

$$\beta_j^2 = \frac{\mu_j}{\rho_j} \quad \rho_j - \text{квадрат скорости распространения поперечных волн в } j\text{-том слое;}$$

ρ_j – плотность j -ого слоя грунта;

$\mu_j = \mu_{0j} (1 + 2\xi i)$ – комплексный модуль сдвига [6];

$\xi = \frac{\gamma}{2}$ – внутренний коэффициент демпфирования грунта;

γ – коэффициент поглощения энергии грунта.

$\delta(z - h_j)$, $\delta'(z - h_j)$ – функция Дирака и её производная.

Отметим, что касательные напряжения определяются по формуле:

$$\tau_j(z, t) = \mu_j \frac{\partial u_j(z, t)}{\partial z} \quad (7)$$

Применим к уравнению (8) преобразование Фурье по двум переменным. Выполнив необходимые алгебраические преобразования учётом выражения (7), получим:

$$\tilde{U}_j(v, \omega) = \frac{\frac{1}{\mu_j} \tau_j(0, \omega) - \frac{1}{\mu_j} \tau_j(h_j, \omega) e^{ivh_j} - ivu_j(0, \omega) + ivu_j(h_j, \omega) e^{ivh_j}}{\frac{\omega^2}{\beta_j^2} - v^2} \quad (8)$$

где $\tilde{U}_j(v, \omega)$ – изображение Фурье функции $U_j(z, t)$ по пространственной координате и по времени;

v – параметр преобразования Фурье по пространственной координате;

ω – параметр преобразования Фурье по времени (круговая частота).

Числитель этого выражения должен делиться на знаменатель без остатка (теорема Винера-Пэли-Шварца) [5]. Поэтому он должен быть равен нулю на корнях знаменателя:

$$v_{1,2} = \pm \frac{\omega}{\beta_j} \quad (9)$$

Используя эти условия для любого промежуточного слоя, можно получить по два уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu_j} \left[\tau_j(0, \omega) - \tau_j(h_j, \omega) e^{i\omega h_j / \beta_j} \right] - \frac{i\omega}{\beta_j} u_j(0, \omega) + \frac{i\omega}{\beta_j} u_j(h_j, \omega) e^{i\omega h_j / \beta_j} &= 0 \\ \frac{1}{\mu_j} \left[\tau_j(0, \omega) - \tau_j(h_j, \omega) e^{-i\omega h_j / \beta_j} \right] + \frac{i\omega}{\beta_j} u_j(0, \omega) - \frac{i\omega}{\beta_j} u_j(h_j, \omega) e^{-i\omega h_j / \beta_j} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

На дневной поверхности верхнего слоя касательные напряжения равны нулю, поэтому уравнения (10) для верхнего принимают вид:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\mu_1} \tau_1(h_1, \omega) e^{i\omega h_1/\beta_1} - \frac{i\omega}{\beta_1} u_1(0, \omega) + \frac{i\omega}{\beta_1} u_1(h_1, \omega) e^{i\omega h_1/\beta_1} &= 0 \\ -\frac{1}{\mu_1} \tau_1(h_1, \omega) e^{-i\omega h_1/\beta_1} + \frac{i\omega}{\beta_1} u_1(0, \omega) - \frac{i\omega}{\beta_1} u_1(h_1, \omega) e^{i\omega h_1/\beta_1} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Для записи уравнения для нижнего полубесконечного слоя, а вернее для полупространства, описывающее колебаний коренной породы, используется один корень

знаменателя $v_1 = -\frac{\omega}{\beta_n}$:

$$\frac{1}{\mu_n} \tau_n(0, \omega) + \frac{i\omega}{\beta_n} u_n(0, \omega) = 0 \quad (12)$$

При составлении системы уравнения учитывается, что на границах слоёв напряжения равны, а перемещения непрерывные.

$$\tau_j(0, \omega) = \tau_{(j-1)}(h_{j-1}, \omega); u_j(0, \omega) = u_{j-1}(h_{j-1}, \omega) \quad (13)$$

В качестве примера представим систему уравнений для трёхслойного массива, расположенного на коренной породе (рисунок 4).

Рисунок 4. Модель трёхслойного массива грунта (разработано автором)

Как правило, параметры колебаний поверхностного слоя превышают параметры колебаний коренной породы.

Предполагается, что на нижней границе нижнего слоя заданы напряжения, создаваемые падающей поперечной волной. Для такого массива можно записать систему, состоящую уравнений из шести уравнений с шестью неизвестными:

$$A * \bar{U} = \bar{U}_0, \quad (14)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} -i\omega / \beta_1 & i\omega / \beta_1 e^{i\omega h_1 / \beta_1} & -\frac{1}{\mu_1} e^{i\omega h_1 / \beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ i\omega / \beta_1 & -i\omega / \beta_1 e^{-i\omega h_1 / \beta_1} & -\frac{1}{\mu_1} e^{-i\omega h_1 / \beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i\omega / \beta_2 & \frac{1}{\mu_2} & i\omega / \beta_2 e^{i\omega h_2 / \beta_2} & -\frac{1}{\mu_2} e^{i\omega h_2 / \beta_2} & 0 \\ 0 & i\omega / \beta_2 & \frac{1}{\mu_2} & i\omega / \beta_2 e^{-i\omega h_2 / \beta_2} & -\frac{1}{\mu_2} e^{-i\omega h_2 / \beta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i\omega / \beta_3 & -\frac{1}{\mu_3} & \frac{1}{\mu_3} e^{i\omega h_3 / \beta_3} \\ 0 & 0 & 0 & i\omega / \beta_3 & \frac{1}{\mu_3} & \frac{1}{\mu_3} e^{i\omega h_3 / \beta_3} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\bar{U}(\omega) = \begin{pmatrix} u_1(0, \omega) \\ u_1(h_1, \omega) \\ \tau_1(h_1, \omega) \\ u_2(h_2, \omega) \\ \tau_2(h_2, \omega) \\ \tau_3(h_3, \omega) \end{pmatrix} \quad \bar{U}_0 = u_3(h_3, \omega) \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{i\omega}{\beta_3} e^{i\omega h_3 / \beta_3} \\ -\frac{i\omega}{\beta_3} e^{-i\omega h_3 / \beta_3} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Отметим такой важный факт. В реальности нижний слой является полубесконечным. Поэтому на конечный результат будут влиять волны, отражаемые от нижней границы. Но влияние этих волн на окончательный результат незначительное и кроме того, существует возможность использовать для системы уравнений уравнение полубесконечного нижнего слоя. Эта методика будет изложена при рассмотрении колебаний одного слоя на коренной породе.

Используя представленную выше методику, можно определить колебания границ грунтового массива, состоящего из любого количества слоёв. Зная колебания границ массива, можно определить спектры Фурье колебания массива на любом уровне в слое.

Для определения спектров функций перемещений грунта на любом уровне h_l внутри слоя при воздействии поперечных волн необходимо выполнить обратное преобразование Фурье, которое определяется выражением:

$$\tilde{U}_j(h_l, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_j(v, \omega) e^{-ivh_l} dv \quad (17)$$

2.2 Построение систем уравнений для определения параметров колебаний слоистого грунтового массива при распространении продольных волн

При анализе распространения продольных волн в слоистых средах используется дифференциальное уравнение колебаний слоя грунта, мощностью h_j , представленное в обобщённых финитных функциях [4]:

$$\frac{\partial^2 W_j(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha_{jj}^2} \frac{\partial^2 W_j(z, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial w_j(0, t)}{\partial z} \delta(z) - \frac{\partial w_j(h_j, t)}{\partial z} \delta(z - h_j) + w_j(0, t) \delta'(z) - w_j(h_j, t) \delta'(z - h_j) \quad (18)$$

$W_j(z, t)$ – финитная функция вертикальных перемещений частиц грунта, совпадающая с функцией $w_j(z, \omega)$ на интервале $(0, h_j)$:

$$U_j(z, t) = u_j(z, t) (\theta(z) - \theta(z - h_j)) \quad (19)$$

Предполагается, что волны распространяются вертикально.

$$\alpha_j^2 = \frac{\lambda_j + 2\mu_j}{\rho_j} \quad \text{– квадрат скорости распространения продольных волн в } j\text{-том слое;}$$

ρ_j – плотность j -ого слоя грунта;

$\mu_j = \mu_{0j}(1 + 2\xi i)$ и $\lambda_j = \lambda_{0j}(1 + 2\xi i)$ – комплексные коэффициенты Лямэ [5];

$\xi = \frac{\gamma}{2}$ – внутренний коэффициент демпфирования грунта;

γ – коэффициент поглощения энергии грунта.

Нормальные напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_j(0, t) = (\lambda_j + 2\mu_j) \frac{\partial w_j(0, t)}{\partial z} \quad (20)$$

Уравнения распространения продольных волн с точностью до обозначений совпадают с уравнениями, описывающими распространения поперечных волн. Система уравнений, для определения функций перемещений и напряжений на границах слоёв при воздействии продольных волн имеет такую же структуру, как уравнения (18), (19) и (20). В уравнениях необходимо заменить касательные напряжения на нормальные и скорости распространения поперечных волн на скорости распространения продольных волн. Кроме того, необходимо учесть наличие слоя воды.

2.3 Параметры сейсмических колебаний сложенного из песка и суглинков слоя грунта, расположенного на скальной коренной породе

На предварительном этапе исследований колебания многослойного массива грунта, сложенного из слоёв песчаного грунта и суглинков, можно оценить, заменив многослойный грунт одним слоем с эквивалентными свойствами.

Как уже было отмечено выше, шестислойная модель массива грунта, может быть заменена двухслойной. Для того чтобы исключить влияние на результат волн, отражённых от нижней границы нижнего слоя, будем использовать полубесконечный, нижний слой. В качестве исходного воздействия будем использовать параметры волн, падающих на границу полубесконечного слоя.

Рисунок 5. Модель однослойного массива грунта (разработано автором)

При составлении системы уравнений предполагается, что на верхней свободной границе напряжения равны нулю. Касательные напряжения на границе слоёв равны, а перемещения непрерывны:

$$\tilde{\tau}_1(h, \omega) = \tilde{\tau}_2(0, \omega) \text{ и } \tilde{u}_1(h, \omega) = \tilde{u}_2(0, \omega) \quad (21)$$

Учитывая равенства (21), получим систему уравнений для определения функций напряжений и перемещений на границах слоёв при падении поперечной волны на границу раздела слоёв:

$$\begin{aligned} -\frac{\tilde{\tau}_1(h, \omega)}{\mu_1} e^{i\omega h / \beta_1} - i\left(\frac{\omega}{\beta_1}\right)\tilde{u}_1(0, \omega) + i\left(\frac{\omega}{\beta_1}\right)\tilde{u}_1(h, \omega) e^{i\omega h / \beta_1} &= 0 \\ -\frac{\tilde{\tau}_1(h, \omega)}{\mu_1} e^{-i\omega h / \beta_1} + i\left(\frac{\omega}{\beta_1}\right)\tilde{u}_1(0, \omega) - i\left(\frac{\omega}{\beta_1}\right)\tilde{u}_1(h, \omega) e^{-i\omega h / \beta_1} &= 0 \\ \frac{\tilde{\tau}_1(h, \omega)}{\mu_2} + 0 + i\left(\frac{\omega}{\beta_2}\right)\tilde{u}_1(h, \omega) &= i\left(\frac{\omega}{\beta_2}\right)\tilde{u}_0(h, \omega) \end{aligned} \quad (22)$$

Где $\tilde{u}_0(h, \omega)$ – спектр перемещений, характеризующий поперечную волну, падающий на границу раздела сред.

$$\tilde{u}_1(0, \omega) = \tilde{u}_0(h, \omega) \left[\cos(\omega h / \beta_1) + i \left(\sqrt{\frac{\mu_2 \rho_2}{\mu_1 \rho_1}} \right) \sin(\omega h / \beta_1) \right] \quad (23)$$

3. Оценка спектров максимальных реакций экипажей поездов на возможное землетрясение

Как уже было отмечено выше, концепцию спектров максимальных реакций экипажей на землетрясения можно использовать при оценке колебаний поездов, находящихся в тоннелях, на насыпях в выемках, на равнинных участках и на мостах.

Для спектров максимальных реакций экипажей введем следующие обозначения:

$S_a(\omega, \xi)$ – спектр максимальных ускорений;

$S_v(\omega, \xi)$ – спектр максимальных скоростей;

$S_d(\omega, \xi)$ – спектр максимальных перемещений.

Если вместо реальных спектров ответов использовать псевдоспектры, которые незначительно отличаются реальных, можно получить простые формулы для построения спектров реакций [1].

Во-первых, существует очень полезное соотношение:

$$S_{pv}(\omega, 0) = |F[\ddot{u}_g(t)]| \quad (24)$$

где $S_{pv}(\omega, 0)$ псевдоспектр максимальных скоростей и $|F[\ddot{u}_g(t)]|$ – модуль спектра Фурье функции ускорений грунта. Кроме того, для псевдоспектров с малыми коэффициентами демпфирования можно записать следующие удобные для динамических расчётов упругих систем формулы:

$$S_d(\omega, \xi) = \frac{|F[\ddot{u}_g(t)]|}{\omega}; \quad S_{pv}(\omega, \xi) = |F[\ddot{u}_g(t)]|; \quad S_a(\omega, \xi) = \omega |F[\ddot{u}_g(t)]| \quad (25)$$

В дальнейшем, ввиду незначительной разницы между спектрами и псевдоспектрами, будем называть псевдоспектры спектрами и обозначениях опускать индекс «р».

Таким образом, для определения реакций экипажей на землетрясения необходимо знать спектры Фурье колебаний верхнего строения пути при землетрясении. На данном этапе исследований будем считать, что параметры, описывающие колебания верхнего строения пути, совпадают с колебаниями грунта, на котором оно уложено.

Зная амплитудные спектры ускорений оснований, можно найти максимальные спектры реакций экипажей в перемещениях, в скоростях и в ускорениях, применяя зависимости (24) и (25).

В представленных ниже примерах будут определяться спектры реакций на землетрясения экипажей, перемещающихся по поверхности грунта и в тоннелях. В качестве исходных сейсмических данных будем считать заданными функции ускорений на уровне коренной породы. Поэтому в первую очередь необходимо определить спектры Фурье ускорений колебаний поверхности грунта и основания тоннелей.

3.1 Пример. Спектры максимальных реакций на землетрясения экипажей

В качестве первого примера рассмотрим сейсмические воздействия на экипажи, перемещающиеся по поверхности слоя, расположенного на коренной породе (рисунок 5).

Характеристики грунтового массива представлены в таблице 2.

В качестве исходного сейсмического воздействия будем использовать акселерограмму землетрясения, произошедшего в 1999 году на Тайване. Будем полагать, что параметры колебаний верхней границы коренной породы соответствуют этому землетрясению. Акселерограмма, велосигграмма, функция перемещений грунта при землетрясении СН1-СН1 и их амплитудные спектры Фурье представлены на рисунке 2.

Спектры ответов экипажей на землетрясения представлены на рисунке 6.

Рисунок 6. Спектры максимальных реакций экипажа при землетрясении *CHI-CHI* в тоннеле и на поверхности (разработано автором)

Заключение

Представленная методика позволяет оценивать параметры максимальных реакций любых экипажей поездов на возможные сейсмические воздействия. Исходными данными являются акселерограммы, характеризующие колебания коренных пород при сейсмических воздействиях. Имеется возможность учёта влияния места расположения верхнего строения

пути: насыпи, выемки, мосты и тоннели. Для этого необходимо определить спектры колебаний оснований, на которые уложено верхнего строения пути. Спектры реакций экипажей могут быть представлены в виде спектров ответов в ускорениях, скоростях и перемещениях. Для получения численных значений максимальных реакций необходимо знать собственные частоты вертикальных и горизонтальных колебаний экипажей, отметим, что обычно собственные частоты экипажей располагаются в интервале 4–10 Гц в зависимости от типа подвижного состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курбацкий Е.Н. Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения – М. ЕАСА (Eurasian SEISMO Association): АНО «СПРОСЭКСПЕРТИЗА»: «Onebook.ru», 2018. 156 с.
2. Ghosh S.K. Trends in the seismic design provisions of U.S. building codes. PCI journal, 2001, p. 98–102.
3. Suyehiro K. A Seismic vibration analyser and the records obtained therewith. Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo 1926; 1: 59–64.
4. Курбацкий Е.Н., Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций. Дис. док. тех. наук. МИИТ, Москва, 1995. – 205 с.
5. Хургин Я.И., Яковлев В.П., Финитные функции в физике и технике. Изд. Стереотип. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. – 416 с.
6. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. – Академия строительства и архитектуры СССР. ЦНИИС строительных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
7. Yean-Seng Wu, Yeong-Bin Yang. Steady-state response и riding comfort of trains moving over a series of simply supported bridges. Engineering Structures 25, 2003, p. 251–265.
8. Sunetra Sarkar, Kartik Venkatraman. A numerical technique to predict periodic and quasi-periodic response of nonlinear dynamic systems. Computers and Structures 81, 2003, p. 1383–1393.
9. Chen Wai-Fah and Richard Liew J.Y. The civil Engineering Handbook. 2nd edition. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C. CRC Press LLC, 2003. – 2813 p.
10. Chen Wai-Fah. Structural Engineering HandBook. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. – 1650 p.
11. Krylov, V.V. On the theory of railway-induced ground vibrations / V.V. Krylov // Journ. de Physique IV. – 1994. – 4. – С. 5, 769–772.
12. Krylov, V.V. Vibrational impact of high-speed trains. I. Effect of track dynamics / V.V. Krylov // Journ. Acoust. Soc. Am. – 100 (5). – 3121–3134; erratum 1996. – 101(6), 3810.
13. Krylov, V.V. Spectra of low-frequency ground vibrations generated by highspeed trains on layered ground / V.V. Krylov // Journ. Low Frequency Noise and Vibr. – 1997. – 16(4). – P. 257–270.
14. Krylov, V.V. Generation of ground vibration boom by high-speed trains / V.V. Krylov // Noise and Vibration from High-speed Trains. Thomas Telford, London. – 2001. P. 251–283.
15. Kim, S.M. Stability and dynamic response of Rayleigh beam-columns on an elastic foundation under moving loads of constant amplitude and harmonic variation / S.M. Kim // Engineering structures. – 2005. 12 p.

Pestriakova Ekaterina Alekseevna

Russian university of transport, Moscow, Russia
E-mail: Kate.pestriakova@gmail.com

Kurbatskiy Evgeny Nikolaevich

Russian university of transport, Moscow, Russia
E-mail: Usd.miit@gmail.com

Nguyen Trong Tam

Vietnam national university, Ho Chi Minh City, Vietnam
E-mail: trongtam.nguyen@ut.edu.vn

Response spectra of trains to earthquakes

Abstract. Currently, the construction of railways for high-speed traffic is developing intensively. Overcoming water obstacles is carried out by the construction of artificial structures such as bridges and tunnels. It often becomes necessary to cross areas with increased seismic activity by rail lines. Which, in turn, increases the likelihood of crews on bridges and in tunnels during earthquakes. With adverse combinations of dynamic parameters during earthquakes, fluctuations may occur that threaten the safety of movement. In this regard, it is necessary to evaluate the response of rolling stock to the effects of this kind. Vertical and horizontal oscillations of rolling stock during earthquakes can reach large quantities, which is fraught with serious consequences. Dynamic characteristics of locomotives and cars have significant differences. Locomotives and wagons can be of different brands, in addition, wagons can be empty and loaded. The parameters of earthquakes that can occur in a given area can also be diverse.

To solve such a complex task, the authors of the article use the widely used abroad concept of response spectra, which allows to evaluate the response of objects with different natural frequencies to all possible earthquakes.

The amplitude Fourier spectra and the spectra of the maximum reactions at speeds have the same dimensions. There is a relationship between these functions, which is used to construct response spectra if the amplitude Fourier spectrum of the ground acceleration function is known. Therefore, to construct the response spectra of the crews for earthquakes, the Fourier amplitude spectra of the base oscillations were used as the initial data.

The results presented in the article are part of the dissertation research "Assessment of the dynamic effects of railway and natural origin on underwater tunnels" Pestryakova E.A.

Keywords: Fourier spectra; Fourier transform; response spectra; maximum response spectra; tunnel seismic stability; crew oscillations in earthquakes; high-speed motion; dynamic effects

REFERENCES

1. Kurbatskiy E.N. (2018). Spektry Fur'e i spektry otvetov na zemletryaseniya. [*Fourier spectra and earthquake response spectra.*] Moscow: EACA (Eurasian SEISMO Association): ANO «SROSEKSPERTIZA»: «Onebook.ru», p. 156.
2. Ghosh S.K. (2001). Trends in the seismic design provisions of U.S. building codes. *PCI journal*, pp. 98–102.
3. Suyehiro K. (1926). A Seismic vibration analyser and the records obtained therewith. *Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo*, 1, pp. 59–64.
4. Kurbatskiy E.N. (1995). Metod resheniya zadach stroitel'noy mekhaniki i teorii uprugosti, osnovanny na svoystvakh izobrazheniy Fur'e finitnykh funktsiy. [*The method of solving problems of structural mechanics and the theory of elasticity, based on the properties of Fourier images of finite functions.*] Moscow: Moscow Institute of Transportation Engineers, p. 205.
5. Khurgin Ya.I., Yakovlev V.P. (2019). Finitnye funktsii v fizike i tekhnike. [*Finite functions in physics and technology.*] Moscow: Book House "LIBROKOM", p. 416.
6. Sorokin E.S. (1960). K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem. [*On the theory of internal friction when vibrations of elastic systems.*] Moscow: Gosstroyizdat, p. 131.
7. Yean-Seng Wu, Yeong-Bin Yang (2003). Steady-state response и riding comfort of trains moving over a series of simply supported bridges. *Engineering Structures*, 25, pp. 251–265.
8. Sunetra Sarkar, Kartik Venkatraman (2003). A numerical technique to predict periodic and quasi-periodic response of nonlinear dynamic systems. *Computers and Structures*, 81, pp. 1383–1393.
9. Chen Wai-Fah, Richard Liew J.Y. (2003). *The civil Engineering Handbook. 2nd edition*. Boca Raton, London, New York, Washington: D.C. CRC Press LLC, p. 2813.
10. Chen Wai-Fah (1999). *Structural Engineering HandBook*. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. – 1650 p.
11. Krylov V.V. (1994). On the theory of railway-induced ground vibrations. *Journ. de Physique*, 4, p. 5, pp. 769–772.
12. Krylov V.V. (1996). Vibrational impact of high-speed trains. I. Effect of track dynamics. *Journ. Acoust. Soc. Am.*, 100(5), pp. 3121–3134, 101(6), pp. 3810.
13. Krylov V.V. (1997). Spectra of low-frequency ground vibrations generated by highspeed trains on layered ground. *Journ. Low Frequency Noise and Vibr.*, 16(4), pp. 257–270.
14. Krylov V.V. (2001). *Generation of ground vibration boom by high-speed trains. Noise and Vibration from High-speed Trains*. Thomas Telford, London, pp. 251–283.
15. Kim S.M. (2005). Stability and dynamic response of Rayleigh beam-columns on an elastic foundation under moving loads of constant amplitude and harmonic variation. *Engineering structures*, p. 12.