

**ДВУХЗОНДОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Предложен двухзондовый интерференционный метод измерения как величины, так и направления перемещения элементов механических систем. Дифференцирование токов соединенных с зондами полупроводниковых детекторов позволяет исключить неизвестный коэффициент отражения. Устранение неопределенности в определении перемещения производится без использования промежуточной частоты, что упрощает аппаратную реализацию метода. Экспериментальная проверка показала достаточную точность измерения для перемещений, в несколько раз превышающих длину волны зондирующего электромагнитного излучения.

Запропоновано двозондовий інтерференційний метод вимірювання як величини, так і напрямку переміщення елементів механічних систем. Диференціювання струмів з'єднаних із зондами напівпровідникових детекторів дозволяє виключити невідомий коефіцієнт відбиття. Невизначеність у визначенні переміщення усувається без застосування проміжної частоти, що спрощує апаратну реалізацію методу. Експериментальна перевірка продемонструвала достатню точність вимірювання для переміщень, що в декілька разів перевищують довжину хвилі зондуємого електромагнітного випромінювання.

A two-probe interference method is proposed to measure both the magnitude and the direction of the displacement of mechanical elements. Differentiation of the currents of the semiconductor detectors connected to the probes eliminates the unknown reflectivity. Ambiguity in displacement determination is resolved without recourse to an intermediate frequency thus simplifying the hardware implementation of the method. Experimental verification has demonstrated reasonable measurement accuracy for displacements that are several times as large as the probing electromagnetic wavelength.

Для построения измерителей параметров движения, в частности вибраций весьма привлекательно применение микроволновых методов. Это обусловлено целым рядом причин, наиболее весомыми из которых являются безынерционность и отсутствие механического контакта с испытываемым объектом. Одним из распространенных микроволновых методов, применяемых для измерения параметров движения, является интерференционный метод [1, 2]. В основе этого метода лежит свойство суперпозиции электромагнитных волн, благодаря которому 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. Однако непосредственное определение величины перемещения по току детектора без применения специальных методов обработки сигнала возможно только для перемещений, не превышающих $\lambda/4$, где λ – длина волны электромагнитного излучения. Это связано с тем, что тригонометрическое уравнение, связывающее расстояние между зондом и объектом с током детектора, имеет множество решений. В работах [3, 4] предложен метод, позволяющий существенно расширить диапазон измеряемых перемещений. Для исключения неоднозначности определения перемещения движущегося объекта из тригонометрического уравнения там используется тот факт, что координата и скорость объекта должны быть непрерывными величинами. Однако этот метод, позволяя определить величину относительного перемещения объекта, не позволяет определить направление перемещения. Метод, позволяющий определить как величину, так и направление перемещения, предложен в работе [5]. Он основан на использовании двух зондов, отстоящих друг от друга на расстоянии $\lambda/8$. Однако при этом коэффициент отражения электромагнитной волны от движущегося объекта должен быть определен заранее.

Поскольку коэффициент отражения различен для различных объектов и зависит от состояния поверхности объекта, то его необходимо определять перед каждым измерением. Предварительного определения коэффициента отражения не требуется в методе, предложенном в [6]. В этом методе зондирующий сигнал модулируется сигналом промежуточной частоты, длина волны которого значительно больше длины волны зондирующего сигнала. Отраженный от объекта модулированный сигнал смешивается с немодулированным опорным сигналом, выделяются квадратурные сигналы промежуточной частоты, образовавшиеся в результате этого смешения, и по этим квадратурным сигналам определяется расстояние до объекта. Поскольку длина волны сигнала промежуточной частоты намного превышает длину волны зондирующего сигнала, то расстояние определяется однозначно. Однако вследствие использования промежуточной частоты аппаратная реализация этого метода является достаточно сложной и требует таких приборов, как фазовый манипулятор для модуляции зондирующего сигнала сигналом промежуточной частоты; цифро-аналоговый преобразователь, модулирующий сигнал промежуточной частоты; балансный смеситель, в котором осуществляется интерференция модулированного отраженного сигнала с немодулированным опорным сигналом и на выходе которого выделяются квадратурные сигналы промежуточной частоты.

Целью данной работы является разработка метода измерения, позволяющего определить как величину, так и направление относительного перемещения для случая произвольного соотношения между амплитудой перемещения и длиной волны электромагнитного излучения при неизвестном коэффициенте отражения без использования промежуточной частоты. Как будет показано ниже, эта цель может быть достигнута при проведении зондовых измерений напряженности электрического поля в двух пространственно разделенных точках с использованием дифференцирования токов детекторов для исключения неизвестного коэффициента отражения.

Пусть мы имеем два зонда 1 и 2, расположенных между излучателем и контролируемым объектом и отстоящих друг от друга на расстоянии $\lambda/8$, причем ближе к объекту расположен зонд 2. Если через x обозначить расстояние между контролируемым объектом и зондом 1, то для токов J_1, J_2 детекторов 1 и 2, соединенных с соответствующими зондами, в предположении квадратичности их вольт-амперных характеристик будем иметь

$$J_1 = B_1 - C_1 \cos \frac{4\pi x}{\lambda}, \quad (1)$$

$$J_2 = B_2 - C_2 \sin \frac{4\pi x}{\lambda}. \quad (2)$$

Коэффициенты B_1, C_1 и B_2, C_2 следующим образом выражаются через модуль коэффициента отражения r

$$B_{1,2} = J_{10,20} (1 + r^2), \quad C_{1,2} = 2rJ_{10,20}, \quad (3)$$

где J_{10}, J_{20} — токи детекторов 1 и 2 в режиме согласованной нагрузки ($r = 0$).

Задача заключается в том, чтобы найти зависимость x от времени t по измеренным зависимостям $J_1(t), J_2(t)$, считая r неизвестным. Поскольку нас интересует относительное перемещение, то для этого достаточно найти скорость перемещения \dot{x} (здесь и далее точка будет означать дифференцирование по времени) и затем получить относительное перемещение интегрированием скорости. Скорость же может быть найдена дифференцированием токов детекторов. Дважды продифференцировав (1) и (2) по времени, получим

$$\dot{J}_1 = \frac{8\pi r J_{10}}{\lambda} \dot{x} \sin \frac{4\pi x}{\lambda}, \quad (4)$$

$$\dot{J}_2 = -\frac{8\pi r J_{20}}{\lambda} \dot{x} \cos \frac{4\pi x}{\lambda}, \quad (5)$$

$$\ddot{J}_1 = \frac{8\pi r}{\lambda} J_{10} \ddot{x} \sin \frac{4\pi x}{\lambda} + 2r \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 J_{10} \dot{x}^2 \cos \frac{4\pi x}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\ddot{J}_2 = -\frac{8\pi r}{\lambda} J_{20} \ddot{x} \cos \frac{4\pi x}{\lambda} + 2r \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 J_{20} \dot{x}^2 \sin \frac{4\pi x}{\lambda}. \quad (7)$$

Умножив (7) на \dot{J}_1 и (6) на \dot{J}_2 и вычтя полученные выражения друг из друга, найдем

$$\ddot{J}_2 \dot{J}_1 - \ddot{J}_1 \dot{J}_2 = \frac{16r^2 \dot{x}^2}{\lambda} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 J_{20} J_{10} \dot{x}. \quad (8)$$

Входящее в (8) произведение $r^2 \dot{x}^2$ можно выразить через производные токов детекторов. Для этого разрешим (4) и (5) относительно тригонометрических функций

$$\sin \frac{4\pi x}{\lambda} = \frac{\lambda \dot{J}_1}{8\pi r \dot{x} J_{10}}, \quad (9)$$

$$\cos \frac{4\pi x}{\lambda} = -\frac{\lambda \dot{J}_2}{8\pi r \dot{x} J_{20}}. \quad (10)$$

Выражение для $r^2 \dot{x}^2$ получим, возведя (9) и (10) в квадрат и сложив их

$$r^2 \dot{x}^2 = \left(\frac{\lambda}{8\pi} \right)^2 \left(\frac{\dot{J}_1^2}{J_{10}^2} + \frac{\dot{J}_2^2}{J_{20}^2} \right). \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в формулу (8), найдем искомую скорость \dot{x}

$$\dot{x} = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\ddot{J}_2 \dot{J}_1 - \ddot{J}_1 \dot{J}_2}{k \dot{J}_1^2 + \dot{J}_2^2 / k}, \quad (12)$$

где введено обозначение $k = J_{20} / J_{10}$.

Рассмотрим случай обращения в ноль знаменателя формулы (12). Этот знаменатель может стать равным нулю только при одновременном обращении в ноль производных \dot{J}_1 и \dot{J}_2 . Из (4) и (5) следует, что это может произойти только при $\dot{x} = 0$, поскольку синус и косинус не могут быть равными нулю одновременно. Таким образом, формула для определения скорости принимает вид

$$\dot{x} = \begin{cases} 0, & \dot{J}_1^2 + \dot{J}_2^2 = 0, \\ \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\ddot{J}_2 \dot{J}_1 - \ddot{J}_1 \dot{J}_2}{k \dot{J}_1^2 + \dot{J}_2^2 / k}, & \dot{J}_1^2 + \dot{J}_2^2 \neq 0. \end{cases} \quad (13)$$

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

Экспериментальная проверка данного метода проведена на стенде, состоящем из измерительного преобразователя, включающего волноводную измерительную линию с установленным в ней детекторным блоком и рупорную антенну; СВЧ-генератора; компьютера с аналого-цифровым преобразователем и кривошипно-шатунного механизма с приводом от электродвигателя, приводящего отражательную поверхность (металлический диск) в возвратно-поступательное движение соосно направлению распространения электромагнитной волны генератора по рупору.

Создаваемое генератором электромагнитное излучение проходило через волноводную линию, излучалось рупорной антенной, достигало колеблющегося металлического диска и отражалось от него, в результате чего в волноводной линии образовывалась стоячая волна, амплитуда которой регистрировалась детекторным блоком. Длина волны электромагнитного излучения, измеренная в волноводной линии, была равна $\lambda_{wg} = 3,725$ см, что соответствовало длине волны в свободном пространстве

$$\lambda_0 = \lambda_{wg} / \sqrt{1 + (\lambda_{wg} / 2W)^2} = 2,90 \text{ см},$$

где $W = 2,3$ см – ширина широкой стенки волноводной линии. Диаметр диска был равен $d = 30$ см, т.е. выполнялось соотношение $d/\lambda_0 \gg 1$, обеспечивающее практическое отсутствие дифракционных эффектов. Частота колебаний диска (частота вращения электродвигателя) регулировалась величиной напряжения на электродвигателе. Размах колебаний диска (удвоенный радиус кривошипа) был равен 15,0 см.

Токи детекторов регистрировались с помощью аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-140. Измерения производились с шагом по времени $\Delta t = 0,02$ мс. Для последующего дифференцирования с целью определения величины относительного перемещения металлического диска производилась полиномиальная аппроксимация измеренных временных зависимостей токов детекторов.

На рис.1 приведена временная зависимость относительного перемещения диска, полученная интегрированием скорости, найденной из производных токов полупроводниковых детекторов по формуле (13). Определенный из этой зависимости размах колебаний диска лежит в диапазоне 14,7 – 15,3 см, то есть ошибка измерения размаха лежит в пределах 2%.

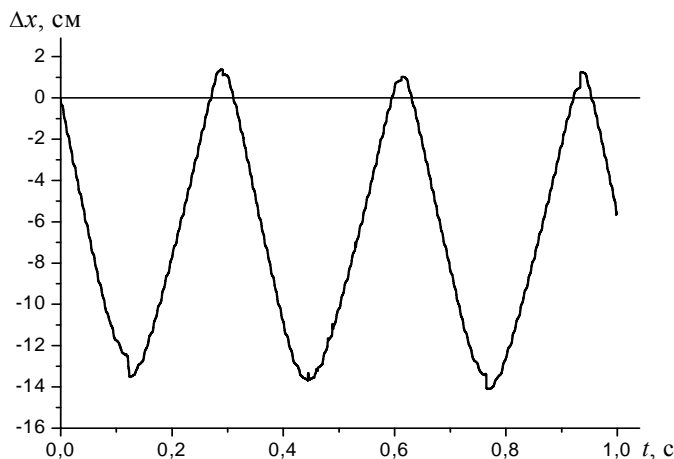


Рис. 1

Таким образом, предложенный двухзондовый метод измерения параметров движения механических систем позволяет определять как величину, так и направление перемещения при неизвестном коэффициенте отражения и обеспечивает достаточную точность измерения в случае перемещений, в несколько раз превышающих длину волны зондирующего электромагнитного излучения. Неопределенность в определении перемещения из тригонометрических уравнений устраняется без использования промежуточной частоты, что упрощает аппаратную реализацию метода. Данный метод может быть использован 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. 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, 12 – 16 сентября 2005 г., Севастополь : материалы конференции. – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 829 – 830.
3. 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.
4. 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.
5. Пилипенко О. В. Измерение параметров движения механических интерференционным методом с использованием двух зондов / О. В. Пилипенко, Н. Б. Горев, М. М. Жечев, Л. Г. Запольский, П. И. Заболотный, И. Ф. Коджеспирова, Е. Н. Привалов // Техническая механика. – 2009. – № 1. – С. 111 – 117.
6. Волковец А. И. Радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации / А. И. Волковец, Д. Ф. Руденко, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2007. – № 4. – С. 58 – 64.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 12.04.11,
в окончательном варианте 12.04.11