

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ЕГО ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

И.Х. Хахо

*ГОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик*

Рецензент В.Ф. Калинин

Ключевые слова и фразы: динамические характеристики; сейсмический сигнал; сейсмостойкость оборудования; характеристики инвертора.

Аннотация: Рассматривается метод формирования сейсмического сигнала с учетом динамических характеристик исследуемого оборудования, который позволяет получить сейсмический сигнал, имеющий статистические характеристики расчетных акселерограмм землетрясений, при этом реакция оборудования на этот сигнал будет иметь заранее заданный уровень. Описанный метод позволяет определить сейсмостойкость электротехнического оборудования с использованием сейсмоплатформы на действие одного сейсмического сигнала с заданной степенью достоверности получаемых результатов.

Методика формирования реального сейсмического сигнала с учетом динамических характеристик исследуемого объекта. Надежную оценку сейсмостойкости оборудования можно получить при испытании его на случайную динамическую нагрузку, заданную в виде сейсмического сигнала [1, 2]. Для проведения расчетов на сейсмостойкость сейсмологами, как правило, выдается сейсмический сигнал, который чаще всего является реальной записью ускорений при землетрясении, зарегистрированный в условиях, адекватных региону строительной площадки.

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.

Хахо И.Х. – руководитель Кабардино-Балкарского республиканского центра НИТ Кабардино-Балкарского государственного университета, г. Нальчик.

Если, следуя В.В. Болотину, 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 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 расчетным путем находится доверительный интервал ускорений, возникающих в точке исследуемой конструкции с заданной вероятностью, что позволяет определить максимальное значение ускорений изделия при воздействии, заданном в виде случайной функции времени, имеющей статистические характеристики расчетного сейсмического сигнала $\ddot{x}(t)$.

Теперь следует осуществить коррекцию расчетного сейсмического сигнала, причем таким образом, чтобы, учитывая передаточную функцию изделия, ускорение, в реакции которого 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, спектральная плотность процесса $S(\omega)$.

В этом случае, чтобы определить сейсмостойкость, оказалось достаточно провести испытания оборудования на один сейсмический скорректированный сигнал $\ddot{x}^*(t)$.

Таким образом, задача определения сейсмостойкости исследуемого оборудования, с учетом его динамических характеристик, решается по следующей схеме.

1. На базе набора расчетных сейсмических сигналов, определяются передаточные функции в узлах и местах креплений комплектующих изделий испытываемого оборудования, нормальное функционирование которых зависит от величины сейсмических нагрузок. Передаточные функции определяются экспериментальным путем с использованием одного из известных методов [3].

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. 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 $y^*(t)$, соответствующий максимуму или минимуму функции $y(t)$.

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

$$X(j\omega) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = |X(j\omega)|e^{-j\omega\varphi_x(\omega)}; \quad (1)$$

$$Y(j\omega) = \int_0^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt = |Y(j\omega)|e^{-j\omega\varphi_y(\omega)}. \quad (2)$$

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

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}, \quad (3)$$

запишем

$$Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) = |X(j\omega)|e^{-j\varphi_x(\omega)}|H(j\omega)|e^{-j\varphi_H(\omega)}, \quad (4)$$

или

$$|Y(j\omega)|e^{-j\varphi_y(\omega)} = |X(j\omega)||H(j\omega)|e^{-j(\varphi_x(\omega)+\varphi_H(\omega))}, \quad (5)$$

откуда

$$\varphi_y(\omega) = \varphi_x(\omega) + \varphi_H(\omega). \quad (6)$$

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

$$y(t) = \sum_{k=1}^i \frac{2}{T} S(\omega_k) \cos[\omega_k t - \varphi_k^y(\omega_k)] = \sum_{k=1}^N S(\omega_k) \cos[\omega_k t - \varphi_k^y(\omega_k)], \quad (7)$$

где

$$S(\omega_k) = \frac{2}{T} \sqrt{A^2(\omega_k) + B^2(\omega_k)}. \quad (8)$$

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

$$\cos(\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega)) = 1, \quad (9)$$

аналогично для минимума реакции

$$\cos(\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega)) = -1, \quad (10)$$

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

$$\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega) = 0; \quad (11)$$

$$\omega_k t_1 - \varphi_k^y(\omega) = \pi, \quad (12)$$

откуда для максимума –

$$\hat{\varphi}_k^y = \omega_k t_1, \quad (13)$$

и для минимума –

$$\check{\varphi}_k^y = \omega_k t_1 - \pi. \quad (14)$$

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

$$\hat{\varphi}_k^x = \varphi_k^x + c(\omega_k)(\omega_k t_1 - \varphi_k^x - \varphi_k^H), \quad (15)$$

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 $\hat{y}(t) = y(t)$.

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

$$A_{\max} = \sum_k |y_k|_k^y. \quad (16)$$

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

Для того чтобы увеличению значения функции $c(\omega_k)$ соответствовало монотонное нарастание вклада данной гармоники в максимум отклика, решение по (15) 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 $\varphi_k^x = \varphi_k^x + c(\omega_k)(V_k - \varphi_k^x - 2\pi)$, (17)

если $|V_k - \varphi_k^x| < \pi$ и $V_k < \varphi_k^x$, то $\varphi_k^x = \varphi_k^x + c(\omega_k)(V_k - \varphi_k^x + 2\pi)$.

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

$$V_k = (\omega_k t_1 - \phi_k^H - \pi) \bmod 2\pi. \quad (18)$$

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

$$A_k^x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N-1} x_n \cos \frac{\pi kn}{N}; \quad (19)$$

$$B_k^x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N-1} x_n \sin \frac{\pi kn}{N}; \quad (20)$$

$$|x_k| = \sqrt{(A_k^x)^2 + (B_k^x)^2}; \quad \phi_k^x = \arctg \frac{B_k^x}{A_k^x}; \quad (21)$$

$$\hat{A}_k^x = |x_k| \cos \hat{\phi}_k^x; \quad \hat{B}_k^x = |x_k| \sin \hat{\phi}_k^x. \quad (22)$$

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

$$\hat{x}_n = \frac{1}{2} (-1)^n A_N^x + \sum_{k=1}^{N-1} \left(A_k^x \cos \frac{\pi kn}{N} + B_k^x \sin \frac{\pi kn}{N} \right) \text{ или ряд } \{ \hat{x}_n \}. \quad (23)$$

Для отклика с повышающимся максимумом имеет место следующее преобразование: пусть $|H_k(j\omega)|$ – модуль, а ϕ_k^H – фазовая характеристика комплексной передаточной функции системы, тогда $|y_k| = |H_k(j\omega)| |x_k|$; $\hat{\phi}_k^y = \hat{\phi}_k^x + \hat{\phi}_k^H$; $\hat{A}_k^y = |y_k| \cos \hat{\phi}_k^y$; $\hat{B}_k^y = |y_k| \sin \hat{\phi}_k^y$, принимая $A_0^y = 0$, получим:

$$\hat{y}_k = \frac{1}{2} (-1)^n A_N^y + \sum_{k=1}^{N-1} \left(\hat{A}_k^y \cos \frac{\pi kn}{N} - \hat{B}_k^y \sin \frac{\pi kn}{N} \right) \text{ или ряд } \{ \hat{y}_k \}. \quad (24)$$

Аналогичные преобразования выполняются для расчета рядов $\{ \tilde{x}_k \}$ и $\{ \tilde{y}_k \}$, 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 δ_0 из равенства

$$\delta_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2, \quad (25)$$

или по величине коэффициента асинхронности колебаний

$$S_i = 1 - \left(\frac{\delta_0}{2S} \right)^2, \quad (26)$$

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: $S_i = \frac{1+r}{2}$, 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 (26) доказывается следующим образом:

$$\delta_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2 = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{n=1}^N x_n^2 + \sum_{n=1}^N \hat{x}_n^2 - 2 \sum_{n=1}^N x_n \hat{x}_n \right], \quad (27)$$

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

где

$$Mx_n \hat{x}_n = rx_n \hat{x}_n S_{x_n} S_{\hat{x}_n}, \quad \delta_0^2 = S_x^2 + S_{\hat{x}}^2 - 2rS_x S_{\hat{x}}. \quad (28)$$

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

$$\frac{\delta_0^2}{4S^2} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} - \frac{r}{2} = \frac{1-r}{2}, \quad (29)$$

откуда

$$S_i = 1 - \left(\frac{\delta_0}{2S} \right)^2 = \frac{1+r}{2}. \quad (30)$$

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 $\ddot{x}(t)$ (рис. 2). Статистические характеристики сигнала приводятся на рис. 3 и 4.

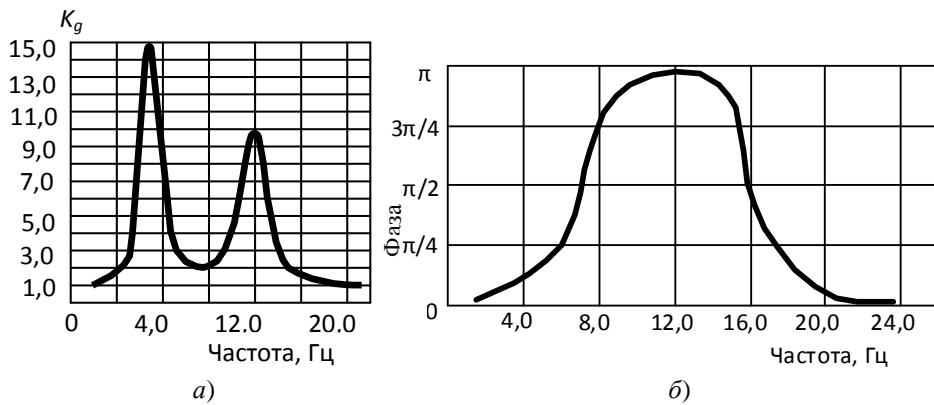


Рис. 1. Экспериментальные частотные характеристики инвертора в точке крепления:
a – амплитудно-частотная; *б* – фазо-частотная

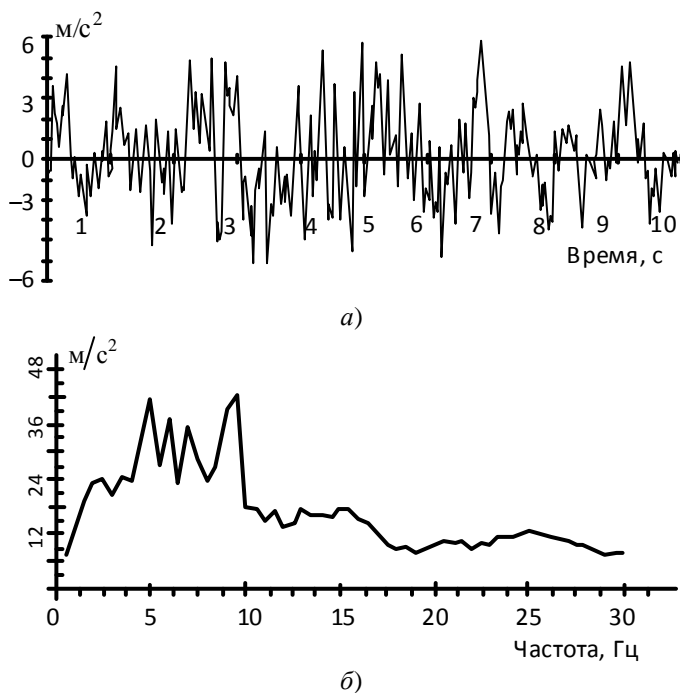


Рис. 2. Синтезированные сейсмические сигналы $\ddot{x}(t)$ (*a*) и его спектр ответов (*б*)

Расчетным путем при воздействии на БУ заданным сигналом $\ddot{x}(t)$ была определена реакция в виде ускорения $\ddot{y}(t)$ (рис. 5). На рис. 6, 7 представлены амплитудные и частотные характеристики реакции исследуемого изделия.

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

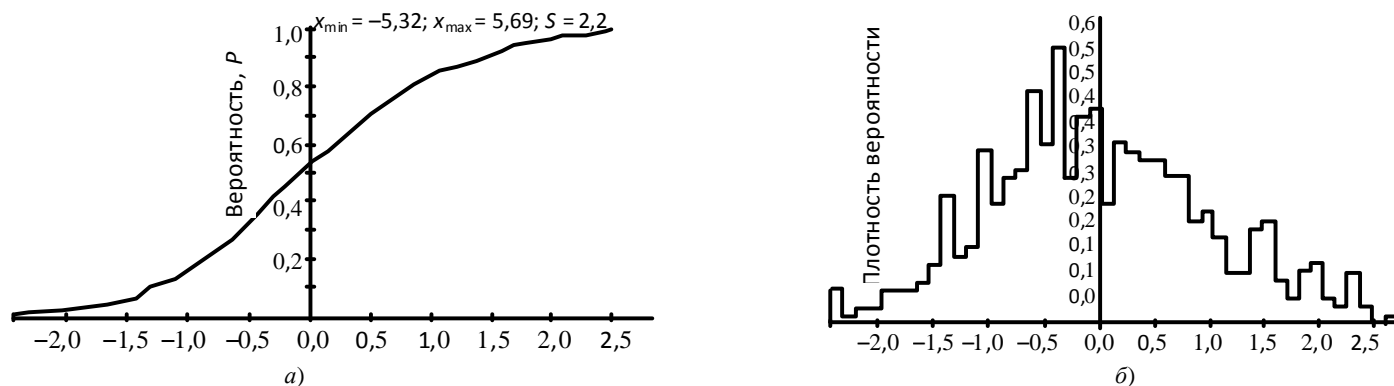


Рис. 3. Статистическая функция плотности распределения сейсмического сигнала $\ddot{x}(t)$:

a – отклонение от среднего S ; b – отклонение от среднего x/S

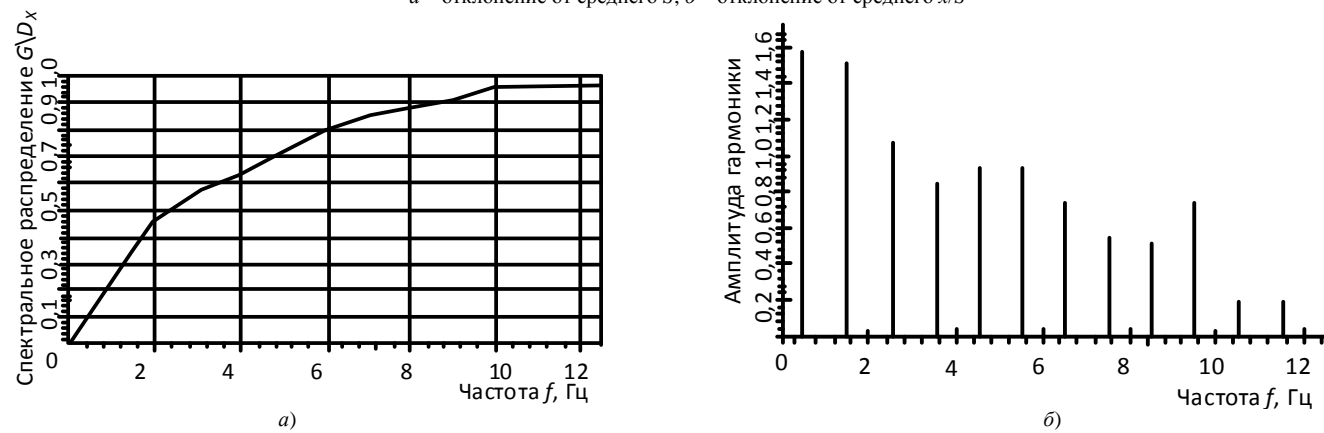


Рис. 4. Распределение сейсмического сигнала:

a – спектральное $D_x = 4,83 + 0,0$; $q = 10$; $df = 1,00 + 0,0$; $f = 4,99 + 0,0$; b – амплитудное

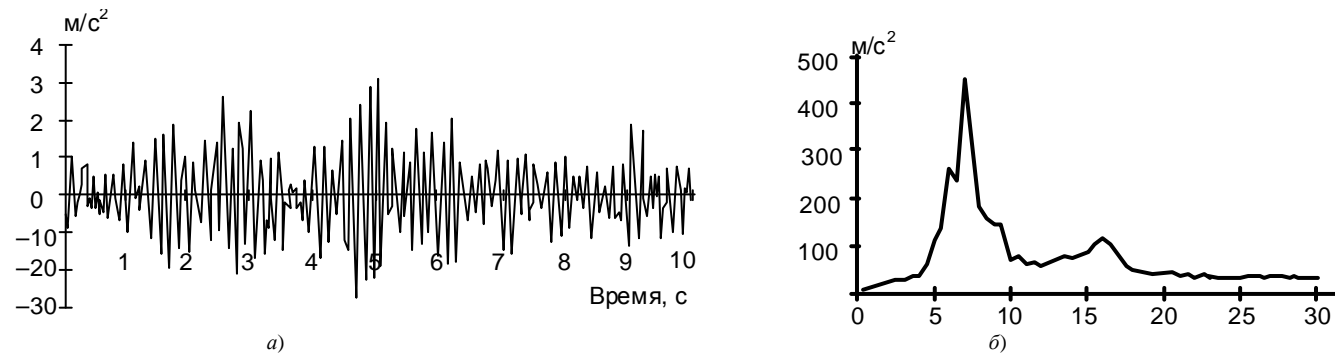


Рис. 5. Реакция $\ddot{y}(t)$ инвертора в месте крепления блока управления (а) и спектр ее ответа при $\delta = 0,06$ (б)

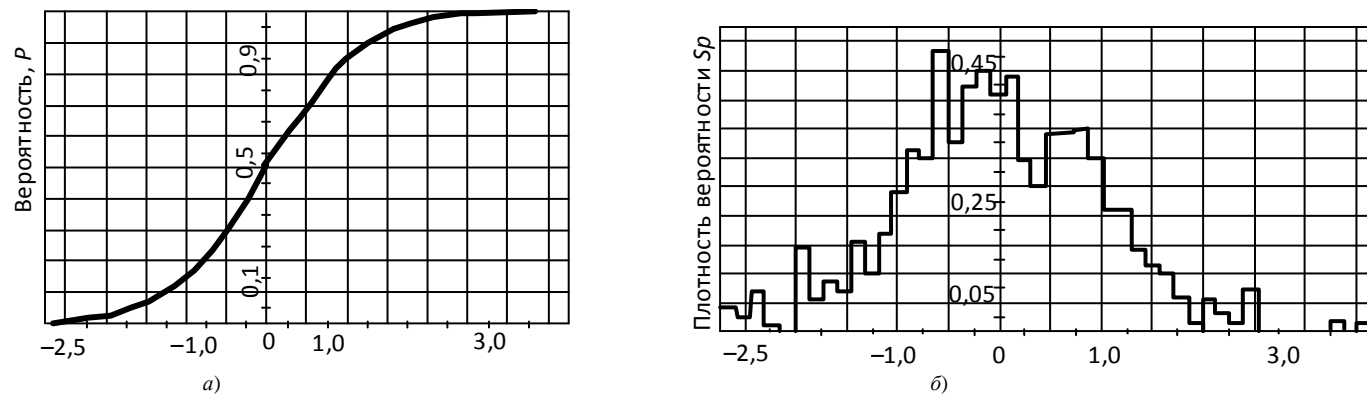


Рис. 6. Статистические функции распределения (а) и плотности распределения (б) сигнала $\ddot{x}(t)$:
 a – отклонение от среднего x/s ; $x_{\min} = -2,49 + 0,1$; $x_{\max} = 3,24 + 0,1$; $s = 9,19 + 0,0$; b – отклонение от среднего x/s

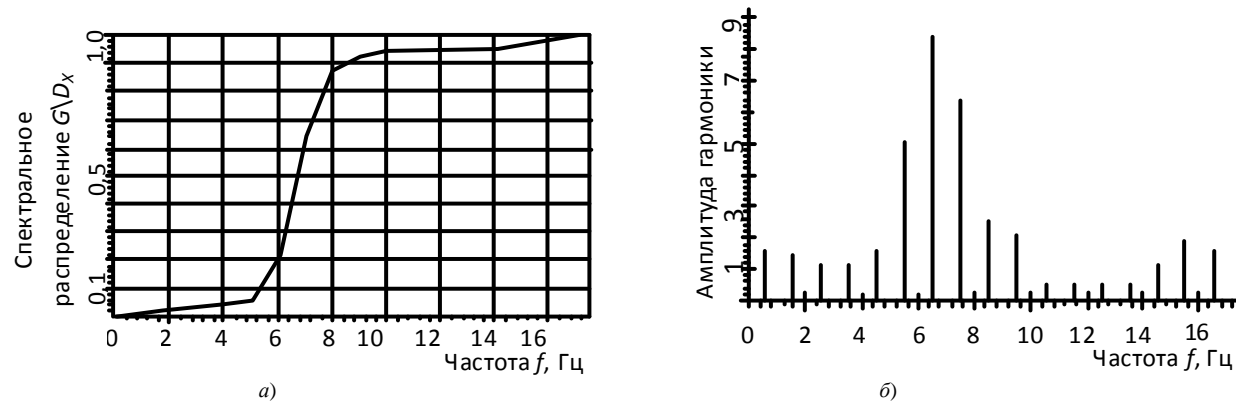


Рис. 7. Спектральное (а) и амплитудное (б) распределение $\ddot{x}(t)$:
 $a - D_x = 8,45 + 0,1$; $q = 10$; $df = 1,00 + 0,0$; $f = 7,47 + 0,0$

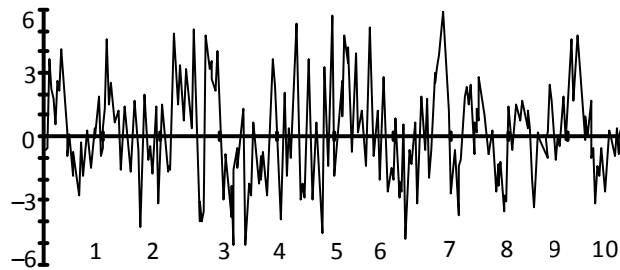


Рис. 8. Сигнал $\ddot{x}^b(t)$ управления сейсмоплатформой



Рис. 9. Ускорение движения сейсмоплатформы $\ddot{x}^n(t)$

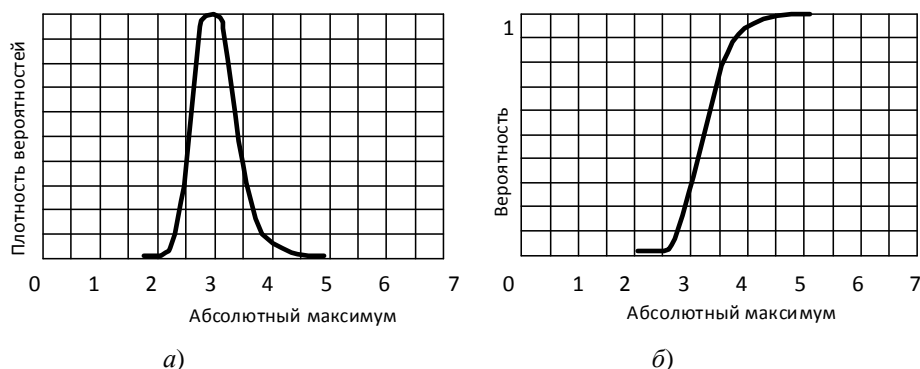


Рис. 10. Функция распределения (а) и плотность распределения (б) вероятности выбросов

Численным способом, при допущении о стационарности отклика $\ddot{y}(t)$ [18], было определено распределение вероятности максимальных амплитуд в заданном доверительном интервале вероятности (рис. 10).

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

Список литературы

1. Адаммер, Н.А. Испытание радиоэлектронной аппаратуры и материалов на воздействие климатических и механических условий / Н.А. Адаммер, Б.Г. Гриффон. – М. : Энергия, 1965. – 268 с.
2. Батхин, Б.М. Метод бесконтактного возбуждения динамических колебаний моделей гидросооружений : труды координационного совещания по гидротехнике / Б.М. Батхин, В.В. Пискарев. – М. : Энергия, 1974. – С. 38–42.
3. Пискарев, В.В. Оценка сейсмостойкости электротехнического оборудования АЭС / В.В. Пискарев, Д.Н. Понамарев // Электрические станции. – 1981. – № 6. – С. 8–11.

Research into Seismological Stability of Electro-Technical Equipment with Regard for its Dynamic Characteristics

I.Kh. Khakho

*Kabardino-Balkaria State University
named after Kh.M. Berbekov, Nalchik*

Key words and phrases: dynamic characteristics; seismic signal; seismological stability of equipment; inverter's characteristics.

Abstract: The technique of forming seismic signal with regard for dynamic characteristics of the examined equipment is considered; it enables to receive seismic signal with static characteristics of calculated accelerograms of earthquakes, thus the equipment reaction to this signal will have the before given level. The described technique enables to determine seismological stability of the electro-technical equipment with seismic platform for one seismic signal with the given level of accuracy of produced results.

© И.Х. Хахо, 2008