

УДК 681.3:002

## ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

И.Х. Хахо

Кабардино-Балкарский государственный университет,  
Республиканский центр НИТ, г. Нальчик  
E-mail: k\_khakho@mail.ru

*Рассмотрена методика формирования сейсмического сигнала с учетом динамических характеристик исследуемого оборудования, которая позволяет получить сейсмический сигнал, имеющий статистические характеристики расчетных акселерограмм землетрясений и определить сейсмостойкость электротехнического оборудования с заданной степенью достоверности полученных результатов.*

### **Ключевые слова:**

*Информация, система, анализ, управление, динамика, устойчивость, коррекция, частотные характеристики, передаточная функция, сейсмостойкость, надежность, вероятность, функция распределения, плотность распределения.*

### **Введение**

Надежную оценку сейсмостойчивости оборудования можно получить при испытании его на случайную динамическую нагрузку, заданную в виде сейсмического сигнала [1, 2]. При проведении расчетов на сейсмостойкость для конкретной строительной площадки сейсмологи предоставляют информацию, которая является реальной записью ускорений при землетрясениях, зарегистрированных в условиях, аналогичных исследуемому.

Имея в распоряжении сейсмоплатформу и расчетный сейсмический сигнал, можно достаточно точно определить сейсмостойкость исследуемого оборудования, однако сложность получения достоверного результата состоит в том, что расчетный сейсмический сигнал является случайной функцией времени с определенными статистическими характеристиками.

Если, следуя В.В. Болотину [3], принять допущение о том, что сейсмический сигнал стационарен и имеет нормальный закон распределения амплитуд, то, с вероятностных позиций, расчетным путем можно будет выполнить оценку максимальных выбросов [4] в реакции исследуемого изделия на воздействие, заданное в виде расчетного сейсмического сигнала.

Для этого предварительно следует определить комплексную передаточную функцию изделия  $H(j\omega)$  в исследуемой точке и спектральные характеристики его реакции на расчетный сейсмический сигнал  $\ddot{x}(t)$ . После чего рассчитать доверительный интервал ускорений, возникающих в точке исследуемой конструкции с заданной вероятностью, что позволит в дальнейшем определить максимальное значение ускорений изделия при воздействии, заданном в виде случайной функции времени, имеющей статистические характеристики расчетного сейсмического сигнала. При этом необходимо осуществить коррекцию расчетного сейсмического сигнала, таким образом, чтобы, учитывая передаточную функцию изделия, ускорение, в реакции на скорректированный сейсмический сигнал  $\ddot{x}^*(t)$ ,

имело максимальную величину, выявленную вероятностным путем.

Коррекцию будем проводить при условии минимального отличия между исходным расчетным и скорректированным сейсмическим сигналом по основным параметрам, таким как длительность ( $T$ ), максимальная амплитуда ( $A_{\max}$ ), спектр ответа и спектральная плотность процесса  $S(\omega)$ . В этом случае, чтобы определить сейсмостойкость, оказалось достаточно провести испытания оборудования на один сейсмический скорректированный сигнал  $\ddot{x}^*(t)$ .

### **Методика формирования реального сейсмического сигнала с учетом динамических характеристик исследуемого объекта**

Задача определения сейсмостойкости исследуемого оборудования, с учетом его динамических характеристик, решается по следующей схеме:

1. На базе набора расчетных сейсмических сигналов с помощью методики [5] определяются передаточные функции в узлах и местах креплений комплектующих изделий испытываемого оборудования. Передаточные функции определяются экспериментальным путем с использованием одного из методов [6].
2. Вычисляется реакция сложных колебательных систем, для которых уже определены передаточные функции на воздействие, заданное синтезированным сейсмическим сигналом (реакция определяется в виде временной функции).
3. Производится спектральный анализ реакции.
4. С использованием методики [7] определяется доверительный интервал максимальных амплитуд в реакции исследуемого оборудования на синтезированный сейсмический сигнал с заданной вероятностью.
5. Производится корректировка фазо-частотной характеристики синтезированного сейсмического сигнала с таким расчетом, чтобы максимальная амплитуда ускорения в реакции исследуемой колебательной системы была равна амплитуде, определенной ранее вероятностным путем.

6. Проводится испытание оборудования на сейсмостойкость посредством задания сейсмоплатформе с закрепленным на ней оборудованием движения в соответствии со скорректированным сигналом.

Рассмотрим более подробно математический аппарат, используемый для корректировки случайного сейсмического сигнала, предназначенного для испытания оборудования с учетом его передаточной функции.

Имеется сейсмический сигнал  $x(t)$ , воспринимаемый колебательной системой, с комплексной передаточной функцией  $H(j\omega)$ . Обозначим реакцию системы через  $y(t)$ . Вычислим воздействие  $x^*(t)$  и реакцию  $y^*(t)$  этой колебательной системы, если на входе задано воздействие  $x(t)$  и допускается управление фазовыми соотношениями его гармонических составляющих, что может обеспечить увеличение экстремума реакции. При этом спектры амплитуд воздействий  $x(t)$  и  $x^*(t)$ , а также  $y(t)$  и  $y^*(t)$  попарно сохраняются.

Дополнительно ставится условие появления в заданный момент времени  $t$  максимума или минимума в отклике  $y^*(t)$ , соответствующего максимуму или минимуму функции  $y(t)$ .

Очевидно, что комплексная амплитуда сейсмического сигнала  $x(t)$  и реакция системы  $y(t)$  могут быть записаны в виде:

$$X(j\omega) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = |X(j\omega)|e^{-j\varphi_x(\omega)};$$

$$Y(j\omega) = \int_0^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt = |Y(j\omega)|e^{-j\varphi_y(\omega)}.$$

Передаточная функция системы, для которой известны  $Y(j\omega)$  и  $X(j\omega)$ , имеет вид:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)},$$

запишем 
$$Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) = |X(j\omega)|e^{-j\varphi_x(\omega)} |H(j\omega)|e^{-j\varphi_H(\omega)},$$

или 
$$|Y(j\omega)|e^{-j\varphi_y(\omega)} = |X(j\omega)||H(j\omega)|e^{-j(\varphi_x(\omega) + \varphi_H(\omega))},$$

откуда 
$$\varphi_y(\omega) = \varphi_x(\omega) + \varphi_H(\omega).$$

Для конечных отрезков действия  $T$  функции  $y(t)$  можно записать:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N S(\omega_k) \cos[\omega_k t - \varphi_k^y(\omega_k)],$$

где 
$$S(\omega_k) = \frac{2}{T} \sqrt{A^2(\omega_k) + B^2(\omega_k)}.$$

Условие, соответствующее наибольшему вкладу  $k$ -ой составляющей частоты  $\omega_k$  в величину максимума реакции, определяется равенством

$$\cos(\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega)) = 1,$$

аналогично для минимума реакции

$$\cos(\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega)) = -1,$$

т. е. для любого момента времени  $t$  на интервале  $T$  условия максимальной положительной и отрицательной величины  $y(t)$  в момент времени  $t=t_1$  запишутся так

$$\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega) = 0,$$

$$\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega) = \pi,$$

откуда для максимума:  $\hat{\varphi}_k^y = \omega_k t_1$

и для минимума:  $\check{\varphi}_k^y = \omega_k t_1 - \pi.$

Если  $\varphi_k^x$  – значение фазы  $k$ -ой гармоники  $x(t)$  и  $\varphi_k^H$  – значение фазовой характеристики комплексной передаточной функции  $H(j\omega)$  на частоте  $\omega_k$ , то значение фазы, скорректированной на максимум отклика  $x^*(t)$ , будет

$$\hat{\varphi}_k^x = \varphi_k^x + c(\omega_k)(\omega_k t_1 - \varphi_k^x - \varphi_k^H), \quad (1)$$

где  $c(\omega_k)$  – функция линейной корректировки фазы.

При  $c(\omega) = 0$  во всем диапазоне частот имеет место равенство  $\hat{\varphi}_k^x = \varphi_k^x$  для всех  $k$  и  $y^*(t) = y(t)$ .

В случае, когда  $c(\omega) = 1$ , при тех же частотных условиях, функция отклика  $y^*(t)$  содержит предельно достижимый максимум, равный

$$A_{\max} = \sum_k |y_k|^y.$$

Таким образом, в общем случае  $0 \leq c(\omega) \leq 1$ , а  $|y_k|$  – модуль комплексной амплитуды в преобразовании Фурье функции  $y(t)$ .

Для того, чтобы увеличению значения функции  $c(\omega_k)$  соответствовало монотонное нарастание вклада данной гармоники в максимум отклика, решение по (1) дополняется следующим алгоритмом:  $V_k = (\omega_k t_1 - \varphi_k^H) \bmod 2\pi$ ,

если  $|V_k - \varphi_k^x| > \pi$  и  $V_k < \varphi_k^x$ ,

то  $\hat{\varphi}_k^x = \varphi_k^x + c(\omega_k)(V_k - \varphi_k^x - 2\pi)$ ,

если  $|V_k - \varphi_k^x| < \pi$  и  $V_k < \varphi_k^x$ ,

то  $\hat{\varphi}_k^x = \varphi_k^x + c(\omega_k)(V_k - \varphi_k^x + 2\pi)$ .

При рассмотрении вклада  $k$ -ой гармоники в минимум отклика принимаем:

$$V_k = (\omega_k t_1 - \varphi_k^H - \pi) \bmod 2\pi.$$

Пусть исходное воздействие представлено временным рядом  $\{x_n\}$  длины  $2N$ , тогда решение поставленной задачи сводится к следующим преобразованиям:

$$A_k^x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N-1} x_n \cdot \cos \frac{\pi kn}{N}; \quad B_k^x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N-1} x_n \cdot \sin \frac{\pi kn}{N};$$

$$|x_k| = \sqrt{(A_k^x)^2 + (B_k^x)^2}; \quad \varphi_k^x = \arctg \frac{B_k^x}{A_k^x};$$

$$\hat{A}_k^x = |x_k| \cos \hat{\varphi}_k^x; \quad \hat{B}_k^x = |x_k| \sin \hat{\varphi}_k^x.$$

Принимая  $A_0^x=0$  получим для скорректированного воздействия:

$$\hat{x}_n = \frac{1}{2}(-1)^n A_N^x + \sum_{k=1}^{N-1} \left( A_k^x \cos \frac{\pi kn}{N} + B_k^x \sin \frac{\pi kn}{N} \right)$$

или ряд  $\{\hat{x}_n\}$ .

Для отклика с повышающимся максимумом имеет место следующее преобразование. Пусть  $|H_k(j\omega)|$  – модуль, а  $\varphi_k^H$  – фазовая характеристика комплексной передаточной функции системы, тогда

$$|y_k| = |H_k(j\omega)| |x_k|; \quad \hat{\varphi}_k^y = \hat{\varphi}_k^x + \hat{\varphi}_k^H;$$

$$\hat{A}_k^y = |y_k| \cos \hat{\varphi}_k^y; \quad \hat{B}_k^y = |y_k| \sin \hat{\varphi}_k^y,$$

принимая  $A_0^y=0$ , получим:

$$\hat{y}_k = \frac{1}{2}(-1)^n A_N^y + \sum_{k=1}^{N-1} \left( \hat{A}_k^y \cos \frac{\pi kn}{N} - \hat{B}_k^y \sin \frac{\pi kn}{N} \right)$$

или ряд  $\{\hat{y}_k\}$ .

Аналогичные преобразования выполняются для расчета рядов  $\{\hat{x}_k\}$  и  $\{\hat{y}_k\}$ , отвечающих условию увеличения минимума отклика системы.

При корректировке исходного сейсмического сигнала  $x(t)$  следует добиваться того, чтобы при минимальной коррекции был получен максимальный отклик исследуемой колебательной системы.

Степень различия временных рядов функций  $\{x_n\}$  и  $\{y_n\}$  можно оценить по величине среднего квадратичного отклонения  $\delta_0$  из равенства:

$$\delta_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2$$

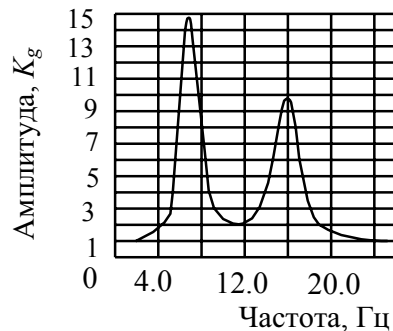
или по величине коэффициента асинхронности колебаний:

$$S_i = 1 - \left( \frac{\delta_0}{2S} \right)^2, \quad (2)$$

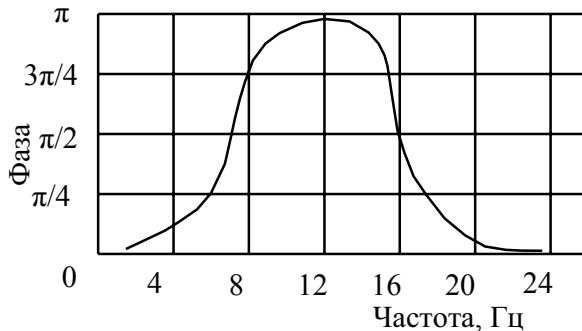
где  $S=S_x=S_{\hat{x}}$  – стандарты колебаний относительно среднего.

Можно показать, что безразмерный коэффициент  $S_i$ , записанный в указанном виде, имеет линейную зависимость с коэффициентом корреляции  $r$ , а именно:

$$S_i = \frac{1+r}{2},$$



а



б

Рис. 1. Экспериментальные характеристики инвертора в точке крепления: АЧХ (а), ФЧХ (б)

т. е. значению  $S_i=0$  соответствует  $r=-1$  и, следовательно, колебания  $x(t)$  и  $\hat{x}(t)$  повторяют друг друга, отличаясь своей полярностью.

В случае  $S_i=0,5$ , процессы  $x(t)$  и  $\hat{x}(t)$  независимы, так как  $r=0$ . И, наконец, в случае  $S_i=1$  имеет место полная согласованность процессов  $x(t)$  и  $\hat{x}(t)$  при  $r=1$ .

Равенство (2) доказывается следующим образом:

$$\delta_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2 =$$

$$= \frac{1}{N-1} \left[ \sum_{n=1}^N x_n^2 + \sum_{n=1}^N \hat{x}_n^2 - 2 \sum_{n=1}^N x_n \hat{x}_n \right],$$

так как  $\sum_{n=1}^N x_n \hat{x}_n = Mx_n \hat{x}_n$ ,  $Mx_n \hat{x}_n$  – корреляционный момент, где

$$Mx_n \hat{x}_n = rx_n \hat{x}_n S_x S_{\hat{x}}, \quad \delta_0^2 = S_x^2 + S_{\hat{x}}^2 - 2r S_x S_{\hat{x}}.$$

Так как в нашем случае  $S=S_x=S_{\hat{x}}$ , то

$$\frac{\delta_0^2}{4S^2} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} - \frac{r}{2} = \frac{1-r}{2},$$

откуда  $S_i = 1 - \left( \frac{\delta_0}{2S} \right)^2 = \frac{1+r}{2}$ .

Рассмотрим несколько примеров по формированию скорректированного сейсмического сигнала с учетом передаточных характеристик исследуемых на сейсмостойкость изделий.

Для проведения исследования сейсмостойкости оборудования по описанной выше методике был взят инвертор. Инвертор является составной частью агрегата бесперебойного питания. Наиболее уязвимым узлом инвертора, с точки зрения сейсмостойкости, является блок управления (БУ). При испытании БУ на гармонические нагрузки, эквивалентные сейсмическим, было отмечено раскрытие фиксаторов разъемов и в дальнейшем обрыв электрических цепей.

Экспериментальным путем были определены амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики инвертора в точке крепления БУ к несущему каркасу (рис. 1).

Сейсмоплатформе с закрепленным на ней инвертором в качестве динамической нагрузки было

задано движение, соответствующее синтезированному сейсмическому сигналу  $\dot{x}(t)$  (рис. 2).

Статистические характеристики сигнала приводятся на рис. 3 и 4.

Расчетным путем при воздействии на БУ заданным сигналом  $\dot{x}(t)$  была определена реакция в виде ускорения  $\ddot{y}(t)$  (рис. 5).

На рис. 6, 7 представлены амплитудные и частотные характеристики реакции  $\ddot{y}(t)$  исследуемого изделия.

Как видно из рис. 8, управляющий платформой электрический сигнал  $\dot{x}^b(t)$ , соответствующий сигналу  $x..(t)$ , и ускорение движения платформы  $\ddot{x}^b(t)$  (рис. 9) достаточно близки по внешнему виду, так как среднее квадратичное отклонение между ними  $\delta=0,18$ .

Численным способом [8], при допущении о стационарности отклика  $\ddot{y}(t)$ , было определено распределение вероятности максимальных амплитуд в заданном доверительном интервале вероятности (рис. 10).



Рис. 2. Синтезированные сейсмические сигналы  $\dot{x}(t)$  (а) и его спектр откликов (б)

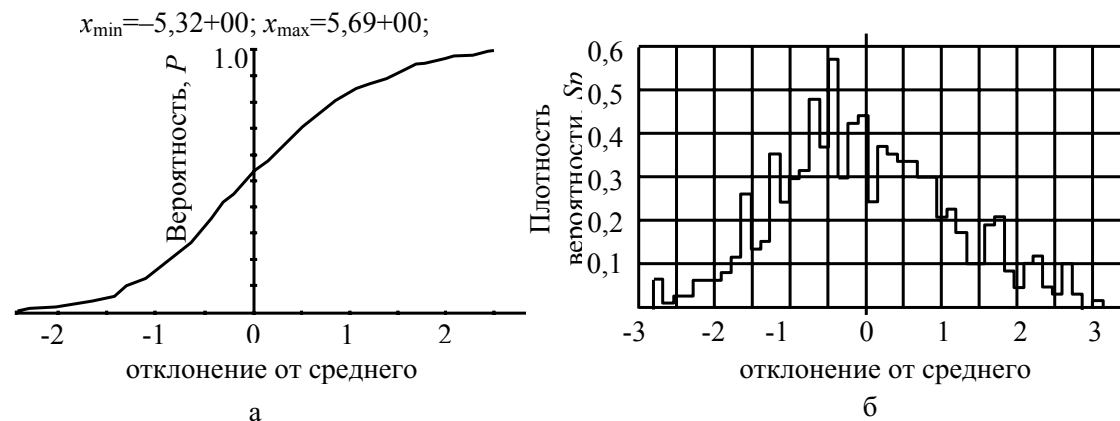


Рис. 3. Статистические характеристики сейсмического сигнала  $\dot{x}(t)$ : а) функция распределения, б) плотность распределения

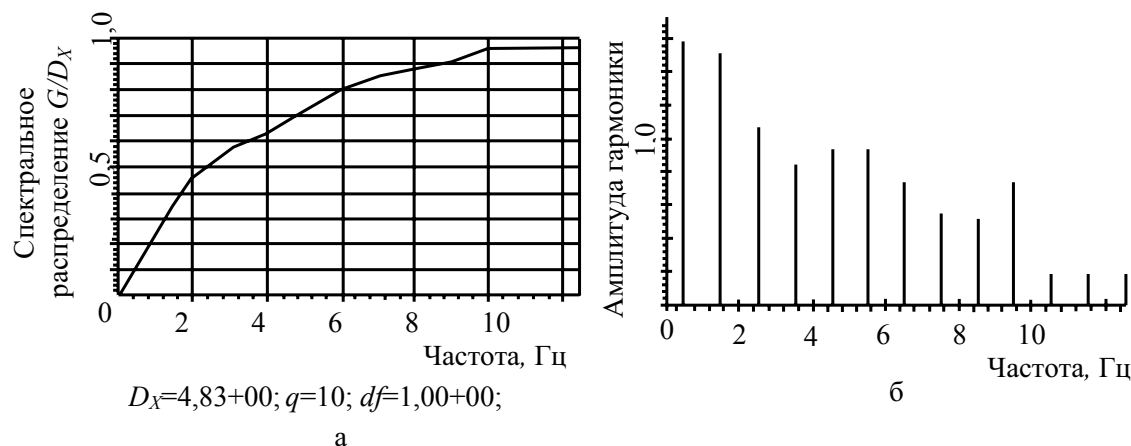


Рис. 4. Распределение сейсмического сигнала: спектральное (а), амплитудное (б)

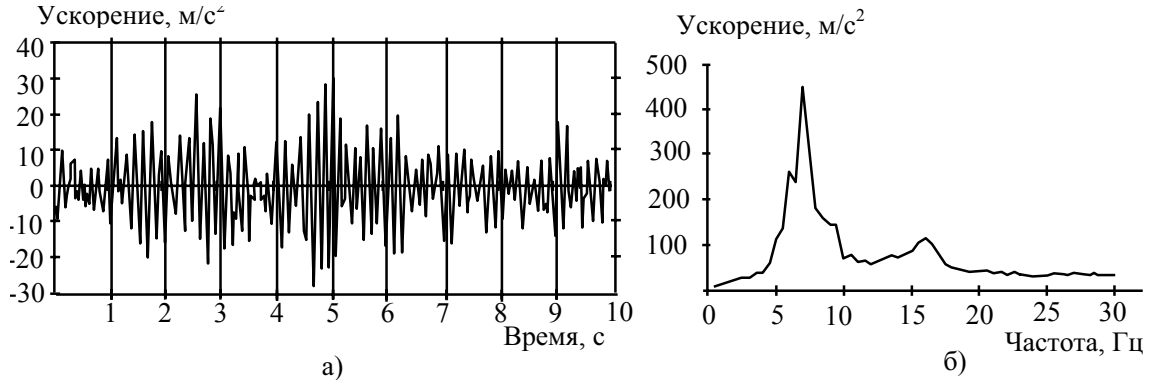


Рис. 5. Реакция  $\ddot{y}(t)$  инвертора в месте крепления блока управления (а) и спектр её ответа при  $\delta=0,06$  (б)

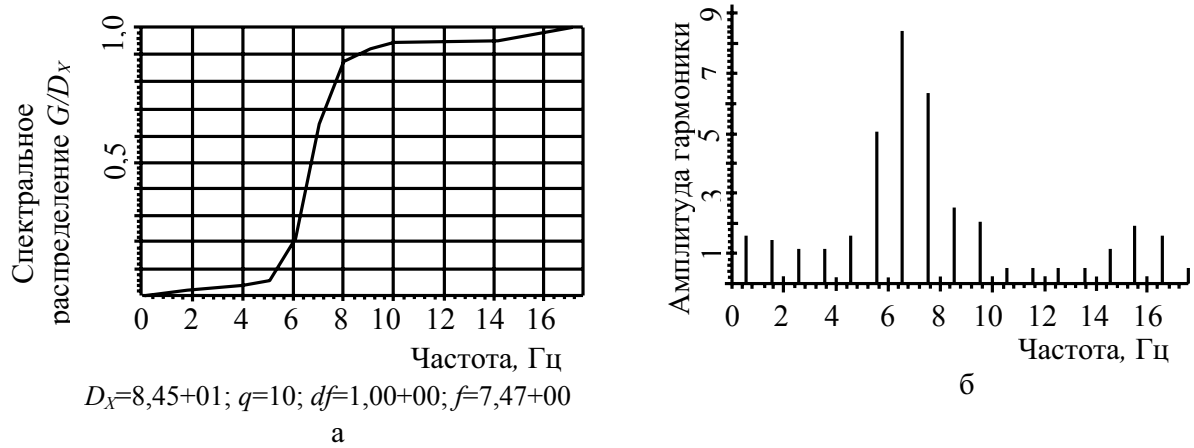


Рис. 6. Статистические характеристики сейсмического сигнала  $\ddot{y}(t)$ : а) функция распределения, б) плотность распределения

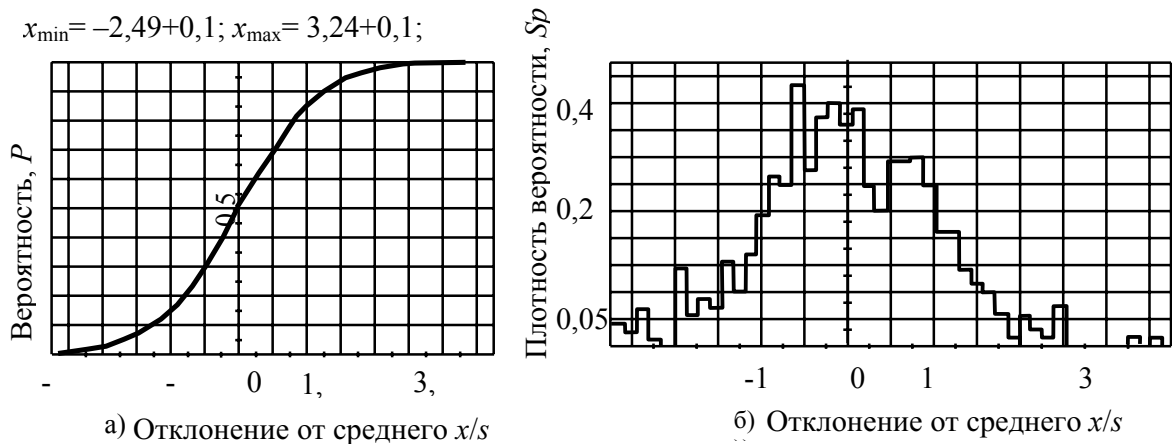


Рис. 7. Спектральное (а) и амплитудное (б) распределение

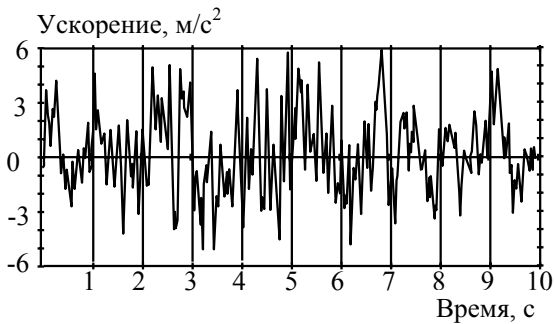


Рис. 8. Сигнал управления сейсмоплатформой:  $x..^b(t)$

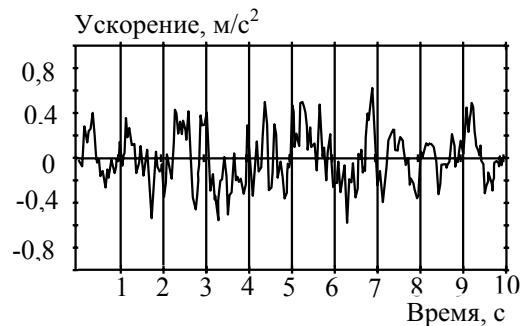


Рис. 9. Ускорение движения сейсмоплатформы:  $x..^a(t)$

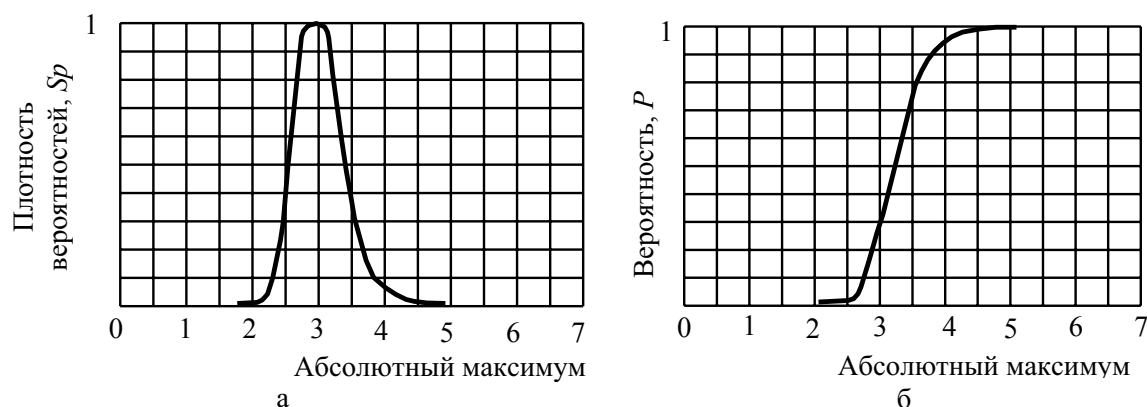


Рис. 10. Функция распределения (а) и плотность распределения (б) вероятности выбросов

При вероятности  $P=0,99$  максимальная величина реакции оборудования на случайные сигналы, имеющие амплитудные и спектральные характеристики сигнала  $\ddot{x}(t)$ , не превысит значения  $A_{max}=40,0$  м/с<sup>2</sup>. Таким образом, для определения сейсмостойкости инвертора необходимо в сигнале скорректировать ФЧХ так, чтобы максимальная величина реакции блока управления была не меньше 40 м/с<sup>2</sup>, что позволит снизить жесткость испытаний и сделать достаточно уверенный вывод о сейсмостойкости изделия.

#### Заключение

Предложена методика формирования синтезированного сейсмического сигнала, учитывающего как динамические характеристики исследуемого

оборудования, так и вероятностные свойства сейсмических сигналов. Определены частотные диапазоны и значения коэффициентов коррекции при формировании синтезированного сейсмического сигнала, показан метод построения сигнала, эквивалентного сейсмическому, с плавно изменяющейся частотой и амплитудой. Проиллюстрирована возможность его воспроизведения на сейсмоплатформе. Разработанный метод позволяет формировать сейсмический сигнал, на действие которого реакция исследуемого объекта имеет заранее заданный уровень амплитуды. Обоснована необходимость проведения натуральных динамических испытаний на сейсмостойкость – неотъемлемой части как расчетных, так и стендовых методов определения сейсмостойкости электрооборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаммер Н.А., Гриффон Б.Г. Испытание радиоэлектронной аппаратуры и материалов на воздействие климатических и механических условий. – М.: Энергия, 1965. – 268 с.
2. Батхин Б.М., Пискарев В.В. Метод бесконтактного возбуждения динамических колебаний моделей гидросооружений // Труды координационного совещания на гидротехнике. – М.: Энергия, 1974. – С.38–42.
3. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 206 с.
4. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. – М.: Наука, 1970. – 392 с.
5. Абриашвили Ю.К., Пискарев В.В. Методы выбора и построения синтезированных акселерограмм для расчета энергетических объектов на сейсмические воздействия // Труды ЦКТИ. – Вып. 212. – Л., 1984. – С. 114–122.
6. Пискарев В.В., Понамарев Д.Н. Оценка сейсмостойкости электротехнического оборудования АЭС // Электрические станции. – 1981. – № 6. – С. 8–11.
7. Хахо И.Х. Вероятностный подход к оценке устойчивости электротехнического оборудования // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН РФ. – 2005. – № 2. – С. 41–45.
8. Ведерников А.А. К расчету трансформаторов тока и напряжения на сейсмические воздействия // Проектирование энергосистем и электрических сетей. – Ташкент: ФАН, 1976. – С. 61–67.

Поступила 28.03.2008 г.