

ты системы технического диагностирования и мониторинга, производительность труда персонала, снизить влияние человеческого фактора на время восстановления, сократить задержки и простои поездов.

Кроме того, автоматизация обнаружения и устранения отказов создает предпосылки к переходу с планово-предупредительной системы технического обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию.

Библиографический список

1. **Анализ** состояния безопасности движения поездов, надежности работы систем и устройств ЖАТ в хозяйстве автоматики и телемеханики ОАО РЖД в 2009 году на соответствие требова-

ниям системы менеджмента качества. – М. : ОАО РЖД, 2010. – 156 с.

2. **Надежность** систем железнодорожной автоматики и телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, В. И. Шаманов ; ред. Вл. В. Сапожников. – М. : УМК МПС РФ, 2002. – 285 с.

3. **Поиск** отказов в устройствах СЦБ / В. Л. Лабетский, В. В. Нестеров // Автоматика, связь и информатика. – 1990. – № 12. – С. 25–28.

4. **Метод** определения технического состояния устройств железнодорожной автоматики / С. В. Бочкарев, А. А. Лыков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – Вып. 4 (33). – С. 48–55.

5. **Предупреждение** и устранение неисправностей в устройствах СЦБ / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – М. : Транспорт, 1994. – 254 с.

УДК 624.042.7

Н. В. Дурсенева, А. В. Индейкин, А. М. Уздин

Петербургский государственный университет путей сообщения

УЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАБОТУ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННОГО СООРУЖЕНИЯ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ФУНДАМЕНТАМИ

Проанализированы колебания сейсмоизолированной системы на кинематических фундаментах с учетом вертикальной компоненты сейсмического воздействия. Показано, что колебания в этом случае описываются уравнениями Матье–Хилла. Установлены зоны неустойчивости колебаний, вызванные вертикальным возбуждением, оценена величина демпфирования, обеспечивающая устойчивость движения.

сейсмоизоляция, кинематические фундаменты, вертикальное возбуждение, уравнения Матье–Хилла, устойчивость колебаний.

Введение

Кинематические сейсмоизолирующие фундаменты широко применяются для сейсмоизоляции зданий и сооружений. В бывшем СССР такие фундаменты предложены и реализованы В. В. Назиным [1], Ю. Д. Черепинским [2], А. В. Курзановым [3] и другими

специалистами. Анализ работы таких фундаментов имеется в брошюре [4] и статьях [5], [6]. В упомянутых работах отмечается, что вертикальная компонента может влиять на работу такого рода фундаментов, однако анализ колебаний здания на таких фундаментах при одновременном действии горизонтального и вертикального возмущений известен

авторам только по статье И. У. Альберта [7], в которой приведено численное решение задачи для частного случая кинематического фундамента и вида воздействия.

В настоящей работе приводится общий качественный анализ рассматриваемой задачи, устанавливаются параметры сейсмоизоляции и воздействия, при которых наличие вертикальной компоненты воздействия может приобретать решающее значение при колебаниях здания.

1 Уравнение колебаний здания на кинематических опорах

Как известно [6], при малых смещениях колебания здания на кинематических опорах описываются уравнением колебаний маятника:

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{d} \varphi = \frac{\Phi(t)}{d}, \quad (1)$$

где φ – угол поворота опоры; d – некоторая характеристика опоры, имеющая размерность длины (для подвесных фундаментов это длина подвески, для опор типа «шар в лунке» – радиус катания, для опор Курзанова – диагональ опорного элемента [4], [6]); g – ускорение силы тяжести; Φ – горизонтальное ускорение основания.

Уравнение (1) справедливо при отсутствии вертикальных колебаний. При землетрясениях вертикальные колебания сочетаются с горизонтальными и уравнение колебаний должно записываться следующим образом:

$$\ddot{\varphi} + \frac{g + \ddot{z}(t)}{d} \varphi = \frac{\Phi(t)}{d}, \quad (2)$$

где $\ddot{z}(t)$ – акселерограмма вертикальных колебаний основания сооружения.

Для качественной оценки влияния вертикальной компоненты рассмотрим гармоническое двухчастотное возмущение системы – горизонтальное с частотой ω и вертикальное с частотой α :

$$\Phi(t) = A_{\text{гор}} g \sin \omega t; \quad (3)$$

$$\ddot{z}(t) = A_{\text{верт}} g \cos \alpha t. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) $A_{\text{верт}}$, $A_{\text{гор}}$ – соответственно вертикальное и горизонтальное ускорения основания в долях ускорения силы тяжести.

С учетом принятых обозначений уравнение (2) преобразуется к виду:

$$\ddot{\varphi} + k^2(1 + A_{\text{верт}} \cos \alpha t) \varphi = k^2 A_{\text{гор}} \sin \omega t, \quad (5)$$

где k – частота колебаний системы, $k^2 = \frac{g}{L}$.

Введем безразмерное время $\tau = kt$.

Тогда

$$d\tau = k dt, \quad \dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{k d\varphi}{d\tau} = k \dot{\varphi},$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{k^2 d^2\varphi}{d\tau^2} = k^2 \ddot{\varphi}.$$

С учетом указанных преобразований уравнение (5) примет вид:

$$\ddot{\varphi} + (1 + A_{\text{верт}} \cos \chi \tau) \varphi = \sin \Omega \tau. \quad (6)$$

В уравнении (6)

$$\chi = \frac{\alpha}{k}, \quad \Omega = \frac{\omega}{k}.$$

Полученное уравнение относится к неоднородным уравнениям Матье.

Соответствующее однородное уравнение имеет вид:

$$\ddot{\varphi} + (L + 2q \cos \chi \tau) \varphi = 0. \quad (7)$$

В нашем случае $L = 1$ и $2q = A_{\text{верт}}$, а левая часть уравнения (6) совпадает с левой частью уравнения (7). Уравнение Матье хорошо изучено и описано в литературе [8]. Анализ уравнения (7) позволяет определить области динамической неустойчивости системы без учета сопротивления.

2 Построение границ зон неустойчивости

Известно, что характер решений уравнения (7) зависит от соотношения безразмерных коэффициентов L и q , которые определяют устойчивость движения. Плоскость изменения этих коэффициентов может быть разделена на области, соответствующие устойчивым (ограниченным) и неустойчивым (бесконечно возрастающим) решениям уравнения (7), т. е. устойчивым и неустойчивым движениям. Границам между зонами устойчивости и неустойчивости соответствуют периодические решения уравнения (7), т. е. периодические колебания системы.

По методике, описанной в [9], авторами выполнено построение приближенных границ первой, наиболее важной, зоны неустойчивости. При этом в систему введено вязкое трение и рассмотрено уравнение вида

$$\ddot{\phi} + \gamma\dot{\phi} + (1 + A_{\text{верт}} \cos \chi\tau)\phi = 0,$$

где γ – коэффициент неупругого сопротивления.

На рисунке 1 показаны приближенные границы первой области неустойчивости при $\gamma = 0$ и $\gamma = 0,2$, а также точки, соответствующие значениям $A_{\text{верт}} = 0,4$ и $A_{\text{верт}} = 0,2$.

Таким образом, становится очевидным, что во время землетрясений при определенных динамических параметрах сооружения возможно явление параметрического резонанса, т. е. ситуация, когда решения уравнения (5) попадают в зону динамической неустойчивости и амплитуда колебаний неограниченно возрастает с течением времени.

Но сейсмические воздействия на сооружения ограничены по времени, поэтому возникает вопрос, до каких значений возрастет амплитуда колебаний за это время и будет ли угрожать безопасности сооружения.

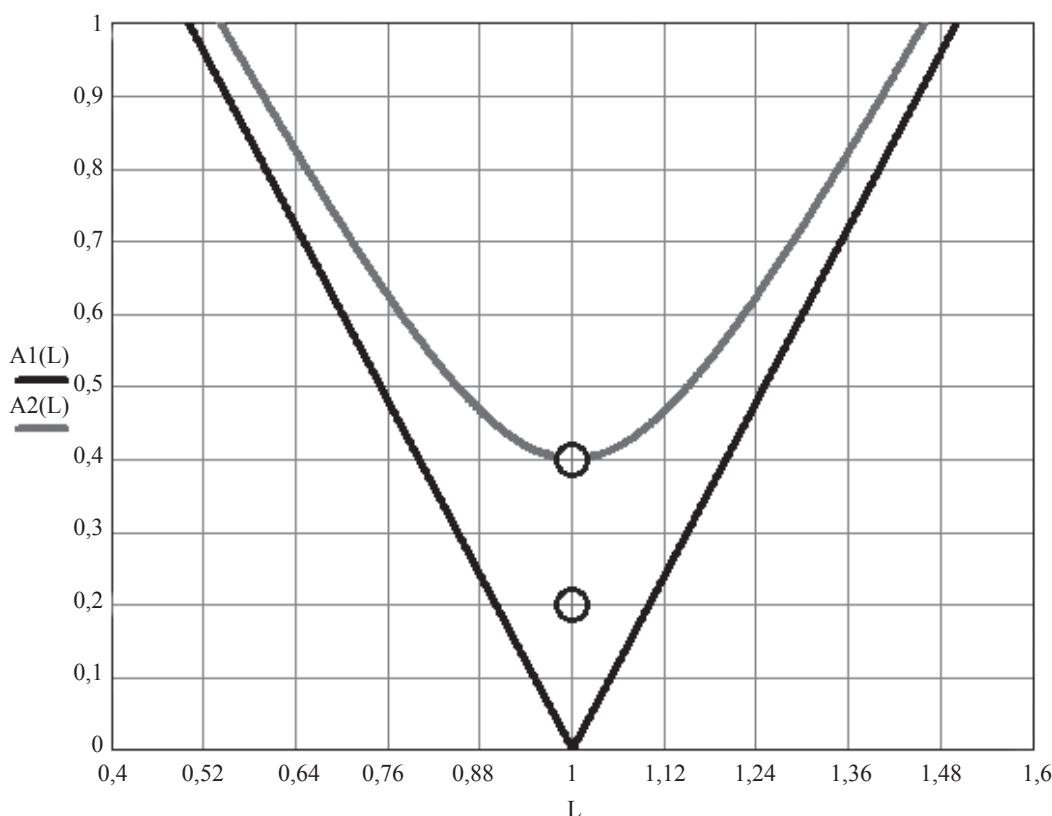


Рис. 1. Границы первой области неустойчивости:
 $A1(L)$ – при $\gamma = 0$; $A2(L)$ – при $\gamma = 0,2$

3 Амплитуда колебаний в режиме главного параметрического резонанса

Амплитуда колебаний в режиме главного параметрического резонанса изучена в работах [10], ее изменение описывается следующим законом:

$$\varphi(t) = a(t) \cdot \sin \frac{\alpha t}{2} + b(t) \cdot \cos \frac{\alpha t}{2}, \quad (8)$$

причем $a(t) = a_0 e^{ht}$, $b(t) = b_0 e^{ht}$.

Характеристический показатель h вычисляется по формуле:

$$h = \frac{\mu k}{2} - n,$$

где μ – коэффициент возбуждения, $\mu = \frac{A_{\text{верт}}}{2}$; $n = \frac{\gamma k}{2} = \frac{\delta k}{2\pi T} = \zeta k$; δ – логарифмический декремент колебаний; ζ – затухание в долях критического; T – период колебаний, $T = \frac{2\pi}{k}$.

Характер амплитуды колебаний зависит главным образом от величины характеристического показателя h . Если $h < 0$, то амплитуда колебаний уменьшается (колебания затухают); если $h = 0$, то амплитуда колебаний постоянна; если $h > 0$, то амплитуда неограниченно возрастает, т. е. возникает явление параметрического резонанса.

4 Условие возникновения параметрического резонанса

Теперь возможно найти такое значение γ , при котором явление параметрического резонанса не развивается.

Обозначим как $n_* = \frac{\mu k}{2}$ такое значение параметра n , при котором $h = 0$.

Тогда $h < 0$, если $n > n_*$, т. е.

$$\frac{\gamma k}{2} > \frac{\mu k}{2},$$

$$\text{откуда } \gamma > \mu = \frac{A_{\text{верт}}}{2}. \quad (9)$$

Очевидно, что если условие (9) не выполняется, т. е. $\gamma < \frac{A_{\text{верт}}}{2}$, то параметрический резонанс возникает. При этом возможно оценить, за какое время амплитуда колебаний увеличится в m раз, из условия

$$m \cdot e^{ht} = e^{h(t+\theta)},$$

откуда

$$\theta = \frac{\ln m}{h} = \ln m^{\frac{1}{h}}.$$

Заключение

Формула (9) определяет демпфирование в системе с кинематической сейсмоизоляцией, необходимое для исключения возможности возникновения опасных параметрических колебаний. Так, на площадках с ускорениями более 0,4g минимальное демпфирование должно быть не менее 10% от критического ($\gamma \approx 0,2$). При меньшем затухании довольно быстро может произойти удвоение амплитуд колебаний. Это проиллюстрировано рисунком 2. Так, при затухании $\gamma \approx 0,15$ удвоение амплитуды колебаний будет происходить каждые 2,5 с, что следует считать катастрофичным для интенсивной фазы землетрясения 10–15 с.

Библиографический список

1. **Индустриализация** строительства сооружений сейсмостойкой конструкции / В. В. Назин. – Киев : Будивельник, 1977.
2. **Активная** сейсмозащита зданий и сооружений / Ю. Д. Черепинский, Т. Ж. Жунусов, И. Г. Горвиц. – Алма-Ата : КазНИИТИ, 1985. – 32 с.
3. **Натурные** исследования трехэтажного фрагмента и пятиэтажного здания на сейсмоизолирующих опорах / А. В. Курзанов, А. М. Ах-

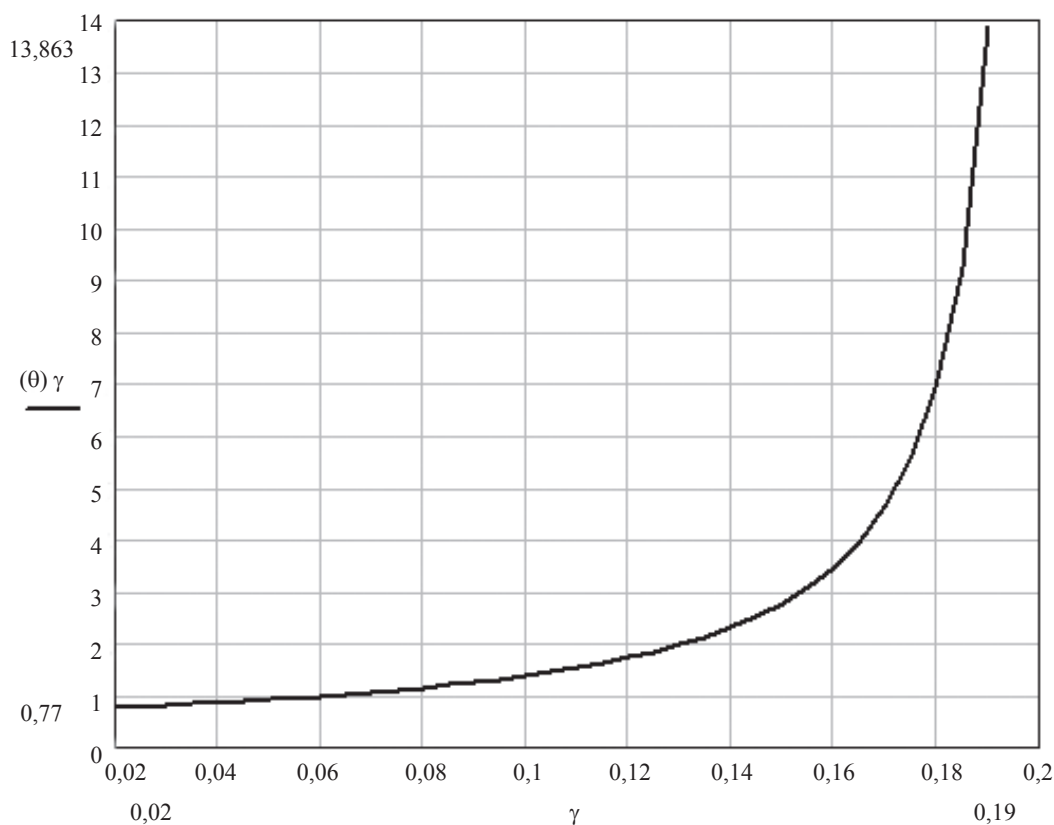


Рис. 2. Зависимость времени удвоения амплитуд колебаний от параметра γ

медов // Экспресс-информация ВНИИИС. Сер.14. Сейсмостойкое строительство. – 1994. – Вып. 2–3. – С. 24–32.

4. **Расчет** элементов и оптимизация параметров сейсмоизолирующих фундаментов / А. М. Уздин, А. А. Долгая. – М. : ВНИИТПИ, 1997. – 76 с.

5. **Сейсмоизоляция.** Современное состояние / Т. А. Белаш, В. С. Беляев, А. М. Уздин, А. А. Ермошин, И. О. Кузнецова // В сб.: Избранные статьи профессора О. А. Савинова и ключевые доклады, представленные на четвертые Савиновские чтения. – СПб. : ЗАО «Ленинградский Промстройпроект», 2004. – С. 95–128.

6. **Анализ** работы сейсмоизолирующих фундаментов на опорных элементах с отрицательной жесткостью / Г. Э. Авидон, Г. В. Давыдова,

Ф. А. Доронин, Е. А. Карлина, А. М. Уздин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2009. – № 3. – С. 15–21.

7. **Некоторые** особенности сейсмоизолирующего кинематического фундамента Ю. Д. Черепинского / И. У. Альберт, Т. А. Сандович, А. М. Уздин // Научно-техн. реф. сб. ЦНИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. – 1993. – Вып. 1. – С. 32–36.

8. **Справочник** по специальным функциям / М. Абрамовица, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – С. 532–559.

9. **Теория** механических колебаний / В. Л. Бидерман. – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.

10. **Теория** диссипативных систем / А. В. Индейкин, А. М. Уздин, А. А. Долгая. – СПб. : ПГУПС, 1999. – 99 с.