

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ДАТЧИКОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СМЕЩЕНИЙ

### Анотація

*Розглянуто методика та експериментальні результати визначення коефіцієнтів передачі датчиків перетворення механічних зсувів. Наведено дані вимірювань та статистичного аналізу з визначенням довірчих границь. Показано, що результати вимірювань зсувів описуються лінійними залежностями з мінімальною дисперсією при заданій імовірності. При цьому похибка вимірювання зсувів є прийнятною при дослідженні та визначенні динамічних характеристик конструкцій.*

### Abstract

*The technique and experimental results of definition a factors of transfer gauges of mechanical displacement transformation is considered. The data of measurements and statistical analysis with definition of confidential borders are given. Is shown, that the results of measurement a displacement are described by linear dependencies with minimal desperation at the given probability. Thus the mistake of measurement a displacement is acceptable at research and definition the dynamic characteristics of designs.*

### Введение

Динамические виды испытаний имеют широкое применение в технической диагностике крупногабаритных изделий, например, бетонных и железобетонных мостовых конструкций [1, 2]. Их использование обусловлено тем, что в процессе эксплуатации конструкции подвержены воздействию динамических нагрузок, которые влияют на изменение свойств материалов и, как следствие, на их несущую способность.

При проведении динамических испытаний, как правило, регистрируют вынужденные и свободные колебания конструкций с использованием различных типов датчиков: индукционных, пьезоэлектрических, тензометрических и других [1]. Они различаются между собой по чувствительности, частотной полосе пропускания и другим характеристикам. Одним из типов датчиков, обладающих достаточно высокой чувствительностью, являются индукционные датчики смещений и скорости колебаний. Непосредственное использование датчиков смещений, например, серии WA с базой перемещения от 10 мм до 200 мм требует развязки корпуса датчика от конструкции. Для больших конструкций это не всегда возможно. С данной точки зрения, более удобным является использование датчиков скорости колебаний, которые непосредственно размещаются на исследуемой конструкции. Работа таких индукционных датчиков скорости рассмотрена в [3, 4] с анализом влияния на параметры выходного сигнала

нелинейности амплитудно-частотной характеристики датчика. При этом показано, что в области низких частот использование такого типа датчиков возможно при условии введения корректирующего коэффициента, зависящего от частоты, т.е. корректировки его амплитудно-частотной характеристики.

Индукционные датчики скорости серийного производства имеют паспортизованные значения частоты собственных колебаний и коэффициента преобразования. Например, для датчиков типа СВ-10Ц со стандартным однотипным корпусом нормированное значение частоты составляет  $10 \text{ Гц} \pm 5\%$ , а значение коэффициента преобразования –  $19,5 \text{ В/м/с} \pm 5\%$  [5]. Однако, при модификации конструктивных элементов датчика (изменение крепежных элементов датчика и кабельного соединения, введение защиты от перегрузок и других) будет влиять, прежде всего, на его коэффициент преобразования. Это, в свою очередь, может приводить к возникновению значительных ошибок не только в определении параметров сигналов колебаний, но и расчетных значений характеристик конструкций, например, динамических смещений. Поэтому при проведении любых модификаций датчиков необходимо проводить определение их коэффициента преобразования на линейном участке амплитудно-частотной характеристики или проводить калибровку их коэффициента преобразования.

В работе рассмотрена методика калибровки индукционных датчиков скорости колебаний, которая основана на сравнении амплитуды эталонных смещений с амплитудой смещений, определяемой по сигналам, регистрируемому на выходе датчика. Так же будут рассмотрены результаты калибровки и спектральные характеристики регистрируемых сигналов колебаний.

### Методика исследований

Структурная схема установки для проведения испытаний показана на рис. 1, а. Исследование параметров сигналов колебаний и смещений осуществляли при использовании ударного нагружения деревянной балки (1, рис. 1, а), изготовленной из дуба, которая имела следующие размеры: толщина – 12 мм, ширина – 30 мм. Длина балки между участками жесткого закрепления 2 составляла 700 мм. Нагружение балки осуществлялось при помощи шарика 14 наполненного песком, падающего с постоянной высоты  $h$ . Масса шарика  $m$  составляла  $m = 1 \text{ Н}$ , а высота его падения  $h - h = 150 \text{ мм}$ . В центре на нижней плоскости балки (рис. 1, а) размещался калибруемый индукционный датчик скорости вертикальных колебаний 4 типа СВ-10Ц, имеющий следующие размеры: диаметр – 29 мм, высота – 67 мм. Нормированный частотный

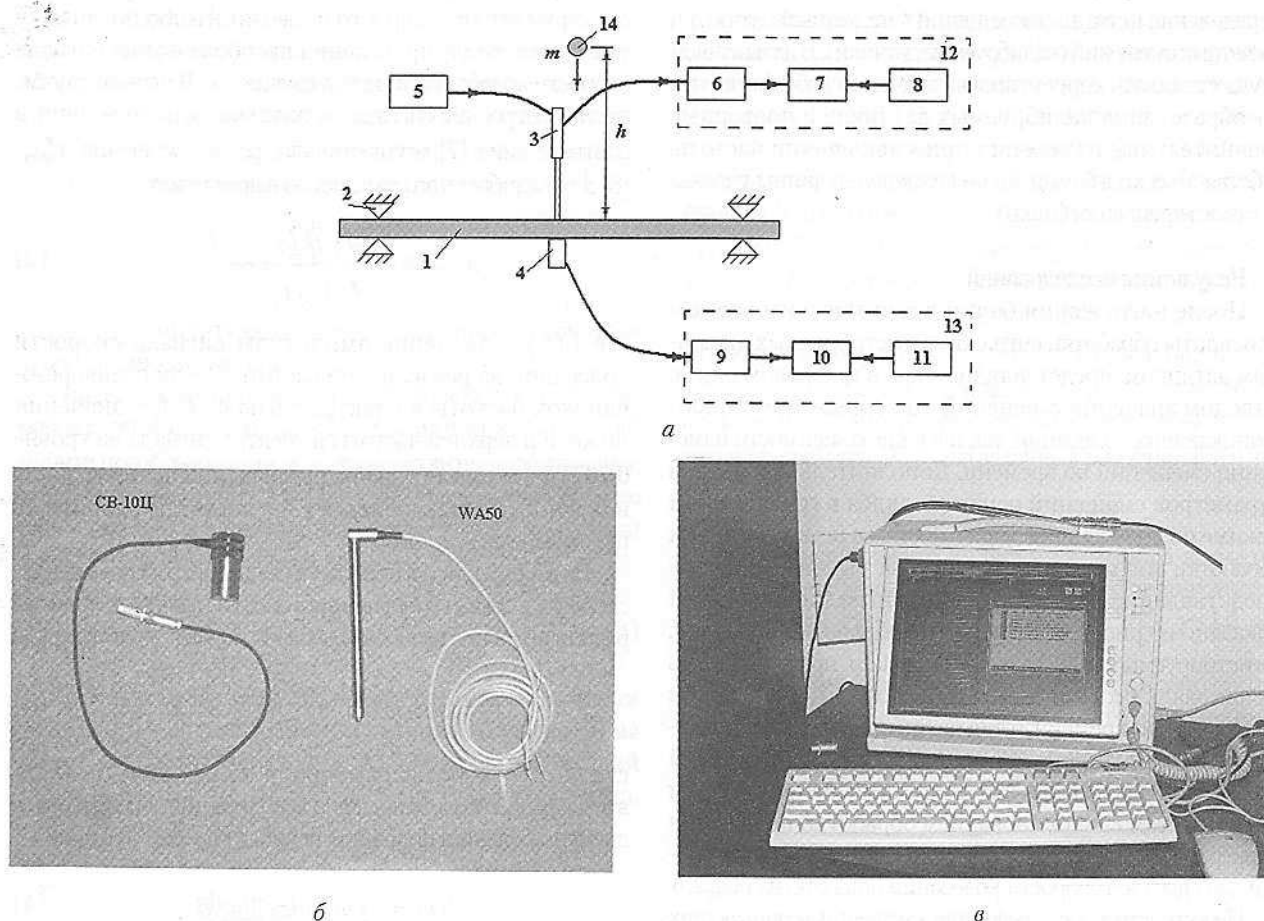


Рис. 1. Структурная схема установки для проведения испытаний (а), общий вид индукционных датчиков (б) и мобильной информационно-измерительной системы (в).

1 – балка; 2 – опоры; 3 – индукционный датчик смещения; 4 – индукционный датчик скорости; 5 – источник специального питания; 6, 9 – порты ввода-вывода информации; 7, 10 – мобильные компьютеры; 8, 11 – программные математические комплексы; 12, 13 – мобильные информационно-измерительные системы; 14 – шарик с песком

диапазон работы датчика – 10–700 Гц. Крепление датчика к балке осуществлялось при помощи струбцины. На верхней плоскости балки напротив калибруемого датчика размещался шток индукционный датчик смещения 3 типа WA50 с базой максимального линейного перемещения (смещения) 50 мм ( $\pm 25$  мм), который являлся эталонным датчиком. Частотный диапазон работы датчика – 0,2–200 Гц. Шток индукционного датчика смещения имел жесткий контакт с балкой. При максимальном выходном напряжении датчика 10 В, соответствующего максимальному перемещению 50 мм, чувствительность датчика WA50 составляет 0,005 мм/мВ.

Выходные сигналы с датчиков 4 и 3 регистрировались и обрабатывались с использованием мобильных информационно-измерительных систем (МИИС), построенных на базе мобильных компьютеров (МК) и средств технологии LabCard [6]. В состав МИИС (12, 13, рис. 1, а) входят порты ввода-вывода, мобильные компьютеры и программные математические комплексы. В первом случае 9, 10, 11 – это система для измерения параметров сигналов вынужденных и собственных колебаний конструкций,

включая и параметры динамических смещений (система "FREQS"). Во втором случае 6, 7, 8 – это многоканальная система для измерения линейных перемещений (система "LINR"). Особенностью таких систем является минимизация электронного оборудования с максимальным использованием гибких программных средств, обеспечивающих все операции контроля, управления процессами измерений, обработки и анализа входной информации, а так же представления их результатов. Для ввода информации в МК используется 16 канальный порт ввода-вывода типа ADA –1292 с 12 разрядным преобразованием аналоговых сигналов в цифровой код и ошибкой, не превышающей,  $\pm 1$  бит. При чувствительности аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 4,88 мВ на единицу младшего разряда ошибка измерения смещения с использованием эталонного датчика составляет  $\pm 0,0244$  мм. Общий вид индукционных датчиков смещения, скорости и МИИС показан на рис. 1, б, в.

Исследования проводили для четырех датчиков CB-10Ц. По результатам измерений и обработки сигналов, регистрируемых на выходах датчиков, проводилось

определение истинных смещений (эталонный датчик) и расчетных смещений (калибруемые датчики). В дальнейшем осуществлялась корректировка значения коэффициента преобразования калибруемых датчиков и повторные сравнительные измерения при уменьшении частоты собственных колебаний балки (изменение длины участка жесткого крепления балки).

#### Результаты исследований

После нагружения балки динамическим ударом результаты обработки сигналов, регистрируемых эталонным датчиком, представлялись, как в цифровом виде с выводом значений смещений по первым трем пикам возникающих колебаний, так и в виде зависимости изменения смещений во времени. Дополнительный анализ параметров смещений осуществлялся в графическом режиме по полученным зависимостям с использованием обработки положения маркера в окне вывода. Типичное представление результатов для сигналов смещений показано на рис. 2, а. Результаты обработки сигналов, регистрируемых калибруемым датчиком, представлялись в виде зависимостей изменения скорости и смещения колебаний во времени, а так же их спектров. Дополнительный анализ параметров сигналов скорости колебаний осуществлялся в графическом режиме по полученным зависимостям с использованием обработки положения маркера в окне вывода. Типичное представление результатов для сигналов скорости колебаний показано на рис. 2, б.

Непосредственное определение смещений, возникающих в балке, осуществлялось с использованием МИИС "LNR" по результатам измерения напряжения на выходе датчика WA50. При этом расчет величины смещения  $x_{\max}^e$  для эталонного датчика осуществлялся по выражению

$$x_{\max}^e = U_{\max} \Delta \ell, \quad (1)$$

где  $U_{\max}$  – максимальная амплитуда сигнала на выходе датчика смещения;  $\Delta \ell$  – чувствительность датчика к перемещению в мм/мВ.

Определение смещений с использованием калибруемого датчика скорости осуществлялось либо по амплитудному

спектру сигнала скорости колебаний либо по сигналу смещения, после проведения преобразования сигнала скорости колебаний в сигнал смещения. В первом случае, после построения спектра сигнала скорости колебаний, в соответствии с [7], осуществлялся расчет смещения  $x_{\max}^k$  [8] для калибруемого датчика по выражению

$$x_{\max}^k = \frac{|U(f_p)|(f_2 - f_1)}{K_{\Pi} f_p}, \quad (2)$$

где  $U(f_p)$  – значение амплитуды сигнала скорости колебаний на резонансной частоте;  $f_p$  – значение резонансной частоты в спектре сигнала;  $f_1, f_2$  – значения нижней и верхней частоты в спектре сигнала на уровне 0,707 от его амплитуды на резонансной частоте;  $K_{\Pi}$  – исходное (первоначальное) значение коэффициента преобразования датчика.

Во втором случае, проводилось преобразование сигнала скорости в сигнал смещения, которое на интервале времени равно половине периода колебаний осуществляется в виде

$$U(t) = \int_0^t u(\tau) d\tau, \quad 0 < t \leq \delta, \quad (3)$$

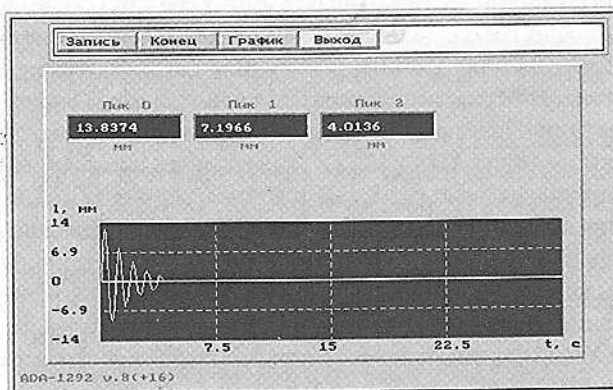
где  $u(\tau)$  – скорость изменения колебаний;  $\delta = T/2$  – время, равное половине периода колебаний, а на интервале времени большем половины периода колебаний в виде

$$U(t) = \int_{t-\delta}^t u(\tau) d\tau, \quad t > \delta. \quad (4)$$

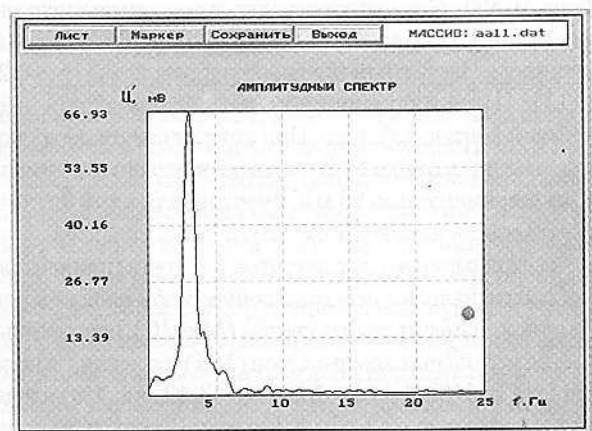
Так как все измерения с использованием МИИС выполняются в цифровом виде, то (3) и (4) записываются в виде

$$U(t_m) = \sum_{i=0}^m u_i \Delta t, \quad t_m = m \Delta t, \quad 0 < m \leq S, \quad (5)$$

$$U(t_m) = \sum_{i=m-S}^m u_i \Delta t, \quad t_m = m \Delta t, \quad m > S, \quad (6)$$



а



б

Рис. 2. Представление результатов анализа при обработке сигналов смещений (а) и скорости колебаний (б)

где  $u_i$  – значения  $i$ -ых отсчетов амплитуды на выходе аналого-цифрового преобразователя, получаемых с интервалом дискретизации входного сигнала  $\Delta t$ ;  $S = \delta/\Delta t$ .

С учетом преобразований (5) и (6) величина смещения  $x_{\max}^k$  для калибруемого датчика определяется по максимальной амплитуде сигнала смещения в виде

$$x_{\max}^k = \frac{|U_{n \max}| \Delta t}{K_{\Pi}}, \quad (7)$$

где  $U_{n \max}$  – амплитуда максимального пика колебаний в зарегистрированном сигнале.

Так как величина смещения для калибруемого датчика определена при некотором исходном значении его коэффициента преобразования  $K_{\Pi}$ , то действительное значение коэффициента преобразования  $K_{\Pi}$  рассчитывается по результатам сравнения смещений, измеренных эталонным и калибруемым датчиком в виде

$$K_{\Pi} = \frac{x_{\max}^e}{x_{\max}^k} K_{\Pi}^e. \quad (8)$$

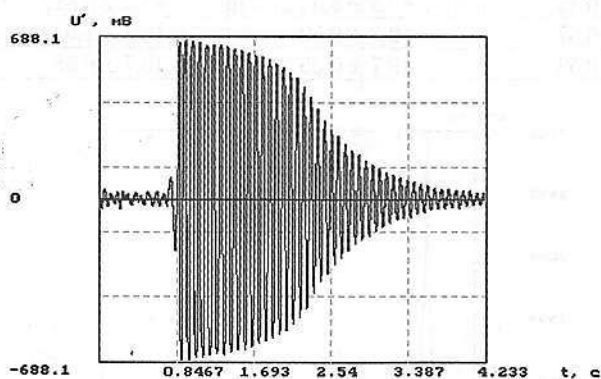
Результат регистрации и обработки сигнала скорости колебаний с использованием датчика №1 показан на рис. 3. На рис. 3, а, б приведен сигнал скорости колебаний и его спектр, а на рис. 3, в, г – сигнал смещения, и его спектр.

полученный после преобразования сигнала скорости в сигнал смещения, и его спектр. Частота регистрируемых колебаний балки для всех исследуемых датчиков находилась в пределах  $f_p = 13,13 \text{ Гц} \pm 1\%$ . Статистическая обработка данных для 70 измерений смещений осуществлялась по результатам определения коэффициента преобразования датчика №1, в соответствии с (8), при начальном значении  $K_{\Pi} = 20,0 \text{ В/м/с}$ . Полученные результаты показали, что значения  $K_{\Pi}$  описываются нормальным законом распределения со значениями оценок среднего и стандартного отклонения:  $\bar{K}_{\Pi} = 19,4$  и  $s_K = 0,34$ . Так как оценка  $\bar{K}_{\Pi}$  определена для выборки из  $N$  элементов ( $N=70$ ), то согласно [7], определим доверительные интервалы действительного среднего  $\bar{K}_{\Pi}$  для заданных вероятностей в виде

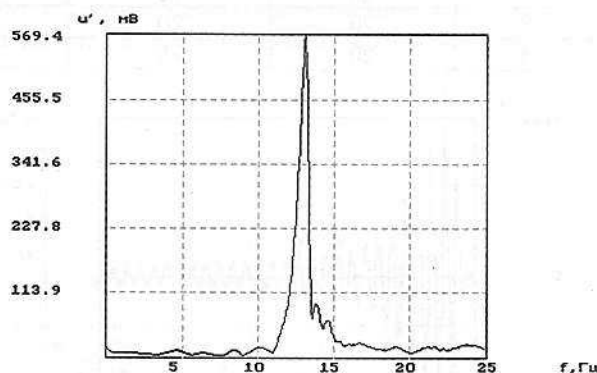
$$\bar{K}_{\Pi} = \hat{K}_{\Pi} \pm \gamma \cdot (s_K / \sqrt{N}), \quad (9)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, значения которого являются табличными данными для заданных вероятностей:  $\gamma=1,645$  для  $p=0,9$ ;  $\gamma=2,0$  для  $p=0,955$ ;  $\gamma=3,0$  для  $p=0,997$ .

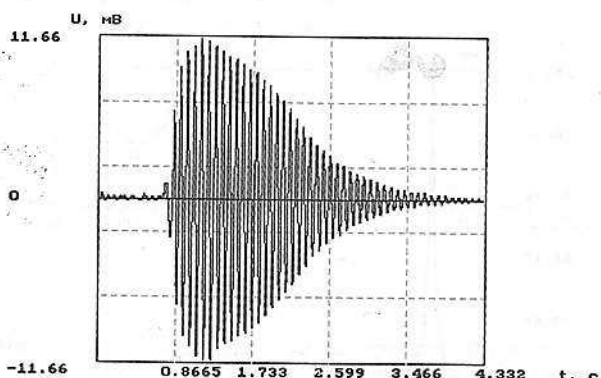
Обработка экспериментальных данных, в соответствии с рассмотренным выше, показала, что для заданных вероятностей среднее значение  $\bar{K}_{\Pi}$  лежит в пределах:  $\bar{K}_{\Pi} = 19,4 \pm 0,066 \text{ В/м/с}$  для вероятности 0,9;  $\bar{K}_{\Pi} =$



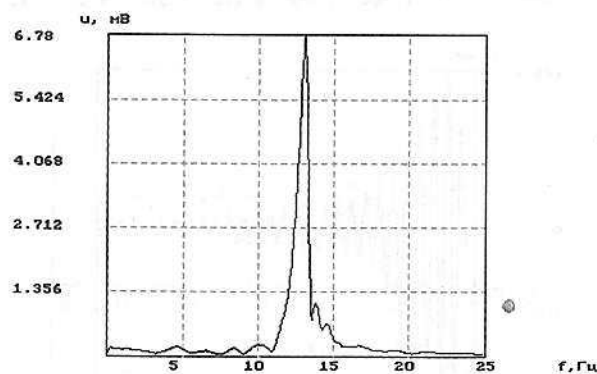
а



б



в



г

Рис. 3. Результаты обработки сигнала скорости колебаний, регистрируемого датчиком №1: а, б – соответственно, сигнал скорости колебаний и его спектр; в, г – соответственно, сигнал смещения и его спектр. Частота колебаний балки 13,13 Гц

$19,4 \pm 0,08$  В/м/с для вероятности 0,955;  $\bar{K}_{\Pi} = 19,4 \pm 0,12$  В/м/с для вероятности 0,997. Доверительный интервал, в котором находится значение коэффициента преобразования  $\bar{K}_{\Pi}$  для заданных вероятностей, определим в виде  $K_{\Pi} = \bar{K}_{\Pi} \pm \gamma \cdot s_K$ . Тогда получим  $K_{\Pi} = 19,4 \pm 0,63$  В/м/с для вероятности 0,9;  $K_{\Pi} = 19,4 \pm 0,64$  В/м/с для вероятности 0,955;  $K_{\Pi} = 19,4 \pm 1,14$  В/м/с для вероятности 0,997 или, соответственно, в процентном отношении –  $\pm 3,24\%$ ,  $\pm 3,3\%$ ,  $\pm 5,9\%$ .

Аналогичные исследования были проведены для датчиков №2, №3 и №4. При этом было определено, что значения  $K_{\Pi}$  так же описываются нормальным законом распределения со значениями оценок среднего и стандартного отклонения, соответственно: для датчика №2 –  $\bar{K}_{\Pi} = 19,5$  и  $s_K = 0,24$ ; для датчика №3 –  $\bar{K}_{\Pi} = 19,3$  и  $s_K = 0,31$ ; для датчика №4 –  $\bar{K}_{\Pi} = 19,7$  и  $s_K = 0,37$ . Результаты расчетов значений коэффициента преобразования с учетом среднего и стандартного отклонения для данных датчиков приведены в табл. 1. Разброс по значению  $K_{\Pi}$  в

процентном отношении для вероятностей 0,9, 0,955 и 0,977, соответственно, составляет: датчик №2 –  $\pm 2,3\%$ ,  $\pm 2,8\%$ ,  $\pm 4,2\%$ ; датчик №3 –  $\pm 2,95\%$ ,  $\pm 3,6\%$ ,  $\pm 5,4\%$ ; датчик №4 –  $\pm 2,74\%$ ,  $\pm 3,3\%$ ,  $\pm 4,98\%$ .

Таким образом, по результатам проведенных исследований определены значения коэффициентов преобразования датчиков и их доверительные границы для различных значений вероятности на частоте выше резонансной (нижней граничной) частоты датчиков, которая, согласно паспортным данным [5], составляет 10 Гц.

Для определения достоверности полученных результатов дальнейшие исследования осуществляли с изменением частоты колебаний балки, которое достигалось за счет изменения длины участка жесткого ее крепления (рис. 1). При этом проводилось измерение смещений балки, как для эталонного, так и калибруемого датчика с последующей их статистической обработкой. Типичный результат регистрации и обработки сигнала скорости колебаний с использованием датчика №1 приведен на рис. 4. На рис. 4, а, б показан сигнал скорости колебаний и его спектр, а на рис. 4, в, г –

Таблица 1

Определение действительного значения коэффициентов преобразования индукционных датчиков скорости

№ датчика	$K_{\Pi}$ , В/м/с	Количество измерений, N	$K_{\Pi}$ , В/м/с для вероятностей		
			0,9	0,955	0,997
1	20	70	$19,4 \pm 0,63$	$19,4 \pm 0,64$	$19,4 \pm 1,14$
2	20	70	$19,5 \pm 0,45$	$19,5 \pm 0,54$	$19,5 \pm 0,81$
3	20	70	$19,3 \pm 0,57$	$19,3 \pm 0,69$	$19,3 \pm 1,04$
4	20	70	$19,7 \pm 0,54$	$19,7 \pm 0,65$	$19,7 \pm 0,98$

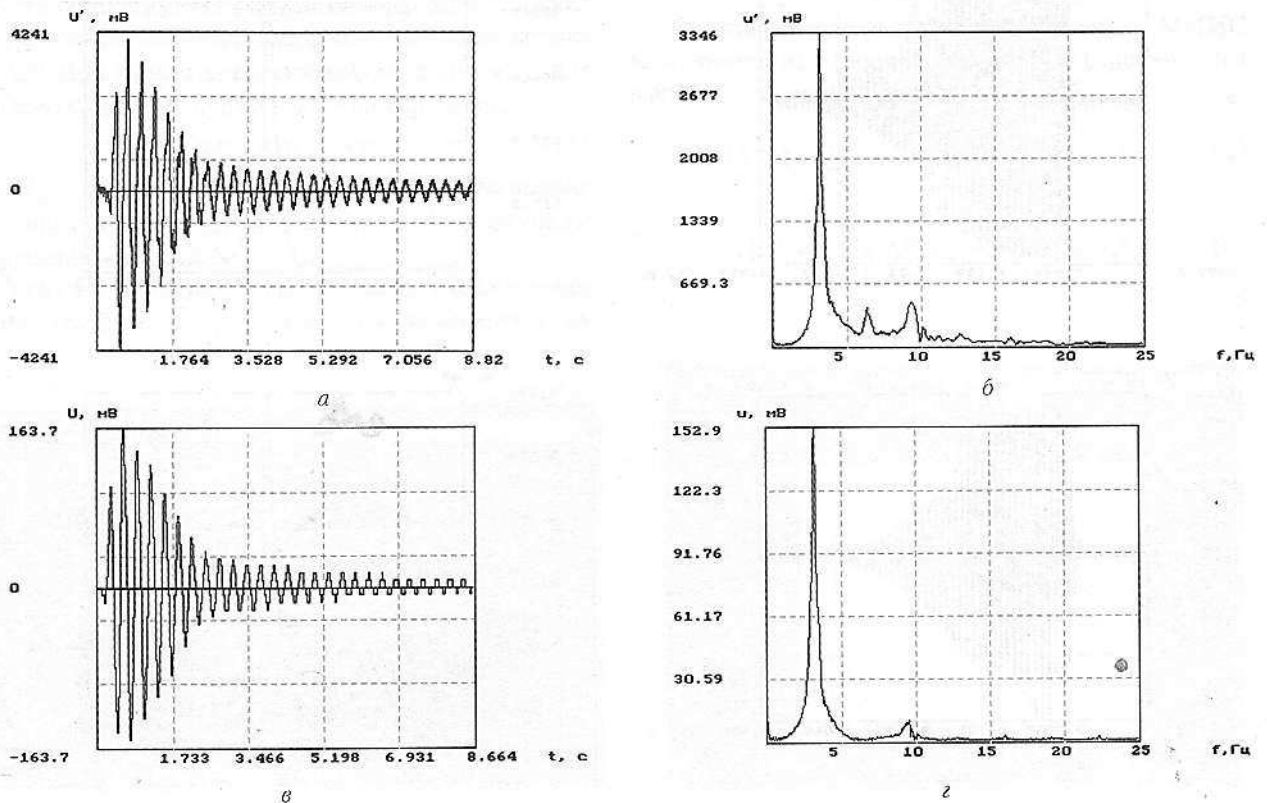


Рис. 4. Результаты обработки сигнала скорости колебаний, регистрируемого датчиком №1: а, б – соответственно, сигнал скорости колебаний и его спектр; в, г – соответственно, сигнал смещения и его спектр. Частота колебаний балки 3,2 Гц

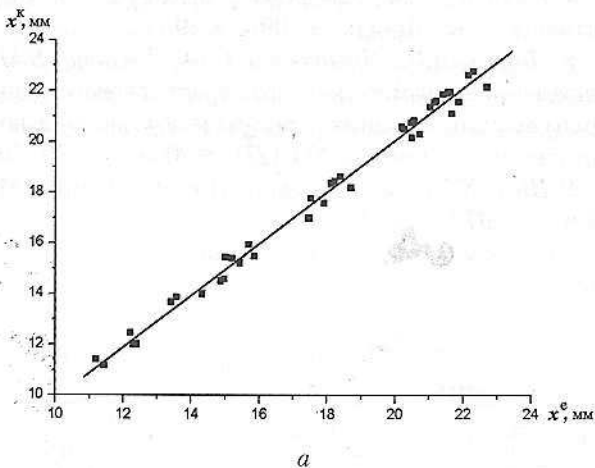
сигнал смещения, полученный после преобразования сигнала скорости в сигнал смещения, и его спектр. Частота регистрируемых колебаний балки составляла  $f_p = 3,2 \text{ Гц} \pm 2\%$ . На данных частотах (ниже резонансной частоты датчика) при определении смещений использовался алгоритм корректировки коэффициента преобразования, с учетом его частотной зависимости [6].

Сравнение результатов проведенных измерений осуществлялось с использованием графических методов анализа экспериментальных данных [9], представленных в виде зависимостей, построенных в координатах  $x^e - x^k$ , где  $x^e, x^k$  – соответственно, смещения измеренные эталонным и калибруемым датчиками. При идеальном совпадении значений смещений, определяемых обоими датчиками, зависимость  $x^k = f(x^e)$  должна носить линейный характер с углом наклона  $45^\circ$  к оси  $X$  и выходить из начала координат. Однако при наличии ошибок измерений анализ полученных зависимостей позволяет провести их аппроксимацию с определением дисперсии (разброса данных) с заданной вероятностью.

На рис. 5 приведен типичный результат обработки данных по результатам измерений смещений эталонным датчиком и калибруемым датчиком №1. На рис. 5, а показана зависимость измерения смещений в координатах  $x^e - x^k$ , на рис. 5, б, в – соответственно, зависимость абсолютной и относительной ошибки измерения смещений для калибруемого датчика в координатах  $x^e - \Delta x_{(1,2)}^k$ , значение которой определяется в виде

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

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



В первом случае ошибка определяется в мм, а во втором – в %. Анализ зависимости приведенной на рис. 5, а показал, что она хорошо описывается выражением вида

$$x^k = A + Bx^e, \quad (10)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения, значения которых равны:

$A = -0,332$  и  $B = 1,021$ . При этом дисперсия для вероятности  $p=0,99512$  составляет  $\sigma^2 = 0,361$ . Анализ зависимостей приведенных на рис. 5, б, в показывает, что относительная ошибка определения смещений калибруемым датчиком не превышает  $\Delta x_{2\max}^k = \pm 3,1\%$ .

Аналогичные результаты получены и для датчиков №2, №3 и №4. При этом экспериментальные зависимости в координатах  $x^e - x^k$  для каждого датчика так же описываются выражением (10). Данные обработки результатов исследований для датчиков №2, №3 и №4 приведены в табл. 2.

Из полученных данных видно, что результаты измерения смещений в заданном диапазоне значений хорошо описываются линейными функциями с достаточно низкой величиной дисперсии, что свидетельствует о высокой достоверности определения коэффициента преобразования для исследованных датчиков. При этом относительная ошибка измерений не превышает  $\pm 5,0\%$ , что является приемлемым при проведении исследований динамических характеристик крупногабаритных конструкций. Следует отметить, что результаты приведенные в табл. 2 получены на частотах ниже резонансной частоты датчика, когда

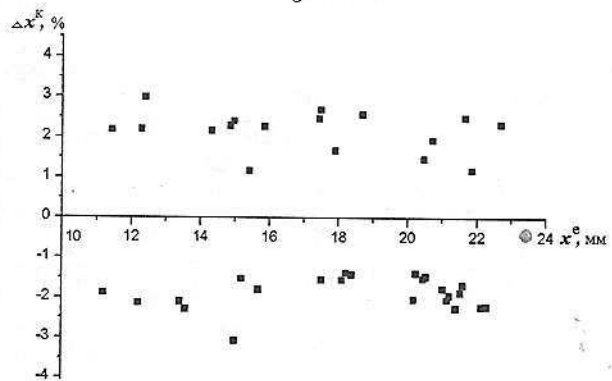
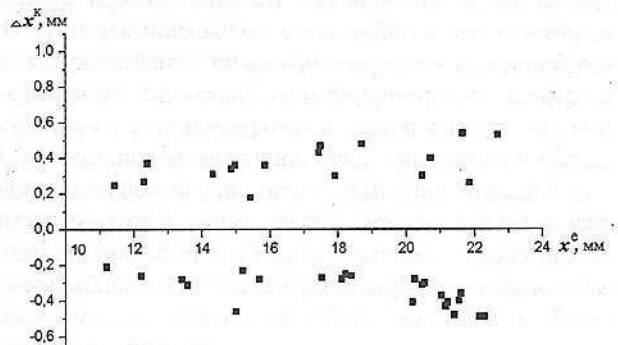


Рис. 5. Результаты обработки экспериментальных данных при измерении смещений эталонным и калибруемым датчиком: а – зависимость смещений в координатах  $x^e - x^k$  (эталонный – калибруемый датчики); б, в – соответственно, зависимости абсолютной и относительной ошибки измерения смещений калибруемым датчиком

Сводные данные результатов исследований для датчиков №1, №2, №3 и №4

№ датчика	$A$	$B$	$p$	$\sigma^2$	$\Delta x_{2\max}^k$
1	-0,332	1,021	0,99512	0,361	$\pm 3,1$
2	0,275	0,995	0,99741	0,286	$\pm 4,1$
3	-0,222	0,995	0,99706	0,331	$\pm 5,0$
4	-0,165	1,021	0,99739	0,285	$\pm 3,9$

используется частотная корректировка их коэффициента преобразования. Это так же свидетельствует о высокой достоверности разработанного алгоритма корректировки, рассмотренного в работе [6].

#### Заключение

Таким образом, в результате исследований разработана методика определения коэффициента преобразования датчиков скорости колебаний, которая базируется на сравнении результатов анализа колебаний, регистрируемых эталонным и калибруемым датчиком. При этом коэффициент преобразования определяется на частотах выше резонансной частоты калибруемого датчика, т.е. на линейном участке преобразования. Статистическая обработка экспериментальных данных для исследуемых датчиков позволила определить значения коэффициентов преобразования и их доверительные границы для различных значений вероятности. Полученные результаты показали высокую стабильность работы калибруемых датчиков. Достоверность полученных результатов проверялась при измерении смещений балки с уменьшением частоты ее колебаний, с учетом корректировки частотной зависимости коэффициента преобразования. Обработка экспериментальных данных показала, что результаты измерения смещений в заданном диапазоне значений описываются линейными функциями с достаточно низкой величиной дисперсии, что свидетельствует о высокой достоверности определения коэффициента преобразования для исследованных датчиков. При этом относительная ошибка измерений не превышает  $\pm 5,0\%$ , что является приемлемым при проведении исследований динамических характеристик крупногабаритных конструкций.

#### Литература

1. *Барашиков А.Я., Мальшиев А.М.* Оценка технического состояния строительных конструкций, зданий и сооружений. – К.: НМЦ Держнаглядохоронпраці України. – 1998. – 232 с.
2. *Луцко Й.Й., Коваль П.М., Дем'ян М.Л.* Методи дослідження та випробувань будівельних матеріалів і конструкцій. – Львів: Каменяр. – 2001. – 436 с.
3. *Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М.* Моделирование динамических характеристик крупногабаритных конструкций //Технологические системы. – №2. – 2004. – С. 31–36.
4. *Babak V.P., Filonenko S.F., Kalita V.M., Kornienko-Miftakhova I.K.* Research of Bridge Structure Vibration Characteristics //Вісник НАУ. – №2. – 2005. – С. 5–10.
5. *ГОСТ 28134-89Е.* Сейсмоприемники электродинамические. Типы, основные параметры и технические требования. – М.: Из-во стандартов. – 1989. – 5 с.
6. *Филоненко С.Ф., Корниенко-Мифтахова И.К.* Информационно-измерительная система для анализа характеристик динамического поведения конструкций // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – №1. – 2006. – С. 75–83.
7. *Бабак В.П., Хандецкий В.С., Шрюфер Е.* Обробка сигналів. – К.: Либідь. – 1999. – 496 с.
8. *Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М.* Определение динамических характеристик конструкций по анализу скорости низкочастотных колебаний //Технологические системы. – №1 (27). – 2005. – С. 35–40.
9. *Шенк Х.* Теория инженерного эксперимента. – М: Мир. – 1972. – 381 с.