

Совершенствование и перспективы применения методов калибровки оптоэлектронного сенсора виброперемещений

Л. А. Варжицкий¹, Н. В. Чертыковцева², Е. М. Тарасов²

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Российская Федерация, e-mail: lavarj1950@gmail.com

²Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация, e-mail: chertykovtseva@samgups.ru, tarasov53em@yandex.ru

Рассмотрены бесконтактные средства измерений параметров колебаний различных изделий. Выполнено сравнение характеристик бесконтактных сенсоров для измерения перемещений, деформаций и параметров вибрации, принципы работы которых имеют разную физическую природу. В рамках модели диффузно-зеркального отражения обоснована эффективность использования оптрона для разработки бесконтактных сенсоров виброперемещений. Сформулированы актуальные задачи исследования и разработки сенсоров, использующих отражённое от поверхности контролируемого объекта ближнее инфракрасное излучение. Предложена методика исследования, основанная на современных алгоритмах и средствах цифровой обработки вибросигналов. Рассмотрены трудности исследования метрологических характеристик сенсоров в широком динамическом и частотном диапазонах с помощью электродинамических вибростендов. Приведены результаты натурного исследования основных метрологических характеристик опытного образца оптоэлектронного сенсора, обеспечивающего измерение перемещений с амплитудой до 5 мм в частотном диапазоне 0–3000 Гц. Приведены результаты анализа амплитудно-частотной характеристики сенсора в диапазоне 5–3000 Гц, полученные с помощью двух дисков, изготовленных на 3D-принтере. Приведены преимущества и недостатки бесконтактных сенсоров на основе оптрона инфракрасного излучения.

Ключевые слова: сенсор, виброперемещение, оптрон, погрешность, нелинейность, калибровка.

Введение. Актуальность развития методов и бесконтактных средств измерений (СИ) виброперемещения, деформации, амплитуды биений валов обусловлена потребностями современных испытательных центров и промышленных предприятий в надёжных и достаточно точных приборах, работающих в широких частотных и амплитудных диапазонах. Спектр применений таких СИ охватывает измерения геометрии деталей, параметров колебаний малогабаритных изделий, на которых не допускается крепление датчиков, а также контроль радиальных биений роторов энергетических установок. В этих случаях, как правило, невозможно использовать контактные методы.

В настоящее время доступны бесконтактные сенсоры и приборы на основе токовихревого эффекта, лазерного и сверхвысокочастотного излучений, разнообразных оптических явлений, включая волновые и дисперсионные (конфокальные). Известны примеры успешного применения ёмкостных, ультразвуковых и магнитных сенсоров. Анализ номенклатуры бесконтактных сенсоров позволил выявить более 180 моделей, производимых 38 фирмами (например, Micro-Epsilon, Omron, Balluff, IFM, Sick и др.). Обычно стои-

мость и сложность эксплуатации таких сенсоров и систем на их основе оказываются чрезмерными, а дополнительное электронное оборудование и специализированное программное обеспечение – избыточными.

Среди указанных выше приборов существуют незначительная по численности группа оптоэлектронных приборов инфракрасного (ИК) диапазона – оптрона. Работа этих приборов с открытым оптическим каналом основана на зависимости параметров отражённого ИК-излучения от расстояния до контролируемого изделия, его положения в пространстве или размеров.

Модель диффузно-зеркального отражения. Теоретические основы процессов отражения, включая случаи смешанного (диффузно-зеркального) отражения, сформулированы в исследованиях основоположника фотометрии Ламберта [1] в 1760 г. – почти за два столетия до создания оптрона. Обзоры наиболее значимых результатов в этой области приведены в работах [2–4]. Характер диффузно-зеркального отражения ИК-излучения при взаимодействии с поверхностями реальных изделий и образцов различных материалов является сложным и трудно поддаётся теоретическому анализу.

Условная граница между зеркальным и диффузным отражением электромагнитного поля обычно задаётся критерием Рэлея [5]:

$$R_z \leq \lambda / (16 \cos \theta), \quad (1)$$

где R_z – высота неровности; λ – длина волны электромагнитного излучения; θ – угол падения электромагнитной волны на поверхность тела.

В соответствии с формулой (1) увеличение шероховатости поверхности при фиксированных значениях λ , θ приводит к смещению характера отражения в сторону диффузного. При увеличении длины волны λ или угла падения θ увеличивается предельное значение A_z шероховатости. Так, для ИК-излучения при $\lambda = 900$ нм и углах падения $\theta = 0 \dots 20^\circ$ предельное значение шероховатости для формирования зеркального отражения $A_z < 60$ нм, а при $\theta = 55^\circ$ предельное значение $A_z = 100$ нм. Типичные значения шероховатости большинства деталей после хонингования или притирки (12 и 13 классы шероховатости), поверхностей полимерных плёнок и даже фольги (например, алюминиевой фольги марки Alloy 1199) составляет более 100 нм [6]. Поэтому в большинстве случаев применения ИК-сенсоров наблюдается значительная доля диффузного отражения, подчиняющегося закону Ламберта [1]:

$$J_\varphi = J_0 \cos \varphi, \quad (2)$$

где J_φ – сила излучения по направлению под углом φ к излучающей поверхности; J_0 – сила излучения в направлении нормали к излучающей поверхности; φ – угол между нормалью к поверхности и направлением отражённого излучения.

Из соотношения (2) следует, что при $\varphi = \pm 10^\circ$ сила отражённого излучения будет изменяться в пределах $\pm 1,5 \%$, что приемлемо для многих технических измерений.

Индикатрису – зависимость силы излучения от углового положения приёмника – в виде соотношения (2) продолжают использовать для моделирования диффузного отражения, однако для реальных объектов разрабатывают более совершенные модели, учитывающие взаимосвязь между зеркальной и диффузной составляющими [3, 4]. В целом диффузное отражение обеспечивает уменьшение требований к точности установки ИК-сенсоров по угловому положению и инвариантность к материалу детали и её шероховатости. Это позволяет обойтись без специальных отражателей и избежать выполнения операций по точной установке сенсора на контролируемом изделии.

Несмотря на 60-летнюю историю развития, область применения оптронов с открытым каналом в основном ограничена использованием в световых барьерах, детекторах преград, энкодерах или в устройствах для подсчёта изделий. Известны примеры успешного использования ближнего ИК-излучения (NIR) для удержания роботизированных транспортных средств на заданной траектории [7], обнаружения препятствий в угольных шахтах [8], решения задач спектроскопии в технике и медицине [9, 10]. Однако отсутствие оборудования для калибровки

ИК-сенсоров в широком частотном и динамическом диапазонах и, как следствие, недостаточная изученность метрологических характеристик являются серьёзными препятствиями на пути практического использования данных приборов. Для преодоления этих препятствий необходимо решить следующие задачи:

экспериментально исследовать метрологические характеристики ИК-сенсоров;

линеаризовать характеристику преобразования сенсора;

разработать методику калибровки и установку для калибровки в широком частотном и динамическом диапазонах.

По мнению авторов настоящей статьи, последняя задача является наиболее сложной, так как с помощью вибрационного стенда невозможно откалибровать ИК-сенсор в потенциально доступных для него диапазонах амплитуд и частот. Так, для калибровки сенсора в режиме работы с амплитудой виброперемещения 5 мм и частотой 2 кГц потребуется вибростенд, создающий ускорения более 80000g, что недостижимо для современных стендов. Серийно выпускаемые установки для калибровки бесконтактных сенсоров, рассмотренные ниже, обеспечивают калибровку только в узких частотных и динамических диапазонах.

Цель настоящей работы – развитие бесконтактных средств измерения виброперемещений на основе ИК-сенсоров и методики их калибровки.

Методика исследования основных метрологических характеристик ИК-сенсоров. К основным метрологическим характеристикам ИК-сенсоров в соответствии с требованиями ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» относятся следующие: функция или коэффициент преобразования; нелинейность функции преобразования; амплитудный и частотный диапазоны; амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); характеристики погрешностей СИ.

При определении статической функции преобразования использовали микрометрический стол для задания расстояния между сенсором и отражающей поверхностью. Выходное напряжение сенсора измеряли цифровым вольтметром GDM-78255A (GW INSTEK, Тайвань) с погрешностью измерения постоянного напряжения $\pm(0,012 \% + 5 \text{ ед. счёта})$ и разрешением 0,1 мВ для предела измерения 10 В.

Динамическую функцию преобразования определяли на электродинамическом вибростенде с выталкивающей силой 4 кН при синусоидальном воздействии и амплитудах от 25 мкм до 5 мм.

Сигналы акселерометра AP 98-100 (ГлобалТест, Россия) и ИК-сенсора обрабатывали с помощью контроллера VR9500 (Vibration Research, США) с неопределённостью оценки амплитуд синусоидальных сигналов $\pm 1 \%$ (в частотном диапазоне 10–2000 Гц). Для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения применяли методы статистической обработки данных.

Несмотря на значительные пределы основной погрешности акселерометра ($\pm 15 \%$), в диапазоне амплитуд 0,1–5,0 мм получили коэффициент корреляции сигналов акселерометра и ИК-сенсора $R = 0,990 \text{--} 0,999$. Анализировали выборки сигналов длиной 10000 отсчётов для каждого из 15 использованных режимов работы вибростенда. Основные составляющие погрешности акселерометра – отклонение действительного

Таблица 1

Статическая функция преобразования ИК-сенсора с оптронам TCRT5000

D_1 , мм	U , В	S_1 , мм	S_2 , мм	ΔS , мкм
18,5	3,26	-4,2	-4,035	-165
18,0	3,41	-3,7	-3,634	-66
17,0	3,73	-2,7	-2,781	81
16,0	4,08	-1,7	-1,847	147
15,0	4,46	-0,7	-0,833	133
14,0	4,88	0,3	0,287	13
13,0	5,28	1,3	1,355	-55
12,0	5,64	2,3	2,315	-15
11,0	6,04	3,3	3,382	-82
10,0	6,40	4,3	4,343	-43
9,5	6,55	4,8	4,743	57

значения коэффициента преобразования от номинального значения ($\pm 10\%$) и неравномерность частотной характеристики ($\pm 12,5\%$) были существенно уменьшены путём сужения частотного диапазона и индивидуальной калибровки акселерометра.

АЧХ акселерометра определяли с помощью специально разработанных калибровочных дисков и многофункциональной платы сбора данных NI DAQ PCI-6221 (National Instruments, США). При измерениях амплитуд использовали цифровую систему для анализа узкополосных процессов на основе преобразования Гильберта [11]. Коэффициент гармоник оценивали с помощью анализатора A17U8 (ZetLab, Россия).

Результаты исследования характеристик ИК-сенсора.

С целью оценки потенциальных возможностей ИК-сенсоров для измерения виброперемещений была изучена номенклатура отражательных оптронах основных фирм-производителей оптоэлектронных компонентов (Omron, Vishay, Honeywell, Texas Instruments, Sharp). Из этого ряда для подробного исследования был выбран оптрон TCRT5000 (Vishay, США), наиболее подходящий по характеристикам для решения задач виброметрии. Результаты определения статической функции преобразования сенсора с этим оптрона даны на рис. 1 и в табл. 1, где D_1 – расстояние между сенсором и объектом; U – выходное напряжение сенсора; S_1 – смещение поверхности объекта от базового положения сенсора; S_2 – оценка смещения, вычисленная по уравнению линии регрессии; $\Delta S = S_1 - S_2$ – абсолютная погрешность определения смещения.

В качестве базового положения выбрано расстояние D_0 между поверхностью объекта и основанием сенсора. С учётом рекомендаций производителя оптрона и запаса 2 мм для амплитуды колебаний 5 мм $D_0 = 14,3$ мм. Из рис. 1 следует, что погрешность ΔS достигает минимума в окрестности базового положения, а максимума (по модулю) – на концах диапазона. Это подтверждает корректность выбора базового положения.

Зависимость оценки S_2 от напряжения U в виде уравнения линии регрессии имеет вид

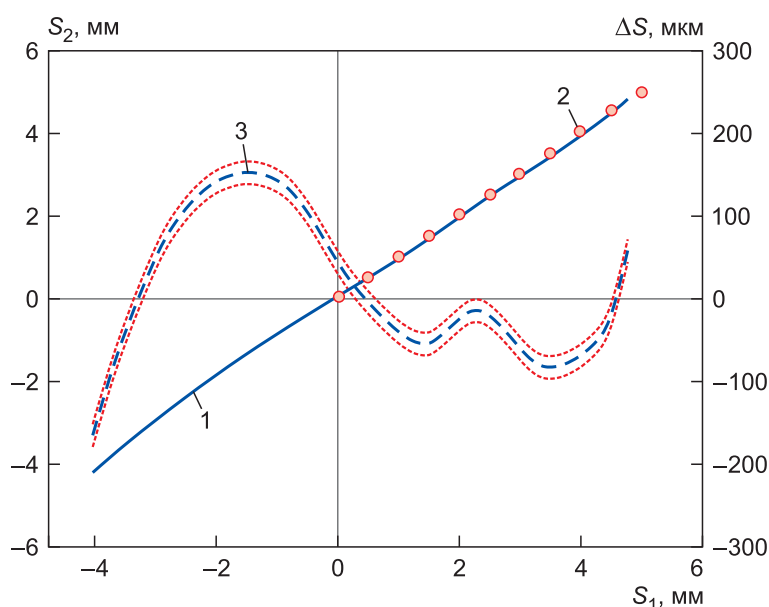


Рис. 1. Функции преобразования ИК- сенсора:

1 – статическая; 2 – амплитудная (динамическая); 3 – абсолютная погрешность (пунктирными линиями показана зона неопределённости, обусловленная инструментальной погрешностью)

Fig. 1. IR sensor conversion functions:

1 – static; 2 – amplitude (dynamic); 3 – absolute error (dotted lines show the zone of uncertainty due to instrumental error)

$$S_2 = -2,667U + 27,030.$$

Чувствительность сенсора составила 0,375 В/мм при использовании отражателя из полимера ПВХ белого цвета. Отражатель из фольги увеличивает чувствительность практически в два раза.

Относительную погрешность δS на концах динамического диапазона, обусловленную нелинейностью характеристики преобразования, вычисляли по формуле

$$\delta S = \frac{|\Delta S_{\max}| + |\Delta S_{\min}|}{S_m} \cdot 100,$$

где $\Delta S_{\max}$, $\Delta S_{\min}$ – абсолютные погрешности смещения на концах диапазона; S_m – модуль максимального смещения.

При $S_m = \pm 4,5$ и $\pm 4,0$ мм получили погрешность $\delta S = 5,0$ и 2,6 % соответственно.

Для определения статической характеристики использовали микрометрический стол с шагом позиционирования 10 мкм и цифровой вольтметр с погрешностью измерения постоянного напряжения $\pm(0,012\% + 5 \text{ ед. счёта})$ и разрешением 0,1 мВ для предела измерения 10 В.

При чувствительности сенсора 0,375 В/мм рассчитали предел инструментальной погрешности измерения (при $U_{\max} = 6,55$ В):

$$\Delta S_{\text{ин}} = (12 \cdot 10^{-5} U_{\max} + 5 \cdot 10^{-4}) / 0,375 + 0,01 \approx 13 \text{ мкм}.$$

Таблица 2

Результаты определения динамической характеристики ИК-сенсора

S_{m1} , мм	S_{m2} , мм	ΔS_m , мкм	δS_m , %
5,000	4,978	-22	-0,44
4,500	4,514	14	0,31
4,000	4,016	16	0,40
3,500	3,493	-7	-0,20
3,000	2,975	-25	-0,83
2,500	2,493	-7	-0,28
2,000	2,001	1	0,05
1,500	1,507	7	0,47
1,000	1,013	13	1,30
0,500	0,509	9	1,80
0,250	0,254	4	1,60
0,125	0,126	1	0,80
0,050	0,050	0	0,00
0,025	0,028	3	12,00

Погрешность $\Delta S_{ин}$ (см. рис. 1, пунктирные линии) отображает зону неопределённости оценки погрешности нелинейности из-за влияния инструментальной погрешности. Таким образом, основная составляющая погрешности ИК-сенсора обусловлена именно нелинейностью характеристики преобразования, а не инструментальными погрешностями.

Для определения амплитудной характеристики провели эксперимент на электродинамическом стенде и сопоставили заданные значения амплитуд виброперемещения стола с измеренными ИК-сенсором. Измерения выполняли для амплитуд виброперемещения в диапазоне 0,025–5,000 мм при частоте возбуждения 23–32 Гц. Оценка амплитуды S_{m2} вычислялась по среднему квадратическому значению сигнала для выборки 8000 точек для каждого режима работы стенда. Результаты определения динамической характеристики сенсора (см. рис. 1, кривая 2) приведены в табл. 2

В диапазоне амплитуд 1,0–5,0 мм разность оценок перемещения, полученных с использованием акселерометра и ИК-сенсора, не превышала 1,3 %, однако при амплитудах менее 1 мм эта разность увеличивалась до 12 %, при этом сохранялось невысокое абсолютное значение (3–9 мкм). Как следует из рис. 1, статическая и динамическая функции сенсора практически совпадают. Это позволяет проводить периодическую калибровку сенсора в статическом режиме, например с помощью пластин, калиброванных по толщине. Необходимость периодической калибровки возникает при замене отражателя, изменении положения сенсора или после его замены.

Осциллограммы сигналов акселерометра и ИК-сенсора для амплитуды виброперемещения 5 мм показаны на рис. 2. Разность фаз ускорения a (g – ускорение свободного падения) и виброперемещения s закономерно равна π .

В соответствии ГОСТ Р 8.669-2009 «Виброметры. Методика поверки» нелинейность амплитудной характеристики

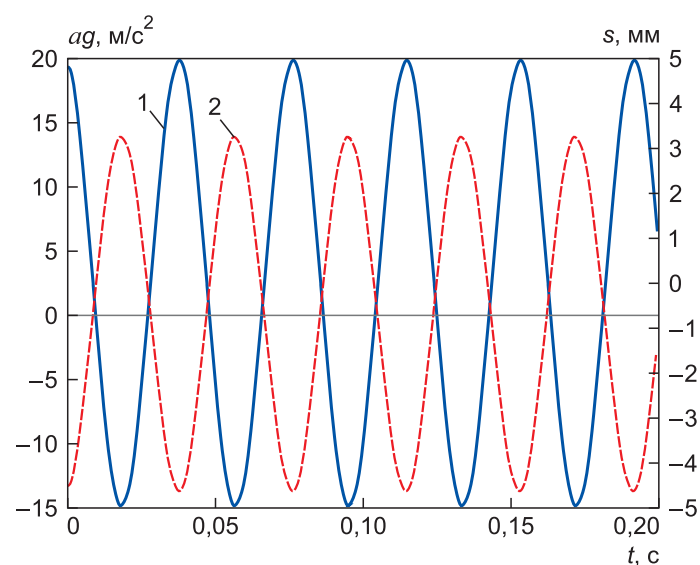


Рис. 2. Осциллограммы виброперемещения (1) и виброускорения (2)

Fig. 2. Waveforms of vibration displacement (1) and vibration acceleration (2)

Таблица 3

Нелинейность амплитудной характеристики и корреляция с виброускорением

i	S_m , мм	U , В	K_n	δK_n , %	R
1	0,10	0,038	0,38	2,2	0,990
2	0,25	0,110	0,37	-0,5	0,995
3	0,50	0,190	0,38	2,2	0,999
4	1,00	0,380	0,38	2,2	0,999
5	1,50	0,560	0,37	0,4	0,999
6	2,00	0,750	0,38	0,8	0,999
7	2,50	0,930	0,37	0,5	0,999
8	3,00	1,120	0,37	0,4	0,999
9	3,50	1,300	0,37	-0,1	0,999
10	4,00	1,440	0,36	-3,2	0,999
11	4,50	1,610	0,36	-3,8	0,999
12	5,00	1,790	0,36	-3,5	0,999

δK_n определяется максимальной нелинейностью:

$$\delta K_n = \max\{\delta K_i\} = \max\{(K_i - \bar{K}_n) / \bar{K}_n\} \cdot 100,$$

где δK_i – i -е значение нелинейности; K_i – коэффициент преобразования для i -й амплитуды колебания; $\bar{K}_n$ – среднее арифметическое значение коэффициентов преобразования для всех использованных амплитуд.

Результаты вычисления значений коэффициентов преобразования представлены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что нелинейность амплитудной характеристики ИК-сенсора в диапазоне амплитуд 0,1–5,0 мм

Таблица 4

Зависимость коэффициентов гармоник от амплитуды виброперемещения

S_{m1} , мм	K_{r1} , %	K_{r2} , %	K_{r3} , %	K_{r4} , %
1,0	1,70	5,0	3,3	2,1
1,5	1,00	6,8	4,0	1,5
2,0	0,90	8,7	5,1	1,5
2,5	0,90	10,4	5,7	1,5
3,0	0,80	11,9	6,4	1,6
3,5	0,94	13,5	7,2	1,7
4,0	1,20	15,1	7,8	1,8
4,5	1,26	16,3	8,1	2,0
5,0	1,92	17,1	8,3	2,2

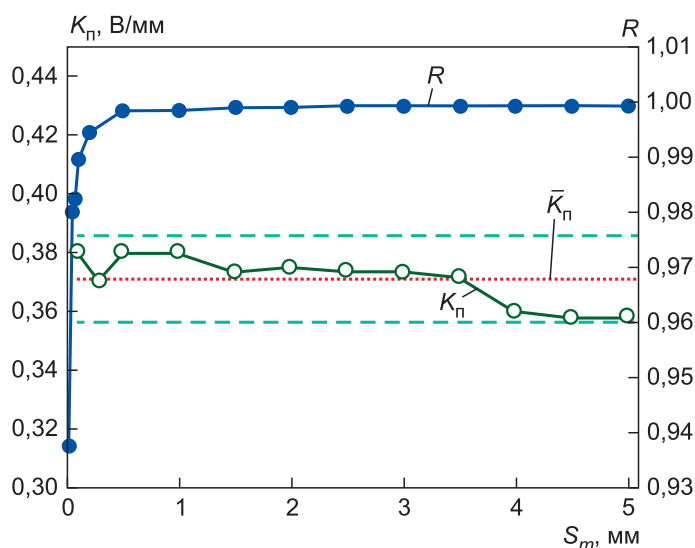


Рис. 3. Динамические характеристики ИК-сенсора – зависимости коэффициентов преобразования K_n и корреляции R от амплитуды виброперемещения S_{m1} ; $\bar{K}_n$ – среднее значение K_n (пунктирными линиями показан диапазон нелинейности $\pm 4\%$)

Fig. 3. Dynamic characteristics of the IR sensor – the dependence of the conversion coefficients K_n and correlation R on the amplitude of vibration displacement S_{m1} ; $\bar{K}_n$ – average value of K_n (dotted lines show the range of nonlinearity $\pm 4\%$)

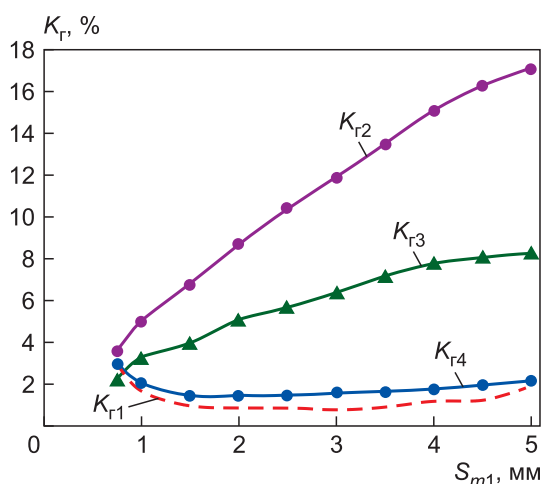


Рис. 4. Зависимость коэффициентов гармоник ИК-сенсора от амплитуды его виброперемещения:

K_{r1} – коэффициент гармоник колебаний стола вибростенда, измеренный по сигналу акселерометра; K_{r2} , K_{r3} , K_{r4} – коэффициенты гармоник колебаний стола вибростенда, измеренные по сигналу ИК-сенсора для трёх схем включения оптрона

Fig. 4. Dependence of the harmonic distortion factor K_r on the vibration displacement amplitude S_{m1} :

K_{r1} – harmonic distortion factor of the shaker board vibration, measured by the accelerometer; K_{r2} , K_{r3} , K_{r4} – harmonic distortion factor, measured by the signal of the IR sensor for three optocoupler switching circuits

не превышает 4 %, при этом максимум нелинейности наблюдается по краям динамического диапазона. Высокие значения коэффициента корреляции R свидетельствуют о тесной линейной связи между ускорением и сигналом ИК-сенсора и об отсутствии фазовых искажений. Среднее значение коэффициента преобразования $\bar{K}_n = 0,371$ В/мм на 1 % отличается от значения K_n , найденного по статической характеристике. Графики зависимости K_n и коэффициента корреляции R от модуля S_{m1} максимального смещения показаны на рис. 3.

В соответствии с ГОСТ ISO 16063-1-2013 «Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Ч. 1. Основные положения» нелинейность функции преобразования можно оценить по коэффициенту гармоник. С этой целью на электродинамическом вибростенде с выталкивающей силой 4 кН и анализаторе А17У8 (ZetLab, Россия) измеряли коэффициент гармоник ИК-сенсора в зависимости от амплитуды колебаний. Частоту колебаний 31 Гц выбирали, чтобы обеспечить минимум нелинейных искажений колебаний стола. Измерения коэффициентов гармоник рабочего стола и сигнала ИК-сенсора выполняли для трёх схем включения оптрона в полосе частот не менее 300 Гц.

Для минимизации нелинейных искажений сигнала ИК-сенсора реализовывали три схемы включения оптрона: схема с фототранзистором, работающим в режиме эмиттерного повторителя;

схема с фототранзистором, подключённым к преобразователю ток–напряжение на одном инвертирующем усилителе, с выхода которого снимается напряжение сенсора;

схема с отрицательной обратной связью, в которой напряжение эмиттерной нагрузки управляет током фотодиода в противофазе с изменением тока фототранзистора.

Нелинейные искажения стола вибростенда (коэффициент гармоник K_{r1}) оценивали по сигналу акселерометра. По сигналу ИК-сенсора определяли искажения для трёх схем включения: с эмиттерной нагрузкой (K_{r2}), преобразователем ток–напряжение (K_{r3}), с отрицательной обратной связью (K_{r4}). Значения амплитуд виброперемещения и коэффициентов гармоник K_r приведены в табл. 4.

Из табл. 4 следует, что минимум нелинейных искажений ($K_{г4} \leq 2,2\%$ в диапазоне амплитуд 1–5 мм) достигается при использовании третьей схемы с отрицательной обратной связью.

При сравнении искажений колебаний стола и ИК-сенсора необходимо учитывать различие физических процессов, приводящих к искажениям колебаний, а также соотношений между амплитудами гармоник в спектрах ускорения и смещения. Поэтому значения K_r акселерометра и ИК-сенсора не могут считаться аддитивными, что затрудняет учёт искажений стола. Графики зависимостей коэффициентов гармоник от амплитуды виброперемещения приведены на рис. 4.

Способ калибровки. Неравномерность АЧХ сенсоров является одной из составляющих их основной погрешности при изменении частоты вибрации. Для сенсоров виброперемещения вопросы оценки неравномерности АЧХ особенно актуальны, так как исследования АЧХ сенсоров на электродинамических стендах при частотах более 70 Гц представляет серьёзные трудности. В ряде случаев расширение частотного диапазона осуществляется за счёт применения специальных стендов с вращающимися дисками. Для периодического изменения расстояния от калибровочной поверхности диска до сенсора ось диска устанавливается под небольшим углом к оси вращения. На этом принципе основаны установки ТКЗ-2 для калибровки вихретоковых проксиметров (BentlyNevada LLC, США), TMS модели 9100D (Modal Shop Inc., США) и ВСВ-133 (ВиКонт, Россия). Установка ВСВ-133 позволяет воспроизводить виброперемещение с амплитудой не более 0,5 мм на частоте не более 80 Гц. Однако коэффициент нелинейных искажений этой установки весьма высок (3 %), что ограничивает возможности её применения. Общими недостатками всех указанных выше установок являются обусловленная угловыми колебаниями плоскости диска методическая погрешность, узкий частотный диапазон и высокая стоимость (более 1 млн руб.).

Однако современные технологии (3D-печать, станки с ЧПУ и электроэрозионная обработка) позволяют изготавливать калибровочные диски с аналитически заданной зависимостью радиуса от угла поворота. Такие диски имеют форму, схожую с зубчатыми колёсами, шестернями, эксцентриками. В процессе калибровки сенсор размещается в плоскости диска с внешней стороны. Частота периодического сигнала сенсора равна произведению числа зубьев на частоту вращения диска. Внешний вид двух таких дисков, изготовленных методом 3D-печати в одной из лабораторий Самарского исследовательского университета, представлен на рис. 5. Диск в форме эллипса предназначен для исследования характеристик сенсоров в низкочастотном диапазоне (0–120 Гц). Диск, имеющий 42 зуба, обеспечивает измерения АЧХ при частотах менее 3 кГц (при частоте вращения вала приводного двигателя 72 Гц).

Результаты измерения неравномерности АЧХ сенсора. На рис. 6 приведена АЧХ сенсора, исследованная с помощью рассмотренных выше 3D-дисков, при амплитуде колебаний 2,75 мм в диапазоне 5–3000 Гц. Неравномерность АЧХ не превышала $\pm 0,4$ дБ в указанном частотном диапазоне. Для уменьшения случайной составляющей погрешности оценки амплитуды сигнала использовали реализации

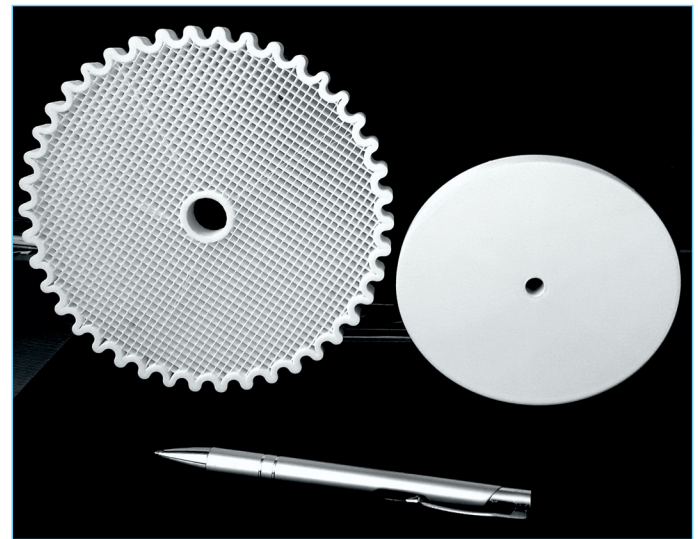


Рис. 5. Внешний вид калибровочных дисков

Fig. 5. Calibration discs appearance

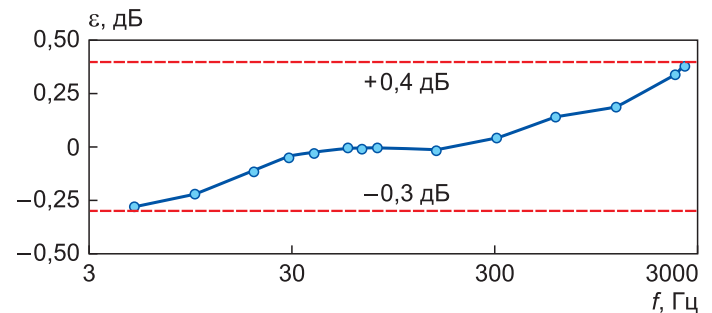


Рис. 6. Неравномерность АЧХ ИК-сенсора

Fig. 6. Irregularity ε of the frequency response of the IR sensor

сигнала по 120000 отсчётов на каждой частоте вращения диска с последующей цифровой обработкой [11].

Заключение. При бесконтактных измерениях виброперемещений авторы настоящей статьи рекомендуют применять ИК-сенсоры. К недостаткам ИК-сенсоров следует отнести уменьшение чувствительности при работе в условиях повышенной влажности и запылённости, а также относительно высокое (3 %) значение коэффициента гармоник. Безусловными преимуществами ИК-сенсоров по сравнению с лазерными, конфокальными и вихретоковыми датчиками являются инвариантность к материалу деталей и образцов, предельно низкие стоимость и размеры, а также возможность использования во взрывоопасных средах из-за малых (до 20 мА) токов потребления. Имеющийся опыт успешного применения рассмотренного ИК-сенсора в составе испытательного стенда для усталостных испытаний титановых сплавов свидетельствует о его высокой надёжности и пригодности для решения задач автоматизированного управления стендом и мониторинга испытаний.

Список литературы

1. Lambert J. H., *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, Augsburg, Eberhard Klett, 1760.
2. Кошелев Е. М., Бородин В. П., Замбрицкий А. П., Пузанов А. А. Диффузное отражение света от шероховатых поверхностей // Вестник МГУ. Сер. Физика, Астрономия. 1976. Т. 18. № 5. С. 25–34.
3. Олейник В. И., Шмаров В. Н. Некоторые вопросы отражения лазерного излучения от шероховатых металлических поверхностей // Системы обработки информации. 2005. Вып. 3 (43).
4. Naplekov D. M., Tur A. V., Yanovsky V. V., *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 87, p. 042901. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-4-55-65>
5. Джон Вильям Стрэтт Рэлей. Теория звука: Пер. с англ. П. Н. Успенского, С. А. Каменецкого / Под общей ред. С. М. Рытова, К. Ф. Теодорчика. М., Л.: Гостехтеоретиздат, 1940–1944.
6. Ладьянов В. И., Старостин С. П., Карбань О. В. и др. Микро- и наноструктура поверхности и катодная ёмкость алюминиевой фольги на последовательных стадиях травления // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18. № 3. С. 421–427.
7. Ming Yang, *Measurement*, 2015, vol. 69, pp. 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.014>
8. Joseph Du Carme, *Advances in Productive, Safe, and Responsible Coal Mining*, 2019, pp. 101–119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101288-8.00003-1>
9. Wen Chin Foo, Effendi Widjaja, Yuet Mei Khong, Rajeev Gokhale, Sui Yung Chan, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2018, vol. 150, pp. 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.11.068>
10. Kaveh Barri, Behnam Jahangiri, Omid Davami, William G. Buttler, Amir H. Alavi, *Measurement*, 2020, vol. 151, p. 107212. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107212>
11. Варжицкий Л. А., Чертыковцева Н. В. Численные и натурные методы исследования погрешностей измерения частотных

характеристик виброизоляторов // Измерительная техника. 2019. № 7. С. 44–48. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-7-44-48>

References

1. Lambert J. H., *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, Augsburg, Eberhard Klett, 1760.
2. Koshelev E. M. et al., *Vestnik MGU. Ser. Fizika, Astronomiya*, 1976, vol. 18, no. 5, pp. 25–34 (in Russian).
3. Oleynik V. I., Shmarov V. N., *Sistemy obrabotki informacii*, 2005, vol. 3 (43) (in Russian).
4. Naplekov D. M., Tur A. V., Yanovsky V. V., *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 87, p. 042901. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-4-55-65>
5. John William Strutt Rayleigh, *The theory of Sound*, London, Macmillan and Co., 1877.
6. Ladianov V. I., Starostin O. V., Karban S. P. et al., *Himicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 421–427 (in Russian).
7. Ming Yang, *Measurement*, 2015, vol. 69, pp. 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.014>
8. Joseph Du Carme, *Advances in Productive, Safe, and Responsible Coal Mining*, 2019, pp. 101–119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101288-8.00003-1>
9. Wen Chin Foo, Effendi Widjaja, Yuet Mei Khong, Rajeev Gokhale, Sui Yung Chan, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2018, vol. 150, pp. 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.11.068>
10. Kaveh Barri, Behnam Jahangiri, Omid Davami, William G. Buttler, Amir H. Alavi, *Measurement*, 2020, vol. 151, p. 107212. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107212>
11. Varzhitskii L. A., Chertykovtseva N. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 7, pp. 622–628. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01669-z>

Дата поступления: 14.05.2020.

Дата принятия: 23.06.2020.

Improvement and possibilities of application of calibration methods for optoelectronic vibration displacement sensor

Leonid A. Varzhitskii¹, Natalia V. Chertykovtseva², Evgenii M. Tarasov²

¹Samara National Research University named after S. P. Korolev, Samara, Russian Federation, e-mail: lavarj1950@gmail.com

²Samara State Transport University, Samara, Russian Federation, e-mail: chertykovtseva@samgups.ru, tarasov53em@yandex.ru

The characteristics of non-contact sensors for measuring displacements, deformations, and vibration parameters using processes of various physical nature are compared. Within the framework of the diffuse-mirror reflection model, the efficiency of using optocouplers for developing non-contact vibration displacement sensors is substantiated. The urgent tasks of research and development of sensors using near infrared radiation reflected from the surface of the controlled object are formulated. The research technique based on modern algorithms and means of digital processing of vibrosignals is given. The difficulties of studying the metrological characteristics of sensors in a wide dynamic and frequency ranges using electrodynamic vibration stands are considered. The results of a full-scale study of the basic metrological characteristics of a prototype optoelectronic sensor providing measurements of displacements with an amplitude of up to 5 mm in the frequency range from 0 to 3 kHz are presented. The results of analysis of the amplitude-frequency characteristics of the sensor in the range from 5 Hz to 3 kHz, obtained using two disks made on a 3D printer, are presented. The advantages and disadvantages of non-contact sensors based on infrared optocouplers are given.

Key words: sensor, vibration displacement, optocoupler, error, nonlinearity, calibration.