

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫМИ СТЕНДАМИ С ЦЕЛЮ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВИБРАЦИИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В. А. Михайлов, А. Е. Божко, В. Н. Давиденко

Харьков

Как известно [1, 2, 3, 4], вибрации аппаратуры автоматизации в реальных условиях эксплуатации могут рассматриваться как колебательные процессы со случайными параметрами. Для оценки надежности проектируемой аппаратуры, предназначенной для работы при таких вибрациях, необходимо условия испытания этой аппаратуры приблизить к реальным.

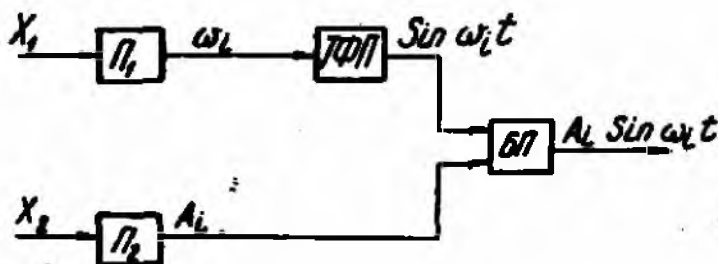


Рис. 1. Структурная схема вибростенда:

x_1, x_2 — сигналы задания частоты и амплитуды;
 Π_1, Π_2 — преобразователи сигналов x_1, x_2 в частоту и амплитуду; ТФП — тригонометрический функциональный преобразователь; БП — блок перемножения.

Обычно широкораспространенные вибрационные стенды (механические, электродинамические) создают гармонические вибрации с постоянными параметрами. При этом в механических стендах частота колебаний определяется скоростью вращения электродвигателя, амплитуда — величиной эксцентриситета либо расстоянием между секторами. В электродинамических вибрационных стендах частота вибрации задается частотой тока подвижной катушки, амплитуда — регулированием амплитуды тока подвижной катушки либо катушки возбуждения.

Поэтому при имитации вибраций вида

$$A_1 \sin \omega_1 t, \quad (1)$$

где A_1, ω_1 — случайные амплитуда и частота соответственно, вибрационный стенд, независимо от его типа, может быть представлен двухканальной структурной схемой, изображенной на рис. 1.

Для воспроизведения случайных вибраций, подобных реальным, необходимо вводить в вибростенд сигналы x_1, x_2 как функции изменения

параметров вибраций, имеющих место при эксплуатации аппаратуры автоматики. С этой целью производится запись реальных вибраций на виброграмму и обработка этой виброграммы по параметрам, заключающаяся в снятии отдельных графиков изменения частоты и амплитуды (рис. 2).

Однако при управлении вибрационным стендом электрическими сигналами x_1 , x_2 , изменяющимися по закону, как это видно на рис. 2, невозможно воспроизвести реальную вибрацию из-за инерционности преобразователей $П_1$, $П_2$ и самого стенда.

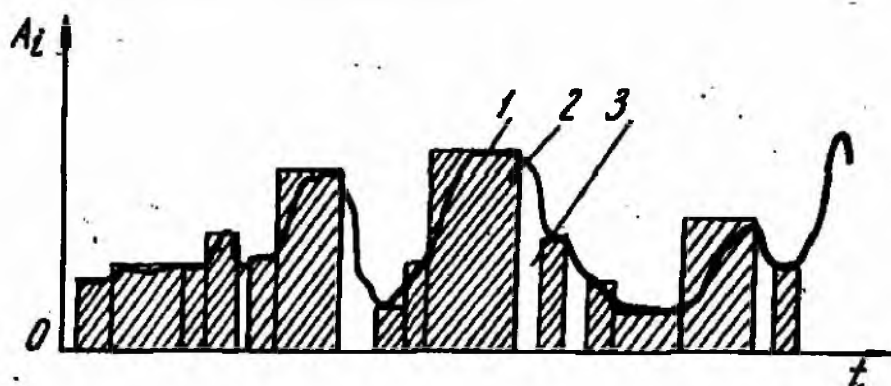


Рис. 2. Аппроксимация непрерывной кривой:
1 — кривая изменения параметра вибрации; 2 — импульсы аппроксимации; 3 — паузы.

На основании вышеизложенного авторы пришли к выводу о необходимости специального, дополнительного преобразования сигнала изменения параметра вибрации (рис. 2), которое предупреждало бы инерционность элементов вибростенда. Так как стенд, воспроизводящий случайную вибрацию, является следящей системой [6], то вопросы управления им можно рассматривать на основе теории информации. Кроме того, в общем случае уравнение движения виброплатформы стенда описывается дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами [1]. Поэтому стенд представляет собой линейный преобразователь, который также анализируется методами линейного автоматического уравнения [2, 6—10].

Для точного воспроизведения кривой вибрации необходимо уменьшить влияние инерционности звеньев стенда — взаимную интерференцию символов [9] за счет преобразования сигналов управления в последовательность прямоугольных импульсов, характеристики которой должны приближаться к характеристикам кривой изменения параметров вибрации [8, 11].

Таковыми характеристиками являются законы распределения или числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсия, корреляционная функция) и спектр мощности. При этом [8] необходимо дополнительно выяснить — может ли стенд точно воспроизвести кривую вибрации, т. е. необходимо, чтобы при воспроизведении выполнялось следующее условие:

$$h'(t) = 0 \text{ при } t = 0 \text{ и } h'(t) \rightarrow 0 \text{ при } t = \infty, \quad (2)$$

где $h'(t)$ — импульсная переходная функция стенда;

t — текущее время;

$t=0$ — момент подачи импульса управления.

Из выражения импульсной переходной функции стенда даже при малом демпфировании (стенд приближается к консервативному звену)

$$h'(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}} \sin \frac{t}{T} \quad (3)$$

где ξ — показатель затухания; k — коэффициент передачи; T — постоянная времени, очевидно, что условия Шеннона (2) для стенда выполнимы.

Поэтому при подаче на систему управления стендом квантованного входного сигнала (последовательность импульсов) выходной сигнал стенда (вибрация) $X_{\text{вых}}$ в момент $n\Delta\tau_j$ является суммой реакций от каждого предшествующего произведения квантованных сигналов в каждом канале [12]

$$X_{\text{вых}}(t) \cong \sum_{i=1}^n h'(t - i\Delta\tau_j) x_2^{(k)}(T_2, i\Delta\tau_j) \sin[x_1^{(k)}(T_1, i\Delta\tau_j)] \Delta\tau_j; \quad (4)$$

где $\Delta\tau_j$ — интервал квантования некоторого участка заданных кривых изменения параметров вибрации.

$x_1^{(k)}, x_2^{(k)}$ — квантованный ряд импульсов, соответствующий кривой изменения частоты и амплитуды вибрации;

T_1, T_2 — постоянные времени каналов управления стенда.

В выражении (4) неизвестным является только интервал квантования $\Delta\tau_j$, определяющий $X_1^{(k)}, X_2^{(k)}$. Поэтому рассмотрим метод квантования кривой изменения параметров реальной вибрации.

Стенд совместно с системой управления (по теории передачи сигналов) может быть представлен фильтром нижних частот с частотой среза ω_c . В этом случае передать сигнал без искажения можно путем представления заданной непрерывной функции рядом импульсов, квантованных по теореме Котельникова через интервалы $\Delta\tau = \frac{1}{2\omega_c}$ с амплитудами, равными амплитудам аппроксимируемой кривой в соответствующие моменты квантования. или любой временной последовательностью сигналов, которая имеет те же спектры мощности в интервале квантования, что и исходная кривая [13].

Согласно [9], в результате взаимной интерференции символов изменяется скорость передачи информации, и весь процесс, при условии накопления инерционными элементами энергии предыдущих импульсов, приближается в некоторой степени к вынужденному. В результате этого частота среза фильтра ω_c как бы увеличивается, что позволяет передавать более быстрые изменения информации (входного сигнала), нежели соответствующие начальной частоте среза ω_c , которая определяет период квантования $\Delta\tau$ и можно теоретически определить форму будущего выходного электрического сигнала системы при известном входном сигнале и параметрах системы путем метода очищения выходного сигнала от взаимной интерференции символов [10]. Однако для вибростенда метод В. Таллера [10] не применим, так как здесь используется электро-механическая система, т. е. из кривой вибрации подвижной системы стенда нельзя вычесть сигнал очищения.

Поэтому авторы пришли к выводу, что можно производить очищение выходного сигнала (вибрации) электро-механической системы не на выходе, а на входе этой системы путем аппроксимации входной непрерывной функции. Для этого произвольная непрерывная входная функция изменения параметров реальной вибрации, как уже было сказано, квантуется рядом прямоугольных импульсов (рис. 3).

В данной аппроксимации необходимо выполнить [7, 10] два условия: равенство интегральных значений сигналов 1 и 2 в квантованных интервалах и равенство числовых характеристик этих сигналов.

Равенство интегралов сигналов 1 и 2 в отдельном интервале аппроксимации можно выразить зависимостью

$$A_n \Delta \tau_n = \int_0^{\Delta \tau_n + \Delta \tau_p} A_k(t) dt, \quad (5)$$

где A_n , $A_k(t)$ — амплитуда импульса и исходной кривой;
 $\Delta \tau_n$, $\Delta \tau_p$ — длительность импульса и паузы, следующей за импульсом.

С точки зрения статистического характера данная аппроксимирующая последовательность импульсов относится к стационарному случайному процессу, принимающему случайные значения, сохраняемые постоянными в случайных по длительности промежутках времени [2]. Из графического построения аппроксимирующего ряда (рис. 2) видно, что числовые характеристики непрерывного и аппроксимирующих процессов должны быть приближенно равными.

Действительно, математические ожидания равны, согласно условию (5).

Корреляционная функция аппроксимирующего про-

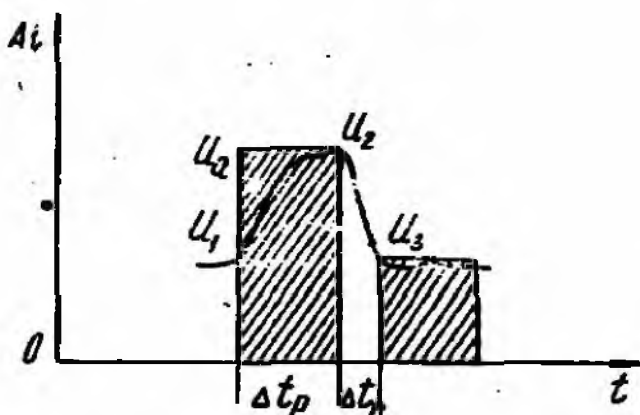


Рис. 3. Определение параметров аппроксимирующего импульса.

$$K_{\Delta a}(\tau) = D_{\Delta a} e^{-a|\tau|}, \quad (6)$$

где $D_{\Delta a}$ — дисперсия процесса;

a — число перемен величины импульсов в единицу времени;

τ — временной интервал,

является первым основным членом разложения корреляционной функции гауссовского случайного процесса, по которому распределены параметры случайной вибрации [3, 4, 5].

Перейдем к практическому определению параметров аппроксимирующего ряда (высота, ширина импульса, величина паузы). В зависимости от типа стенда для облегчения расчета учитываются наиболее существенные инерционности. Так, в механических стендах влияющей является инерционность электрических двигателей, в электродинамических — инерционность виброплатформы.

Для воспроизведения случайной вибрации в механическом стенде наилучшим по быстродействию и интервалу регулирования является управление током якорной цепи двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В этом случае передаточная функция двигателя

$$\Phi(p) = \frac{K_A}{T_A p + 1}, \quad (7)$$

где K_A — коэффициент передачи двигателя;

T_A — постоянная времени двигателя;

p — оператор Лапласа.

Для электродинамического вибростенда передаточная функция

$$\Phi(p) = \frac{K_A}{T_p^2 p^2 + 2\zeta T_p p + 1}. \quad (8)$$

где K_n — коэффициент передачи виброплатформы;
 T_n — постоянная времени подвижной части;
 ξ — показатель затухания.

Согласно (7, 8) выходной сигнал подобных звеньев определяется соответственно выражениями

$$X_{\text{вых.л}} = X_{\text{вх}} K_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right), \quad (9a)$$

$$X_{\text{вых.п}} = X_{\text{вх}} K_n e^{-\xi \frac{t}{T_n}} \sin \frac{t}{T_n} \quad (96)$$

при $\xi < 1$ (стенд зарезонансного типа).

Из уравнений (9a), (96) ясно, что при воспроизведении участков исходной кривой длительностью, меньшей постоянных времени инерционных элементов, оба уравнения приближенно приводятся к виду

$$X_{\text{вых}} = X_{\text{вх}} K \frac{t}{T}, \quad (10)$$

где K — коэффициент пропорциональности;

T — постоянная времени.

Поэтому параметры аппроксимирующего ряда определяем при помощи выражения (10) следующим образом.

На графике кривой изменения параметра вибрации определяются значения функции в точках существенных перегибов. Измеряются временные интервалы Δt_p между соседними перегибами, последующий из которых изменяет знак производной функции на отрицательный (рис. 3).

Высота существенно повышающегося прямоугольного импульса

$$U_s = \frac{U_2 - U_1}{\Delta t_p} T m_{ia}, \quad (11)$$

где U_1, U_2 — функции на соседних перегибах;

T — постоянная времени инерционного элемента стенда;

m_{ia} — масштаб оси времени и амплитуды.

Начало этого импульса лежит вблизи точки существенного перегиба. Оканчивается повышающийся импульс в точке максимума отрезка аппроксимации при резком изломе исходной кривой либо в конце интервала максимума при плоской вершине кривой при соблюдении равенства условия (5).

В случае пологого заднего фронта в исходной кривой на отрезке аппроксимации величина импульса вычисляется при помощи относительного сравнения отрезков, соответствующих времени спада этой кривой и постоянной времени стенда.

В таблице приведены значения относительного изменения амплитуд импульсов аппроксимирующего ряда длительностью $t_n < T$ в сравнении с максимальной амплитудой на всем пологом участке спада исходной кривой.

Таблица

$\frac{\Delta t}{T} \%$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	125	150	200	300
$\frac{\Delta U}{U_{\text{max}}}$	0,1	0,2	0,26	0,33	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,63	0,7	0,8	0,81	0,94

Время пауз необходимо для формирования заднего фронта колебания виброплатформы подобно реальному, т. е. как бы разрешается

выходному сигналу стенда возвращаться к минимальному значению из-за отсутствия возмущающей силы. Паузы расположены только после перегибов непрерывной функции на отрицательную производную. Длительность паузы

$$\Delta t_n = T m_{ia} \left(1 - \frac{U_3}{U_2} \right), \quad (12)$$

где U_2, U_3 — амплитуда импульсов в граничных точках паузы (рис. 3). В случае резкого перепада значений функции изменения параметра вибрации на участке заднего фронта колебания аппроксимацию необходимо производить не паузой, а отрицательным импульсом, обеспечивая этим инвертирование мощности инерционного элемента.

В этом случае величина аппроксимирующего импульса

$$U_a = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\Delta t} T m_{ia} - U_{\max} m_{ia}, \quad (13)$$

где $U_{\min}, U_{\max}$ — минимальное и максимальное значения исходной кривой и интервале резкого спада Δt .

Следует отметить, что для регулирования амплитуды колебаний в механических стендах необходимо, кроме описанной обработки виброграмм, произвести построение разностного аппроксимирующего ряда, величина импульсов которого равна приращениям между соседними импульсами ряда, аппроксимирующего кривую изменения амплитуды вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Иорши. Виброметрия. Изд-во «Машгиз», 1963.
2. Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления. Изд-во «Советское радио», 1963.
3. Ирвин Вигнес. Исследование основных характеристик ударов и вибраций. Перевод № 10—498, 1962.
4. М. З. Коловский. О замене случайного вибрационного воздействия полигармоническим процессом. АН СССР ОТН, «Механика и машиностроение», № 2, 1963.
5. А. А. Свешников. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций. «Физматгиз», 1962.
6. Ж. Жиль, М. Пелегрен, П. Декольи. Теория и техника следящих систем. Изд-во иностр. лит-ры, 1963.
7. К. Шеннон. Связь при наличии шума. Сб. «Теория информации и ее приложение». Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
8. Г. Боде и К. Шеннон. Упрощенное изложение линейной теории сглаживания и предсказания. Сб. «Теория информации и ее приложение». Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
9. Р. Хартин. Передача информации. Сб. «Теория информации и ее приложение». Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
10. В. Галлер. Теоретическое ограничение скорости передачи информации. Сб. «Теория информации и ее приложение». Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
11. П. Элиас. Кодирование с предсказанием. Сб. «Теория информации и ее приложение». Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
12. А. А. Красовский и Г. С. Поспелов. Основы автоматики и технической кибернетики. Госэнергоиздат, 1962.
13. Б. М. Оливер. Эффективное кодирование. Сб. «Теория информации и ее приложение». Изд-во иностр. лит-ры, 1959.