

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ
ЗОНДОВ**

Предложена и проверена экспериментально методика измерения перемещения элементов механических систем интерференционным методом с использованием двух зондов. Методика позволяет определять как величину, так и направление перемещения при колебательном движении, сводит к минимуму влияние погрешности установки зондов и обеспечивает достаточную точность измерения перемещения даже в случае, когда размах колебаний в несколько раз превышает длину волны электромагнитного излучения, используемого при измерениях.

Запропоновано та перевірено експериментально методику вимірювання переміщення елементів механічних систем інтерференційним методом з використанням двох зондів. Методика дозволяє визначити як величину, так і напрямок переміщення при коливальному русі, зводить до мінімуму вплив похибки установки зондів і забезпечує достатню точність вимірювання переміщення навіть у випадку, коли розмах коливань у декілька разів перевищує довжину хвилі електромагнітного випромінювання, що використовується при вимірюваннях.

A procedure is proposed and verified by experiments to measure displacement of mechanic systems elements by the interference method using two probes. The procedure makes it possible to determine both the magnitude and the direction of displacement in vibratory motion, minimizes the effect of the interprobe distance error and allows displacement to be measured to good accuracy even if the peak-to-peak amplitude is several times higher than the electromagnetic radiation wavelength used in measurements.

Эффективность разработки новых и эксплуатационной доработки существующих виброзащитных систем может быть значительно повышена, если этот процесс сопровождается на любой его стадии достоверным и надежным контролем и измерением параметров вибрации и относительного движения элементов конструкции. Применение для этих целей измерителей, использующих микроволновые методы, является весьма привлекательным по ряду причин, наиболее весомыми из которых являются их безынерционность и отсутствие механического контакта с контролируемым объектом. Одним из наиболее распространенных микроволновых методов, применяемых для измерения параметров движения, является интерференционный метод [1 – 3]. Однако если не применять специальных мер либо в аппаратной части, либо в части программного обеспечения, диапазон амплитуд перемещений, в котором интерференционный метод применим в его общепринятом виде, ограничен сверху величиной от $\lambda/4$ до $\lambda/2$, где λ – длина волны электромагнитного излучения. Ранее авторами была предложена [4] и апробирована экспериментально [5] методика, позволяющая существенно расширить этот диапазон, исключив неоднозначность определения перемещения движущегося объекта из тригонометрического уравнения, связывающего расстояние между объектом и зондом и измеренный ток детектора. Однако эта методика, позволяя определить величину относительного перемещения объекта, не позволяет определить направление перемещения. В данной работе предлагается методика, позволяющая определять как величину, так и направление относительного перемещения при произвольном соотношении между амплитудой перемещения и длиной электромагнитной волны. Методика основана на использовании двух зондов, отстоящих друг от друга на фиксированном расстоянии.

© О.В. Пилипенко, Н.Б. Горев, М.М. Жечев, Л.Г. Запольский,
П.И. Заболотный, И.Ф. Коджеспилова, Е.Н. Привалов, 2009

Методика измерения относительного перемещения. Как известно, в основе интерференционного метода лежит свойство суперпозиции электромагнитных волн. Благодаря этому в результате зондирования контролируемого объекта электромагнитной волной между излучающим устройством и объектом образуется стоячая волна. С помощью зонда и соединенного с ним детектора регистрируется электрическое поле этой волны, модулированное вибрациями объекта. Для случая квадратичной вольт-амперной характеристики детектора расстояние x между зондом и движущимся объектом связано с током детектора J_{det} следующим образом [4]

$$J_{rel}(t) = A - B \cos[4\pi x(t)/\lambda], \quad (1)$$

$$A = \frac{1 + r^2}{(1 + r)^2}, \quad B = \frac{2r}{(1 + r)^2},$$

$$J_{rel}(t) = \tilde{J}(t)/J_1, \quad \tilde{J}(t) = J_{det}(t) - J_0,$$

$$J_1 = \frac{2J_{max}r}{(1 + r)^2}, \quad J_0 = \frac{J_{max}(1 + r^2)}{(1 + r)^2}, \quad r = \frac{\sqrt{J_{max}/J_{min}} - 1}{\sqrt{J_{max}/J_{min}} + 1},$$

где t – время; $J_{rel}(t)$ – нормированная переменная составляющая тока детектора $J_{det}(t)$; $\tilde{J}(t)$, J_1 – переменная составляющая тока $J_{det}(t)$ и ее амплитуда; J_0 – постоянная составляющая тока $J_{det}(t)$; r – модуль коэффициента отражения; J_{min} , J_{max} – минимальное и максимальное значения тока детектора.

Пусть имеются два зонда 1 и 2, расположенных между излучателем и контролируемым объектом и находящихся на расстоянии $\lambda/8$ друг от друга, причем ближе к объекту расположен зонд 2. Если теперь под x понимать расстояние между контролируемым объектом и зондом 1, то для относительных токов J_{rel1} , J_{rel2} детекторов 1 и 2 будем иметь

$$J_{rel1} = A_1 - B_1 \cos(4\pi x/\lambda), \quad (2)$$

$$J_{rel2} = A_2 - B_2 \sin(4\pi x/\lambda), \quad (3)$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 – значения параметров A и B для детекторов 1 и 2. Дифференцирование (2), (3) по времени позволяет выразить скорость объекта v через производные токов детекторов по времени \dot{J}_{rel1} и \dot{J}_{rel2}

$$v = \frac{\lambda \dot{J}_{rel1}}{4\pi B_1} \cdot \frac{1}{C_2(J_{rel2})}, \quad (4)$$

$$v = -\frac{\lambda \dot{J}_{rel2}}{4\pi B_2} \cdot \frac{1}{C_1(J_{rel1})}, \quad (5)$$

где

$$C_i(J_{rel i}) = (A_i - J_{rel i})/B_i, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Если известна скорость v , то относительное перемещение объекта Δx (относительно его положения в начальный момент времени $t = 0$) определяется интегрированием скорости по времени.

Оценка влияния погрешности установки зондов. Описанная выше методика основана на использовании двух зондов, и поэтому она может вносить в определение параметров движения ошибку, обусловленную погрешностью в установке расстояния между зондами. Найдем влияние этой погрешности на измеряемую скорость. Для этого рассмотрим общий случай.

Пусть расстояние между зондами равно l_d . Тогда из (1) следует, что относительный ток детектора 2 равен

$$J_{rel2} = A_2 - B_2 [\cos \alpha \cos(4\pi x/\lambda) + \sin \alpha \sin(4\pi x/\lambda)], \quad (7)$$

где $\alpha = 4\pi l_d/\lambda$.

Дифференцирование (1) и (7) по времени позволяет получить следующие выражения для скорости v

$$v = \frac{\lambda \dot{J}_{rel1}}{4\pi B_1} \cdot \frac{\sin \alpha}{C_2(J_{rel2}) - C_1(J_{rel1}) \cos \alpha}, \quad (8)$$

$$v = \frac{\lambda \dot{J}_{rel2}}{4\pi B_2} \cdot \frac{\sin \alpha}{C_2(J_{rel2}) \cos \alpha - C_1(J_{rel1})}. \quad (9)$$

Пусть расстояние между зондами установлено с погрешностью Δl_d . Тогда истинная скорость $v(l_d + \Delta l_d)$ будет отличаться от измеренной скорости $v(l_d)$, даваемой формулами (8) и (9), на величину Δv , которую можно оценить как

$$\Delta v = \frac{\partial v}{\partial l_d} \Delta l_d = \frac{4\pi \Delta l_d}{\lambda} \frac{\partial v}{\partial \alpha}. \quad (10)$$

Выше мы получили две формулы для определения скорости v . Выясним теперь, в каком случае следует пользоваться какой из этих формул для минимизации ошибки Δv . Как видно из (10), при фиксированных λ и Δl_d ошибка Δv тем меньше, чем меньше производная $\partial v/\partial \alpha$. Из (8) и (9) для этой производной имеем

$$\frac{\partial v}{\partial \alpha} = \frac{\lambda \dot{J}_{rel1}}{4\pi B_1} \frac{C_2(J_{rel2}) \cos \alpha - C_1(J_{rel1})}{[C_2(J_{rel2}) - C_1(J_{rel1}) \cos \alpha]^2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \alpha} = \frac{\lambda \dot{J}_{rel2}}{4\pi B_2} \frac{C_2(J_{rel2}) - C_1(J_{rel1}) \cos \alpha}{[C_2(J_{rel2}) \cos \alpha - C_1(J_{rel1})]^2}. \quad (12)$$

Вернемся теперь к случаю $l_d = \lambda/8$. Тогда $\alpha = 4\pi l_d/\lambda = \pi/2$ и формулы (8), (9) переходят соответственно в формулы (4), (5), а соответствующие им выражения для $\partial v/\partial \alpha$ (11), (12) принимают вид

$$\frac{\partial v}{\partial \alpha} = -\frac{\lambda \dot{J}_{rel1} C_1(J_{rel1})}{4\pi B_1 C_2^2(J_{rel2})},$$

$$\frac{\partial v}{\partial \alpha} = \frac{\lambda \dot{J}_{rel2} C_2(J_{rel2})}{4\pi B_2 C_1^2(J_{rel1})}.$$

Сравнение с (4), (5) показывает, что формула для скорости (4) дает минимальную ошибку ($\partial v/\partial \alpha = 0$) в случае обращения в ноль знаменателя формулы (5), а формула (5) дает минимальную ошибку в случае обращения в ноль знаменателя формулы (4). Поэтому при малом $C_1(J_{rel1})$ скорость следует определять по формуле (4), а при малом $C_2(J_{rel2})$ – по формуле (5) (из определения $C_1(J_{rel1})$ и $C_2(J_{rel2})$ с учетом (2), (3) вытекает, что эти величины равны $\cos(4\pi x/\lambda)$ и $\sin(4\pi x/\lambda)$ соответственно, и поэтому они не могут стать малыми одновременно).

Алгоритмически это можно реализовать следующим образом: определять скорость по формуле (4) при условии $|C_2(J_{rel2})| > |C_1(J_{rel1})|$ и по формуле (5) в противоположном случае. Заметим, что это позволяет также уменьшить влияние погрешности измерения тока детектора и погрешности вычислений, так как их влияние становится наиболее заметным для малых значений знаменателя и числителя (поскольку скорость конечна, малым значениям знаменателя должны соответствовать и малые значения числителя).

Компенсация погрешности установки зондов. Покажем, что из измеренных токов детекторов можно определить истинное расстояние между зондами, т.е. истинные значения $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$, входящих в формулы (8) и (9), и тем самым значительно уменьшить влияние погрешности установки расстояния между зондами на результаты измерений. Действительно, $\cos \alpha$ можно представить в виде

$$\cos \alpha = \cos(4\pi x/\lambda - \alpha) \cos(4\pi x/\lambda) + \sin(4\pi x/\lambda - \alpha) \sin(4\pi x/\lambda). \quad (13)$$

С учетом (2), (3), (6) имеем

$$\cos(4\pi x/\lambda) = C_1(J_{rel1}), \quad (14)$$

$$\cos(4\pi x/\lambda - \alpha) = C_2(J_{rel2}), \quad (15)$$

$$|\sin(4\pi x/\lambda)| = \sqrt{1 - C_1^2(J_{rel1})}, \quad (16)$$

$$|\sin(4\pi x/\lambda - \alpha)| = \sqrt{1 - C_2^2(J_{rel2})}. \quad (17)$$

Формулы (14) – (17) однозначно определяют входящие в (13) косинусы, но дают только абсолютные величины всходящих туда синусов, т.е. знаки этих синусов не известны. Поэтому построим следующие выражения

$$s_1(t) = C_1(J_{rel1}) C_2(J_{rel2}) + \sqrt{1 - C_1^2(J_{rel1})} \sqrt{1 - C_2^2(J_{rel2})}, \quad (18)$$

$$s_2(t) = C_1(J_{rel1}) C_2(J_{rel2}) - \sqrt{1 - C_1^2(J_{rel1})} \sqrt{1 - C_2^2(J_{rel2})}. \quad (19)$$

Из (13) – (19) следует, что $\cos \alpha$ является нижней границей величины s_1 и верхней границей величины s_2 . Поэтому $\cos \alpha$ можно найти из зависимостей $s_1(t)$ и $s_2(t)$, которые выражаются через измеренные токи детекторов по формулам (18) и (19).

Для иллюстрации на рис. 1 приведены величины $s_1(t)$ (сплошная кривая) и $s_2(t)$ (пунктирная кривая), полученные при моделировании измерения описанной выше методикой относительного перемещения объекта, совершающего гармонические колебания с амплитудой 7,5 см и частотой 3,125 Гц. Входящие в (17) и (18) токи детекторов рассчитывались по формулам (2) и (7) для $r = 1$, $\lambda = 3,725$ см, установочного расстояния между зондами $\lambda/8$ и погрешности установки расстояния $\Delta l_d = -0,155$ см, что соответствует $\cos \alpha = 0,5$. Как видно из рисунка, число 0,5 действительно является нижней границей $s_1(t)$ и верхней границей $s_2(t)$.

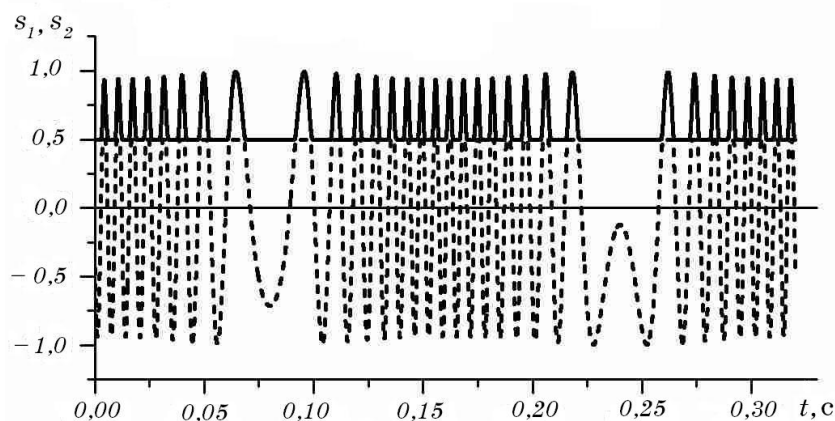


Рис. 1

При известном $\cos \alpha$ для определения $\sin \alpha$ достаточно найти его знак. Если считать, что установочное значение расстояния между детекторами равно $\lambda/8$ и погрешность Δl_d установки расстояния не очень велика, а именно, $|\Delta l_d/\lambda| \leq 1/8$, то из определения величины α следует, что $\sin \alpha \geq 0$.

После же того как $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$ найдены, скорость v можно определить по формулам (8) и (9) по алгоритму, аналогичному описанному выше: при условии $|C_2(J_{rel2}) - C_1(J_{rel1}) \cos \alpha| > |C_2(J_{rel2}) \cos \alpha - C_1(J_{rel1})|$ скорость находится по формуле (8), а в противоположном случае – по формуле (9).

Экспериментальная проверка методики. Описанная выше двухзондовая методика измерения протестирована экспериментально в задаче определения относительного перемещения отражательной поверхности по измеренному току детекторов. Отражательная поверхность (металлический диск) с помощью кривошипно-шатунного механизма приводилась в возвратно-поступательное движение соосно направлению распространения зондирующей волны.

щей электромагнитной волны. Используемый при измерениях лабораторный стенд описан в работе [5]. Измерения проводились при длине волны электромагнитного излучения в волноводной линии $\lambda_{wg} = 3,725$ см, что соответствовало длине волны в свободном пространстве $\lambda_0 = \lambda_{wg} / \sqrt{1 + (\lambda_{wg}/2W)^2} = 2,90$ см, где $W = 2,3$ см – ширина широкой стенки волноводной линии. Размах колебаний диска составлял 15,0 см, т.е. превышал длину волны электромагнитного излучения более чем в пять раз. Установочное расстояние между зондами было равно $\lambda_{wg}/8$.

Временная зависимость относительного перемещения диска Δx , полученная из измеренных токов детекторов для расстояния между зондами $\lambda_{wg}/8$ ($\cos \alpha = 0$, $\sin \alpha = 1$) с использованием формул (4) и (5), приведена на рис. 2 (сплошная кривая). Найденный из графика размах измеренной величины Δx составляет около 15,7 см при истинном размахе 15,0 см, т.е. относительная погрешность определения размаха относительного перемещения составляет около 4,7%.

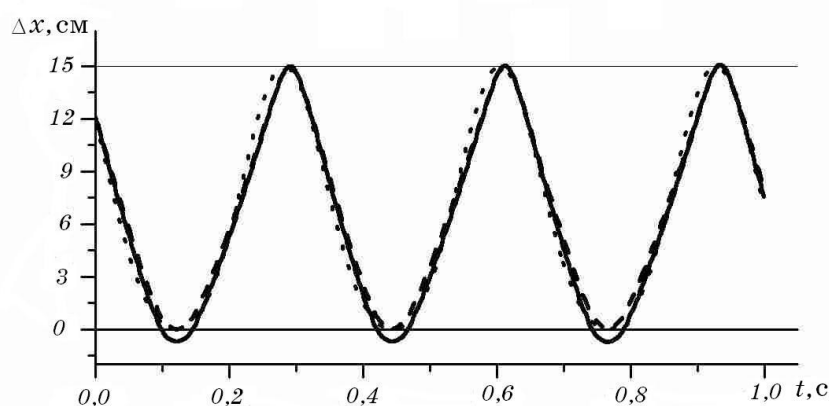


Рис. 2

Для повышения точности определения относительного перемещения диска по измеренным токам детекторов были найдены истинные значения $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$. На рис. 3 приведены зависимости $s_1(t)$ (сплошная кривая) и $s_2(t)$ (пунктирная кривая), полученные из измеренных токов детекторов. Из рис. 3 видно, что в соответствии с изложенным выше $\cos \alpha$ можно оценить как 0,5, и, следовательно, $\sin \alpha = 0,87$. Относительное перемещение диска, найденное для этих значений $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$ с использованием формул (8) и (9), показано на рис. 2 штриховой кривой. Как видно из рис. 2, точность определения размаха теперь намного выше. Ошибка при этом составляет всего 0,9 мм, или 0,6%. Отсюда можно заключить, что основная погрешность в определении относительного перемещения в данном случае обусловлена погрешностью установки расстояния между зондами, причем влияние этой погрешности можно значительно уменьшить путем определения истинного расстояния между зондами по измеренным токам детекторов.

Найденная из рис. 2 частота колебаний диска (частота вращения электродвигателя) составляет 3,11 Гц. Для этой частоты и использованных в эксперименте параметров кривошипно-шатунного механизма было рассчитано

истинное относительное перемещение диска, показанное на рис. 2 пунктирной кривой. Как видно из рис. 2, относительное перемещение диска, найденное по измеренным токам детекторов с учетом погрешности установки расстояния между зондами, находится в хорошем соответствии с истинным относительным перемещением.

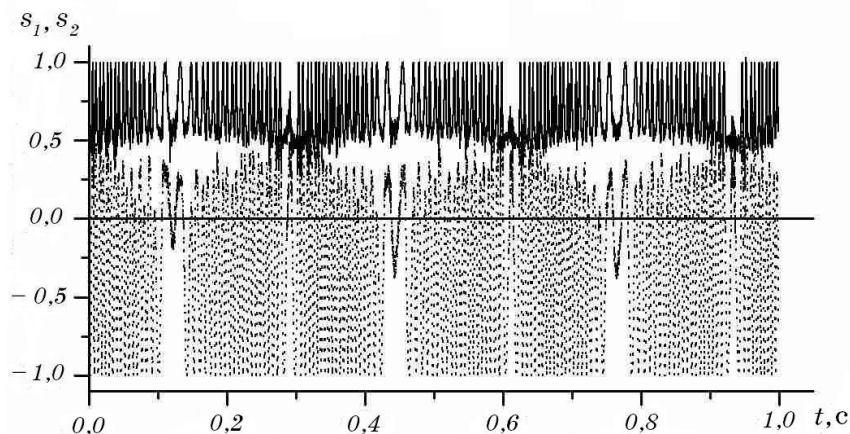


Рис. 3

Выводы. Таким образом, предложенная двухзондовая методика измерения параметров движения механических систем интерференционным методом позволяет определять как величину, так и направление перемещения при колебательном движении, сводит к минимуму влияние погрешности установки зондов и обеспечивает достаточную точность измерения перемещения даже в случае, когда размах колебаний в несколько раз превышает длину волны электромагнитного излучения, используемого при измерениях. Данная методика может быть использована при разработке микроволновых измерителей перемещения для различных классов виброзащитных систем и систем управления технологическими процессами.

1. Викторов В. А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
2. Кемпа Я. М. Микроволновой акселерометр и тахометр / Я. М. Кемпа, С. И. Коба, Н. А. Наумец, Я. Н. Рыбак, В. Л. Сенников // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 12-я Международная конференция, сентябрь, 2002 г., Севастополь. : Материалы конференции.– Севастополь : Вебер, 2002. – С. 565 – 566.
3. Руденко Д. Ф. Радиоволновой измеритель параметров вибраций / Д. Ф. Руденко, А. И. Волковец, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, О. О. Герасименко, А. Б. Дзисяк // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 15-я Международная конференция, сентябрь, 2005 г., Севастополь : Материалы конференции.– Севастополь : Вебер, 2005. – С. 829 – 830.
4. Пилипенко О. В. Моделирование процесса измерения параметров вибрации / О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, Л. Г. Запольский, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов // Техническая механика. – 2003. – № 2. – С. 25 – 32.
5. Пилипенко О. В. Измерение параметров движения интерференционным методом в широком диапазоне амплитуд перемещений / О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, Л. Г. Запольский, П. И. Заболотный, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов // Техническая механика. – 2008. – № 1. – С. 100 – 107.