

## ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

У статті розглянуто методи відтворення в процесі проведення стендових вібраційних випробувань вібрацій, які сприймаються несучими конструкціями рухомого складу.

В статье рассмотрены методы воспроизведения в процессе проведения стендовых вибрационных испытаний вибраций, воспринимаемых несущими конструкциями подвижного состава.

The article considers the methods of reproduction of vibrations, perceived by bearing structures of the rolling stock, in the course of stationary vibration tests.

Проблема воспроизведения натуральных колебаний элементов и узлов подвижного состава актуальна при проведении их стендовых вибрационных испытаний на реальные эксплуатационные вибрации. Воссоздание действительных нагрузок, действующих на объекты вибрационных испытаний, является одним из путей обеспечения автономности процесса их нагружения. Решение этой проблемы может свидетельствовать о создании систем ускоренных и форсированных вибрационных испытаний, учитывающих частотные характеристики испытываемых элементов и воспроизводящего вибрации оборудования.

Рекомендованный стандартом [1] способ испытаний металлоконструкций на реальные эксплуатационные вибрации не расширен далее общей декларации. Это связано с тем, что воспроизведение вибраций (а также иных факторов нагружения силового, инерционного или деформационного характера) сталкивается с существенным отклонением сигнала от эталона при его воспроизведении. Погрешности воспроизведения испытательных сигналов при проведении стендовых вибрационных испытаний обусловлены нелинейностью передаточных функций (ПФ), применяемых для этого вибрационных стендов (ВС), а также влиянием на ПФ системы воспроизведения вибраций самих объектов испытаний.

В работе [2] предложена математическая модель системы управления вибрационными испытаниями, позволяющая компенсировать нелинейность амплитудно- и фазочастотной характеристик (АЧХ и ФЧХ) передаточной функции системы «вибростенд-объект испытаний» для обеспечения ее идеального характера в рабочем диапазоне частот. Вид идеальных характеристик тракта воспроизведения вибра-

ций приведен на рис. 1. При этом АЧХ  $H(f)$  должна быть постоянной вплоть до максимальной рабочей частоты  $f_p$ , а фазовый сдвиг  $\varphi(f)$  гармоник воспроизводимого сигнала – минимальным при прохождении сигнала через тракт воспроизведения вибраций.

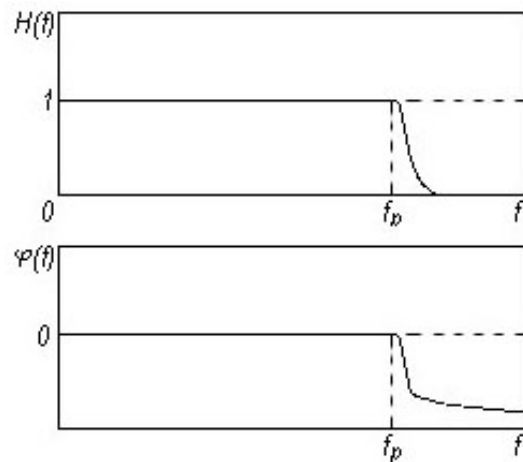


Рис. 1. Идеальная передаточная функция тракта воспроизведения вибраций

Характеристики тракта воспроизведения вибраций вне рабочей области частот  $f > f_p$  в принципе не оговариваются, однако, рациональным и желательным является подавление сигнала в этом диапазоне с одновременным обеспечением устойчивости системы.

В соответствии с [2] тракт воспроизведения вибраций с помощью ВС описывался в частной области соотношением

$$Y(f) = W_c(f)X(f), \quad (1)$$

где  $Y(f)$  – спектр выходного сигнала перемещения стола (ВС);  $W_c(f)$  – передаточная функ-

ция (ПВ) системы «вибростенд-объект испытаний» (далее – системы);  $X(f)$  – спектр входного сигнала, подлежащего воспроизведению.

В систему включался блок коррекции (БК) передаточной функции ВС, наличие которого учитывалось дополнением уравнения (1) соответствующей передаточной функцией

$$Y(f) = W_c(f)W_y(f)X(f), \quad (2)$$

где  $W_y(f)$  – передаточная функция реакции ПФ системы «вибростенд-объект испытаний». Физически БК был выполнен на базе компьютера, оборудованного блоком устройств связи с объектом (УСО), реализованным с использованием адаптеров аналогового ввода-вывода.

Очевидным соотношением, позволяющим решить проблему компенсации искажений сигнала, связанную с нелинейностью ПФ тракта воспроизведения сигнала, являлось равенство

$$W_y(f)W_c(f) \equiv 1, \quad f = f_n, f_p, \quad (3)$$

где (3)  $f_n$  – нижняя граница рабочего диапазона частот системы, определяемая типом используемого оборудования.

Таким образом, для воспроизведения реальных вибраций (в данном случае перемещений стола ВС) необходимо было синтезировать устойчивый блок управления с ПФ, обратной ПФ тракта воспроизведения системы «вибростенд-объект испытаний».

Данная задача решалась путем идентификации передаточной функции  $W_c(f)$  тракта воспроизведения вибраций [3]. Однако для тестирования системы, в отличие от указанного источника, применялось не гармоническое возмущение с плавающей частотой, а случайное возмущение типа «белого шума» в рабочем диапазоне частот. Это позволяло сократить время тестирования системы, а также снизить вероятность перегрузки объекта испытаний при возбуждении его колебаний на резонансных частотах.

Результатом тестирования системы являлись:

- оценки ее передаточной функции

$$W_c(f) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{Y_k(f)X_k^*(f)}{|X_k(f)|^2},$$

где  $m$  – количество циклов тестирования системы путем подачи на ее вход тестового сигнала  $X_k(f)$ ;  $X_k^*(f)$  – комплексно сопряженная функция Фурье-преобразования процесса  $X_k(f)$  во время проведения  $k$ -го цикла тести-

рования системы;  $|*|$  – модуль комплексной функции;  $Y_k(f)$  – преобразование Фурье отклика системы (контролируемой величины перемещения стола вибростенда и т. п.) при проведении  $k$ -го цикла тестирования системы;

- импульсной функции отклика

$$h(t) = \int_w W_c(f) \exp(j\omega t) d\omega,$$

где  $\omega$  – круговая частота;

- функции когерентности

$$\gamma^2(f) = \frac{W_c(f)}{X(f)Y(f)},$$

где  $X(f)$  – спектр входного тестового сигнала;  $Y(f)$  – спектр выходного сигнала системы.

Функция когерентности являлась критерием качества идентификации передаточной функции и функции отклика системы.

Одновременно с этим для контроля качества идентификации ПФ может быть использован показатель когерентности в форме

$$\gamma^* = \frac{\int_{f_n}^{f_p} \frac{W_c(f)}{X(f)Y(f)} df}{f_p - f_n},$$

который представляет собой среднее значение функции когерентности в пределах рабочего диапазона частот. В сочетании с функцией когерентности он дает полное представление о достоверности и качестве идентификации ПФ системы «вибростенд-объект испытаний».

Для реализации БК с передаточной функцией  $W_y(f)$  синтезировался линейный цифровой корректирующий фильтр (ЦКФ) вида

$$y'(t) = \sum_{i=0}^n a'_i x(t - ih) - \sum_{i=1}^n b'_i y(t - ih),$$

где  $n$  – порядок ЦКФ;  $a'_i$ ,  $b'_i$  – коэффициенты фильтра, подлежащие определению;  $y'$  – промежуточный выходной (предварительно искаженный фильтром, предсказанный) сигнал;  $h$  – шаг квантования процессов по времени.

Передаточная функция ЦКФ имела вид

$$W_y(f) = W_c^{-1}(f) = \frac{\sum_{i=0}^n a'_i e^{-2\pi f i h}}{\sum_{i=0}^n b'_i e^{-2\pi f i h}}. \quad (4)$$

Для определения параметров ЦКФ предварительно строился прямой цифровой фильтр, описывающий ПФ системы «вибростенд-объект испытаний». Его передаточная функция  $W_{\varphi}(f)$  должна с достаточной точностью описывать ПФ  $W_c(f)$  идентифицируемой системы. Тогда в соответствии с (4)

$$W_{\varphi}(f) = \frac{\sum_{i=0}^n b_i e^{-2\pi f i h}}{\sum_{i=0}^n a_i e^{-2\pi f i h}}. \quad (5)$$

Коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  определялись путем минимизации функционала погрешности аппроксимации ПФ системы методами нелинейного программирования [4]

$$\varepsilon(a_0, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n) = \sum_{\omega} [W_{\varphi}(\omega) - W_c(\omega)]^P \rightarrow \min,$$

где  $P$  – положительный четный показатель степени.

Различие в обозначениях коэффициентов в выражениях (4) и (5) не случайно, хотя они в соответствии с (3) могли быть определены путем простой инверсии. Однако в случае, когда цифровой фильтр, описывающий поведение системы, устойчив, обратный ему фильтр ЦКФ оказывается, как правило, неустойчивым (физически нереализуемым) [5]. Является очевидным, что устойчивость ЦКФ (4) определяется свойствами корней полинома знаменателя его передаточной функции (полюсами фильтра).

Обеспечить устойчивость ЦКФ можно, воспользовавшись процедурой инверсии полюсов, описанной в [5].

Общий алгоритм процесса коррекции ПФ системы «вибростенд-объект испытаний» приведен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм коррекции нелинейности передаточной функции системы «вибростенд-объект испытаний»

После достаточно непродолжительного тестирования системы и идентификации ее ПФ управляющий компьютер отключался от УСО и производил определение сначала коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  прямого фильтра, затем  $a'_i$  и  $b'_i$  – обратного (ЦКФ). После этого предварительно оцифрованный динамический процесс подвергался цифровой фильтрации с помощью ЦКФ и подавался на вход аналоговой части системы. Этим обеспечивалось правильное воспроизведение испытательного сигнала через ВС.

Рассмотренная выше система предназначалась для воспроизведения перемещений объекта испытаний, связанного с перемещениями стола ВС. Перемещения объекта могли быть получены путем математического моделирования колебаний транспортного экипажа или в результате проведения специальных натуральных экспериментальных исследований.

Недостатком рассмотренной системы являлось то, что ее практическое применение сталкивается с необходимостью получения абсолютных перемещений исследуемого объекта, что не всегда целесообразно или возможно.

Для расширения сферы применения предложенного способа воспроизведения вибраций рассмотрим принципиальные возможности создания требуемого напряженно-деформированного состояния элементов и узлов конструкций подвижного состава. Оно может быть реализовано следующим образом:

- силовое (деформационное) воздействие на объект испытаний, когда напряжения (или в данном случае пропорциональное ему усилие  $F$ ) в конструкции пропорциональны перемещениям штока силового возбудителя ВС;
- воздействие на объект испытаний инерционными нагрузками, при котором напряжения в конструкции пропорциональны ускорениям объекта испытаний  $\ddot{x}_m$ .

Указанные способы нагружения конструкций проиллюстрированы на простых «пружинно-массовых» аналогах, приведенных на рис. 3.

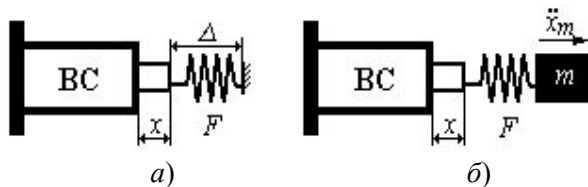


Рис. 3. Иллюстрация к созданию напряженно-деформированного состояния объектов стендовых вибрационных испытаний:  
 а) – деформационное воздействие;  
 б) – инерционное воздействие

При деформационных воздействиях (см. рис. 3 а) описанная выше система успешно применялась и обеспечивала при этом весьма удовлетворительное качество воспроизведения вибраций. Поэтому особый интерес представляет случай (см. рис. 3 б) при необходимости воспроизведения заданного ускорения элемента конструкции подвижного состава. Это обусловлено тем, что входное управляющее воздействие на систему «вибростенд-объект испытаний» пропорционально перемещению стола ВС, поэтому в передаточной функции системы появляется включенное последовательно звено идеального двойного дифференциатора  $W_d$  с передаточной функцией

$$W_d = j^2 w^2, \quad (6)$$

где  $j$  – мнимая единица.

В связи с этим в передаточной функции ЦКФ присутствует звено идеального двойного

интегратора с ПФ  $W_{\text{и}}$ , обратной передаточной функции (6), а именно

$$W_{\text{и}} = \frac{1}{j^2 w^2}. \quad (7)$$

Тракт воспроизведения такой системы может быть представлен в виде, показанном на рис. 4.

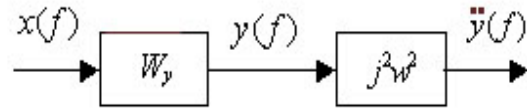


Рис. 4. Блок-схема ПФ системы с идентификацией по ускорению объекта испытаний

Ввиду неопределенности ПФ ЦКФ в области инфранизких (близких к  $f = 0$ ) частот, это делает затруднительной прямую идентификацию ЦКФ такой системы.

Для решения указанной задачи предлагается метод идентификации фиктивного перемещения объекта испытаний.

При этом идентификации ПФ системы включает в себя следующие этапы:

- идентификация по ПФ системы  $W_{yy}(f)$ , где выходом является ускорение объекта испытаний;
- выполнение двойного интегрирования ПФ в частотной области, исключая частоты, при которых возникает неопределенность как

$$W_{y\varphi} = \frac{W_{yy}}{j^2 w^2}, \quad f = f_{\text{н}} \div f_p;$$

- в результате данной операции вычисляется фиктивная ПФ  $W_{y\varphi}(f)$ , выходом которой является перемещение места установки датчика ускорений;

– коррекция ПФ в области инфранизких частот  $f < f_{\text{н}}$ . В простейшем случае, когда минимальная из собственных частот системы «вибростенд-объект испытаний» достаточно велика, она может быть выполнена как:

$$W_y(f \leq f_{\text{н}}) = W_{y\varphi}(f_{\text{н}}),$$

$$W_y(f > f_{\text{н}}) = W_{y\varphi}(f).$$

Блок-схема предлагаемого метода идентификации ПФ приведена на рис. 5.

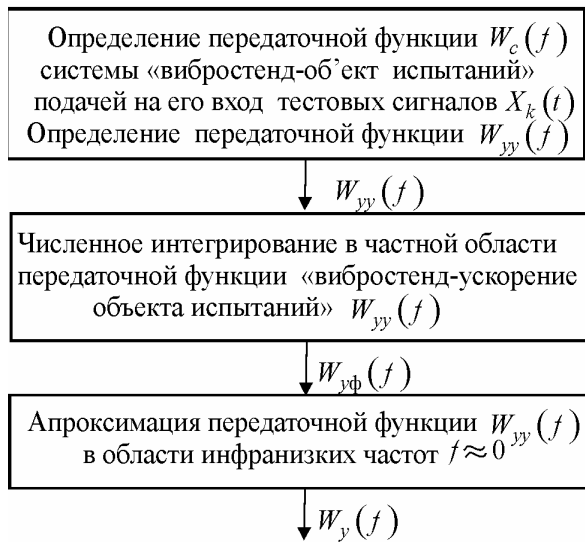


Рис. 5. Блок-схема идентификации фиктивного перемещения объекта испытаний

Описанный метод использован для воспроизведения полусинусоидальных импульсов ускорения. В качестве силовозбудителя использовался электрогидравлический вибрационный стенд фирмы «Shenk» усилием 200 кН совмест-

но с его стойкой управления. Результаты идентификации фиктивного перемещения стола вибростенда с объектом испытаний приведены на рис. 6–8. Как видно из представленной информации, предлагаемый метод обеспечивает удовлетворительное качество идентификации ПФ системы в рабочей области частот (0...60 Гц). По результатам выполненной идентификации определена импульсная функция отклика, приведенная на рис. 9. После определения параметров ЦКФ были выполнены натурные эксперименты по нагружению объекта испытаний импульсами, параметры которых приведены в таблице.

Таблица

Параметры нагружения объекта испытаний

№ пп	Длительность импульса, мс	Амплитуда импульса, g	Период следования импульсов, мс
1	30	2,3	1000
2	100	1,5	600

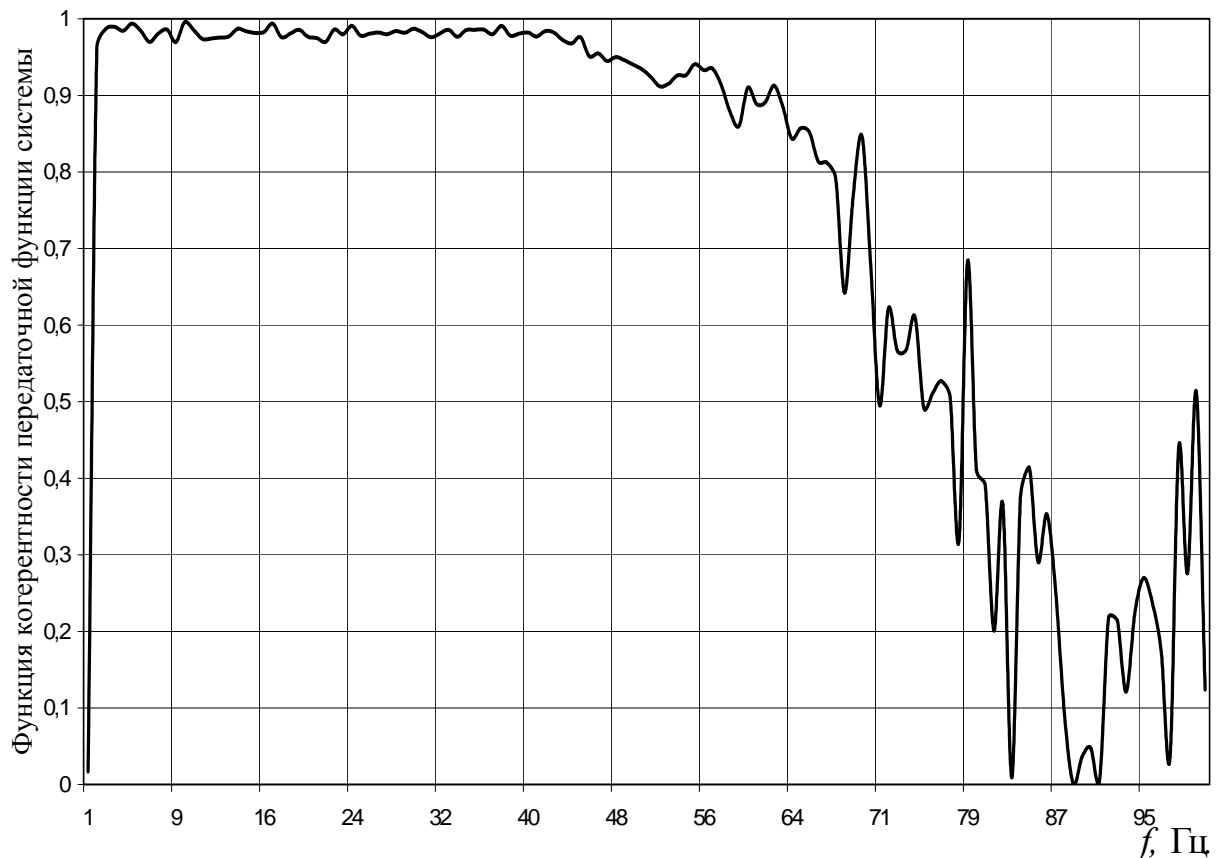


Рис. 6. Функция когерентности  $\gamma(f)$  ПФ вибростенда с объектом испытаний, идентифицированная по его ускорению

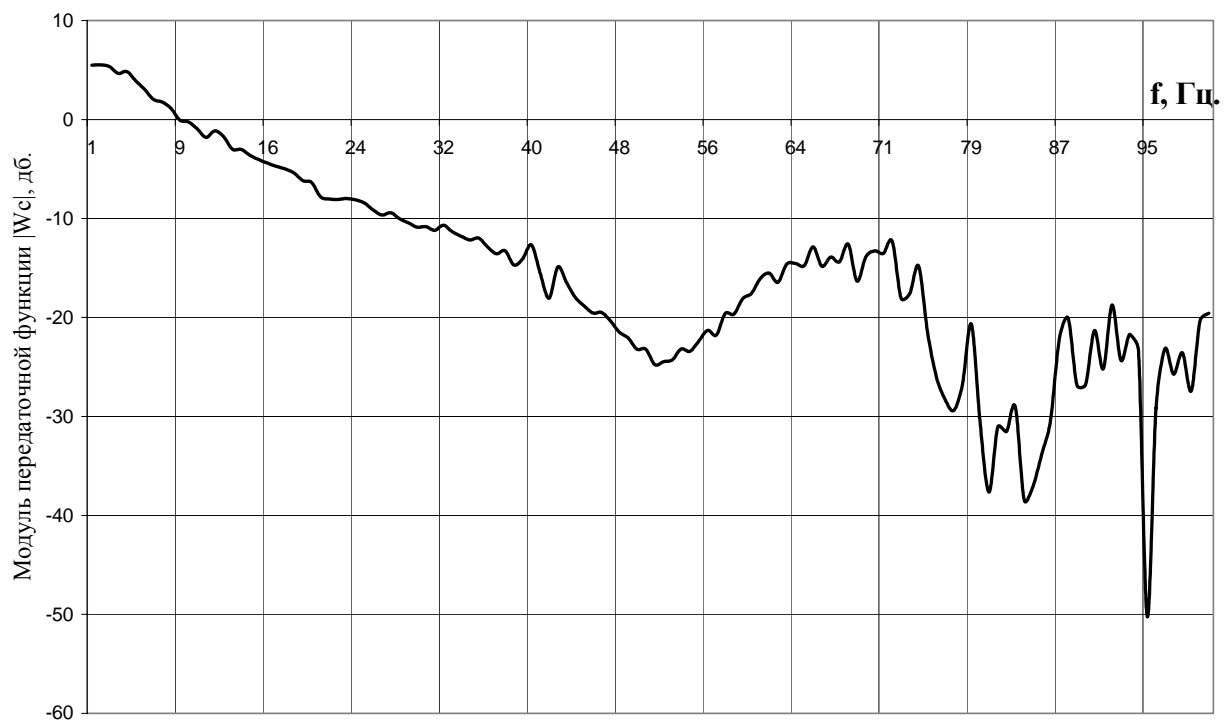


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика  $H_c(f)$  ПФ вибростенда с объектом испытаний, идентифицированная по его ускорению



Рис. 8. Фазочастотная характеристика  $\varphi_c(f)$  ПФ вибростенда с объектом испытаний, идентифицированная по его ускорению

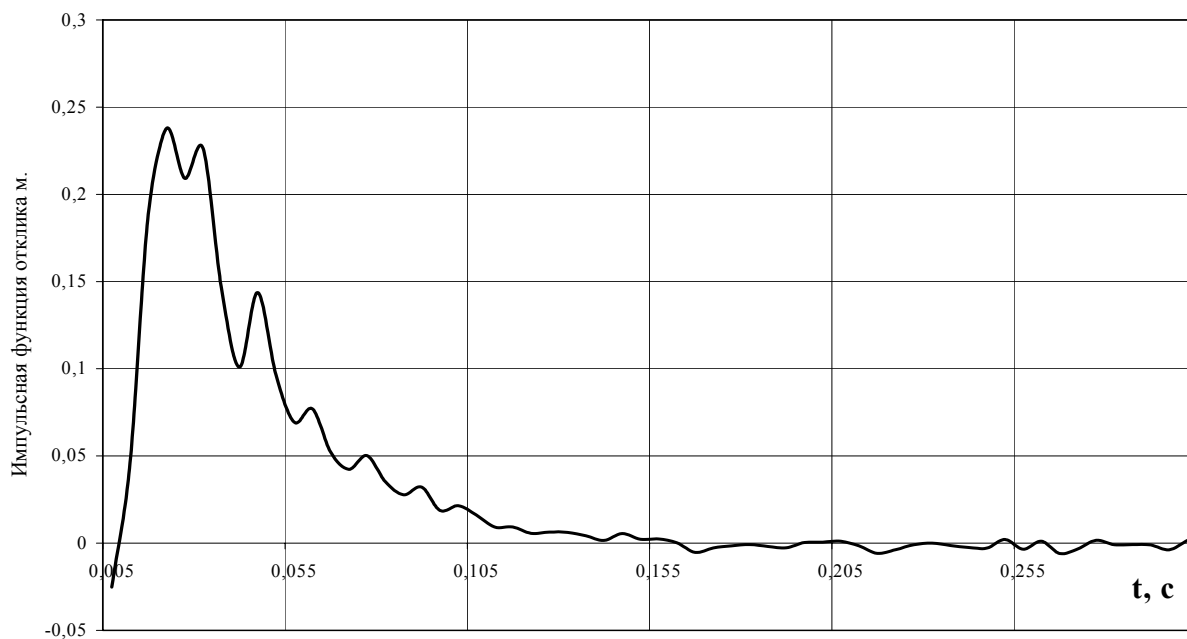


Рис. 9. Импульсная функция отклика  $h(f)$  системы

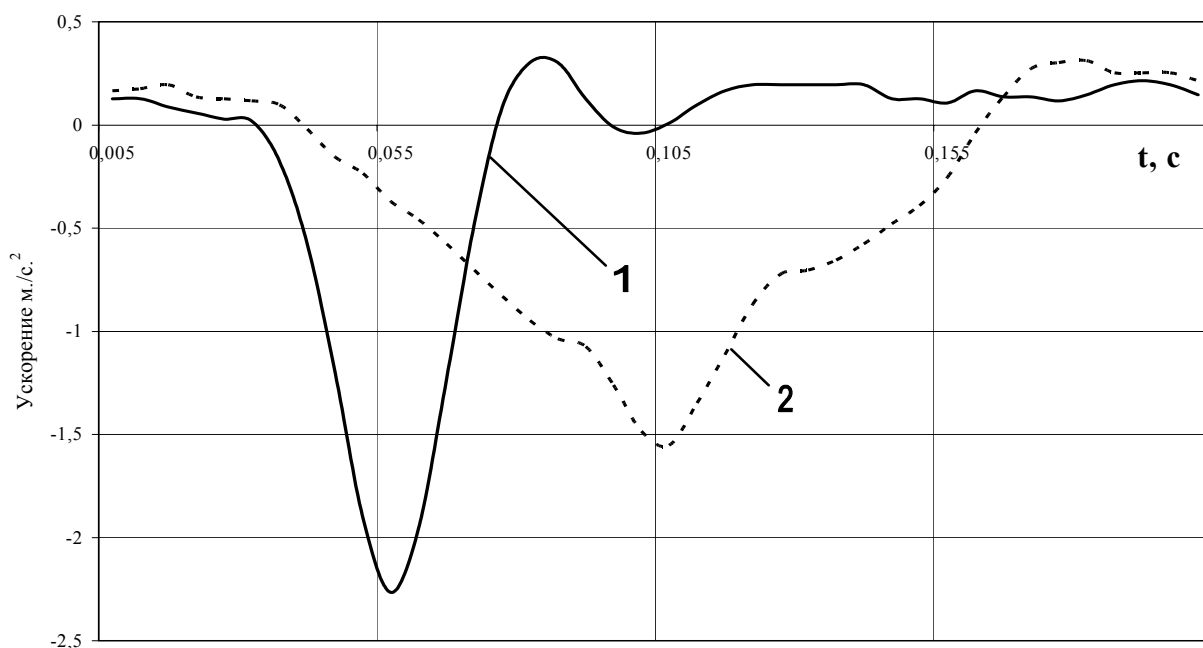


Рис. 10. Полусинусоидальные импульсы ускорения, воспроизведенные на электрогидравлическом вибростенде:

1 – импульс длительностью 30 мс; 2 – импульс длительностью 100 мс

Результаты воспроизведения импульсов показаны на рис. 10, а сравнительная оценка спектров воспроизводимых сигналов – на рис. 11. Следует отметить, что на качество воспроизведения сигналов при идентификации ПФ тракта воспроизведения по ускорениям объекта испытаний сильное влияние оказывают

посторонние воздействия (вибрации пульсатора от неравномерности давления масла, качество работы сервоклапанов пульсаторов, механические вибрации, передающиеся через силовой пол и т. д.). В связи с этим погрешность воспроизведения сигнала на некоторых гармониках достигает 10...12 дБ.

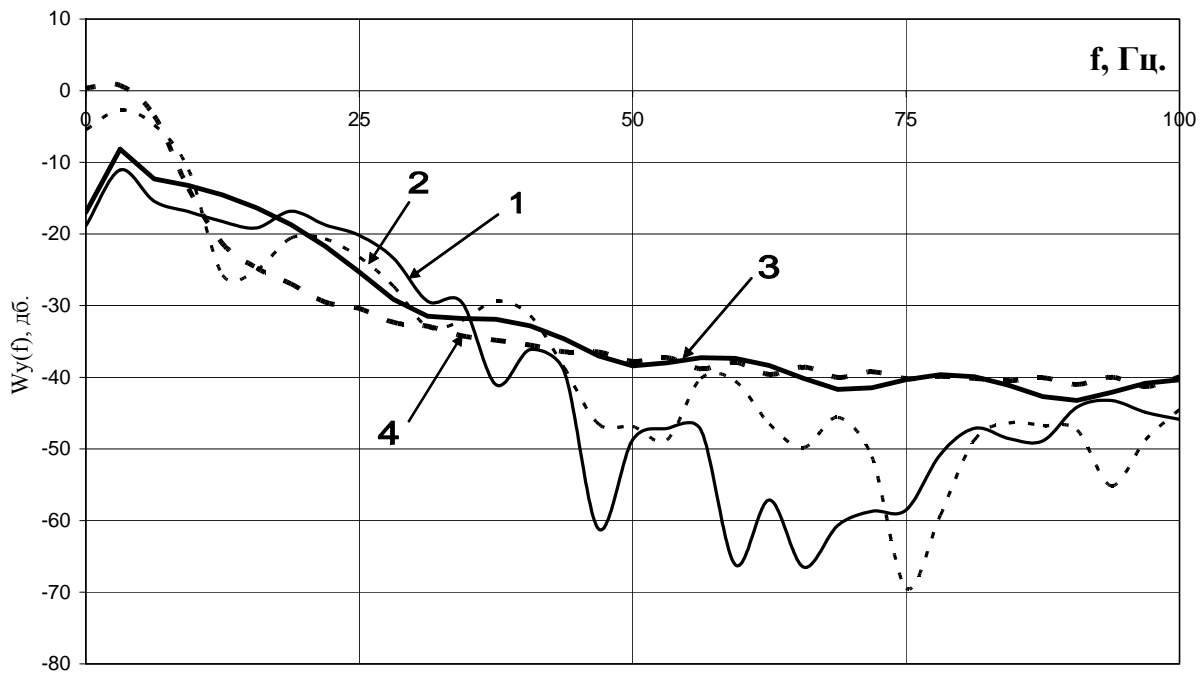


Рис. 10. Сравнение спектров воспроизведенных и эталонных сигналов:  
 1 – импульс 30 мс, воспроизведенный; 2 – импульс 30 мс, эталон; 3 – импульс 100 мс, воспроизведенный;  
 4 – импульс 100 мс, эталон

### Список сокращений

- ПФ – передаточная функция;  
 АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;  
 БК – блок коррекции амплитудно-частотной характеристики;  
 ЦКФ – цифровой корректирующий фильтр;  
 ВС – вибрационный стенд;  
 ФЧХ – фазочастотная характеристика;  
 УСО – устройство связи с объектом.

### Выводы

Исследование возможности применения системы воспроизведения реальных вибраций для создания желаемого напряженно-деформированного состояния элементов и конструкций подвижного состава показывает:

1. В качестве величин, по изменению которых формируется желаемое напряженно-деформированное состояние конструкции, наряду с перемещениями и усилиями могут быть использованы скорости и ускорения элементов конструкций.

2. При идентификации передаточной функции системы «вибростенд-объект испытаний» по ускорениям исследуемого объекта, на качество воспроизведения большое влияние оказывают посторонние воздействия вибрационного характера.

3. Испытание системы, основанной на идентификации ПФ системы по ускорениям точек объекта испытаний, показало возможность её использования для воспроизведения реальных вибраций конструкций подвижного состава.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения: Общие требования. – М.: Госкомстандарт, 1985. – 32 с.
2. Блохин Е. П. Способ воспроизведения вибраций элементов железнодорожных вагонов при их стендовых испытаниях / Е. П. Блохин, А. И. Паламаренко, В. Л. Горобец // Динамика поезда и подвижного состава железных дорог: Сб. научн. тр.– Д.: ДИИТ, 1990. – С. 65–73.
3. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
4. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
5. Капеллини В. Цифровые фильтры и их применение / В. Капеллини, А. Дж. Константинодис, П. Эмилиани и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

Поступила в редколлегию 08.04.04.