

Генерирование случайных воздействий при исследовании устройств и систем управления

Е.С. Лобусов, Тьонг Хоанг Мань

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: evgeny.lobusov@yandex.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с получением стационарных случайных сигналов с заданными характеристиками в виде спектральной плотности. Для этой цели использовано базовое представление $x(t)\sin(\omega_{cm}t + \varphi) + y(t)\cos(\omega_{cm}t + \varphi)$, в котором отличительной особенностью по сравнению с известными представлениями является то, что величины $x(t)$ и $y(t)$ — независимые случайные процессы кусочно-линейного типа, конструируемые непосредственно по сигналам от датчиков случайных чисел. Спектральная плотность такого представления достаточно хорошо аппроксимируется «треугольником». Это свойство позволяет отразить существование в реальных спектральных плотностях пиков, проявляющихся на различных частотах и, в общем случае, аппроксимировать исходную спектральную плотность совокупностью таких «треугольников». Кроме того, в отличие от широко используемого подхода на основе формирующих фильтров в рассматриваемом случае удастся избежать переходных процессов и сразу начать генерировать требуемый случайный сигнал. Приведено сравнение результатов моделирования спектральной плотности с явно выраженным пиком на основе традиционного подхода с использованием формирующего фильтра и на основе предлагаемого способа, а также вариант аппроксимации реальной записи виброускорений транспортной машины.

Ключевые слова: случайный процесс, формирующий фильтр, аппроксимация, спектральная плотность.

Generation of Random Signals in Control Units and Systems Research

E.S. Lobusov, Tuong Hoang Manh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: evgeny.lobusov@yandex.ru

The article deals with the problems of generating stationary signals with desired characteristics of the spectral density. For that purpose, the resulting signal is represented as a sum of the following type $x(t)\sin(\omega_{sm}t + \varphi) + y(t)\cos(\omega_{sm}t + \varphi)$. If we compare this expression with the well-known ones, we can see its distinctive feature: $x(t)$ and $y(t)$ are independent random piecewise-linear processes, they are formed by the signals from random number generators. Spectral density the signal of this type is well approximated by triangles. This way of approximation reflects peaks existence in real spectral density characteristics which becomes apparent in different frequencies. In general it gives a good opportunity to make approximation of initial spectral

density by the set of such triangles. Furthermore, unlike the wide spread forming filter approach, in the case under consideration it is possible to avoid transient responses and begin to generate the proper random signal. Applying the traditional approach we make the comparison of spectral density modeling results with the explicit peak using the forming filter and relying on the proposed method. Moreover, we show a possible approximation of the real record of the transport machine vibration acceleration.

Keywords: *random process, forming filter, approximation, spectral density.*

При отработке функционирования систем управления влияние факторов внешней среды учитывается введением случайных и детерминированных воздействий. В связи с этим возникает задача генерации или синтеза соответствующих воздействий, обладающих заданными характеристиками.

Генерация детерминированных воздействий не представляет больших трудностей, так как воздействия задаются в виде, допускающем непосредственную реализацию.

Широко распространенной является задача, относящаяся к генерированию случайных стационарных процессов. Статистические подходы используют при описании собственных шумов измерителей с последующим определением их влияния, при описании возмущений внешней среды, действующих на рассматриваемый объект или процесс и т. д. По этой тематике существует обширная литература [1–7].

Во многих случаях для генерации применяется традиционный подход, связанный с использованием *формирующих фильтров*. Однако достаточно часто экспериментально определенные спектральные характеристики (спектральная плотность) содержат выбросы, проявляющиеся на различных частотах. В этом случае математическое описание таких ситуаций с помощью формирующих фильтров может приводить к сложным выражениям, сравнимым с описанием исследуемого объекта или процесса [4].

В соответствии с изложенным рассмотрим ситуацию, связанную с формированием алгоритма получения случайного процесса, учитывающего наличие пиков в исходных данных по спектральной плотности и, одновременно, в функционировании которого отсутствует переходный процесс. Именно этот случай проанализирован далее.

Генерирование случайных процессов. Рассмотрим стационарный случайный процесс, процедура которого не использует формирующие фильтры.

Блок-схемы (рис. 1) включают в себя генератор случайных чисел Ген, импульсный элемент (ИЭ), функционирующий с временным тактом Δ_t , и формирующие элементы (ФЭ) двух типов (прямоугольного и треугольного) [7].

Сигнал от генератора Ген (см. рис. 1) формирует импульсную последовательность, которую представим в виде

$$x^*(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{s_0}}{\sqrt{\Delta_t}} \varepsilon[i] \delta(t - i\Delta_t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x[i] \delta(t - i\Delta_t); \quad x[i] = \frac{\sqrt{s_0}}{\sqrt{\Delta_t}} \varepsilon[i],$$

где $\varepsilon[i]$ — дискретная последовательность случайных величин, имеющая соответственно математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию и спектральную плотность:

$$\mathbf{M}\{\varepsilon[i]\} = 0; \quad \mathbf{M}\{\varepsilon^2[i]\} = 1;$$

$$R_\varepsilon[m] = \begin{cases} 1, & m = 0; \\ 0, & m \neq 0, \end{cases} \quad S_\varepsilon^* \left(-\frac{\pi}{\Delta_t} < \omega < \frac{\pi}{\Delta_t} \right) = 1.$$

Эти выражения можно записать и для переменной $x[i]$ с учетом умножения на коэффициент s_0/Δ_t .

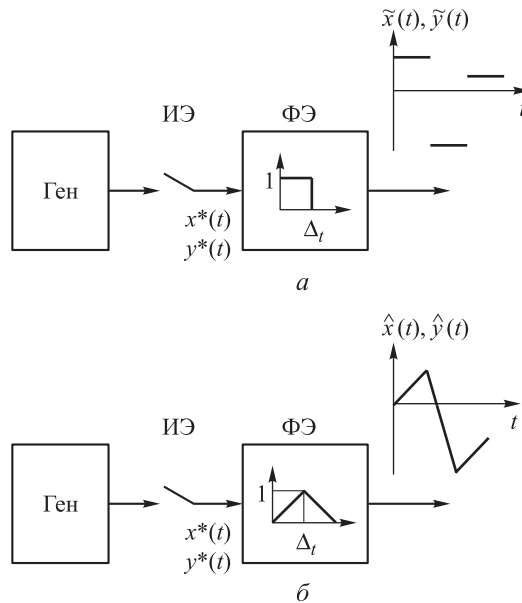


Рис. 1. Блок-схемы моделирования случайного процесса с формирующими элементами прямоугольного (а) и треугольного (б) типов

Согласно блок-схемам, приведенным на рис. 1, сигнал на выходе первого ФЭ является кусочно-постоянным, а сигнал на выходе второго ФЭ — кусочно-линейным.

Оценку спектральной плотности $S_{\tilde{x}}(\omega)$ сигнала $\tilde{x}(t)$ на выходе первого ФЭ можно представить в виде [6]

$$S_{\tilde{x}}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \mathbf{M} \left\{ \left| \tilde{X}(j\omega) \right|^2 \right\} = \frac{1}{\Delta_t} |W_{s_0}(j\omega)|^2 \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \mathbf{M} \left\{ \left| X^*(j\omega) \right|^2 \right\} =$$

$$= \frac{1}{\Delta_t} |W_{30}(j\omega)|^2 S_x^*(\omega) = \frac{1}{\Delta_t} |W_{30}(j\omega)|^2 \frac{s_0}{\Delta_t} = s_0 \frac{\sin^2(\omega\Delta_t/2)}{(\omega\Delta_t/2)^2},$$

где \mathbf{M} — операция математического ожидания; $2T = (2N + 1)\Delta_t$;

$\bar{\omega} = \omega\Delta_t$; $W_{30}(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega\Delta_t}}{j\omega}$, $|W_{30}(j\omega)| = \left| \frac{\sin(\omega\Delta_t/2)}{\omega/2} \right|$ — частотная характеристика первого ФЭ.

Аналогично находят и спектральную плотность на выходе второго ФЭ

$$S_{\hat{x}}(\omega) = \frac{1}{\Delta_t} |W_{31}(j\omega)|^2 S_x^*(\omega) = \frac{1}{\Delta_t} \left| \frac{4 \sin^2(\omega\Delta_t/2)}{\Delta_t \omega^2} \right|^2 \frac{s_0}{\Delta_t} = s_0 \left(\frac{\sin(\omega\Delta_t/2)}{\omega\Delta_t/2} \right)^4.$$

Далее формируется результирующий сигнал

$$z(t) = \hat{x}(t) \sin(\omega_{\text{см}}t + \varphi) + \hat{y}(t) \cos(\omega_{\text{см}}t + \varphi), \quad (1)$$

т. е. для его формирования используется два независимых одинаковых канала (см. рис. 1), и выходной сигнал каждого канала подвергается модуляции гармоническими компонентами $\sin(\omega_{\text{см}}t + \varphi)$ и $\cos(\omega_{\text{см}}t + \varphi)$, где $\omega_{\text{см}}$ — известная частота смещения; φ — случайно выбранная фаза из диапазона значений $[0, 2\pi]$. Этот результирующий сигнал далее полагается *базовым*.

Определим моменты базовой функции: $\mathbf{M}\{z(t)\} = 0$, поскольку $\mathbf{M}\{\hat{x}(t)\} = \mathbf{M}\{\hat{y}(t)\} = 0$. Смешанный момент $\mathbf{M}\{\hat{x}(t)\hat{y}(t + \tau)\}$ (рис. 2) вычисляется как

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\{\hat{x}(t)\hat{y}(t + \tau)\} &= \mathbf{M}\{\hat{x}(t_i + \tau_i)\hat{y}(t_j + \tau_j)\} = \\ &= \mathbf{M}\left\{\left(x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta_t} \tau_i\right)\left(y_j + \frac{y_{j+1} - y_j}{\Delta_t} \tau_j\right)\right\}; \quad x(t_i) = x_i; \quad y(t_j) = y_j. \end{aligned}$$

После раскрытия приведенного выражения имеем $\mathbf{M}\{\hat{x}(t)\hat{y}(t + \tau)\} = 0$, переменные x_i и y_j независимы так же, как и момент $\mathbf{M}\{\hat{y}(t)\hat{x}(t + \tau)\} = 0$. Таким образом, при независимости составляющих x_i и y_j оказывается, что момент (корреляционная функция) базовой функции $z(t)$ равен $\mathbf{M}\{z(t)z(t + \tau)\} = R(\tau) = \cos(\omega_{\text{см}}\tau)$, где $R_{\hat{x}}(\tau) = R_{\hat{y}}(\tau) = R(\tau)$ — корреляционная функция каждой составляющей.

Сравнение характеристик двух подходов к получению случайного сигнала с кусочно-постоянной и кусочно-линейной аппроксимациями приведено на рис. 3.

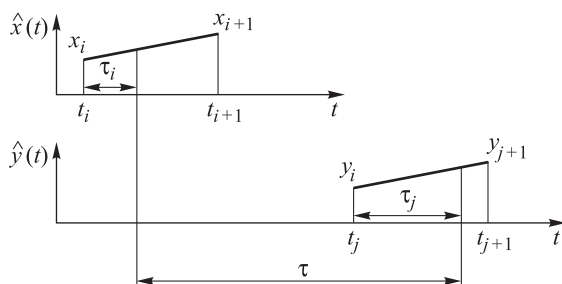


Рис. 2. Схема для вычисления смешанного момента

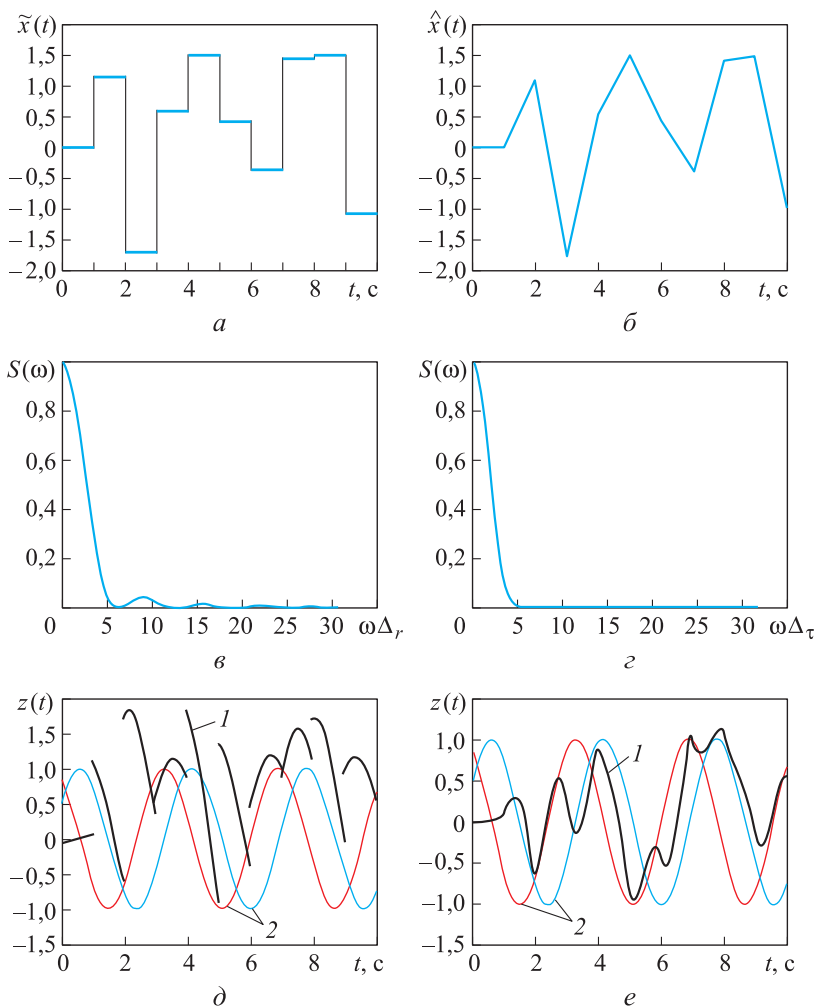


Рис. 3. Кусочно-постоянный (а) и кусочно-линейный (б) временные сигналы (реализации) при отсутствии модуляции, спектры кусочно-постоянного (в) и кусочно-линейного (з) элементарных сигналов при $s_0 = 1$, реализации результирующего модулированного случайного сигнала (1) по выражению (1) и гармонические компоненты (2) при кусочно-постоянной (д) и кусочно-линейной аппроксимациях (е)

Следует обратить внимание на то, что спектр (рис. 3, з) достаточно хорошо аппроксимируется «треугольником». Это дает ощутимые преимущества при аппроксимации спектральной плотности и будет использовано далее. Если возникает необходимость в получении случайного сигнала с достаточно произвольной спектральной характеристикой, то можно воспользоваться следующим алгоритмом:

- аппроксимация заданной спектральной характеристики $S(\omega)$ «треугольниками» требуемое число n раз;

- определение параметров каждого треугольника (только высоту и ширину $\omega_{\text{см}} \Delta_\tau = 5$);

- составление для каждого найденного «треугольника» в соответствии с полученными параметрами блок-схемы генерации временной реакции $z_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ (см. рис. 1);

- моделирование отдельных блок-схем и получение результирующего выходного сигнала $z(t) = \sum_{i=1}^n z_i(t)$;

- нахождение оценки либо спектральной плотности $S(\omega)$, либо корреляционной функции $R(\tau)$ для результирующего сигнала $z(t)$ [5];

- сравнение полученной оценки с исходными данными.

Необходимо использовать небольшое число базовых функций для получения возможно более простого решения. Это вполне допустимо вследствие невысокой точности экспериментального определения статистических характеристик. Однако во многих случаях целесообразно использовать совместно и подход формирующих фильтров и предлагаемый способ.

В качестве примера рассмотрим результат аппроксимации спектра ограниченного белого шума (рис. 4).

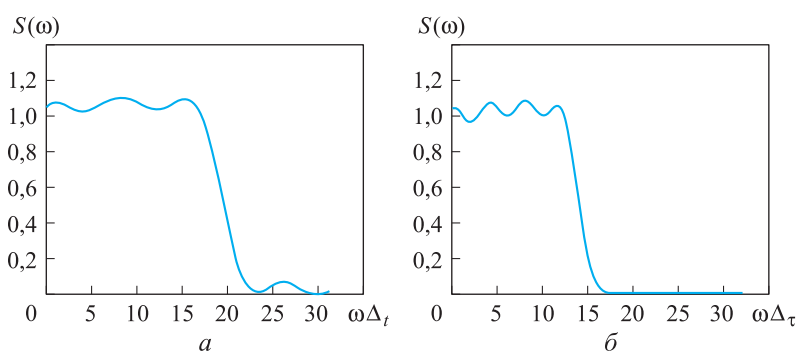


Рис. 4. Спектр сложного случайного сигнала (ограниченный белый шум), состоящий из четырех элементарных спектров с фиксированным смещением

Генерирование тригонометрических функций. Как было отмечено выше, для реализации базового случайного процесса следует иметь генератор случайной величины и пару гармонических функций

\sin и \cos . Поскольку моделирование выполняется в дискретном времени с постоянным шагом Δ_t и непосредственно связано с вычислением тригонометрических функций $\sin \omega t_i$ и $\cos \omega t_i$ (ω — заданная частота), существует алгоритм вычисления одновременно пары тригонометрических функций на равномерной дискретной временной сетке.

Каждая пара тригонометрических функций выступает как решение дифференциального уравнения

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\omega x_2; \\ \dot{x}_2 &= \omega x_1\end{aligned}$$

с начальными условиями $x_1(0) = \cos \varphi$, $x_2(0) = \sin \varphi$, что дает $x_1(t) = \cos \omega t$, $x_2(t) = \sin \omega t$. В разностном представлении решение непрерывного дифференциального уравнения имеет вид

$$\begin{aligned}x_1(i+1) &= \cos(\omega \Delta_t) x_1(i) - \sin(\omega \Delta_t) x_2(i); \\ x_2(i+1) &= \sin(\omega \Delta_t) x_1(i) + \cos(\omega \Delta_t) x_2(i),\end{aligned}$$

$i = 0, 1, 2, 3, \dots$; $\omega \Delta_t$ — известная константа.

Моделирование разностного представления позволяет получить непосредственно пару тригонометрических функций после предварительного вычисления констант $\cos(\omega \Delta_t)$, $\sin(\omega \Delta_t)$ и задания начальных условий. Гармонические компоненты показаны на рис. 3, *д*, *е*.

Сравнительный анализ. Выполним качественное сравнение двух способов моделирования случайного процесса: 1) с использованием формирующих фильтров [1]; 2) с помощью предлагаемого способа.

Экспериментально найдена оценка спектральной плотности, которая аппроксимирована выражением

$$\begin{aligned}S(\omega) &= \frac{4\sigma^2 \xi \omega_f^3}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega^4} = \frac{4\sigma^2 \alpha \omega_f^2}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2} = \\ &= \frac{2\sigma \omega_f \sqrt{\alpha}}{(j\omega)^2 + 2\alpha j\omega + \omega_f^2} \frac{2\sigma \omega_f \sqrt{\alpha}}{(-j\omega)^2 - 2\alpha j\omega + \omega_f^2}.\end{aligned}\quad (2)$$

Соответствующая корреляционная функция имеет вид [5, 7]

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos(\beta\tau) + \frac{\alpha}{\beta} \sin(\beta|\tau|) \right).\quad (3)$$

Исходная спектральная плотность $S(\omega)$ для принятых значений параметров $\omega_f = 2\pi/T$, $T = 10$ с, $\omega_f = 628,3185 \cdot 10^{-3} \approx 0,628$ рад/с,

$\xi = 0,1$ $\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \approx 0,1$, $\beta \approx 0,6252$, $\alpha \approx 0,06252$ приведена на рис. 5, *а*.

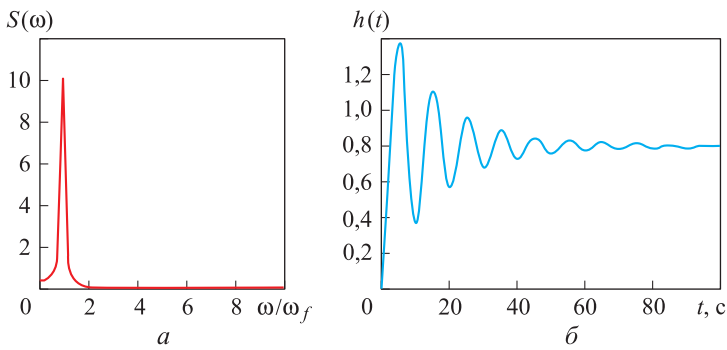


Рис. 5. Исходная спектральная плотность (а), переходная функция $h(t)$ синтезированного формирующего фильтра (б), длительность переходного процесса приблизительно 60 с

Для моделирования реализован формирующий фильтр второго порядка. Частотная характеристика формирующего фильтра $W(j\omega)$ (см. (2)) имеет вид

$$W(j\omega) = \frac{2\sigma\omega_f\sqrt{\alpha}}{(j\omega)^2 + 2\alpha j\omega + \omega_f^2}.$$

Переходная функция $h(t)$ синтезированного формирующего фильтра представлена на рис. 5, б.

Выполним простейшую аппроксимацию заданной спектральной плотности (2). Для этого выберем для аппроксимации три базовые составляющие (рис. 6) $S(\omega) \approx S_1(\omega) + S_2(\omega) + S_3(\omega)$. Предполагается (см. рис. 3, з), что аппроксимация спектра выполняется «треугольником».

Первая составляющая (кривая 1) имеет следующие значения $\omega_{см1} = 0$, граничная частота $\omega_{fin} = \omega_f|_{\text{фильтр}} = 0,6283$ рад/с, следовательно, из условия $\omega_{fin}\Delta_\tau \approx 5$ (см. рис. 3, з) для этой составляющей параметр равен $\Delta_{\tau1} \approx 5/\omega_{fin} = 7,958$ с. Для второй

составляющей (кривая 2) — $\omega_{см2} = \omega_f|_{\text{фильтр}} = 0,6283$ рад/с, параметр $\Delta_{\tau2} = \Delta_{\tau1} \approx 5/\omega_{fin} = 7,9585$ с. Третья составляющая (кривая 3) имеет $\omega_{см3} = \omega_f|_{\text{фильтр}} = 0,6283$ рад/с, параметр $\Delta_{\tau3} \approx (3 \cdot 5)/\omega_{fin} \approx 23,9$ с.

Для всех составляющих выбирается общий шаг квантования по времени Δ_t ; в рассматриваемом случае принимается $\Delta_t = 0,1$ с.

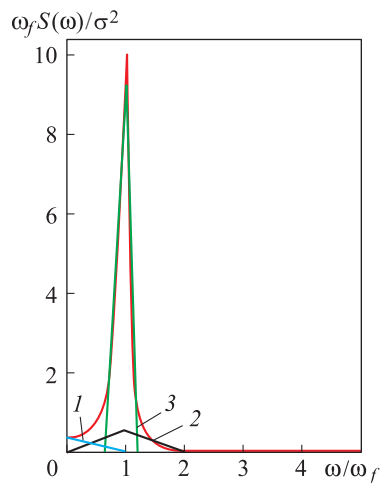


Рис. 6. Аппроксимация спектра, приведенного на рис. 5, а

Выходные сигналы (реализации) случайных процессов, рассчитанные для двух рассмотренных вариантов, представлены на рис. 7.

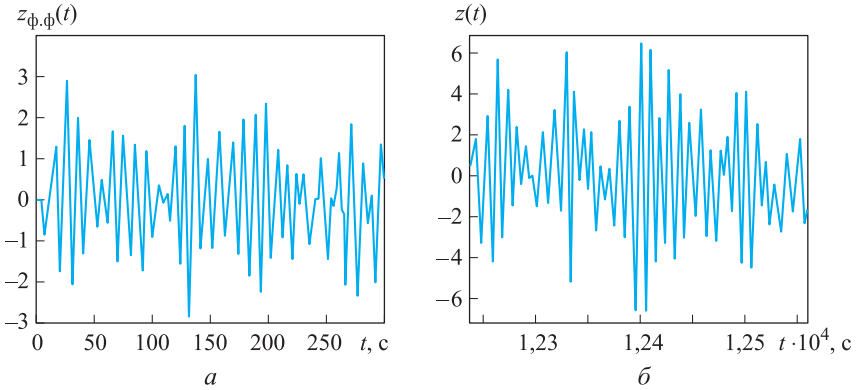


Рис. 7. Выходной сигнал формирующего фильтра $z_{\phi,\phi}(t)$ (а) и выходной сигнал $z(t)$ (б), полученный предлагаемым подходом ($\Delta_t = 0,1$ с)

Кроме визуального сравнения двух оценок корреляционных функций (рис. 8, а, б) можно выполнить аппроксимацию полученной оценки корреляционной функции выражением для точной корреляционной

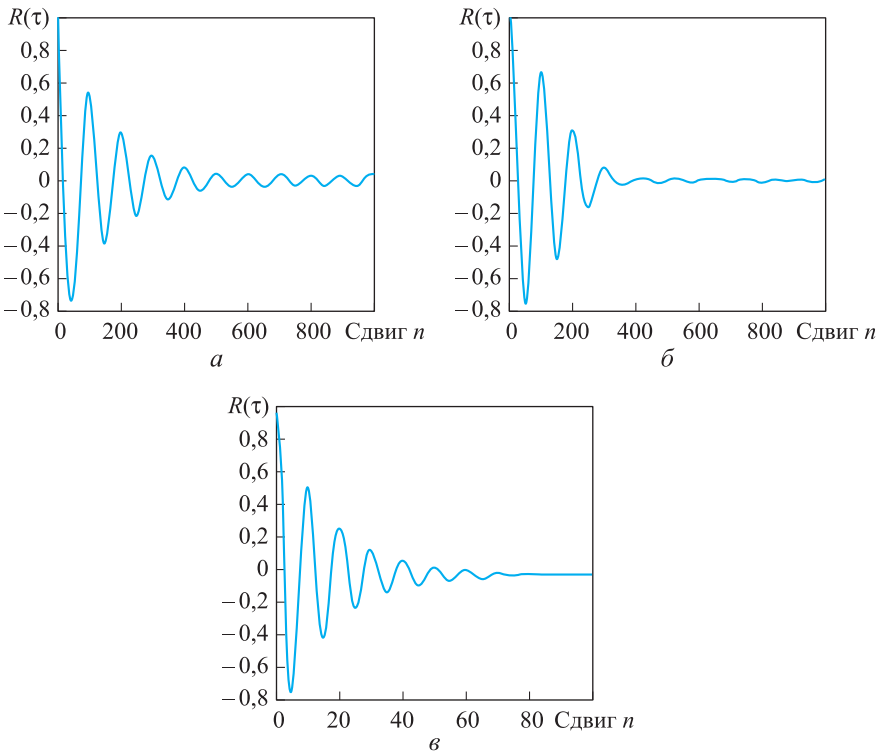


Рис. 8. Оценки нормированных корреляционных функций для выхода формирующего фильтра (а) и для предлагаемого подхода (б) $R(n\Delta_t)$ ($\Delta_t = 0,1$ с), нормированная корреляционная функция (в), рассчитанная по формуле (3)

функции (рис. 8, в), а также сравнение по двум параметрам. В рассматриваемом случае находятся параметры аппроксимации корреляционной функции по характерным точкам, расположенным в ближайшей окрестности начала координат [5] (взяты точки, в которых оценка корреляционной функции равна нулю): $\hat{\beta} \approx 0,654$ рад/с (аппроксимация); $\beta = 0,6252$ рад/с (точное значение); $\hat{\alpha} \approx 0,107$ рад/с (аппроксимация); $\alpha = 0,06252$ рад/с (точное значение).

Рассмотрим еще один вариант аппроксимации спектральной плотности реального сигнала (для транспортной машины). Записанный спектр (спектр виброускорений) приведен к безразмерным переменным (рис. 9, а), содержит несколько пиков и после ручной обработки

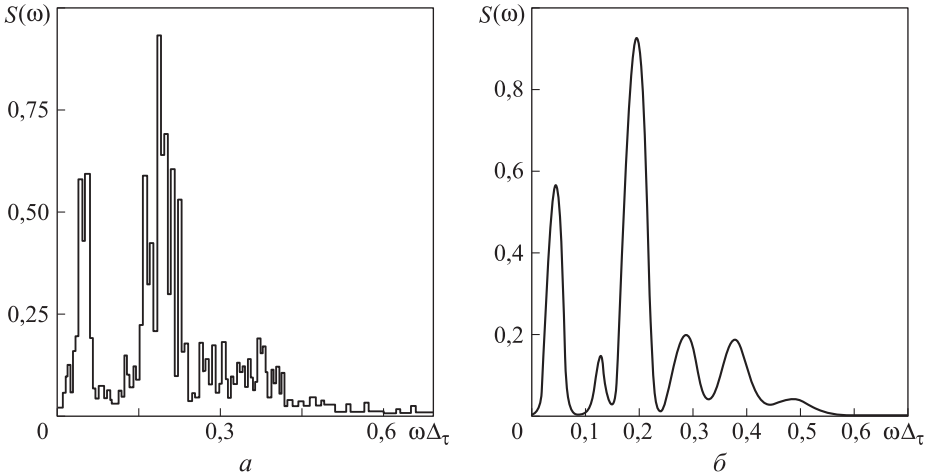


Рис. 9. Спектральная плотность вертикальных виброускорений центра масс шасси (а), полученных для булыжной дороги (скорость 8 м/с) и результирующая аппроксимация исходной спектральной плотности (б)

представляется в виде суммы шести «треугольников» с параметрами (ω_{σ} — безразмерная ширина спектра), приведенными в таблице.

Параметры для аппроксимации спектральной плотности

Безразмерная частота ($\omega_{cm}\Delta_{\tau}$) (высота)	Сторона (Δ_{τ})	Высота	\sqrt{t}
0,044	0,034	0,558	0,747
0,126	0,028	0,142	0,377
0,190	0,050	0,921	0,960
0,286	0,056	0,200	0,447
0,374	0,072	0,184	0,429
0,476	0,128	0,042	0,268

Далее для каждого отдельного i -го «треугольника», имеющего смещение по частоте ω_{cmi} и соответствующую длительность τ_i , аргумент спектра представляется в виде (см. соотношения для $S_{\hat{x}}(\omega)$)

$$(\omega - \omega_{cmi})\tau_i = \omega_{\delta i}\tau_i - \omega_{cmi}\tau_i = (\omega\Delta_\tau)\frac{\tau_i}{\Delta_\tau} - (\omega_{cmi}\Delta_\tau)\frac{\tau_i}{\Delta_\tau},$$

где $\omega_{\delta i}\tau_i \approx 5$, $\omega_{\delta i}\Delta_\tau(\tau_i/\Delta_\tau) \approx 5 \rightarrow (\tau_i/\Delta_\tau) \approx 5/(\omega_{\delta i}\Delta_\tau)$.

Следовательно, отношения τ_i/Δ_τ являются известными, так как $\omega_{\delta i}\Delta_\tau$ и $\omega_{cmi}\Delta_\tau$ определяют по выполненной аппроксимации спектральной плотности. Окончательный результат аппроксимации исходной спектральной плотности суммой шести «треугольников» показан на рис. 9, б.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о практической применимости предлагаемого варианта реализации случайного процесса.

Выводы. Предложен способ генерации случайного стационарного процесса, который в отличие от подхода с использованием формирующих фильтров учитывает наличие пиков в исходной спектральной плотности, не имеет переходных процессов и позволяет выполнить аппроксимацию спектральной плотности «треугольниками».

Приведены результаты сравнительного моделирования случайных процессов — с помощью формирующих фильтров и предлагаемого способа генерации, а также результат аппроксимации реальной спектральной плотности вертикальных виброускорений, которые показывают работоспособность предлагаемого способа и возможность его адаптации к реальной ситуации.

Авторы признательны профессору кафедры «Колесные и гусеничные машины» М.М. Жилейкину за предоставление данных по спектральной плотности виброускорений шасси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 296 с.
2. Радченко Ю.С., Радченко Т.А. Основы статистического моделирования. Ч. 1. Моделирование случайных величин. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2010. 30 с.
3. Радченко Ю.С., Радченко Т.А. Основы статистического моделирования. Ч. 2. Моделирование случайных процессов. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2010. 50 с.
4. Peled Abraham, Liu Bede. Digital Signal Processing. Theory, Design, and Implementation. John Wiley & Sons, 1976. 304 p.
5. Свеишников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. Л.: Судпром, 1961. 252 с.

6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
7. Шахтарин Б.И. Случайные процессы в радиотехнике. Т. 1. Линейные преобразования. М.: Горячая линия — Телеком, 2010. 512 с.

REFERENCES

- [1] Ermakov S.M., Mikhaylov G.A. Statisticheskoe modelirovanie [Statistical Modeling]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 296 p.
- [2] Radchenko Yu.S., Radchenko T.A. Osnovy statisticheskogo modelirovaniya. Ch. 1. Modelirovanie sluchaynykh velichin [Principles of Statistical Modeling. Part 1. Simulation of Random Variables]. Voronezh, Voronezhskiy gos. univ. Publ., 2010. 30 p.
- [3] Radchenko Yu.S., Radchenko T.A. Osnovy statisticheskogo modelirovaniya. Ch. 2. Modelirovanie sluchaynykh protsessov [Principles of Statistical Modeling. Part 2. Simulation of Random Processes]. Voronezh, Voronezhskiy gos. univ. Publ., 2010. 50 p.
- [4] Peled Abraham, Liu Bede. Digital Signal Processing. Theory, Design, and Implementation. John Wiley & Sons, 1976. 304 p.
- [5] Sveshnikov A.A. Prikladnye metody teorii sluchaynykh funktsiy [Applied Methods of the Random Function Theory]. Leningrad, Sudprom Publ., 1961. 252 p.
- [6] Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Кн. 1 [Statistical Communication Theory]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1969. 752 p.
- [7] Shakhtarin B.I. Sluchaynye protsessy v radiotekhnike. Т. 1. Lineynye preobrazovaniya [Stochastic Processes in Radio Engineering. Vol. 1. Linear Transformations]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2010. 512 p.

Статья поступила в редакцию 28.10.2015

Лобусов Евгений Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Lobusov E.S. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Automatic Control System Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Тьонг Хоанг Мань — аспирант кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Tuong Hoang Manh — post-graduate student of Automatic Control System Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лобусов Е.С., Тьонг Хоанг Мань. Генерирование случайных воздействий при исследовании устройств и систем управления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 3. С. 102–113.

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-102-113

Please cite this article in English as:

Lobusov E.S., Tuong Hoang Manh. Generation of Random Signals in Control Units and Systems Research. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 3, pp. 102–113. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-3-102-113