УДК 624.042.7:721.011.27

В. В. Дроздов, В. А. Пшеничкина, С. И. Евтушенко

УЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ХАРАКТЕРА СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАСЧЕТЕ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ

Изложен способ моделирования нестационарной функции сейсмической нагрузки путем приведения ее к стационарному случайному вектору, что позволяет, оставаясь в рамках корреляционного приближения, учесть изменение амплитуды и спектрального состава в процессе реализации землетрясения. Рассмотрена процедура оценки огибающих функций для компонент вектора, предложена форма огибающих, удобная для практического применения. Представление вектора в виде канонического разложения существенно упрощает решение стохастической задачи колебаний сооружений под действием сейсмической нагрузки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сейсмическая нагрузка, оценка надежности, сейсмический риск, нестационарный случайный процесс.

The article describes the method of modeling non-stationary function of seismic load by reducing it to a stationary random vector that. It allows take into account the changes in the amplitude and spectral composition in the process of implementation of the earthquake, remaining within the limits of the correlation approximation. The procedure of assessment of the envelope functions for the vector components is considered, the envelope form suitable for practical use is offered. Representation of a vector in the form of the canonical decomposition significantly simplifies the solution of a stochastic construction vibration task under seismic load.

K e y w o r d s: seismic load, seismic reliability, seismic risk, non-stationary random process.

Сейсмическая нагрузка представляет собой ярко выраженный нестационарный случайный процесс с характерным нерегулярным изменением во времени амплитуды и спектрального состава. Представление сейсмической нагрузки в виде нестационарного случайного процесса с полным заданием всех его характеристик требует большого объема статистической информации, которой в настоящее время недостаточно. Поэтому в практических расчетах зданий и сооружений на сейсмостойкость нагрузка рассматривается как стационарная. Такой подход возможен только для длительно действующих слабозатухающих землетрясений, что существенно сужает класс решаемых задач.

Вместе с тем нестационарная случайная функция сейсмической нагрузки, согласно В. В. Болотину [1], может быть представлена в виде суммы произведений двух функций, т. е. приведена к стационарному случайному вектору:

$$\tilde{\ddot{H}}(t)=\sum_{h=1}^{m}A_h(t)\overset{\circ}{\tilde{\ddot{H}}}_h(t), \tag{1}$$

где $A_h(t)$ — детерминированные огибающие случайного процесса, характеризующие изменение амплитуд за время реализации землетрясения τ_E; $\overset{\circ}{\tilde{\ddot{H}}}_h(t)$ — функции, рассматривающиеся как стационарные, центрированные относительно математического ожидания и имеющие единичную дисперсию:

$$m_h(t)=0;\quad D_h(t)=1. \tag{2}$$

Спектральные плотности $S_{H_h}(\omega)$ случайных функций $\overset{\circ}{\ddot{H}}_h(t)$ описывают спектральный состав землетрясения.

В качестве огибающих могут использоваться следующие функции [1]:

$$A(t) = A_0 e^{-\gamma t};\; A(t) = A_0 \gamma t e^{-\gamma t};$$

$$A(t) = \begin{cases} A_0\, t/\tau_1 & \text{при } 0 \le t \le \tau_1, \\ A_0 & \text{при } \tau_1 \le t \le \tau_2, \\ A_0 e^{-\gamma(t-\tau_2)} & \text{при } t > \tau_2. \end{cases} \qquad (3)$$

Для аппроксимации спектральной плотности стационарной случайной функции сейсмического ускорения чаще всего используют зависимость

$$S(\omega) = \frac{2\alpha}{\pi} \frac{m^2 + \omega^2}{m^4 + 2a\omega^2 + \omega^4},$$

где $m^2 = \alpha^2 + \beta^2, \quad a = \alpha^2 - \beta^2$.

Для спектральных плотностей $S_h^{\text{н}}(\omega)$ параметры α_h и β_h в общем случае различны.

Наиболее распространенная процедура оценки амплитуды и спектральной плотности по записи землетрясения заключается в следующем (рис. 1). Исследуемая акселерограмма разбивается на отрезки $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$, … , каждый из которых имеет достаточное число экстремумов. Интервалы $\Delta\tau_i$ должны быть значительно больше времени корреляции процесса. В пределах каждого интервала амплитуда не должна существенно меняться.

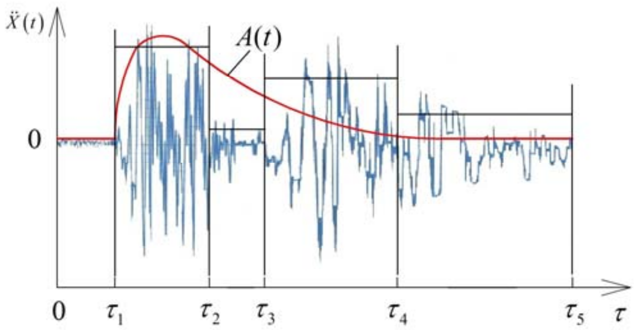

Рис. 1. Оценка амплитуды стационарного случайного процесса по записи землетрясения

На каждом интервале вычисляются стандарты σ_{Hi} процесса $\tilde{\ddot{H}}(t)$, рассматриваемые как оценки огибающих на i-м участке $\sigma_{Hi} = A_i$, и строится оценка реализации стационарной функции $\ddot{H}(t)$ для всего отрезка записи акселерограммы

$$\ddot{H}(t) \approx \tilde{\ddot{H}}(t) \big/ A(t).$$

Далее проверяется условие стационарности процесса $\ddot{H}(t)$, находится оценка спектральной плотности $S_H(\omega)$ и проверяются условия

$$m_H(t)=0; \quad D_H(t)=1. \tag{4}$$

Если условия (4) не выполняются, то производится перенормировка процесса с отнесением нормировочного множителя к огибающей. Для аппроксимации $A(t)$ может быть принята одна из функций (3). Первая фаза землетрясения, соответствующая действию продольных волн и характеризуемая небольшими амплитудами колебаний, как правило, исключается из рассмотрения.

При таком подходе спектральный состав землетрясения принимается постоянным, усредненным на всем интервале τ_E. Вместе с тем реакция сооружения существенно зависит от спектрального состава воздействия: при его изменении возможно перераспределение сейсмической нагрузки и изменение картины напряженно-деформированного состояния конструкций здания.

Для моделирования сейсмической нагрузки в виде (1) необходимо получить оценки функций $A_h(t)$ и $S_h^{\text{Н}}(\omega)$. Рассмотренная процедура оценки амплитудных и частотных характеристик землетрясения должна быть дополнена. Для этого проводим повторное разбиение записи на интервалы $\Delta\tau_1'$, $\Delta\tau_2'$, ..., $\Delta\tau_m'$ с различной частотой процесса (рис. 2) и находим функции $A_h(t)$, $\overset{\circ}{H}_h(t)$ и $S_h^{\text{н}}(\omega)$ на каждом h-м участке, выполняя при этом условия (2).

Для аппроксимации огибающих $A_h(t)$ наряду с функциями (3) предлагается использовать следующую зависимость, удобную для практического использования:

$$A_h(t)=A_0 e^{-\left(\frac{t-m_h}{2S_h^2}\right)},$$

где $t\in[0,\tau_E]$, τ_E — продолжительность сейсмического воздействия; m_h — текущее значение времени, соответствующее среднему на h-м участке; $2S_h^2$ — длина h-го интервала, при этом интервалы удобнее принимать перекрывающимися.

Представление процесса $\tilde{\ddot{H}}(t)$ в форме (1) позволяет учитывать изменение спектрального состава землетрясения. Подобрав соответствующим образом функции $A_h(t)$ и $S_h^{\text{н}}(\omega)$, можно с достаточной степенью точности описать любую нестационарную акселерограмму землетрясения, оставаясь в рамках корреляционного приближения. Каждой случайной стационарной функции $\overset{\circ}{\tilde{H}}_h(t)$ соответствуют две детерминированные — $A_h(t)$ и $S_h^{\text{н}}(\omega)$ (рис. 3).

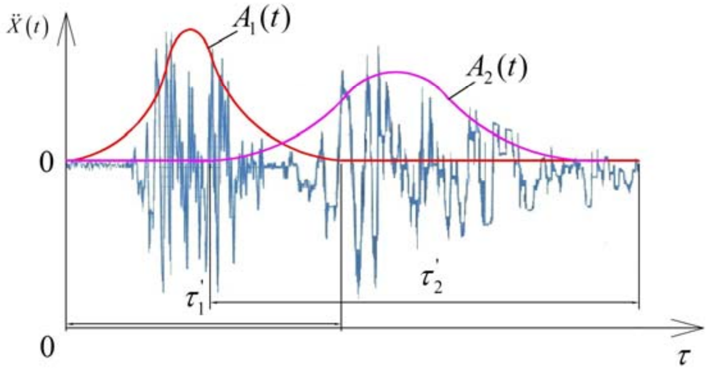

Рис. 2. Оценка амплитуд стационарного случайного вектора

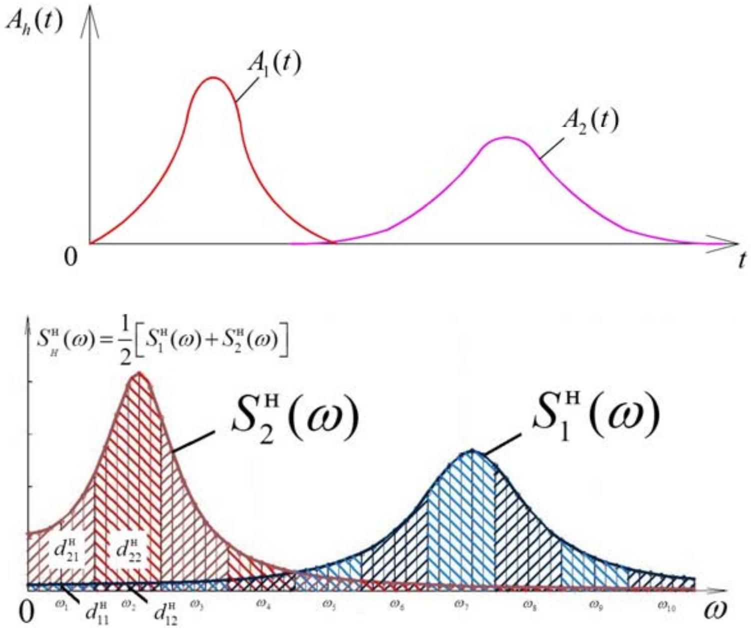

Рис. 3. Огибающие $A_h(t)$ и спектральные плотности $S_s^{н}(\omega)$ случайных компонент $\mathring{\tilde{\ddot{H}}}_h(t)$ функции (1)

Представление (1) — это ни что иное как выражение нестационарного случайного процесса через составляющие стационарной векторной случайной функции. Согласно [2] составляющую любой векторной функции можно рассматривать как скалярную функцию ее аргумента и номера. Тогда функция $\tilde{\ddot{H}}(t)$ может быть записана в виде канонического разложения, т. е. выражена через белые шумы $V_h(\omega)$. Так, в дискретной форме

$$\ddot{H}(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\sum_{h=1}^{m}V_h(\omega)x_h(t,\omega)d\omega, \qquad (5)$$

где $x_h\left(t,\omega\right)=\sum_{r=1}^{m}a_{rh}A_h\left(t\right)e^{i\omega t}$ — координатные функции входа; a_{rh} — коэффициенты приведения $V_h\left(\omega\right)$ к системе некоррелированных белых шумов. При условии, что функции $\overset{\circ}{\tilde{H}}_h\left(t\right)$ статистически независимы, коэффициенты a_{rh} равны единице при $r = h$ и нулю — в противном случае.

Далее решение задачи колебаний сооружения сводится к стационарному виду, рассмотренному, например, в [3]. Каноническое разложение (5) позволяет свести нестационарную случайную функцию к системе некоррелированных случайных величин и детерминированных координатных функций, что существенно упрощает решение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Болотин В. В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М. : Машиностроение, 1984. 312 с.
2. *Пугачев В. С.* Теория случайных функций. М. : Физматгиз, 1960. 884 с.
3. Надежность зданий как пространственных составных систем при сейсмических воздействиях / В. А. Пшеничкина и др. Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. 180 с.

1. *Bolotin V. V.* Prognozirovanie resursa mashin i konstruktsiy. M. : Mashinostroenie, 1984. 312 s.
2. *Pugachev V. S.* Teoriya sluchaynykh funktsiy. M. : Fizmatgiz, 1960. 884 s.
3. Nadezhnost' zdaniy kak prostranstvennykh sostavnykh sistem pri seysmicheskikh vozdeystviyakh / V. A. Pshenichkina i dr. Volgograd : VolgGASU, 2010. 180 s.

Поступила в редакцию
в сентябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Дроздов В. В., Пшеничкина В. А., Евтушенко С. И. Учет нестационарного характера сейсмической нагрузки при расчете сооружений на сейсмостойкость // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). URL: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/DrozdovPshenichkina1-2013_2(27).pdf