

Адаптивный бесконтактный волоконно-оптический преобразователь виброперемещений

А. И. ЮРИН, А. В. ДМИТРИЕВ, М. И. КРАСИВСКАЯ, Г. Ю. ЗЛОДЕЕВ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия, e-mail: ayurin@hse.ru

Рассмотрен пример построения бесконтактного адаптивного преобразователя виброперемещений на основе волоконно-оптического преобразователя рефлектометрического типа с внешней модуляцией. Определены источники погрешностей измерений и методы их уменьшения. Описан опытный образец волоконно-оптического бесконтактного адаптивного преобразователя виброперемещений и методика коррекции функции преобразования.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, преобразователь виброперемещений, виброметрия, виртуальный прибор.

Construction of a contactless adaptive vibration sensor based on fiber-optical displacement transducers with external modulation is considered. The sources of measurement uncertainty and methods to reduce them are determined. The pilot model of a fiber-optic adaptive contactless vibration sensor and method of correction of transformation function are described.

Key words: fiber optic sensor, contactless vibration sensor, vibrometry, virtual instrument.

Измерение параметров вибрации имеет большое значение в промышленности, в частности, при вибрационной диагностике технического состояния и исправности машин и механизмов. Наиболее распространёнными датчиками вибрации являются акселерометры, так как с их помощью можно определить также виброскорость и виброперемещение методом одно- или двукратного интегрирования информационного сигнала.

Одно из перспективных направлений развития виброметрии — разработка датчиков на основе волоконной оптики. Принцип работы таких датчиков основан на модуляции параметров оптического излучения, передаваемого от источника к фотоприёмнику по волоконно-оптическому каналу. К их достоинствам можно отнести универсальность, взрыво- и пожаробезопасность, устойчивость к агрессивным средам и воздействию электромагнитных полей, простоту конструкции, малые габаритные размеры и т. д.

В [1], [2] рассмотрены примеры построения акселерометров на основе волоконно-оптических преобразователей (ВОП) с внешней модуляцией, имеющих достаточно высокую точность, надёжность и стойкость к воздействию электромагнитных полей. Вместе с тем, можно отметить и ограничения применения преобразователей подобной конструкции, к которым можно отнести необходимость контакта с контролируемым объектом, относительно узкий диапазон рабочих частот и влияние температуры на результаты измерений. Однако применение ВОП рефлектометрического типа, основанных на регистрации отражённого от объекта излучения, позволяет реализовать бесконтактные измерители параметров вибрации, свободные от перечисленных выше ограничений.

В настоящей статье представлены результаты разработки и исследования макета адаптивного бесконтактного преобразователя виброперемещений на основе ВОП рефлектометрического типа (рис. 1). Рассмотрим принцип работы

такого преобразователя. Световой поток от источника излучения ИИ передаётся по волоконно-оптическому каналу П, отражается от объекта и по приёмному каналу ПР попадает на фотоприёмник ФП. Из-за вибрации объекта и изменения расстояния до него происходит модуляция интенсивности светового потока, приводящая к изменению силы тока фотоприёмника $I(x)$. Таким образом, переменная составляющая $I(x)$ зависит от параметров виброперемещения.

Функция преобразования ВОП рефлектометрического типа имеет вид кривой с двумя квазилинейными участками a , b (рис. 2), параметры которой зависят, в первую очередь, от конструкции приёмопередающего канала. Анализ математических моделей функций преобразования, описанных в [3], показывает, что для реализации бесконтактного преобразователя виброперемещений оптимальным является применение коаксиального волоконно-оптического жгута (ВОЖ) круглой формы.

Сущность разработанной методики измерений параметров вибрации состоит в опре-

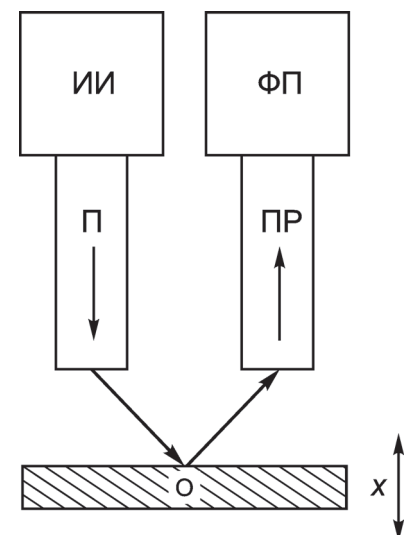


Рис. 1. Схема построения бесконтактного ВОП рефлектометрического типа: ИИ — источник излучения; ФП — фотоприёмник; П — передающий волоконно-оптический канал; ПР — приёмный волоконно-оптический канал; О — объект; x — перемещение объекта

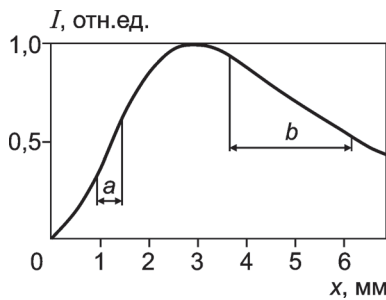


Рис. 2. Функция преобразования ВОП рефлектометрического типа

делении частоты f и максимальной амплитуды $A_{\max}$ переменной составляющей сигнала фотоприёмника, полученных в процессе приближения торца ВОЖ к объекту. Значение $A_{\max}$ достигается в точке наибольшего наклона квазилинейного участка b . Для определения виброскорости и виброперемещения переменную составляющую информационного сигнала фотоприёмника необходимо выделить и подвергнуть процедуре одно- или двухкратного дифференцирования.

Основная погрешность бесконтактного ВОП, как и для большинства средств измерений, выражается суммой аддитивной и мультипликативной составляющих:

$$\delta_{\text{ВОП}} = \pm (\Delta_{\text{ад}} / x + \delta_{\text{м}}),$$

где $\Delta_{\text{ад}}$ — абсолютная аддитивная составляющая погрешности ВОП, которая определяет порог чувствительности преобразователя; x — измеряемый параметр (перемещение объекта); $\delta_{\text{м}}$ — мультипликативная составляющая погрешности (погрешность коэффициента преобразования).

Основной вклад в $\Delta_{\text{ад}}$ вносят шумы фотоприёмника и источника излучения, содержащего кроме собственного оптического шума пульсации мощности излучения, вызванные нестабильностью источника тока. В случае если в качестве фотоприёмника используется кремниевый фотодиод, а в качестве источника излучения — светодиод, то $\Delta_{\text{ад}}$ в основном

определяется диапазоном частот измеряемых параметров и схемой включения фотоприёмника. Следует учитывать, что вклад в погрешность ВОП светодиода и фотоприёмника зависит от потерь в волоконно-оптическом канале. При использовании волоконно-оптических жгутов значительной длины будут преобладать шумы фотоприёмника. При достаточно малой длине жгутов основной вклад в $\Delta_{\text{ад}}$ будут вносить шумы источника излучения, что требует особого внимания к снижению пульсаций тока светодиода.

Мультипликативная составляющая погрешности ВОП в основном обусловлена старением элементной базы (фотоприёмника, светодиода, элементов вторичной аппаратуры, нарушением светопропускания световода). Эти процессы протекают достаточно медленно и могут быть учтены периодической калибровкой преобразователя.

Особое влияние на погрешность бесконтактных ВОП оказывают оптико-физические и геометрические свойства поверхности объекта измерения (коэффициенты отражения и рассеивания, шероховатость и т. д.), а также внешняя засветка, которая в общем случае носит случайный характер. Эффективным методом уменьшения влияния подобных факторов является программная коррекция функции преобразования ВОП.

Дополнительные погрешности, связанные с воздействием температуры и электромагнитных полей можно исключить посредством вынесения электронной части преобразователя из зоны измерения, где могут воздействовать эти факторы.

Таким образом, среди основных недостатков ВОП рефлектометрического типа, которые необходимо учитывать при разработке бесконтактных измерительных устройств, выделим следующие: влияние внешней засветки на результаты измерений; влияние оптических свойств поверхности контролируемого объекта на функцию преобразования ВОП; необходимость установки рабочей точки перед каждым измерением.

Указанные недостатки могут быть устранены различными методами. Влияние засветки можно уменьшить с помощью светозащитных экранов или согласования спектральных чувствительностей приёмника излучения и источника. Однако эти методы не всегда могут обеспечить нужную эффективность. Наиболее перспективным методом уменьшения влияния засветки является модуляция интенсивности светового потока источника излучения посредством подачи напряжения питания определённой частоты с дальнейшим выделением переменной составляющей информационного сигнала данной частоты на фоне помех или коррекция функции преобразования с помощью дополнительного сигнала [4, 5].

Уменьшение влияния оптических свойств поверхности является более сложной задачей, так как результат измерения зависит не только от коэффициента отражения, но и от формы, расположения и параметров шероховатости поверхности объекта. Для учёта этих факторов можно использовать эмпирические поправочные коэффициенты. Подобный метод не всегда удобен, поскольку требует знания информации об объекте. Более перспективной является коррекция функции преобразования по точке максимума, которой можно добиться изменением напряжения питания источника излучения, либо введением дополнительного ВОП, сигнал которого определяется свойствами отражающей поверхности.

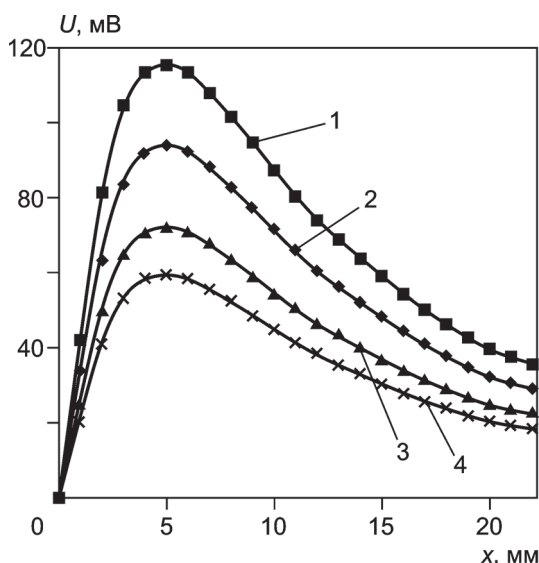


Рис. 3. Зависимость функции преобразования ВОП от угла наклона поверхности α :

1, 2, 3, 4 — $\alpha = 0; 5; 10; 12^\circ$, соответственно

Форма функции преобразования ВОП рефлектометрического типа не зависит от яркости источника излучения и коэффициента отражения поверхности объекта [5]. Проведённые исследования показали, что она не зависит также и от угла α наклона поверхности в пределах $10\text{--}12^\circ$ (рис. 3). Погрешность измерений, вызванную различными отражающими свойствами поверхности и неточностью позиционирования объекта, можно скорректировать с помощью поправочного коэффициента

$$k = U_{\max 0} / U_{\max},$$

где $U_{\max 0}$ — номинальное значение напряжения в точке максимума функции преобразования; $U_{\max}$ — максимальное значение постоянной составляющей информационного сигнала, полученное в процессе приближения торца светодиода к объекту.

Следует отметить, что в данном случае происходит также коррекция постоянной внешней засветки объекта.

Однако форма функции преобразования может изменяться в зависимости от формы отражающей поверхности и её шероховатости. Для возможности коррекции погрешности измерений, вызванной различной шероховатостью отражающей поверхности были проведены исследования зависимости функции преобразования ВОП от класса чистоты поверхности стали, обработанной с помощью цилиндрического фрезерования. Результаты исследований представлены на рис. 4. Согласно результатам эксперимента при увеличении шероховатости происходит более резкий спад характеристики после точки максимума. Это связано с рассеянием отражённого светового потока. Чувствительность преобразователя на квазилинейном участке b изменяется, что приводит к погрешности расчёта амплитуды виброперемещения, которую необходимо скорректировать. Для коррекции чувствительности можно использовать соотношение напряжений в точках максимальной чувствительности $U_{\max S}$ и максимума $U_{\max}$.

Таким образом, амплитуду виброперемещения A рассчитаем как

$$A = k_{\text{ш}} S k U_m, \quad (1)$$

где $k_{\text{ш}} = U_{\max S} / U_{\max}$ коэффициент для коррекции шероховатости поверхности; U_m — амплитуда переменной составляющей информационного сигнала; S — номинальная чувствительность преобразователя.

Дальнейшие исследования показали, что коррекция с помощью коэффициента $k_{\text{ш}}$ позволяет уменьшить погрешность измерений от 3 до 5 раз в зависимости от различных технологий обработки стальных поверхностей (шлифование, фрезерование торцевое, фрезерование цилиндрическое, строгание).

Разработанные методики измерений параметров вибрации и коррекции погрешностей были реализованы в работе макета адаптивного бесконтактного преобразователя виброперемещений на основе разветвлённого ВОЖ с общим приёмопередающим торцом. В качестве источника излучения и фотоприёмника были использованы соответственно зеленый светодиод L-1513SGC и кремниевый фотодиод

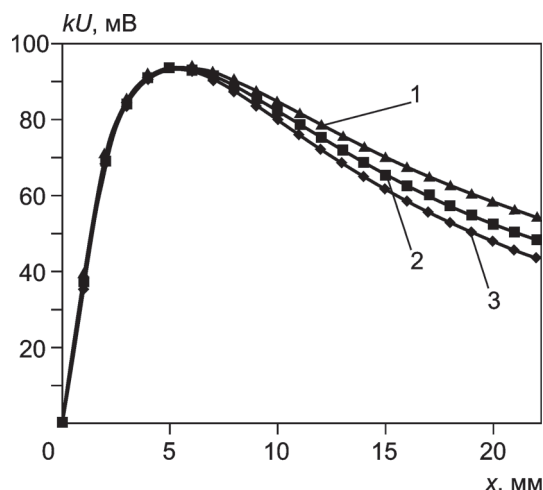


Рис. 4. Зависимость функции преобразования ВОП от класса чистоты поверхности:

1, 2, 3 — класс чистоты соответственно 7, 5, 4

VBWPW21R. Для подачи напряжения питания на источник излучения и оцифровки сигнала с фотоприёмника была применена специализированная плата сбора данных PCI 6251 компании National Instruments (США).

Закключение. Для расчёта результатов измерений и коррекции погрешностей был разработан виртуальный прибор в среде графического программирования LabVIEW. Функциональные возможности созданного прикладного программного обеспечения: возможность регулировки уровня подачи напряжения питания источника излучения; измерение постоянной и переменной составляющих напряжения с фотоприёмника; реализация алгоритма коррекции функции преобразования ВОП согласно (1); программная фильтрация помех; расчёт амплитуды виброперемещения и частоты вибрации; расчёт амплитуд виброскорости и виброускорения гармонической вибрации; запись измерительной информации в файл.

Л и т е р а т у р а

1. Дмитриев А. В., Юрин А. И., Злодеев Г. Ю. Волоконно-оптический акселерометр // Датчики и системы. 2015. № 3. С. 33—35.
2. Дмитриев А. В., Юрин А. И., Красивская М. И. Волоконно-оптический датчик виброускорений // Приборы. 2014. № 2. С. 7—9.
3. Дмитриев А. В., Красивская М. И., Юрин А. И. Исследование волоконно-оптических датчиков с внешней модуляцией // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 34—37.
4. Юрин А. И., Карцев Е. А., Дмитриев А. В. Методы коррекции дополнительной температурной погрешности резонаторных датчиков // Метрология. 2013. № 11. С. 15—20.
5. Удд Э. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008.

Дата принятия: 22.06.2016.