ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 624.042.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.754–760

ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫЙ НАБОР АКСЕЛЕРОГРАММ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

О.В. Мкртычев, А.А. Решетов

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ. При расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия прямыми динамическими методами требуются акселерограммы землетрясений с характеристиками, соответствующими площадке строительства. Такие акселерограммы можно получить несколькими способами, например, их могут предоставить специалисты-сейсмологи. Однако для инженера-расчетчика может потребоваться провести их дополнительную обработку (балансировка, выделение интенсивной фазы воздействия и др.), что не всегда удобно. Кроме того, может потребоваться акселерограмма с несколько иным спектральным составом, иной продолжительностью, но в то же время возможная для данной площадки строительства. Также можно сгенерировать акселерограмму, применяя специальное программное обеспечение. Однако это тоже не всегда удобно, так как может занять некоторое время и вызвать определенные трудности как при формировании исходных данных для генерирования, так и получении корректного результата. Для преодоления вышеозначенных трудностей предлагается представительный набор синтезированных акселерограмм землетрясений, который может быть применен при различных комбинациях сейсмических свойств площадки строительства.

В статье изложены основные подходы к формированию набора акселерограмм землетрясений, предназначенных для расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия. Сформулированы целевые требования как к отдельным акселерограммам, так и к набору в целом, сформулированы целевые характеристики акселерограмм, приведены пояснения и рекомендации к применению набора акселерограмм в практических расчетах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: представительный набор акселерограмм, дисперсия, спектральная характеристика, огибающая, магнитуда, интенсивность землетрясения, сейсмическое воздействие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Решетов А.А. Представительный набор акселерограмм землетрясений для расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 7 (106). С. 754–760. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.754-760

REPRESENTATIVE SET OF EARTHQUAKE ACCELEROGRAMMS FOR STRUCTURAL ENGINEERING OF BUILDINGS AND STRUCTURES DURING EARTHQUAKE EFFECTS

O.V. Mkrtychev, A.A. Reshetov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT. In the process of structural engineering of buildings and structures with the use of direct dynamic methods the accelerograms of earthquakes with the parameters corresponding to a specific construction site are required. Such accelerograms could be obtained by various methods. For example, they could be produced by seismologists. However, for a structural engineer it could be required to get them processed (balancing, segregation of separate phase of impact, etc.), that is not always convenient to do. Moreover, an accelerogram with slightly different spectral composition and lifespan, nevertheless applicable to a given construction site, could be required. Also an accelerogram could be generated with the use of specially designed software. Although it's not always convenient as it requires certain amount of time and could cause some difficulties during formation of original data for generation and also for obtaining correct results. In order to overcome the above-mentioned difficulties the authors proposed the representative set of synthesized earthquake accelerograms which could be applied for various combinations of seismic properties of construction sites.

The present article sets out the principal approaches to formation of the set of earthquake accelerograms, designated for design of buildings and structures in terms of earthquake effects. Purpose requirements to discrete accelerograms and to the set as a whole have been disclosed, purpose characteristics of accelerograms have been set out, clarifications and recommendations for application of the representative set of accelerograms in practical calculations have been enclosed.

KEY WORDS: representative set of accelerograms, dispersion, spectral-response characteristic, envelope, magnitude, earthquake intensity, seismic effect

FOR CITATION: Mkrtichev O.V., Reshetov A.A. Predstavitel'nyy nabor akselerogramm zemletryaseniya dlya rascheta zdaniy i sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya [Representative Set of Earthquake Accelerograms for Structural Engineering of Buildings and Structures During Earthquake Effects]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 7 (106), pp. 754–760. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.754-760

Требуется сформировать набор акселерограмм, удовлетворяющий следующим целевым требованиям: он должен включать в себя акселерограммы, приходящиеся на диапазон магнитуд 6...8 с шагом 0,5 и диапазон частот 0,5...5 Гц с шагом 0,5 Гц. При этом акселерограммы должны иметь соответствующие огибающие и спектральные характеристики.

Выбор таких диапазонов продиктован стремлением покрыть значимые для практических расчетов комбинации магнитуд (и связанных с ними продолжительностей) и доминантных частот.

Для решения этой задачи были сформированы исходные (целевые) данные для каждой комбинации магнитуд и частот. По этим данным для каждой комбинации было сгенерировано по 1000 акселерограмм. Сгенерированные акселерограммы были отсортированы по убыванию их фактических дисперсий, и в каждом случае была выбрана акселерограмма с наибольшей дисперсией. При этом контролировалось соответствие фактических характеристик (спектра, огибающей) целевым. В ходе решения данной задачи применялось специальное программное обеспечение, разработанное авторами.

Целевыми характеристиками акселерограмм являются огибающая и спектральная характеристика (амплитудный спектр Фурье и связанная с ним спектральная плотность). Данные характеристики применялись в качестве исходных данных при генерировании акселерограмм. После генерирования производилась проверка вновь полученных акселерограмм на предмет соответствия их фактических характеристик (огибающей и спектральной характеристики) исходным (целевым). И только акселерограммы, имевшие хорошее соответствие, принимались к дальнейшей обработке.

Огибающая была сформирована на основании нормативного документа РБ 006-98¹. Согласно этому документу, продолжительность интенсивной фазы колебаний зависит от магнитуды землетрясения. Поэтому ранжирование по магнитуде приводит к ранжированию по продолжительности. Время, по истечению которого от начала воздействия амплитуда воздействия не превышает 1/10 максимальной амплитуды, находится по формуле:

$$T_c = 10^{(0,31M - 0,774)}, \quad (1)$$

где M — магнитуда.

Огибающая представляет собой кусочную функцию (рис. 1). При этом значения времени нарастания и начала спада амплитуд акселерограммы находятся по таблице и тоже зависят от магнитуды.

Спектральная характеристика была сформирована на основании трудов [1, 2], согласно которым средняя форма спектра реакции в ускорениях может быть представлена в виде участков прямых в двойном логарифмическом масштабе (рис. 2). В нашей работе мы по данному спектру получали амплитудный спектр Фурье, а по амплитудному спектру — спектральную плотность, необходимую для применения методики генерирования акселерограммы в виде случайного процесса.

На рис. 2 параметры S_1 и S_2 характеризуют логарифмическую ширину спектра $S = S_1 + S_2$. В практических расчетах можно полагать спектр симметричным ($S_1 \approx S_2$) [1]. Таким образом, ширину спектра можно характеризовать одним параметром S . На рис. 3 изображен закон его распределения [1].

¹ РБ 006–98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ.

Рис. 1. Огибающая

Рис. 2. Средняя форма спектра реакции (в двойном логарифмическом масштабе)

Рис. 3. Распределение логарифмической ширины спектра S

Генерирование акселерограмм производилось методом канонических разложений [3–5], адаптированным для применения быстрых алгоритмов. При этом акселерограмма $a(t)$ представлялась в виде произведения стационарной части $y(t)$ и огибающей $A(t)$ [6, 7]:

$$a(t) = A(t) \cdot y(t). \quad (2)$$

Отметим, что методом канонических разложений генерировалась стационарная часть $y(t)$, при этом в качестве исходных данных для генерирования применялась спектральная плотность, связанная с амплитудным спектром Фурье, сформированным на основе работ [1, 2]. Последующее умножение стационарной части на огибающую существенно не изменяло спектральную характеристику, так как стационарная часть имела практически постоянный во времени спектральный состав, а огибающая достаточно медленно изменялась во времени по сравнению с колебаниями стационарной части. Тем не менее, производился контроль

соответствия спектральных характеристик целевым именно для полученных акселерограмм, а не только их стационарных частей. В процессе исследований помимо метода канонических разложений также применялись и другие методы генерирования акселерограмм (например, метод формирующего фильтра; методы, основанные на вейвлет-анализе и др.). О других методах генерирования акселерограмм можно узнать в статьях [9–19].

Для каждой комбинации магнитуды и частоты было сгенерировано семейство из 1000 акселерограмм, из каждого семейства были выбраны акселерограммы с наибольшей дисперсией. При этом проверялось, чтобы фактическая спектральная характеристика хорошо соответствовала целевой. Все отобранные акселерограммы были сбалансированы и нормированы на единицу. Гистограмма распределения фактических дисперсий приведена на рис. 4.

Рис. 4. Гистограмма дисперсий

Таким образом, был сформирован представительный набор акселерограмм землетрясений для расчета зданий и сооружений.

В качестве примера на рис. 5 представлена акселерограмма из данного набора.

Рис. 5. Акселерограмма с магнитудой 7, доминантной частотой 3 Гц и компонентой Y (а) и соответствующая ей спектральная характеристика в линейном (б), логарифмическом (в) и двойном логарифмическом масштабе (г)

Сформированный набор был записан в виде файлов. В папке с набором находится текстовый файл расшифровки (содержащий информацию о наборе) и вложенные папки, названия которых обозначают значения магнитуд 6; 6,5; 7; 7,5; 8. При этом магнитудам соответствуют продолжительности 13,88; 19,94; 28,64; 41,14; 59,08 с. Каждая папка соответствующей магнитуды содержит в свою очередь вложенные папки с акселерограммами, имеющими доминантные частоты от 0,5 до 5 Гц с шагом 0,5 Гц. В каждой папке соответствующей доминантной частоты содержится трехкомпонентная акселерограмма, сохраненная в следующих форматах: в формате EXCEL (..._accel.xlsx и ..._spectr.xlsx), в универсальном формате данных (..._x.dat, ..._y.dat, ..._z.dat) и в формате кривой для редактора LS-PrePost из расчетного комплекса LS-DYNA (..._ls_x.dat, ..._ls_y.dat, ..._ls_z.dat).

Все акселерограммы в наборе нормированы на единицу, что соответствует интенсивности землетрясения в 7 баллов.

Для применения набора акселерограмм на практике предлагаются следующие рекомендации.

В зависимости от требуемой продолжительности воздействия из файла расшифровки выбира-

ется та магнитуда, которой соответствует наиболее близкая к требуемой продолжительность. Задав магнитудой, необходимо зайти в соответствующую папку и выбрать доминантную частоту акселерограммы. Доминантная частота должна выбираться на основании сейсмических свойств площадки строительства, а также по возможности на основании резонансных частот сооружения. Зайдя в папку соответствующей частоты, необходимо выбрать файлы в удобном для использования формате (см. расшифровку). Далее в зависимости от требуемой интенсивности землетрясения необходимо произвести масштабирование компонент акселерограммы.

В рамках работы был сгенерирован набор акселерограмм, который может применяться в практических расчетах сооружений на сейсмическое воздействие, а также было разработано специальное программное обеспечение.

Сформированный набор акселерограмм землетрясений предлагается включить в СП 14.13330.2014².

² СП 14.13330.2014. Свод правил. Строительство в сейсмических районах

ЛИТЕРАТУРА

1. Антикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М. : Наука и образование, 2012. 176 с.
2. Антикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Параметры спектров реакции // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008. № 5. С. 23–25.
3. Бакалов В.П. Цифровое моделирование случайных процессов. М. : МАИ, 2001. 81 с.
4. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Моделирование сейсмического воздействия в виде случайного процесса методом канонического разложения // Фундаментальные науки в современном строительстве : сб. докл. III науч.-практ. и учеб.-метод. конф. МГСУ, 22.12.2003 г. М. : МГСУ, 2003. С. 79–84.
5. Мкртычев О.В., Юрьев Р.В. Расчет конструкций на сейсмические воздействия с использованием синтезированных акселерограмм // Промышленное и гражданское строительство 2010. № 6. С. 52–54.
6. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Методика определения исходных характеристик наиболее неблагоприятных акселерограмм для линейных систем с конечным числом степеней свободы // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 80–91.
7. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. М. : Стройиздат, 1961. 203 с.
8. Cacciola P. A stochastic approach for generating spectrum compatible fully non-stationary earthquakes // Computers and Structures. August 2010. Vol. 88. Issues 15–16. Pp. 889–901.
9. Cecini D., Palmeri A. Spectrum-compatible accelerograms with harmonic wavelets // Computers and Structures. 2015. Vol. 147. Pp. 26–35.
10. Ghaffarzadeh H., Izadi M.M. Artificial generation of spatially varying seismic ground motion using ANNs // The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12–17, 2008, Beijing, China.
11. Gharehbaghi S.A., Mohaghegh A. Application of artificial intelligence in Generating artificial accelerograms using Kanai-Tajimi model // Research Journal of Recent Sciences. February 2015. Vol. 4 (2). Pp. 120–129.
12. Ghaffarzadeh H. Generation of spatially varying ground motion based on response spectrum using artificial neural networks // International Journal of Science and Engineering Investigations. March 2015. Vol. 4. Issue 38. Pp. 233–242.
13. Heidari P.S., Khorasani M. Generation of artificial earthquake accelerogram compatible with spectrum using the wavelet packet transform and nero-fuzzy networks // International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. 2012. Vol. 6. No. 8. Pp. 566–569.
14. Lam N., Wilson J., Chandler A., Hutchinson G. Response spectrum modelling for rock sites in low and moderate seismicity regions combining velocity, displacement and acceleration predictions // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2000. Vol. 29. Issue 10. Pp. 1491–1525.
15. Rezaeian S., Der Kiureghian A. Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2010. Vol. 39 (10). Pp. 1155–1180.
16. Rezaeian S., Der Kiureghian A. Stochastic modeling and simulation of ground motions for performance-based earthquake engineering : PEER Report 2010/02, Berkeley : Berkeley College of Engineering, University of California, 2010.

17. Soize C. Information theory for generation of accelerograms associated with shock response spectra // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. July 2010. Vol. 25. Issue 5. Pp. 334–347.

18. Stafford P.J., Sgobba S., Marano G.C. An energy-based envelope function for the stochastic simulation of earthquake accelerograms // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009. Vol. 29. No. 7. Pp. 1123–1133.

19. Zentner I. Comparison of natural and synthetic spectrum compatible accelerograms obtained by ground motion selection and stochastic simulation // *Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World : SECED 2015 Conference*: 9–10 July 2015, Cambridge UK.

Поступила в редакцию в ноябре 2016 г.

Принята в доработанном виде в декабре 2016 г.

Одобрена для публикации в мае 2017 г.

Об авторах: **Мкртычев Олег Вартанович** — доктор технических наук, заведующий Научно-исследовательской лабораторией «Надежность и сейсмостойкость сооружений», профессор кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mkrtychev@yandex.ru;

Решетов Андрей Александрович — кандидат технических наук, инженер Научно-исследовательской лаборатории «Надежность и сейсмостойкость сооружений», **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, andrew331@bk.ru.

REFERENCES

1. Aptikaev F.F. *Instrumental'naya shkala seysmicheskoy intensivnosti* [Instrumental Scale of Seismic Intensity]. Moscow, Nauka i obrazovanie Publ., 2012, 176 p. (In Russian)
2. Aptikaev F.F., Ertelva O.O. Parametry spektrov reaktsii [Parameters of the Response Spectra]. *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Earthquake Engineering. Constructions Safety]. 2008, no. 5, pp. 23–25. (In Russian)
3. Bakalov V.P. *Tsifrovoe modelirovanie sluchaynykh protsessov* [Digital Simulation of Random Processes]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 2001, 81 p. (In Russian)
4. Mkrtychev O.V., Djinchvelashvili G.A. Modelirovanie seysmicheskogo vozdeystviya v vide sluchaynogo protsessa metodom kanonicheskogo razlozheniya [Modelling Seismic Effects in the Form of a Random Process by the Method of Canonical Decomposition]. *Fundamental'nye nauki v sovremennom stroitel'stve : sbornik dokladov 3 nauchno-prakticheskoy i uchebno-metodicheskoy konferentsii, MGSU, 22.12.2003* [Fundamental Sciences in Modern Construction: the Third Scientific and Practical Learning and Teaching Conference, MSSU, 22.12.2003]. Moscow, MGSU Publ., 2004, pp. 79–84. (In Russian)
5. Mkrtychev O.V., Yur'ev R.V. Raschet konstruksiy na seysmicheskie vozdeystviya s ispol'zovaniem sintetizirovannykh akselerogramm [Calculation of Structures for Seismic Effects Using the Synthesized Accelerograms]. *Proyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2010, no. 6, pp. 52–54. (In Russian)
6. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. Metodika opredeleniya ishodnykh kharakteristik naibolee neblagopriyatnykh akselerogramm dlya lineynykh sistem s konechnym chislom stepeney svobody [Method for Determining Baseline Characteristics Most Unfavorable Accelerograms for Linear Systems with Finite Number of Degrees of Freedom]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 8, pp. 80–91. (In Russian)
7. Bolotin V.V. *Statisticheskie metody v stroitel'noy mekhanike* [Statistical Methods in Structural Mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1961, 203 p. (In Russian)
8. Cacciola P. A Stochastic Approach for Generating Spectrum Compatible Fully Nonstationary Earthquakes. *Computers & Structures*. August 2010, vol. 88, issues 15–16, pp. 889–901.
9. Cecini D., Palmeri A. Spectrum-compatible Accelerograms with Harmonic Wavelets. *Computers and Structures*. 2015, vol. 147, pp. 26–35.
10. Ghaffarzadeh H., Izadi M.M. Artificial Generation of Spatially Varying Seismic Ground Motion Using ANNs. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12–17, 2008, Beijing, China*.
11. Gharehbaghi S.A., Mohaghegh A. Application of Artificial Intelligence in Generating Artificial Accelerograms Using Kanai-Tajimi model. *Research Journal of Recent Sciences*. February 2015, vol. 4 (2), pp. 120–129.
12. Ghaffarzadeh H. Generation of Spatially Varying Ground Motion Based on Response Spectrum using Artificial Neural Networks. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. March 2015, vol. 4, issue 38, pp. 233–242.
13. Heidari P.S., Khorasani M. Generation of Artificial Earthquake Accelerogram Compatible with Spectrum using the Wavelet Packet Transform and Nero-Fuzzy Networks. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2012, vol. 6, no. 8, pp. 566–569.
14. Lam N., Wilson J., Chandler A., Hutchinson G. Response Spectrum Modelling for Rock Sites in Low and Moderate Seismicity Regions Combining Velocity, Displacement and Acceleration Predictions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2000, vol. 29, issue 10, pp. 1491–1525.
15. Rezaeian S., Der Kiureghian A. Simulation of Synthetic Ground Motions for Specified Earthquake and Site Characteristics. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2010, vol. 39 (10), pp. 1155–1180.
16. Rezaeian S., Der Kiureghian A. *Stochastic Modeling and Simulation of Ground Motions for Performance-Based Earthquake Engineering : PEER Report 2010/02*. Berkeley, College of Engineering University of California, 2010.

17. Soize C. Information Theory for Generation of Accelerograms Associated with Shock Response Spectra. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. July 2010, vol. 25, issue 5, pp. 334–347.

18. Stafford P.J., Sgobba S., Marano G.C. An Energy-Based Envelope Function for the Stochastic Simulation of Earthquake Accelerograms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009, vol. 29, no. 7, pp. 1123–1133.

19. Zentner I. Comparison of Natural and Synthetic Spectrum Compatible Ac-Celerograms Obtained by Ground Motion Selection and Stochastic Simulation. *Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World : SECED 2015 Conference 9–10 July 2015, Cambridge UK*.

Received in October 2016.

Adopted in revised form in December 2016.

Approved for publication in May 2017.

About the authors: **Mkrtychev Oleg Vartanovich** — Doctor of Technical Sciences, Head of Research Laboratory “Reliability and Earthquake Engineering”, Professor, Department of Strength of Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mkrtychev@yandex.ru;

Reshetov Andrey Aleksandrovich — Candidate of Technical Sciences, Engineer, Research Laboratory “Reliability and Earthquake Engineering”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; andrew331@bk.ru.