

УДК 699.841

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.146>

АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ОБЪЕКТА СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

¹Лапин В.А., ¹Ержанов С.Е.

¹АО «Казахский научно-исследовательский и проектный институт строительства и архитектуры»

АНАЛІЗ РЕАКЦІЇ ОБ'ЄКТА СЕЙСМОІЗОЛЯЦІЇ ПІД ЧАС ВИПАДКОВОЇ СЕЙСМІЧНОЇ ДІЇ

¹Лапін В.О., ¹Єржанов С.Є.

¹АТ «Казахський науково-дослідний і проектний інститут будівництва й архітектури»

ANALYSIS OF THE REACTION OF THE OBJECT OF SEISMOISOLATION WITH RANDOM SEISMIC ACTION

¹Lapin V.A., ¹Erzhanov S.E.

¹JSC "Kazakh Research and Design Institute of Construction and Architecture"

Аннотация. С использованием вероятностных методов анализируется надёжность и сейсмостойкость крупнопанельного здания на кинематических фундаментах (КФ) на полигоне сейсмоизоляции в городе Алматы. Здание моделируется нелинейной одномассовой системой с экспериментальной диаграммой деформирования. Привлекаются результаты вибрационных динамических испытаний, выполненных ранее специалистами АО «КазНИИСА». Сейсмическое воздействие моделируется случайным процессом с заданной корреляционной функцией. Для расчета вероятностных характеристик используется метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Параметры сейсмического воздействия задаются в соответствии с «Картой сейсмического зонирования Республики Казахстан» медианными значениями пиковых ускорений. В качестве модели воздействия выбраны 2 акселерограммы Байсорунского землетрясения 1990 года. Отличия пиковых значений ускорения от величин, нормируемых Картой сейсмического зонирования, составляет 2-8 %. Поэтому эти акселерограммы были приняты как исходные для моделирования сейсмического воздействия случайным процессом. Генерирование реализаций стационарного случайного процесса выполняется методом рекурсивной фильтрации. Реализации нестационарного случайного процесса получаются из стационарного путём умножения на дробно-рациональную детерминированную огибающую (Аптикаева Ф.Ф.). Исследовано влияние количества статистических испытаний (искусственных акселерограмм) на точность вычисления моментов функции распределения перемещений. Установлено, что для определения средних, медианных, среднеквадратичных значений перемещений достаточно использовать от 1000 до 5000 реализаций случайного процесса. Для величины надёжности достаточно от 5000 реализаций. Для значений асимметрии (третий момент) A_x достаточно от 10000 реализаций. Значение эксцесса E_x начинает устанавливаться от 25000 реализаций. По результатам расчёта методом Монте-Карло с использованием 5000 реализаций определяется надёжность здания (вероятность безотказной работы). Определены величины надёжности W_{475} и W_{2475} при сейсмическом воздействии с повторяемостью 475 и 2475 лет. Делаются выводы об эффективности системы сейсмоизоляции кинематического типа для указанного типа зданий при региональных параметрах воздействия.

Ключевые слова: сейсмоизоляция, нелинейные системы, кинематический фундамент, случайный процесс

В г. Алматы получили распространение системы сейсмоизоляции на основе сейсмоизолирующих кинематических фундаментов (КФ), разработанных в АО «КазНИИСА» д.т.н. Черепинским Ю.Д. [1-4]. Построено свыше 30 зданий различной этажности в г. Алматы и свыше 300 в Российской Федерации.

В настоящее время внедряются новые Карты сейсмического зонирования территории Республики Казахстан, которые имеют вероятностный характер. Целесообразно получить уточнённые оценки сейсмостойкости зданий на таких опорах с учётом имеющихся экспериментальных данных и новых вероятностных представлениях о моделях сейсмического воздействия, а также современных вычислительных средствах – системах компьютерной математики.

Учёт сложного характера сейсмического воздействия, которое представляет собой стохастический в пространстве и во времени процесс колебания грунта удобно выполнять методами теории случайных функций. Существуют различные способы цифрового моделирования случайного процесса с заданной корреляционной функцией [5, 6].

В настоящее время в задачах теории сейсмостойкости у отечественных и зарубежных учёных наиболее популярны два классических типа аппроксимаций корреляционных функций, применяемых ещё Болотиным В.В. и Барштейном М.Ф.

$$K(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega\tau \quad (1)$$

соответствует не дифференцируемому случайному процессу, а

$$K(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} [\cos \omega\tau + (\alpha/\omega) \sin \omega\tau] \quad (2)$$

дважды дифференцируемому случайному процессу. Здесь σ^2 – дисперсия процесса, характеризующая интенсивность землетрясения; α – параметр корреляции, характеризующей степень затухания кривой; ω – частота.

Одним из самых быстрых и удобных является алгоритм, основанный на рекурсивной фильтрации (авторегрессия) [5]. Основная расчётная формула авторегрессии (скользящего среднего) имеет вид:

$$y_k = \sum_{i=0}^m a_i x_{k-i} - \sum_{i=1}^n b_i y_{k-i}, \quad (3)$$

где x_{k-i} – дискретные реализации случайного процесса на входе системы, y_k – дискретные реализации случайного процесса на выходе (в данном случае акселерограммы); a_i, b_i – коэффициенты модели авторегрессии со скользящим средним; m и n – положительные числа ($m \leq n$). Данный метод не имеет методической погрешности, а параметры моделирующего алгоритма выражаются в явном виде через параметры корреляционной функции. Если вид корреляционной функции усложняется (например, у непрерывной передаточной функции формирующего фильтра есть кратные полюса), то рекуррентные алгоритмы становятся приближенными.

Для проверки качества алгоритма генерируется случайный процесс с корреляционной функцией (2) с различными параметрами. Затем решаем обратную задачу. По генерированной реализации восстанавливаем корреляционную функцию. На рис. 1, рис. 2 представлены некоторые результаты, а в табл. 1, табл. 2 – результаты расчётов.

Таблица 1 – Акселерограмма землетрясения KernCounty, 21.07.52 S00E

Корреляционная функция	$\alpha, 1/c$	$\omega, 1/c$
Аппроксимирующая исходной акселерограммы	2,02	8,74
Восстановленная по искусственной акселерограмме	2,20	7,37

Таблица 2 – Искусственная акселерограмма землетрясения LongBeach, 10.03.33 WEST

Корреляционная функция	$\alpha, 1/c$	$\omega, 1/c$
Аппроксимирующая исходной акселерограммы	9,12	19,22
Восстановленная по искусственной акселерограмме	11,15	19,82

Параметры аппроксимирующей и восстановленной корреляционных функций отличаются в пределах 5-20 %, что следует признать удовлетворительным совпадением, так как аппроксимируется по сути начальный участок экспериментальной корреляционной функции.

Отметим также, что важным здесь является свойство узкополосности случайного гауссовского процесса. Это процесс, спектральная плотность которого сконцентрирована в узкой полосе частот около некой несущей частоты.

Расчёты были выполнены и для двучленной аппроксимирующей корреляционной функции (3). Оценка точности остаётся такой же – 5-20 %.

В обоих случаях, следует отметить, частотные характеристики в целом выдерживаются. Цифровое моделирование сейсмического воздействия адекватно отражает его особенности.

Далее изложение вероятностных методов расчёта сейсмоизолированного здания будем выполнять на примере здания на кинематических фундаментах, которое построено в городе Алматы и оснащено станцией инженерно-сейсмометрической службы [4].

Типовое здание представляет собой крупнопанельный жилой дом серии 158, одноподъездная блок-секция. Габариты здания: длина – 17,4 м, ширина – 12,9 м, высота – 31,5 м. Здание имеет 9 этажей высотой 3 м каждый с дополнительным техническим подпольем и полупроходным чердаком. На здании с КФ кинематические фундаменты опираются на перекрёстную ленту в местах пересечения стен. Глубина заложения 3,8 м.

Здание запроектировано для районов сейсмичностью 9 баллов.

Грунтовые условия на площадке строительства –

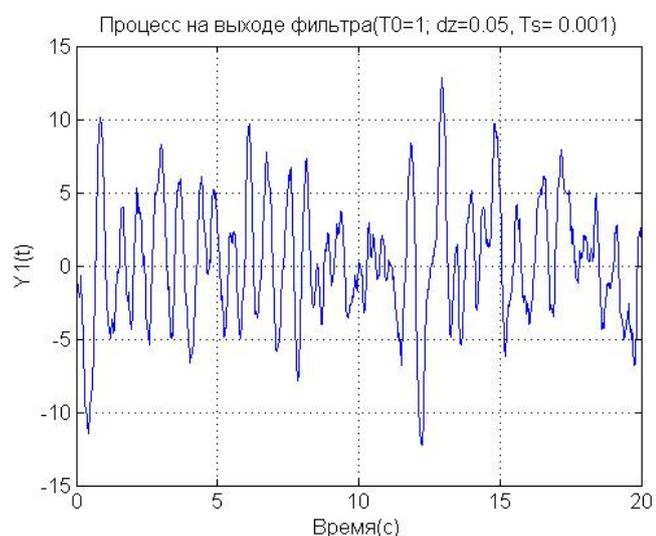


Рисунок 1– Искусственная акселерограмма землетрясения KernCounty, 21.07.52 S00E

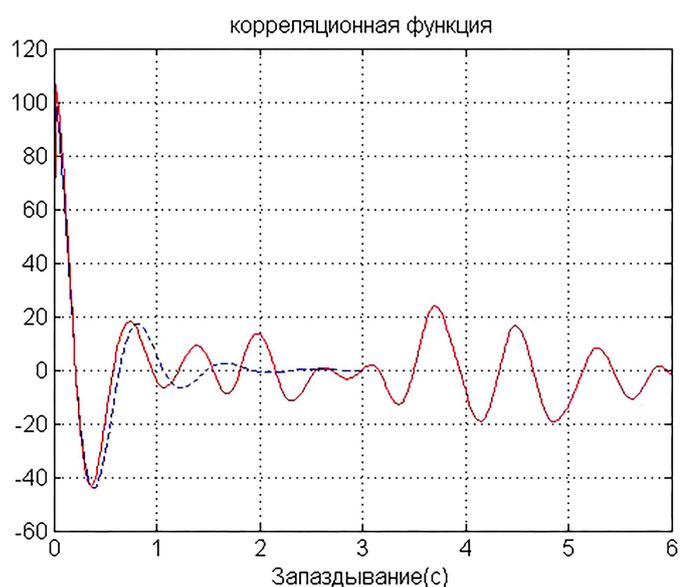


Рисунок 2 – Экспериментальная (—) и аппроксимирующая корреляционная функция (---) акселерограммы землетрясения KernCounty, 21.07.52 S00E

валуногалечники, 2-й категории по сейсмическим свойствам. Уровень грунтовых вод 20 м.

Раннее здание испытывалось с помощью вибрационной машины инерционного действия. Следовательно, имеются экспериментальные данные о его поведении [4].

Для анализа возможных перемещений при воздействии реактивных сил в уровне кинематических фундаментов (КФ) при сейсмических нагрузках и также для оценки надёжности таких зданий допустимой расчётной моделью может служить одномассовая консольная система с сосредоточенной массой и диаграммой деформирования (ДД), соответствующей уровню КФ. Проведённые ранее испытания объектов позволили получить полную информацию, необходимую для оценки сейсмической реакции и надёжности.

Интегрируется нелинейное дифференциальное уравнение

$$m\ddot{x} + \mu\dot{x} + R(x) = -m\ddot{x}_{0i}, \quad (4)$$

где $R(x)$ – нелинейная восстанавливающая сила; \ddot{x}_{0i} – i -ая акселерограмма; μ – коэффициент неупругого сопротивления (гипотеза Фойхта); m – масса здания; x – горизонтальное перемещение.

Расчётная модель здания обладает следующими инерционными и диссипативными характеристиками ($Q = mg$, g – ускорение свободного падения):

$$Q = 2430 \text{ т}; \quad \mu = 4,4 \text{ т}\cdot\text{с}/\text{см}.$$

Диаграмма деформирования одномассовой системы принята соответствующая указанному весу (рис. 3).

В качестве критерия отказа здесь принимается достижение предельно допустимых перемещений $[x_{\max}]$. По данным статических испытаний [1, 2] принято $[x_{\max}] = 10$ см. Надёжность (вероятность безотказной работы) $W = W(|x| < [x_{\max}])$.

Расчёты выполняются методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) с использованием возможностей системы компьютерной математики MATLAB. Сейсмическое воздействие моделировалось стационарным случайным процессом, который получается путём умножения реализаций стационарного процесса на детерминированную огибающую. Детерминированная огибающая принята в виде дробно-рациональной функции Аптикаева Ф.Ф.

$$A = A_{\max} \frac{3td}{9t^2 - 9td + 4d^2}. \quad (5)$$

Величина d есть эффективная длительность сейсмического воздействия (продолжительность воздействия с интенсивностью не менее половина максимума – ширина импульса).

Для оценки качества модели воздействия выполним расчёт вероятностных характеристик и надёжности сейсмоизолированного здания на кинематических фундаментах.

Для решения задачи применяются модули системы компьютерной математики MATLAB. В расчётах используется по 300 реализаций нестационарного случайного процесса. Реализуется схема метода статистических испытаний (метод Монте-Карло). Нелинейная восстанавливающая сила принята из рис. 3.

Коэффициент внутреннего вязкого трения принят 4,4 т·с/см. В табл. 3 и табл. 4 приведены результаты расчётов. Здесь A_x и E_x соответственно асимметрия и эксцесс.

Таблица 3 – Вероятностные характеристики перемещения сейсмоизолируемого здания, KernCounty, 21.07.52 S00E, $d = 16,5$ с

Воздействие	Среднее, см	Медиана, см	Среднеквадратичное значение, см	A_x , см	E_x , см
Точное	0,31	0,30	0,05	0,906	1,51
Восстановленное	0,31	0,30	0,05	0,888	1,50

Таблица 4 – Вероятностные характеристики перемещения сейсмоизолируемого здания, LongBeach, 10.03.33 S00E, $d = 6,84$ с

Воздействие	Среднее, см	Медиана, см	Среднеквадратичное значение, см	A_x , см	E_x , см
Точное	1,68	1,59	0,52	1,919	9,69
Восстановленное	1,49	1,47	0,40	0,760	1,67

На основе моделирования сейсмического воздействия нестационарным случайным процессом с целью оценки сейсмостойкости вычисляются величины надёжность и вероятностные характеристики параметров колебаний. По данным табл. 3 – табл. 4 отличия величин перемещения по средним и медианным значениям порядка 1-10 %.

Наибольшие отличия по величинам третьего и четвёртого моментов. Таким образом, точность цифрового моделирования сейсмического воздействия, представленного инструментальными записями ускорений весьма удовлетворительная для целей расчёта вероятностных характеристик параметров реакции сейсмоизолированного здания.

Целесообразна оценка поведения систем сейсмоизоляции с учётом региональных особенностей. В АО «КазНИИСА» функционирует сеть станций инженерно-сейсмометрической службы на зданиях, которая в режиме реального времени фиксирует сейсмические события. Результатом являются инструментальные записи ускорений, смещений и скоростей, пики которых могут быть кинематическими характеристиками землетрясений. В табл. 5 приведены наиболее значимые акселерограммы землетрясений, зафиксированные как станциями ИСС, так и станциями Института Сейсмологии РК.

Выполним расчёт сейсмоизолированного здания с учётом региональных особенностей сейсмического воздействия для города Алматы – мегаполиса с

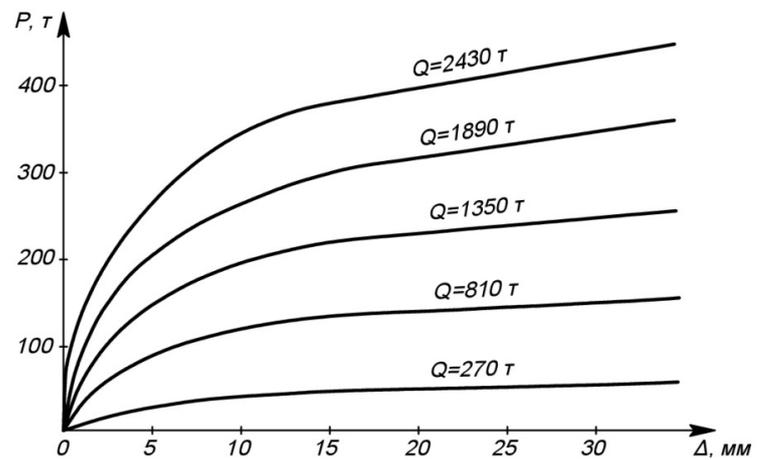


Рисунок 3 – Диаграмма деформирования в уровне КФ при различной вертикальной нагрузке

населением свыше 2 млн. чел. Согласно действующей Карты сейсмического зонирования Республики Казахстан медианные величины ускорения на территории города равны при повторяемости 1 раз в 475 лет $0,38g$, а при 1 раз при 2475 лет – $0,73g$. Здесь g есть ускорение свободного падения.

Таблица 5 – Параметры нормированной корреляционной функции (2)

Название землетрясения	α , 1/с	ω , 1/с	Ускорение, см/с ²
Жаланаш-Тюпское	6,59	12,22	35
Жаланаш-Тюпское	9,80	18,26	29
Жаланаш-Тюпское	7,85	16,07	18,5
Жаланаш-Тюпское	51,71	42,34	20
Жаланаш-Тюпское	9,74	25,19	14
Баканасское	51,79	18,65	7,5
Баканасское	14,04	11,57	4,4
Кунгейское	8,17	16,29	12,6
Байсорунское	2,4	27,63	699,2
Байсорунское	5,74	39,02	436,9
Байсорунское	2,13	24,38	64
Байсорунское	7,24	26,96	44,4
Среднее значение	14,77	23,28	

Двум указанным величинам ускорений ближе всего соответствуют две акселерограммы Байсорунского землетрясения 1990 года из таблицы 5 с пиками ускорения $699,2 \text{ см/с}^2$ и $436,9 \text{ см/с}^2$. Различия пиковых значений ускорения от величин, нормируемых Картой сейсмического зонирования, здесь 2-8 %. Поэтому эти акселерограммы могут быть взяты как исходные для моделирования сейсмического воздействия случайным процессом. В табл. 6 приведены некоторые параметры инструментальных записей – акселерограмм.

Таблица 6 – Параметры акселерограмм

Параметры	Компонента 1 (N-S)	Компонента 2(E-W)
Максимум акселерограммы, см/с ²	699,2	436,92
Минимум акселерограммы, см/с ²	-589,85	-375,53
Дисперсия, см ² /с ⁴	69,64	72,05
Среднеквадратичное значение, см/с ²	8,34	8,49
Размах, см/с ²	1289,05	812, 450
Среднее значение, см/с ²	4,193	6,098
Медианное значение, см/с ²	1,600	9,845
Максимум спектральной плотности	42,20; 36,58	39,69
Частота, 1/с	3,66; 4,76	4,88
Период, с	0,27; 0,21	0,20
Длительность колебаний с амплитудой большей половины максимума (эффективная длительность), с	2,52	2,50

Беглый анализ таблицы 6 показывает, что акселерограммы хорошо отцентрированы. Инструментальные записи высокочастотные. Преобладающие периоды и несущие частоты определены по спектральной плотности с

использованием пакета Signal Processing Toolbox СКМ MATLAB. При общей продолжительности воздействия свыше 8 с эффективная длительность (продолжительность колебаний с амплитудой большей половины максимума) составляет 2,5 с, т.е. примерно 30 % от общей длительности. Эффективная длительность одна из характеристик рекомендуемой детерминируемой огибающей (5). Отношение максимальных значений ускорений компонент 1,6.

На рис. 4 приведены спектральные кривые β , характеризующие как спектральный состав указанного землетрясения, так и возможный динамический эффект. Воздействия достаточно узкополосные.

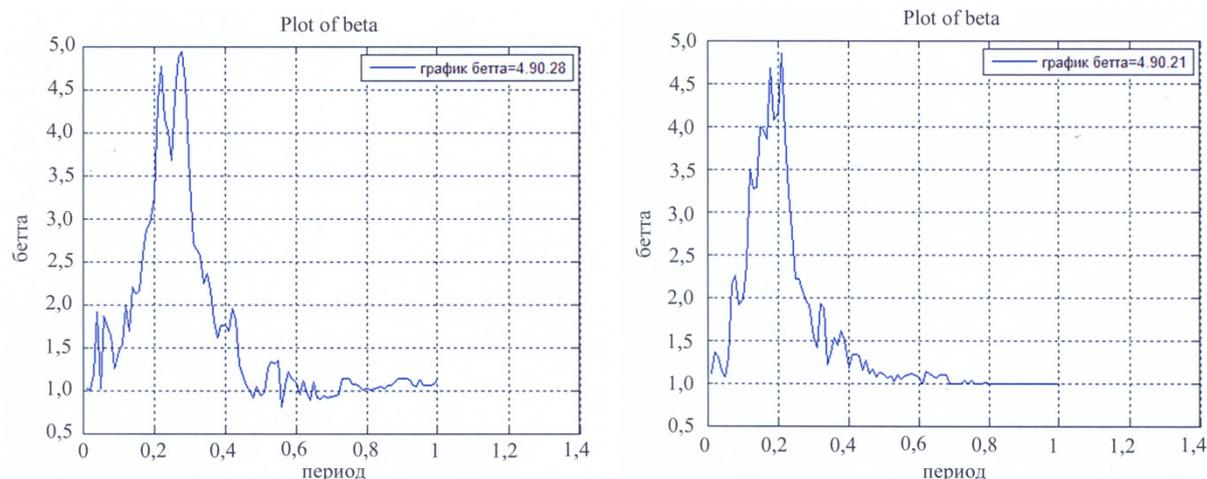


Рисунок 4 – Спектральные кривые Байсорунского землетрясения (N-S) и (E-W)

Выполним вероятностный расчёт сейсмоизолированного здания при двух указанных величинах пикового ускорения при средних значениях параметров корреляционной функции (2) из табл. 3. Расчёт выполнялся методом Монте Карло с использованием 5000 реализаций случайного процесса с корреляционной функцией (2). Реализации случайного процесса генерировались методом рекурсивной фильтрации (1). Интегрировалось обыкновенное дифференциальное уравнение (4), где ввиду существенно нелинейной работы конструкций параметр внутреннего вязкого трения принимался 4,4 т·с/см. Интегрирование уравнения (4) выполнялось методом Адамса типа предиктор-корректор переменного порядка. Результаты расчётов в табл. 7.

Таблица 7 – Величины вероятностных характеристик перемещения и значения надёжности W сейсмоизолированного здания

Параметры	Для повторяемости 475 лет	Для повторяемости 2475 лет
Среднее значение, см	1,84	4,07
Медианное значение, см	1,71	3,78
Среднеквадратичное отклонение, см	0,64	1,45
Коэффициент вариации	0,57	0,36
Надёжность W	1,00	0,9974
Вероятность отказа Q	0,00	0,0026
A_x	1,33	1,15
E_x	3,00	1,88

Величина E_x для повторяемости 475 лет равна 3. То есть эмпирическая функция распределения величин перемещения близка к нормальному закону. Для повторяемости 2475 лет коэффициент эксцесса положительный. Это означает, что эмпирическое распределение более островершинное, чем нормальное, т.е. столбцы гистограммы в центре распределения должны быть выше значения кривой нормального распределения.

Величины перемещения в уровне фундамента в пределах по средним значениям 1,84-4,07 см, по медианным – 1,71-3,78 см.

Величина надёжности W при повторяемости 475 лет очень высокая 1,0, а при повторяемости 2475 лет весьма высокая 0,9974. Оценки надёжности представляются точными, т.к. получены при большом количестве реализаций.

Тем не менее, целесообразно оценить влияние количества реализаций случайного процесса на оценки вероятностных характеристик величин перемещения в уровне кинематического фундамента. В таблице 8 приведены результаты расчётов.

Установлено, что для определения средних, медианных, среднеквадратичных значений перемещений достаточно использовать от 1000 до 5000 реализаций случайного процесса. Для величины надёжности достаточно от 5000 реализаций. Для значений асимметрии (третий момент) A_x достаточно от 10000 реализаций. Значение эксцесса E_x начинает устанавливаться от 25000 реализаций.

Таблица 8 – Величины вероятностных характеристик перемещения и значения надёжности W сейсмоизолированного здания при различном количестве реализаций

Параметры	1000 реализаций	5000 реализаций	10000 реализаций	15000 реализаций	25000 реализаций
Среднее значение, см	4,10	4,07	4,09	4,05	4,04
Медианное значение, см	3,72	3,78	3,79	3,77	3,75
Среднеквадратичное отклонение, см	1,57	1,45	1,49	1,44	1,44
Коэффициент вариации	0,38	0,36	0,36	0,36	0,36
Надёжность, W	0,992	0,9974	0,9957	0,9962	0,9975
Вероятность отказа, Q	0,008	0,0026	0,0043	0,0038	0,0025
A_x	1,68	1,15	1,34	1,28	1,25
E_x	4,49	1,88	3,17	2,77	2,56

Анализ табл. 8 позволяет сделать вывод, что метод Монте-Карло (статистических испытаний) приводит к приемлемым результатам при расчёте первых двух моментов распределения при достаточно небольшом количестве статистических испытаний – 1000-5000 реализаций.

В целом нелинейная одномассовая расчётная схема является приемлемой идеализацией крупнопанельного здания на кинематических фундаментах различных конструкций.

Общая надёжность сейсмоизолированного здания в случае реализации использования данных из табл. 7 представляется в виде (W_{475} – величина надёжности при сейсмическом воздействии с повторяемостью 475 лет, W_{2475} – величина надёжности при сейсмическом воздействии с повторяемостью 2475 лет).

$$W = W_{475} \cdot W_{2475}$$

Очевидно, $W = 1 \times 0,9974 = 0,9974$. Таким образом, общая надёжность сейсмоизолированной системы равна или меньше величины надёжности при более интенсивном сейсмическом воздействии. Эта величина надёжности есть количественная мера сейсмостойкости здания.

Таким образом, вероятностный анализ поведения зданий с КФ позволяет дать количественную оценку сейсмостойкости зданий по величинам надёжности и оценить эффект сейсмоизоляции. Общим результатом является достаточная эффективность кинематических фундаментов (КФ) при высокочастотном воздействии.

Безусловным достоинством предлагаемой здесь методики вероятностного расчёта сейсмоизолируемого здания есть учёт регионального характера сейсмического воздействия и количественной информации о параметрах ожидаемого сейсмического воздействия с «Карты сейсмического зонирования территории Республики Казахстан».

Авторы работы убеждены, что результаты динамических и статических испытаний реальных сейсмоизолированных зданий являются бесценным материалом для исследований. Теория сейсмостойкости развивается достаточно быстро. Поэтому периодически надо возвращаться к ранее полученным экспериментальным данным с целью их интерпретации с использованием новых теоретических методологий и подходов.

В рамках использования новой нормативной базы Республики Казахстан на основе Еврокодов применение сейсмоизоляции представляется весьма перспективным [10].

Выводы

1. Получены оценки сейсмостойкости по величинам надёжности (вероятности безотказной работы) сейсмоизолированного дома на кинематических фундаментах с учётом основных параметров «Карты сейсмического зонирования территории Республики Казахстан». Учитываются вероятности реализации значений ускорения при нормируемой повторяемости сейсмического воздействия. Оценка надёжности и вероятностные характеристики реакции выполняется по схеме метода статистических испытаний (Монте-Карло). Количественные оценки надёжности W не менее 0,9974.

2. Указанный вероятностный метод может быть использован при расчёте прочих зданий, для которых имеются данные экспериментальных исследований или диаграммы деформирования, полученные, например, методом Pushover.

3. Исследования рекомендуется уточнять по мере накопления инструментальных записей инженерно-сейсмометрической службы АО «КазНИИСА» и результатов сейсмического зонирования территории города Алматы.

4. В г. Алматы функционирует полигон сейсмоизоляции, состоящих из трёх зданий, оснащённых станциями инженерно-сейсмометрической службы. Всего сеть станций ИСС насчитывает в г. Алматы 10 сейсмостанций. Целесообразно продолжить использование инструментальных записей указанных станций для корректировки моделей сейсмического воздействия [7, 8, 9].

Исследования выполнялись с использованием средств гранта АР 05130702
Министерства образования и науки Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черепинский Ю.Д., Лапин В.А. Основы сейсмоизоляции в строительстве. Иркутск: Элит, 1995. 204 с.
2. Черепинский Ю.Д. Экспериментальные исследования, расчетно-теоретический анализ и внедрение в строительство сейсмоизолирующих конструктивных систем КФ: автореферат дисс. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 1998. 46 с.
3. Черепинский Ю.Д. Сейсмоизоляция жилых зданий. Алматы: КазГАСА, 2003. 157 с.
4. Лапин В.А., Ержанов С.Е. Динамика объекта полигона сейсмоизоляции: здание на кинематических фундаментах. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. №2. С. 16-22.
5. Прохоров С.А. Математическое описание и моделирование случайных процессов. Самара: Государственный аэрокосмический ин-т, 2001. 209 с.
6. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 400 с.
7. Лапин В.А., Ержанов С.Е., Даугавет В.П. Особенности колебания основания зданий при местных землетрясениях. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2018. №1. С. 25-32.
8. Лапин В.А., Ержанов С.Е. Методологические основы использования инженерно-сейсмометрической службы на зданиях. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2018. №4. С. 44-49.
9. Лапин В.О., Ержанов С.Е., Даугавет В.П. Аналіз ефекту сейсмоізоляції на основі результатів записів станцій інженерно-сейсмометричної служби на будинках. *Наука та будівництво*. 2019. №1. С. 59-65.
10. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 8: Проектирование сейсмостойких конструкций: Общие нормы проектирования сейсмостойких конструкций, сейсмические воздействия, правила проектирования зданий и подпорных сооружений / М. Фардис и др. М.: МГСУ, 2013. 484 с.

REFERENCES

1. Cherepinskiy, Yu.D. and Lapin, V.A. (1995), *Osnovy seysmoizolyatsii v stroitelstve* [Basics of seismic isolation in construction], Elit, Irkutsk, Russia.
2. Cherepinskiy, Yu.D. (1998), "Experimental studies, calculation and theoretical analysis and implementation into the construction of seismic insulating structural systems KF", Abstract of D. Sc. dissertation, Novosibirsk, Russia.
3. Cherepinskiy, Yu.D. (2003), *Seysmoizolyatsiya zhilykh zdaniy* [Seismic isolation of residential buildings], KazGASA, Almaty, Kazakhstan.
4. Lapin, V.A. and Yerzhanov, S.Ye. (2019), "Dynamics of a seismic isolation site: building on kinematic foundations", *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*, no. 2, pp. 16-22.
5. Prokhorov, S.A. (2001), *Matematicheskoye opisaniye i modelirovaniye sluchaynykh protsessov* [Mathematical description and simulation of random processes], Gosudarstvennyy aerokosmicheskiy in-t, Samara, Russia.
6. Bykov, V.V. (1971), *Tsifrovoye modelirovaniye v statisticheskoy radiotekhnike* [Digital modeling in statistical radio engineering], Sovetskoye radio, Moscow, USSR.
7. Lapin, V.A., Yerzhanov, S.Ye. and Daugavet, V.P. (2018), "Peculiarities of basement oscillations during local earthquakes", *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*, no. 1, pp. 25-32.
8. Lapin, V.A. and Yerzhanov, S.Ye. (2018), "Methodological basis for the use of engineering seismometric service on buildings", *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*, no. 4, pp. 44-49.
9. Lapin, V.O., Yerzhanov, S.Ye. and Daugavet, V.P. (2019), "Analysis of seismic effect effect on the basis of recordings of stations of engineering seismometric service on buildings", *Nauka ta budivnytstvo*, no. 1, pp. 59-65.
10. Fardys M., Karval'o O., Ėlnashay A., Fachchyoly Ė., Pynto P. and Plum'er A. (2013), *Rukovodstvo dlya proyektirovshchikov k Yevrokodu 8: Proyektirovaniye seysmostoykikh konstruksiy: Obshchiye normy proyektirovaniya seysmostoykikh konstruksiy, seysmicheskiye vozdeystviya, pravila proyektirovaniya zdaniy i podpornykh sooruzheniy* [Eurocode Guide for Designers 8: Design of Earthquake-Resistant Structures: General Design Standards for Earthquake-Resistant Structures, Seismic Impacts, Building and Retaining Structures Design Rules], MGSU, Moscow, Russia.

Об авторах

Лапин Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, член-корреспондент НИА РК и МИА, директор Центра научных исследований строительной отрасли, АО «КазНИИСА», Алматы, Казахстан.

Ержанов Сырымгали Ержанович, кандидат технических наук, член-корреспондент НИА РК и МИА, советник генерального директора по науке, АО «КазНИИСА», Алматы, Казахстан.

About the authors

Lapin Vladimir Alekseevich, Ph.D. in Engineering Science, Director of Center for Scientific Research in Building Industry, Corresponding Member of International Engineering Academy and National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, «KazRDICA» JSC, Almaty, Kazakhstan.

Erzhanov Syrymgali Erzhanovich, Ph.D. in Engineering Science, Adviser to Director General, Corresponding Member of International Engineering Academy and National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, «KazRDICA» JSC, Almaty, Kazakhstan.

Анотація. З використанням імовірнісних методів аналізується надійність і сейсмостійкість великопанельного будинку на кінематичних фундаментах (КФ) на полігоні сейсмоізоляції в місті Алмати. Будівля моделюється нелінійною одномасовою системою з експериментальною діаграмою деформування. Залучаються результати вібраційних динамічних випробувань, виконаних раніше фахівцями АТ «КазНДІСА». Сейсмічна дія моделюється випадковим процесом із заданою кореляційною функцією. Для розрахунку імовірнісних характеристик використовується метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло). Параметри сейсмічного впливу задаються відповідно до «Карти сейсмічного зонування Республіки Казахстан» медіанними значеннями пікових прискорень. В якості моделі впливу обрані 2 акселерограми Байсорунського землетрусу 1990 року. Відмінності пікових значень прискорення від величин, нормованих Картою сейсмічного зонування, становить 2-8%. Тому ці акселерограми були прийняті як вихідні для моделювання сейсмічного впливу випадковим процесом. Генерування реалізацій стаціонарного випадкового процесу виконується методом рекурсивної фільтрації. Реалізації нестаціонарного випадкового процесу виходять зі стаціонарного шляхом множення на дрібно-раціональну детерміновану обгинаючу (Аптікаєва Ф.Ф.). Досліджено вплив кількості статистичних випробувань (штучних акселерограм) на точність обчислення моментів функції розподілу переміщень. Встановлено, що для визначення середніх, медіанних, середньоквадратичних значень переміщень досить використовувати від 1000 до 5000 реалізацій випадкового процесу. Для величини надійності достатньо від 5000 реалізацій. Для значень асиметрії (третього моменту) A_x достатньо від 10000 реалізацій. Значення ексцесу E_x починає встановлюватися від 25000 реалізацій. За результатами розрахунку методом Монте-Карло з використанням 5000 реалізацій визначається надійність будівлі (ймовірність безвідмовної роботи). Визначено величини надійності W_{475} і W_{2475} при сейсмічній дії з повторюваністю 475 і 2475 років. Робляться висновки про ефективність системи сейсмоізоляції кінематичного типу для зазначеного типу будівель при регіональних параметрах дії.

Ключові слова: сейсмоізоляція, нелінійні системи, кінематичний фундамент, випадковий процес

Abstract. Using probabilistic methods, the reliability and seismic resistance of a large-panel building on kinematic foundations (CF) at the seismic isolation site in Almaty is analyzed. The building is modeled by a nonlinear single-mass system with an experimental deformation diagram. The results of vibration dynamic tests performed earlier by the specialists of «KazRDICA» JSC are attracted. Seismic impact is modeled by a random process with a given correlation function. To calculate probabilistic characteristics, the method of statistical tests is used (Monte-Carlo method). The seismic impact parameters are set in accordance with the "Map of the seismic zoning of the Republic of Kazakhstan" by the median values of peak accelerations. 2 accelerograms of the 1990 Baysorun earthquake were chosen as the impact model. The differences in peak acceleration values from the values normalized by the seismic zoning map are 2-8%. Therefore, these accelerograms were taken as the basis for modeling the seismic effects of a random process. Generation of realizations of a stationary random process is performed by recursive filtering. The implementation of a non-stationary random process is obtained from a stationary by multiplying by a fractional rational deterministic envelope (Aptikaev F.F.). The influence of the number of statistical tests (artificial accelerograms) on the accuracy of calculating the moments of the distribution function of displacements was investigated. It has been established that to determine the mean, median, root-mean-square values of displacements, it is sufficient to use from 1000 to 5000 realizations of a random process. For a value of reliability, 5000 implementations are sufficient. For asymmetry values (third moment), A_x is sufficient from 10,000 implementations. The value of the kurtosis E_x starts to be set from 25,000 implementations. According to the results of a Monte Carlo calculation using 5000 realizations, the reliability of the building is determined (probability of failure-free operation). The reliability values of W_{475} and W_{2475} under seismic effects with a repeatability of 475 and 2475 years are determined. Conclusions about system effectiveness of seismoisolation of kinematic type for the influence specified like buildings at regional parameters are drawn.

Keywords: seismic isolation, nonlinear systems, kinematic foundation, random process

Статья поступила в редакцию 15.02.2019

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.И. Дырдой