

УДК 624.042.7:721.011.27

DOI: 10.38054/IAEEE-202305

## ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ СПЕКТРОВ УСКОРЕНИЙ РЕАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Колесников А.В.,

НИУ МГСУ, ООО «ЛИРА софт», [heallex@yandex.ru](mailto:heallex@yandex.ru)

***Аннотация:** В работе приводится сравнение линейных и нелинейно-упругих спектров перемещений и ускорений. Показано, что учет влияния нелинейной работы материала приводит к уменьшению спектральных характеристик. Разработанная методика может быть применена при анализе сооружений с упругопластической работой материала.*

***Ключевые слова:** сейсмостойкое строительство, акселерограмма, спектр ответа.*

## CONSTRUCTION OF LINEAR AND NONLINEAR ACCELERATION SPECTRA OF REAL EARTHQUAKES

A.V. Kolesnikov,

NRU MSUCE, LIRA soft LLC, [heallex@yandex.ru](mailto:heallex@yandex.ru)

***Abstract:** The paper compares the linear and nonlinear elastic spectra of displacements and accelerations. It is shown that taking into account the influence of the nonlinear work of the material leads to a decrease in the spectral characteristics. The developed technique can be applied in the analysis of structures with elastoplastic work of the material.*

***Key words:** earthquake-resistant construction, accelerogram, response spectrum.*

Основной задачей теории сейсмостойкости является определение значений сейсмических сил [1]. Наиболее значительным вкладом в анализ сейсмического воздействия на здания и сооружения является введение понятия сейсмического спектра. По сейсмическому спектру можно довольно точно определить максимальные силы инерции, которые могут быть вызваны землетрясением в системе с одной степенью свободы. Следовательно, сейсмический спектр является прямым средством для анализа поведения простых сооружений, которые могут быть представлены как система с одной степенью свободы. Кроме того, понятие сейсмического спектра может успешно применяться также при определении сейсмических сил для таких сооружений, для которых основную роль играет первая форма колебаний [2].

Для систем с конечным числом степеней свободы применение данного метода основано на разложении системы дифференциальных уравнений движения по собственным формам. Согласно ему, анализ сейсмостойкости включает следующие этапы:

- по спектрам отклика вычисляют инерционные сейсмические нагрузки, соответствующие каждой из собственных форм;

- эти нагрузки прикладывают как статические и определяют модальные отклики конструкции (перемещения, моменты, поперечные и продольные силы);

- вычисляют суммарный (или расчетный) сейсмический отклик, с использованием которого в комбинации с иными нагрузками, оценивают сейсмостойкость сооружения.

Всюду при этом считается, что восстанавливающая сила упругости системы пропорциональна ее деформации. Силу внутреннего трения тоже в конечном итоге принимаем как линейную функцию от скорости движения. В результате таких предположений движение системы описывается линейными дифференциальными уравнениями, типа:

$$y'' + 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot y' + \omega^2 y = -y_0''(t), \tag{1}$$

В действительности, как показывают многочисленные исследования, зависимость между напряжениями и деформациями почти во всех сооружениях, является нелинейной. Сложность задачи заключается не только в нелинейности восстанавливающей силы, но и в том, что нагрузка и разгрузка для строительных материалов характеризуются различными нелинейными законами.

Дифференциальное уравнение колебаний с одной степенью свободы (рис. 1) при нелинейной восстанавливающей силе можно представить в следующем общем виде:

$$y'' + F(y, y') + R(y) = -y_0''(t), \tag{2}$$

где  $R(y)$  - восстанавливающая сила;  $F(y, y')$  - сила внутреннего сопротивления.

Восстанавливающую силу удобно принимать в виде [1, 2] (рис. 1):

$$R(y) = \omega^2 \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \text{arctg}(\lambda y) \tag{3}$$

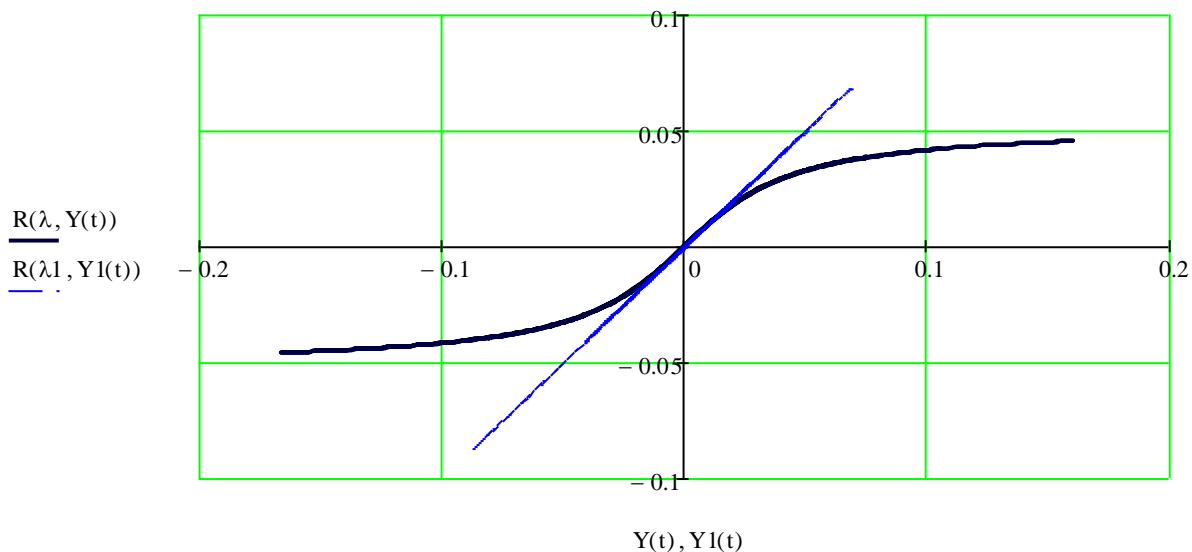


Рис.1 Восстанавливающая сила  $R(y)$

Силу внутреннего сопротивления можно представить в виде:

$$F(y, y') = 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \frac{y'}{\sqrt{1 + \lambda^2 \cdot y^2}} \tag{4}$$

где  $\lambda$  - параметр нелинейности,  $\xi$  - параметр затухания.

Рассмотрим землетрясения 3 марта 1977 года в городе Бухаресте (рис.1) и землетрясение 17 мая 1976 года в Газли (Рис. 2).

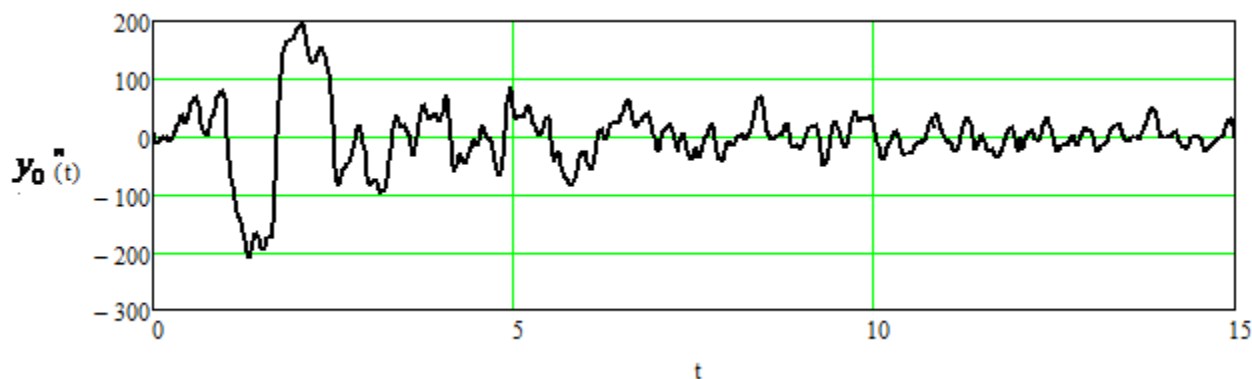


Рис. 2 Горизонтальная составляющая акселерограммы бухарестского землетрясения.(IS019)

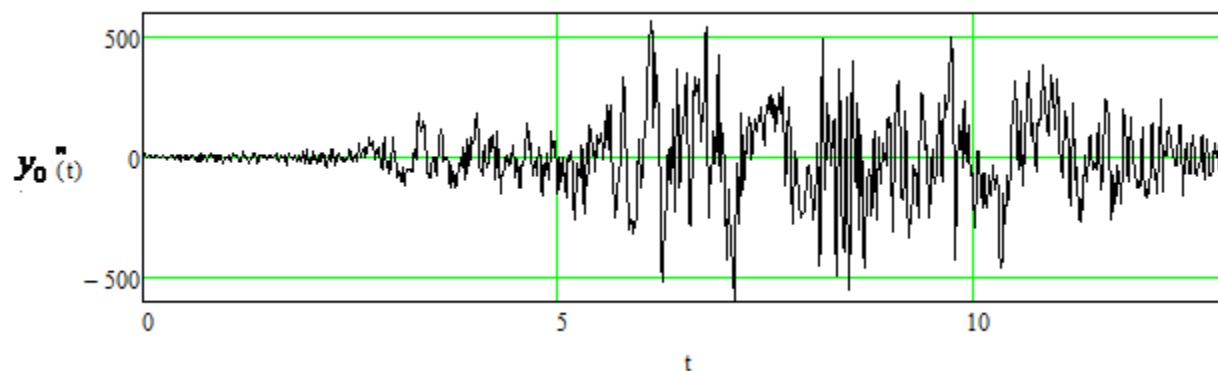


Рис. 3 Горизонтальная составляющая акселерограммы газлийского землетрясения.(IS001)

На рис. 4-5 приведены соответствующие спектры при линейной и нелинейно-упругой диаграмм (см. рис. 1):

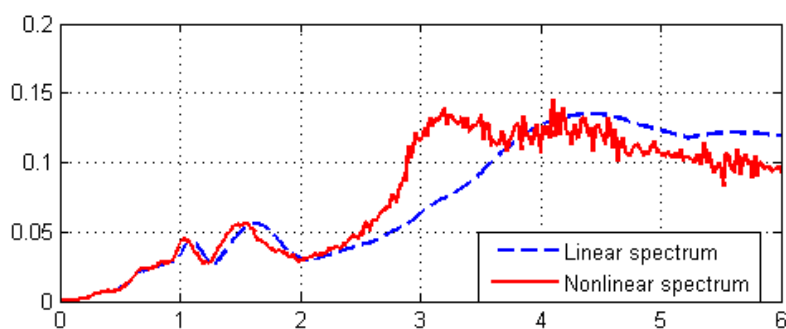


Рис. 4 Линейный и нелинейно-упругий спектры перемещений акселерограммы IS001 при затухании  $\xi = 0.05$

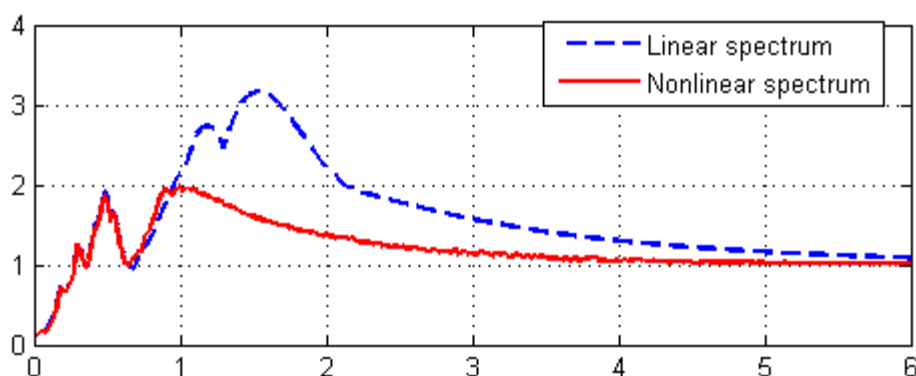


Рис. 5 Линейный и нелинейно-упругий спектры ускорений акселерограммы IS019 при затухании  $\xi = 0.05$

Прежде всего, следует заметить, что качественная сторона спектров, как линейных так и нелинейных, для различных землетрясений почти одинакова. Для всех видов спектров характерно сильное увеличение (пики) ускорений, скоростей и перемещений при некоторых значениях периодов свободных колебаний сооружения. Однако значения этих периодов для спектров ускорений, скоростей и перемещений различны. Как правило, пики на спектрах ускорений получаются при меньших значениях периода свободных колебаний, чем на спектрах скоростей и перемещений.

В СП 14.13330.2018 [7] учет нелинейной работы материала производится при помощи коэффициента  $K_1$ , который принимает значения от 0.12 до 1. Для уточнения этого параметра необходимо в дальнейшем провести серию расчетов спектральных характеристик при различных видах физических зависимостей свойств материала конструкции.

Что касается количественной оценки ординат спектров ускорений, то здесь наблюдается уменьшение ординат до 2 раз. Максимальные значения ускорений, скоростей и перемещений зависят от многих разнообразных и неэквивалентных факторов. К ним, прежде всего относится магнитуда землетрясения, тектонические особенности очага, эпицентральное расстояние, грунтовые условия и рельеф местности, а также поглощающая способность самого сооружения.

### Литература

- 1) Ньюмарк Н., Розенблюет Э. Основы сейсмостойкого строительства, М.: Стройиздат, 1980, 344 с.
- 2) Хачиян Э.Е., Амбарцумян В.А. Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости, М.: Наука, 1981, 204 с.
- 3) Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений, М.: Стройиздат, 1979, 320 с.
- 4) Бате К, Вилсон Е. Численные метода анализа и метод конечных элементов - М.: Стройиздат, 1982.
- 5) Бахвалов Н.С. Численные методы, М.: МГУ. Лаборатория Базовых Знаний, 2007, 636 с.
- 6) Фараонов В.В. Система Программирования Delphi, СПб.: БХВ-Петербург, 2005, 912 с.
- 7) СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»