

УДК 620.179:534.6

Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Корниенко-Мифтахова И.К., Пономаренко А.В.
 Национальный авиационный университет. Украина, Киев

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ОБЪЕКТОВ

Анотація

Наведено результати досліджень за вимірюванням зсувів з використанням датчиків прискорення. Показано, що постійна часу перетворення сигналу прискорення в сигнал швидкості і зсуву впливає на амплітуду вихідних сигналів. Встановлено, що мінімальне значення похибки на вихідну амплітуду відповідає значенню постійної часу перетворення, яка дорівнює половині періоду вхідного сигналу. Розглянуто результати вимірювань зсувів з використанням датчиків прискорення та їх порівняння з даними, що отримано еталонним датчиком зсувів.

Abstract

The outcomes of researches the measurement of displacement with usage of acceleration transducers are adduced. Is shown, that the time constants of transformation a acceleration signal in a signal of speed and displacement influence amplitude of output signals. Is established, that the minimum value of an error on output amplitude corresponds to value of time constants transformation, that equal half of term on input signal. The outcomes of displacement measurement with usage of acceleration transducers and their matching with the data obtained by the reference sensor of displacement are reviewed.

Введение

При диагностике крупногабаритных конструкций используются, как статические, так и динамические виды их испытаний. Одной из важных характеристик, получаемых по результатам испытаний, является коэффициент динамичности, который определяется по соотношению статических и динамических смещений исследуемой конструкции [1, 2]. Измерение статических смещений конструкций не представляет особых сложностей и осуществляется с использованием датчиков электрического и механического типов (тензорезисторы, индукционные датчики, микрометрические головки и другие). В тоже время, определение смещений при динамических испытаниях конструкций является достаточно трудной задачей, что связано со способами регистрации и обработки сигналов возникающих колебаний.

Для регистрации возникающих колебаний крупногабаритных конструкций практическое применение нашли не прямые методы преобразования смещений в электрический сигнал. Это обусловлено тем, что датчики смещения обладают малой чувствительностью, ограниченными частотным и динамическим диапазонами, имеют значительные габариты и массу. При их установке на конструкции возникают значительные проблемы. Значительно лучшие характеристики и малые габариты имеют датчики скорости (индукционного типа) и ускорения (пьезокерамического типа). По этой причине датчики скорости, а особенно ускорения нашли достаточно широкое применение. Однако при регистрации колебаний с использованием датчиков данного типа производится обработка ограниченного набора параметров. Как правило, к данным параметрам относятся: частоты возникающих мод колебаний и коэффициент затухания [3, 4, 5], а методики диагностики основаны на анализе отклонения полученных параметров от их теоретических значений.

Нивелирование преимуществ датчиков ускорения и скорости в результатах обработки сигналов колебаний, т.е. отсутствие практической возможности определения динамических смещений, обусловлено необходимостью проведения преобразования регистрируемых сигналов в сигнал смещения. Такое преобразование должно выполняться с использованием процедур двойного или одинарного интегрирования, при реализации которых задается конечное время интегрирования τ ($\tau = \text{const}$) [6]. При неизвестной частоте регистрируемых сигналов субъективный выбор величины τ приводит к нелинейности преобразования регистрируемых сигналов в зависимости от их частоты, т.е. нелинейности коэффициента преобразования от частоты. Учет данной нелинейности достаточно сложен, что практически не позволяет осуществлять определение динамических смещений. По этой причине не проводится анализ наиболее легко обрабатываемых характеристик возникающих колебаний.

В работе будет показано, что при заданной частоте и неизменной амплитуде входного сигнала амплитуда выходного сигнала, в зависимости от постоянной времени преобразования, носит нелинейный характер. При этом существует определенный интервал значений постоянной времени, для которого значение выходной амплитуды

остаётся практически постоянной величиной, что позволяет оптимизировать процедуру обработки сигналов ускорения и скорости колебаний с определением динамических смещений конструкций.

Методика исследований

Исследования проводили с использованием мобильного диагностического комплекса "FREQS", который предназначен для регистрации, обработки и анализа сигналов свободных и вынужденных колебаний конструкций. Последние регистрируются с использованием либо датчиков ускорения, либо датчиков скорости, соответственно пьезокерамического и индукционного типов. Диагностический комплекс построен с использованием средств технологии LabCard на базе мобильного компьютера, и имеет минимальную электронную конфигурацию с максимальным использованием гибких программных средств. Такой подход позволяет провести полную автоматизацию процесса измерений, обработки и анализа входной информации.

Для проведения исследований использовались два типа сигналов: сигнал синусоидальной формы с заданной амплитудой и частотой, а так же затухающий сигнала, регистрируемый при возбуждении колебаний балки. В первом случае, синусоидальный сигнал с выхода эталонного генератора подавался непосредственно на вход диагностического комплекса. При этом сигнал рассматривался как сигнал ускорения. Во втором случае, в соответствии с методикой испытаний (рис. 1), проводилось возбуждение балки, а регистрация возникающих затухающих вертикальных колебаний осуществлялась датчиком ускорения, который размещался в ее центральной части. Возбуждение балки проводилось при помощи шарика наполненного песком с массой m , который падал с определенной высоты h . Балка (1, рис. 1) толщиной 12 мм и шириной 30 мм была изготовлена из

дуба. Длина балки между участками жесткого закрепления 2 составляла 700 мм. Масса шарика m составляла $m = 1$ Н, а высота его падения — $h = 150$ мм. В качестве датчика использовался датчик ускорения вертикальных колебаний типа А1612 с диаметром 50 мм и высотой 30 мм, который крепился к балке при помощи струбицы. Чувствительность датчика составляла $1,1$ В/м/с².

В обоих случаях обработка сигналов осуществлялась следующим образом. Проводилась регистрация сигналов с построением их спектров, а так же осуществлялось последовательное преобразование сигналов в сигнал скорости и смещения с построением их спектров. Спектральный анализ выполнялся в соответствии с преобразованием Фурье [6], а преобразование сигналов на каждом шаге проводилось с использованием процедур интегрирования в виде

$$U_2(t) = \int_0^t U_1(\tau) d\tau, \quad 0 < \tau \leq \delta, \quad (1)$$

где U_1 , U_2 — соответственно, входная амплитуда и амплитуда сигнала после преобразования; δ — время интегрирования, или в цифровом виде

$$U_2(t_m) = \sum_{i=0}^m U_{1i} \Delta t, \quad t_m = m \Delta t, \quad 0 < m \leq S, \quad (2)$$

где U_{1i} — значения i -ых отсчетов амплитуды на выходе аналого-цифрового преобразователя, получаемых с интервалом дискретизации входного сигнала Δt ; $S = \tau / \Delta t$, а τ лежит в пределах $0 < \tau \leq \delta$.

В процессе выполнения преобразования на каждом шаге осуществлялось построение и анализ зависимости изменения амплитуды выходного сигнала (скорости и смещения) от времени интегрирования, величина которого изменялась в пределах $\delta = T_1/16 - 14T_1/16$, где $T_1 = 1/f_1$ — период зарегистрированного сигнала.

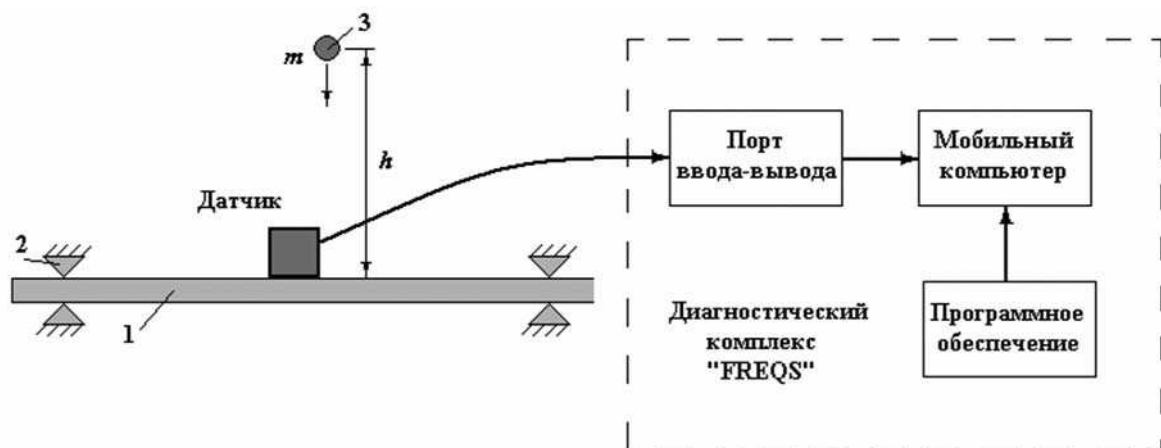


Рис. 1. Методика испытаний с использованием диагностического комплекса "FREQS":
1 — деревянная балка; 2 — опоры крепления; 3 — шарик, наполненный песком

Экспериментальные результаты

В соответствии с методикой исследований, непрерывный синусоидальный сигнал, регистрируемый диагностическим комплексом, использовался в качестве модельного сигнала ускорения колебаний. Он имел следующие параметры: амплитуда $U_1 = 2313$ мВ, частота $f_1 = 9,8$ Гц. Исходный сигнал записывался в диагностический комплекс с последующим его хранением в виде массива

данных. Результат регистрации исходного сигнала и его спектр показаны на рис. 2, *a–б*, соответственно. В дальнейшем осуществлялось преобразование исходного сигнала 'ускорения' в сигнал скорости, а затем в сигнал смещения. Типичные сигналы после проведения соответствующего преобразования и их спектры показаны на рис. 2, *в–е* при значении постоянной времени $\delta = T_1/2$, т.е. равной половине периода регистрируемого сигнала. Из

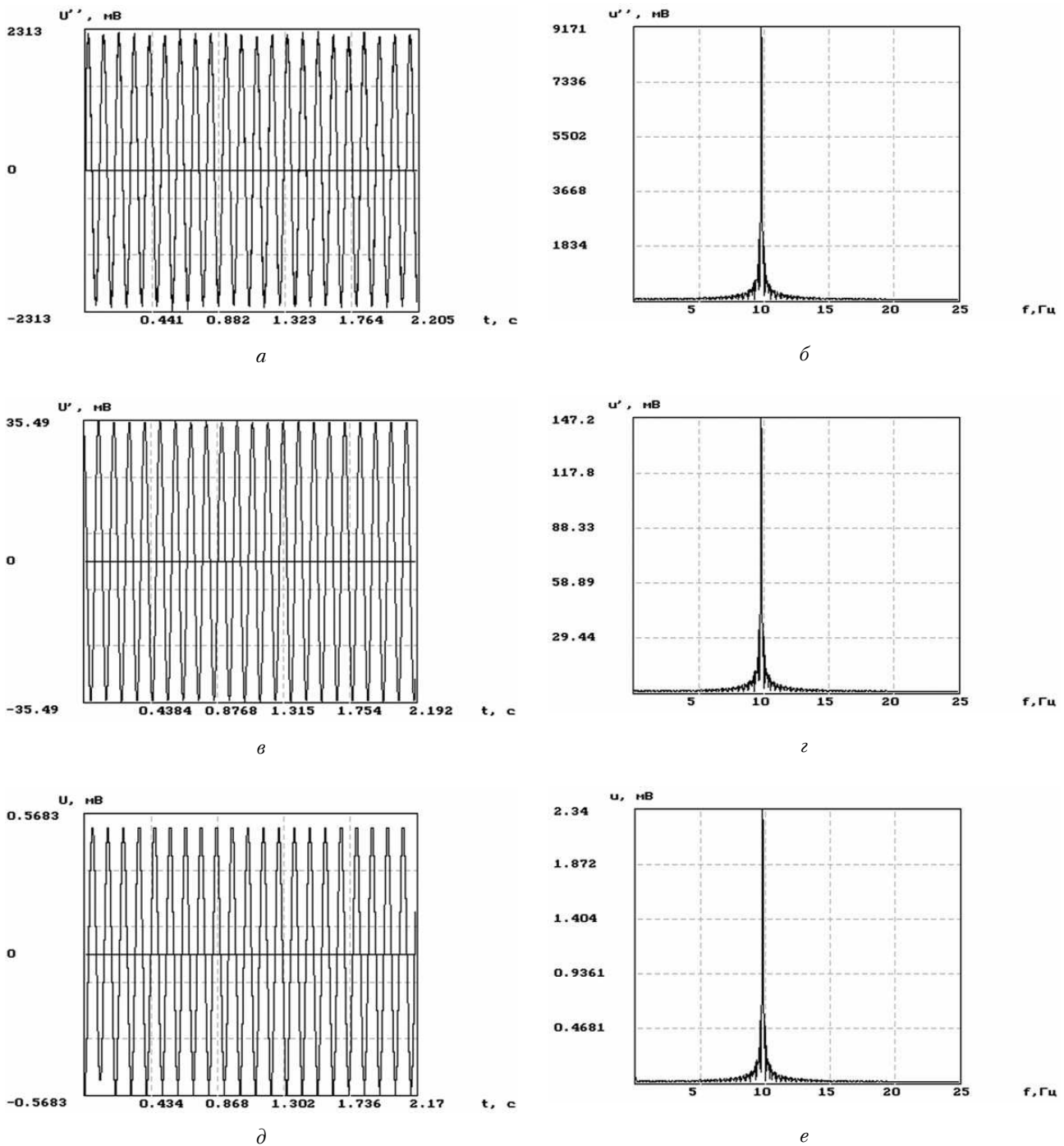


Рис. 2. Результаты регистрации и обработки модельного сигнала ускорения колебаний: *a, б* – сигнал ускорения и его спектр; *в, г* – сигнал скорости и его спектр; *д, е* – сигнал смещения и его спектр. Частота модельного сигнала $f_1 = 9,8$ Гц. Постоянная времени преобразования $\delta = 1/2f_1 = 0,102$ с



рис. 2, *в-г* видно, что операции преобразования приводят к уменьшению амплитуд выходного сигнала скорости и смещения, однако не влияют на их спектры (рис. 2, *г, е*), по сравнению со спектром исходного сигнала (рис. 2, *б*).

В тоже время, как показала обработка экспериментальных данных, изменение постоянной времени δ приводит к нелинейному изменению амплитуды выходного сигнала. Диапазон исследуемых значений δ составлял $-0,063T_1 \leq \delta \leq 0,94T_1$. Зависимость амплитуды сигнала скорости от постоянной времени, после проведения преобразования сигнала ускорения, носит колоколообразный характер с явно выраженным максимумом, положение которого соответствует значению $\delta = T_1/2$ (рис. 3, *а*). Дальнейшее преобразование сигнала скорости, полученного при $\delta = T_1/2$, в сигнал смещения, так же приводит к нелинейности изменения выходной амплитуды от постоянной времени

(рис. 3, *в*). Зависимость так же имеет колоколообразный характер изменения. Однако в области максимума, соответствующего значению постоянной преобразования $\delta = T_1/2$, наблюдается полочка. В пределах данной полочки отклонение амплитуды выходного сигнала, не превышающего 5% (рис. 3, *г*) максимального значения, лежит в пределах значений постоянной преобразования $0,47T_1 \leq \delta \leq 0,77T_1$. Для сигнала скорости 5% отклонение амплитуды выходного сигнала соответствует меньшему диапазону значений постоянной преобразования $-0,39T_1 \leq \delta \leq 0,61T_1$ (рис. 3, *б*). Однако диапазон значений δ распределен равномерно относительно величины $T_1/2$. Мы рассматриваем 5% значение отклонения амплитуды, так как оно является максимально допустимой ошибкой при определении динамических смещений конструкций, которые рассчитываются по амплитуде сигнала смещения.

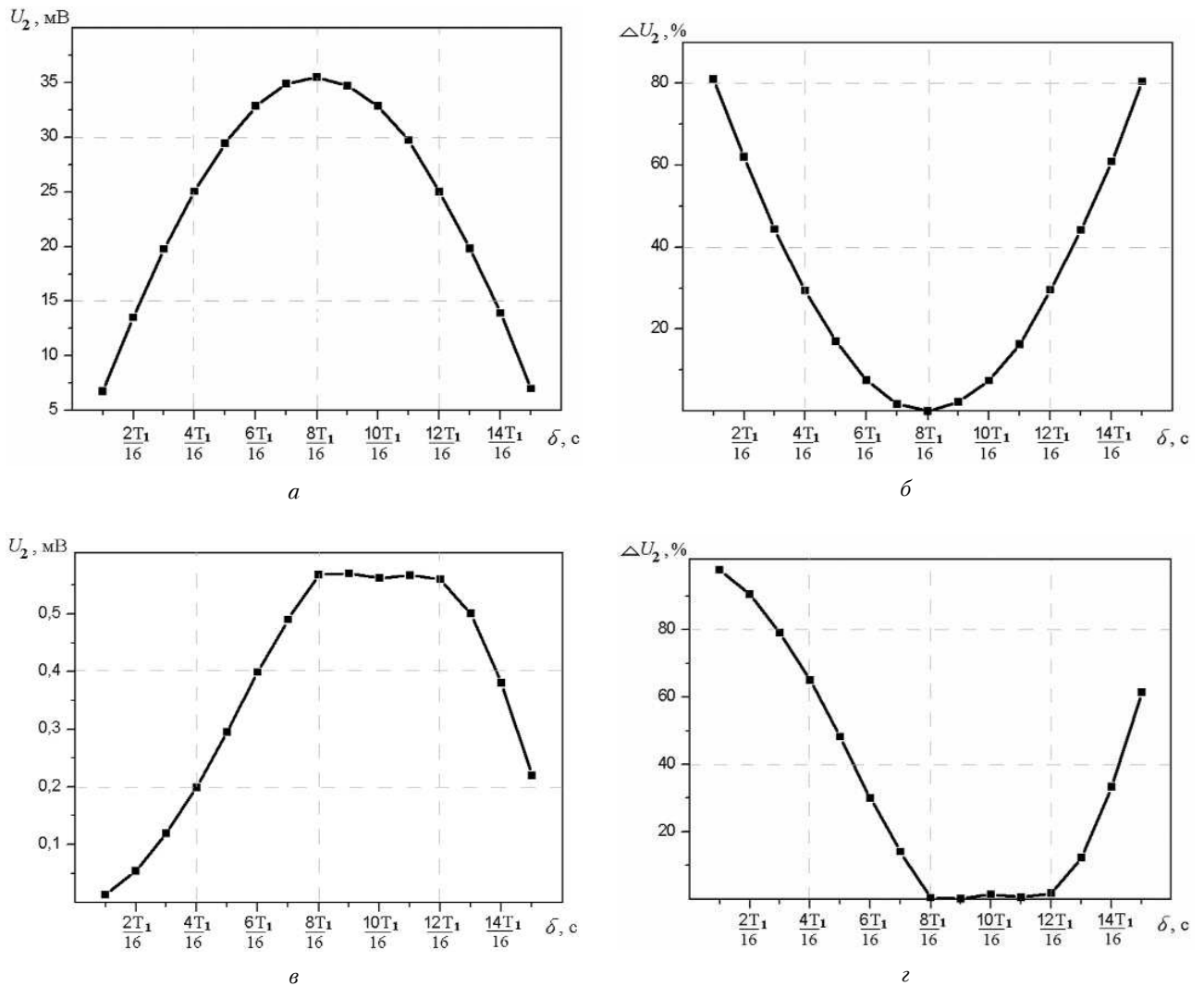


Рис. 3. Изменение амплитуды выходных сигналов и их процентного отклонения от максимальной амплитуды в зависимости от постоянной времени преобразования δ модельного сигнала ускорения: *а, б* — для сигнала скорости; *в, г* — для сигнала смещения. T_1 — период сигнала, $T_1 = 0,102$ с

Аналогичные исследования были проведены для затухающего сигнала ускорения, который регистрировался, в соответствии с методикой испытаний балки (рис. 1). Полученные результаты преобразования сигнала ускорения в скорость и смещение, а так же их спектры показаны на рис. 4. Зависимости изменения амплитуды выходного сигнала от постоянной времени δ для сигналов скорости и ускорения приведены на рис. 5.

Частота колебаний балки составляла 4,65 Гц (период колебаний, $T_1 = 0,215$ с). Сигналы скорости и смещения, приведенные на рис. 4, *в*, *д* получены после преобразования сигнала ускорения при значении постоянной времени $\delta = T_1/2$, т.е. равной половине периода регистрируемого сигнала. Из результатов исследований видно, что операции преобразования приводят к уменьшению амплитуд выходного сигнала скорости и смещения

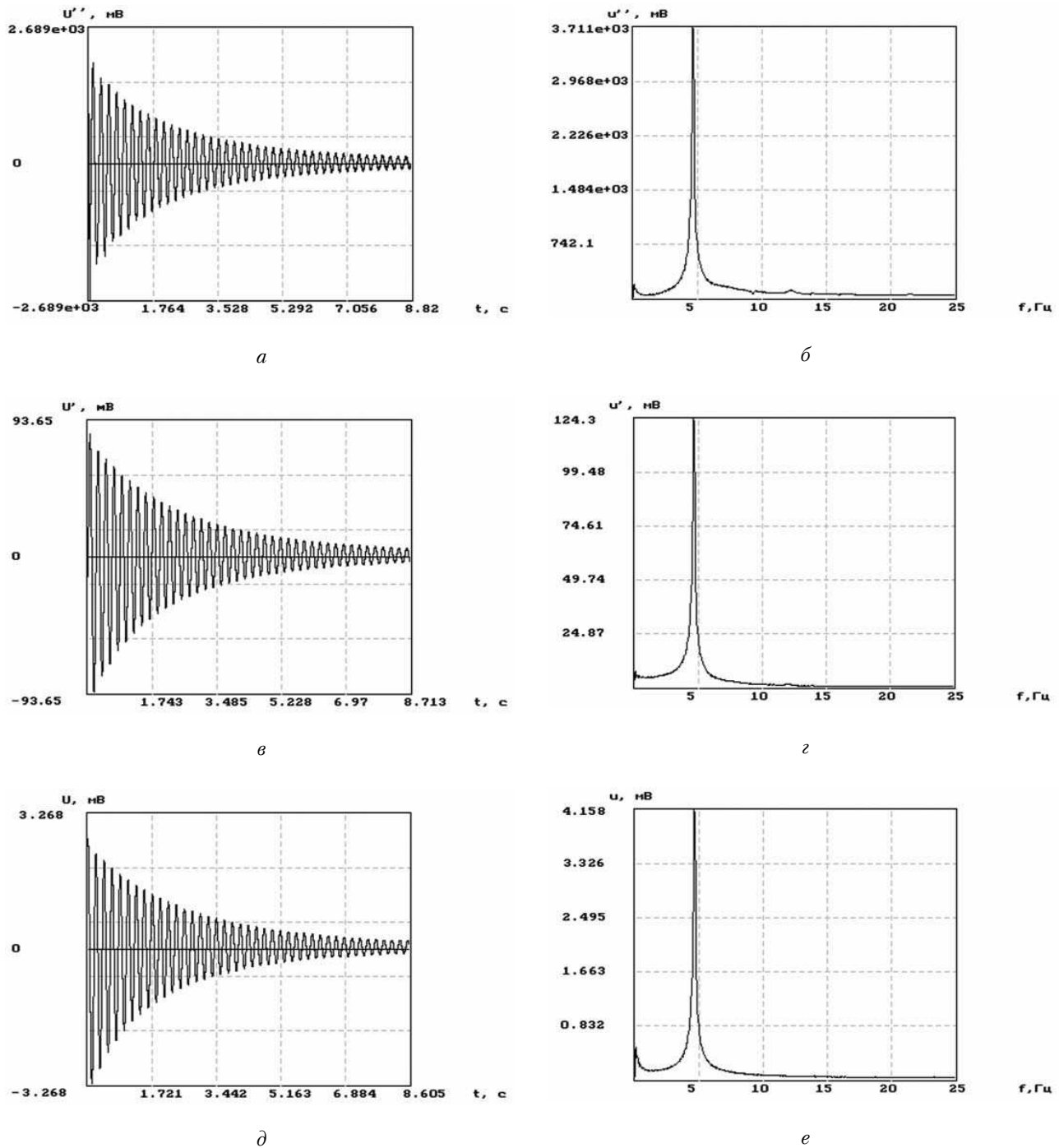


Рис. 4. Результаты обработки сигнала затухающих колебаний балки, зарегистрированного датчиком ускорения: *a, б* – сигнал ускорения и его спектр; *в, г* – сигнал скорости и его спектр; *д, е* – сигнал смещения и его спектр. Частота модельного сигнала $f_1 = 4,65$ Гц. Постоянная времени преобразования $\delta = 1/2f_1 = 0,215$ с



(рис. 4, а, в, д), однако не влияют на их спектры (рис. 4, б, г, е).

В тоже время, исследование влияния постоянной времени δ в диапазоне значений $0,063T_1 \leq \delta \leq 0,94T_1$ на амплитуду выходного сигнала показало следующее. Зависимость изменения амплитуды сигнала скорости от постоянной времени, после проведения преобразования сигнала ускорения, как и в случае непрерывного сигнала, носит колоколообразный характер с явно выраженным максимумом, положение которого соответствует значению $\delta = T_1/2$ (рис. 5, а). Зависимость изменения выходной амплитуды сигнала смещения, после преобразования сигнала скорости, полученного при $\delta = T_1/2$, так же носит колоколообразный характер (рис. 5, в). Однако в области максимума, соответствующего значению постоянной преобразования $\delta = T_1/2$, наблюдается полочка (рис. 5, в). В пределах данной полочки,

как и в случае непрерывного сигнала (рис. 3, в), отклонение амплитуды выходного сигнала, не превышающего 5% (рис. 5, г) максимального значения, лежит в пределах значений постоянной преобразования $0,45T_1 \leq \delta \leq 0,7T_1$. Для затухающего сигнала скорости 5% отклонение амплитуды выходного сигнала соответствует меньшему диапазону значений постоянной преобразования — $0,41T_1 \leq \delta \leq 0,65T_1$ (рис. 5, б). Однако, в отличие от модельного сигнала, после его преобразования в сигнал скорости, диапазон значений δ распределен неравномерно относительно величины $T_1/2$ и сдвинут в область значений больших $T_1/2$.

Заключение

Таким образом, результаты исследований показали, что амплитуда сигнала смещения, получаемого при проведении двойного преобразования сигнала ускорения, зависит от величины посто-

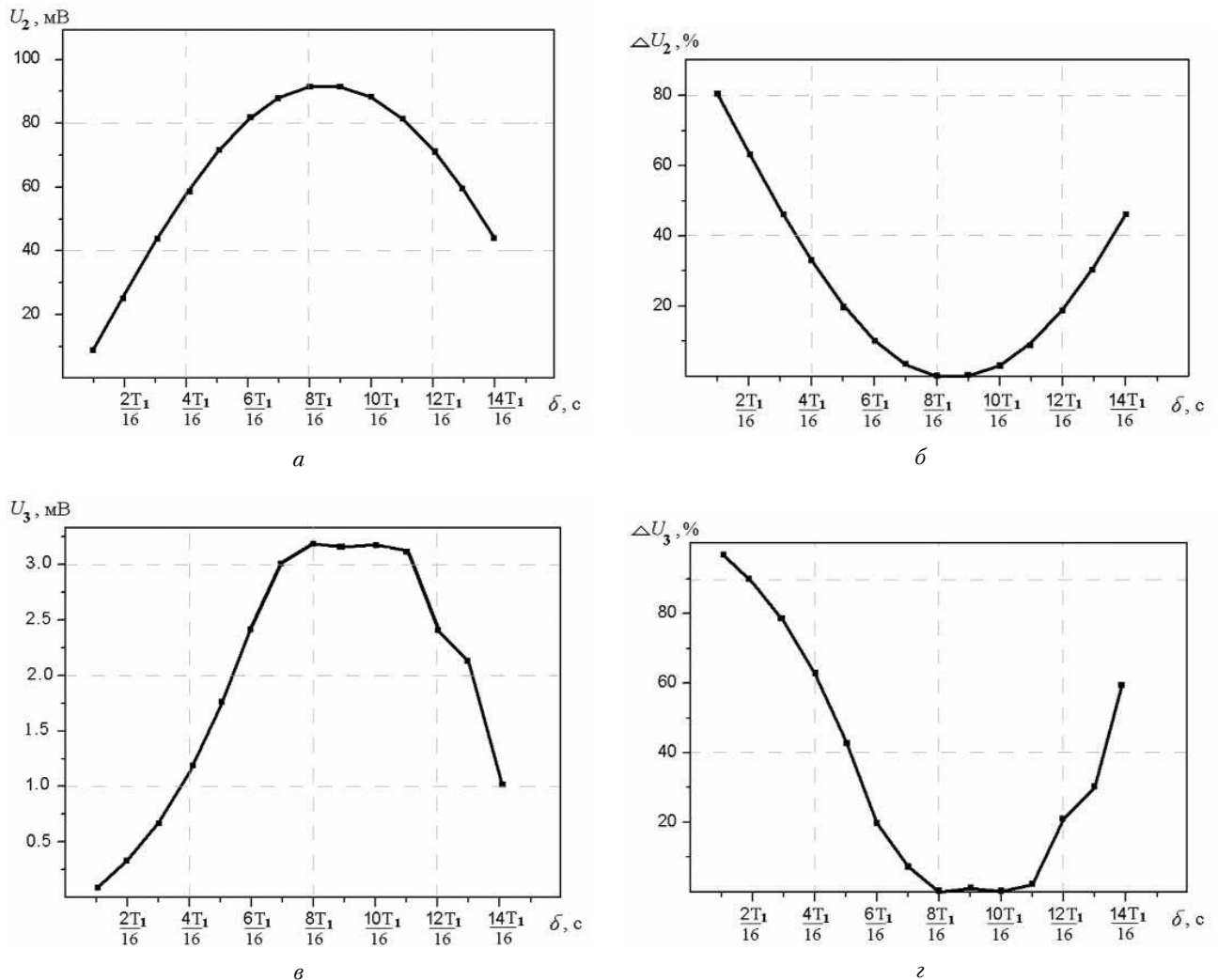


Рис. 5. Изменение амплитуды выходных сигналов и их процентного отклонения от максимальной амплитуды в зависимости от постоянной времени преобразования δ затухающего сигнала ускорения: а, б — для сигнала скорости; в, г — для сигнала смещения. T_1 — период сигнала, $T_1 = 0,215$ с

янной времени преобразования. Подобная зависимость наблюдается на каждом шаге преобразования, как при обработке модельного синусоидального сигнала, так и затухающего сигнала, регистрируемого датчиком ускорения. Зависимости носят колоколообразный характер. Однако при первом преобразовании зависимость имеет гауссовский вид с зеркальным отражением относительно максимального значения амплитуды. При втором преобразовании на зависимости появляется полочка, которая наблюдается при значениях постоянной преобразования больших $T_1/2$ (где T_1 — период сигнала). Максимальное значение амплитуды сигнала смещения в обоих случаях соответствует значению постоянной времени, равному $T_1/2$. Анализ полученных зависимостей показывает, что с изменением значения постоянной времени, как в большую, так и меньшую сторону значений относительно $T_1/2$ наблюдается увеличение ошибки отклонения амплитуды сигнала смещения. Однако 5% ошибка отклонения амплитуды сигнала смещения соответствует определенному диа-

пазону значений постоянной преобразования. Для модельного сигнала ускорения данный диапазон соответствует значениям $\delta = 0,4T_1 - 0,6T_1$, а для затухающего сигнала ускорения — $\delta = 0,38T_1 - 0,7T_1$.

Для определения динамического смещения конструкций важным является установление действительного значения амплитуды сигнала смещения. Как показывают исследования данное значение амплитуды сигнала соответствует величине постоянной времени преобразования, которая связана с основной частотой регистрируемого сигнала ускорения, т.е. $\delta = T_1/2$. Такое условие выбора постоянной времени преобразования позволяет значительно снизить ошибку определения динамических смещений. На рис. 6 показан результат обработки данных по результатам измерений динамических смещений эталонным индукционным датчиком смещений типа WA50 и датчиком ускорения типа A1612. Зависимость (рис. 6, а) приведена в координатах $x^e - x^k$, где x^e, x^k — соответственно, смещения измеренные эталонным и исследуемым датчиками. На рис. 6, б–в показаны, соответственно, зависимости абсолютной и относительной ошибки измерения смещений для исследуемого датчика в координатах $x^e - \Delta x_{(1,2)}^k$ значения которых определяются в виде

$$\Delta x_1^k = x^e - x^k,$$

$$\Delta x_2^k = \frac{x^e - x^k}{x^e} (\%).$$

Анализ зависимости, приведенной на рис. 8, а, показал, что она хорошо описывается выражением вида

$$x^k = A + Bx^e, \quad (3)$$

где A и B — коэффициенты аппроксимирующего выражения, значения которых равны: $A = -0,0655$

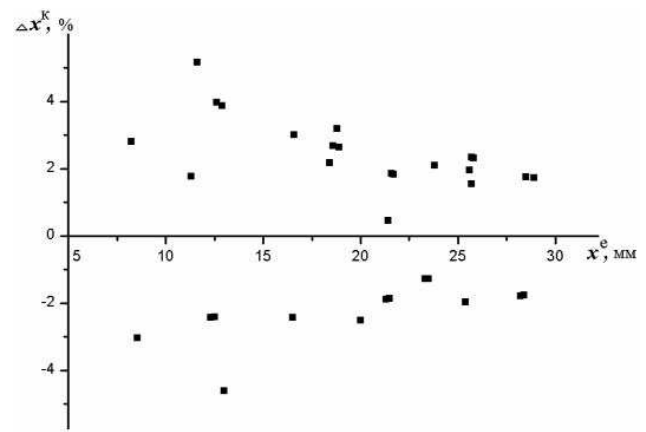
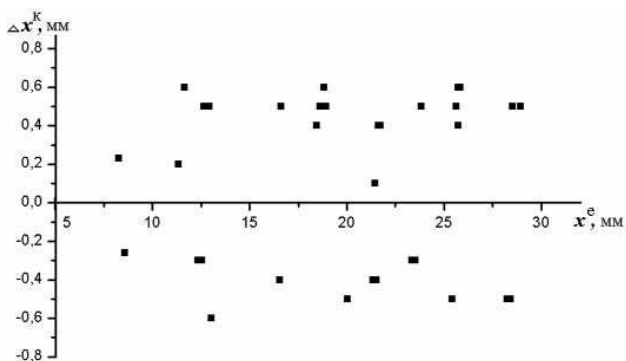
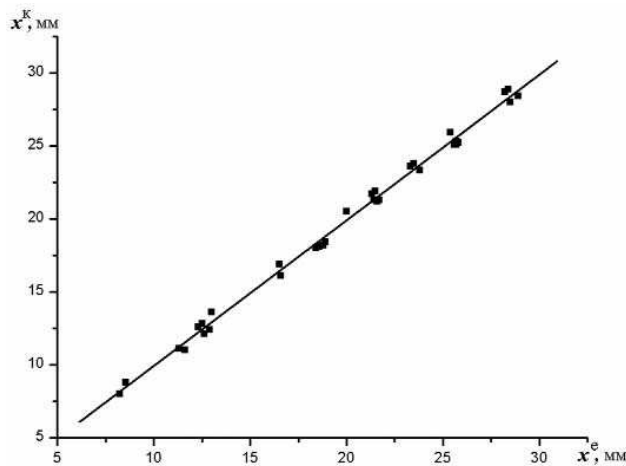


Рис. 6. Результаты обработки экспериментальных данных при измерении смещений эталонным индукционным датчиком смещений и исследуемым датчиком ускорения колебаний:

а — зависимость смещений в координатах $x^e - x^k$ (эталонный — исследуемый датчики); б, в — соответственно, зависимости абсолютной и относительной ошибки измерения смещений с использованием датчика ускорений



и $B = 0,9975$. При этом дисперсия для вероятности $p=0,99741$ составляет $\sigma^2 = 0,449$, а относительная ошибка определения смещений датчиком скорости колебаний не превышает $\Delta x_{2\max}^k = \pm 4,9\%$.

Литература

1. Лучко Й.Й., Коваль П.М., Дем'ян М.Л. Методи дослідження та випробувань будівельних матеріалів і конструкцій. — Львів: Каменярь, 2001. — 436 с.
2. Мости: Конструкції та надійність / Лучко Й.Й., Коваль П.М., Корнієв М.М. та інші. — Львів: Каменярь, 2005. — 989 с.
3. Karoumi R., Gerard J. Monitoring of New Svinesund Bridge/ Shot report. The Royl Institute of Technology (KTH) < Stockholm. — N4, 2005. — 17 p.
4. Ren W.X., Zatar W., Harik I.E. Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge // J.Structures. — 2006, 26. — P. 631–640.
5. Bochkarev N.N., Kartopolzev A.V., Selivanova T.V. Vibration of transport superstructures under influence of random traffic streem/ XV Session of the Russian Acoustic Soc. — 2004. — P. 527–531.
6. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів. — К: Либідь, 1999. — 496 с.