

**Лазерный измеритель вибраций и линейных перемещений / Ю.Ю. Кудряшов, А.А. Львов, А.А. Моржаков, С.В. Свежинцев // Научное приборостроение. -1992. -Т. 2. -№ 3: Лазеры и современное приборостроение. - С. 47-52.**

**Описаны принципы построения бесконтактного автоматического измерителя параметров вибраций и линейных перемещений. Обсуждаются его характеристики и возможные области применения. Точность измерения амплитудного спектра вибраций составляет 0,0001 мкм, линейных перемещений — 0,01 мкм. Библ. 2 назв. Ил. 1.**

Ю. Ю. Кудряшов, А. А. Львов, А. А. Моржаков, С. В. Свежинцев  
(ПО Тантал, СКТБ "Видео", Саратов)

## ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВИБРАЦИЙ И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

### Введение

При разработке, в производстве, при настройке и регламентном контроле высокотехнологичных механических систем крайне необходима информация о паразитных вибрациях и биениях, возникающих при эксплуатации данных систем. Это обстоятельство обуславливает актуальность проблемы создания высокоточных и высокопроизводительных измерителей параметров вибраций. Среди многочисленных виброизмерительных методов в последнее время значительное развитие получили бесконтактные, использующие оптические интерферометры. Данные методы измерения, в отличие от широко применяемых бесконтактных (емкостные или индуктивные датчики) и контактных (датчики перемещения, скорости, ускорения) методов, обладают более высокой точностью и объективностью.

В настоящей статье описан лазерный бесконтактный измеритель вибраций и линейных перемещений, проведено исследование его характеристик и рассмотрены возможные области применения.

При разработке описанного виброизмерителя авторы руководствовались основными принципами, приведенными ниже.

1. Использование в составе измерителя максимально простых и дешевых оптических компонентов, не требующих применения высокотехнологичного оборудования. Такое упрощение должно достигаться благодаря увеличению объема снимаемой информации (использование большего числа измерительных датчиков) и применению более интеллектуальных алгоритмов обработки последней.

2. Отказ от использования устройств аналоговой обработки сигналов и от необходимости их настройки. Это позволяет после оцифровки сигналов с датчиков ввести их в ЭВМ, где в цифровой форме проводить всю последующую обработку.

3. Обязательное обеспечение самокалибровки бесконтактного виброизмерителя без использования эталонных калибровочных средств и, в идеале, совмещение процессов самокалибровки и измерения.

4. Ориентация на применение высокопроизводительного, высоконадежного и компактного универсального компьютера с большим объемом оперативной памяти. Это позволяет выполнить вышеперечисленные требования и обеспечить управление виброизмерителем, проведение последующего анализа полученных данных, выдачу в удобной форме измеряемых параметров на любое периферийное устройство или их запоминание на магнитном носителе.

Такой подход к построению виброизмерительной системы позволил достичь существенных преимуществ по сравнению с известными бесконтактными виброизмерителями (фирмы Hewlett-Packard, Brüel & Kjaer, Ometron), которые обсуждаются ниже.

### Принцип работы и математические соотношения

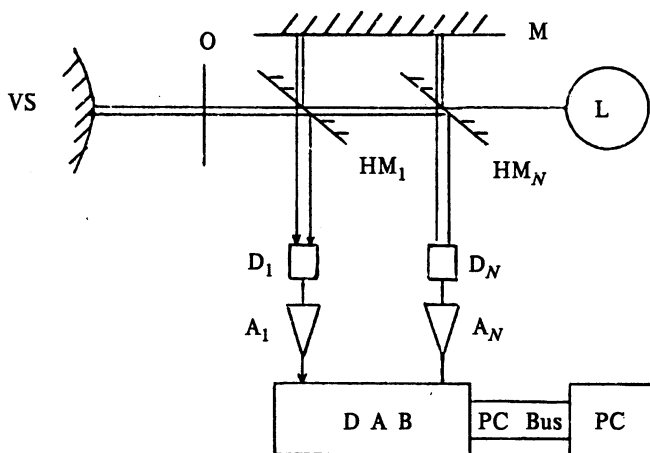
Принцип неконтактного метода известен — это дистанционное зондирование перемещающейся поверхности с помощью источника излучения и измерение характеристик отраженного сигнала (рисунок).

Объект зондируется источником когерентного излучения  $L$ , в качестве которого взят He-Ne-лазер с длиной волны  $\lambda = 633$  нм. Оптическая часть вибрметра основана на интерферометре Майкельсона. Когерентный луч света разделяется с помощью полупрозрачных зеркал  $HM_1, \dots, HM_N$  на зондирующий и опорные лучи. Зондирующий луч, проходя через объектив  $O$ , фокусируется на исследуемой поверхности  $S$ . Свет, диффузионно рассеянный поверхностью и собранный объективом, разбивается на сигнальные лучи. Аддитивная смесь опорных и сигнальных пучков образует интерференционную картину в плоскости расположения измерительных фотодиодов  $D_1, \dots, D_N$ . Сигналы с фотодатчиков поступают через согласующие усилители  $A_1, \dots, A_N$  в плату сбора данных DAB, где после оцифровки вводятся в память персонального компьютера PC. Вибрация тестируемой поверхности вызывает изменение оптической длины путей сигнальных пучков и, следовательно, изменение исследуемой интерференционной картины, а также сигналов, снимаемых с фотодиодов.

Мгновенные значения токов датчиков лазерного интерферометра пропорциональны интенсивности суперпозиции опорной и обратной волн

$$I_{nk} = \left| \dot{A}_n \dot{a}_k + \dot{B}_n \dot{b}_k \right|^2 + \Delta_{nk}, \quad (1)$$

где  $n$  — номер датчика ( $n = \overline{1, N}$ );  $k$  — номер измерения ( $k = \overline{1, K}$ );  $\dot{A}_n, \dot{B}_n$  — комплексные коэффициенты передачи  $n$ -го датчика для прямой (опорной) и рассеянной (сигнальной) волн соответственно;  $\dot{a}_k, \dot{b}_k$  — комплексные амплитуды



Блок-схема лазерного бесконтактного измерителя параметров вибраций.  
Объяснение в тексте.

ды прямой и отраженной волн в  $k$ -й момент времени;  $\Delta_{nk}$  — аддитивный шум. Предполагается, что помеховый сигнал  $\Delta_{nk}$  обусловлен, в первую очередь, тепловыми шумами детекторов и усилителей, поэтому его можно считать распределенным по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией.

Исследователя интересуют только параметры  $\dot{a}_k$  и  $\dot{b}_k$ , так как их отношение

$$\dot{\rho}_k = \dot{b}_k / \dot{a}_k \quad (2)$$

равно комплексному коэффициенту отражения вибрирующей поверхности в момент времени  $k$ . Фаза коэффициента  $\dot{\rho}_k$  связана с координатой облучаемой поверхности соотношением

$$\varphi_k = \arg\{\dot{\rho}_k\} = 4\pi l_k / \lambda. \quad (3)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны лазера;  $l_k$  — расстояние между поверхностью и интерферометром в  $k$ -й момент времени. Поэтому, если известны все  $\dot{b}_k$  и  $\dot{a}_k$ , то несложно установить закон изменения координаты вибрирующей поверхности во времени.

Однако основная трудность заключается в том, что параметры интерферометра  $A_n$  и  $B_n$  также неизвестны. Они должны быть определены при предварительной калибровке виброизмерительной системы. Другой, подход состоит в получении точно известных коэффициентов передачи  $A_n$ ,  $B_n$  на стадии изготовления интерферометра с использованием высокотехнологичного оборудования и дальнейшей подгонки данных коэффициентов в случае их изменения. Такой путь выбран известными фирмами Hewlett-Packard, Brüel & Kjaer, Ometron. В фирменных бесконтактных виброизмерителях, основанных на доплеровском измерении скорости вибрирующей поверхности, информация снимается с двух датчиков. При этом к используемой аппаратуре предъявляются очень жесткие требования: необходим высокостабильный источник излучения, фазовые соотношения между датчиками должны быть точно известны и оставаться постоянными в процессе измерения. Отметим, что сама измерительная система нуждается в сложной, прецизионной настройке измерительных каналов, а это является достаточно дорогостоящей операцией.

Основная идея предлагаемого авторами метода измерения параметров вибраций заключается в использовании числа измерительных каналов интерферометра, большего четырех, причем коэффициенты их передачи  $A_n$  и  $B_n$  для опорной и сигнальной волн считаются неизвестными при каждом измерении. Общее количество комплексных неизвестных в системе (1) — все  $\dot{a}_k$ ,  $\dot{b}_k$ ,  $A_n$  и  $B_n$  — равно  $2(N + K)$ , а количество уравнений  $NK$ . Поэтому при выполнении соотношения

$$NK \geq 4(N + K) \quad (4)$$

система (1) может быть разрешена по методу максимального правдоподобия, а, таким образом, можно получить оценки всех неизвестных параметров  $\dot{a}_k$ ,  $\dot{b}_k$ ,  $A_n$  и  $B_n$ .

Система уравнений (1) типична для измерительных систем, работающих в СВЧ-диапазоне. Методы решения таких нелинейных систем хорошо известны [1]. Основная проблема применения многополюсных рефлектометров в СВЧ-метрологии — это сложность их калибровки. В данном случае необходимо откалибровать интерферометр, не используя образцовых стандартов отражения, поскольку у большинства пользователей виброизмерителей они отсутствуют. В работе [2] приведены методы калибровки многополюсных рефлектометров специального вида по неизвестным стандартам отражения. Опираясь на этот опыт, авторы решают систему (1), при выполнении условия (4), относительно неизвестных  $A_n$ ,  $B_n$  и фаз комплексных отношений  $\varphi_k$ . Таким образом, в результате решения системы (1) находятся фазы коэффициента отражения ( $a$  значит, и координаты) перемещающейся поверхности в различные моменты времени. Эталонем служит длина волны источника излучения.

### Преимущества многозондового измерителя

Используя специфические свойства системы (1), авторы реализовали алгоритм ее решения, который сокращает время обработки измерительной информации на два порядка по сравнению с известными алгоритмами [2]. Это позволило проводить обработку цифровой информации в реальном времени и совместить процедуры калибровки и измерения. Калибровка виброметра производится при каждом измерении, вследствие чего исключается влияние внешних факторов — изменения давления, температуры, влажности и т.д.

Увеличение числа датчиков ( $N > 4$ ) позволяет значительно упростить и удешевить оптическую часть виброметра. Действительно, в системе (1) все коэффициенты передачи интерферометра  $A_n$ ,  $B_n$ , равно как и амплитуды  $\dot{a}_k$  падающей волны, при каждом измерении считают неизвестными и определяют в процессе измерения. На основании этого можно утверждать, что процедура самокалибровки виброизмерителя производится при каждом измерении, в связи с чем требования стабильности мощности источника излучения, знания фазовых соотношений между датчиками отсутствуют.

При решении системы (1) не накладывается никаких ограничений на параметры  $\dot{a}_k$  и  $\dot{b}_k$ , кроме естественного ( $|b| < |a|$ ), поэтому коэффициент отражения вибрирующей поверхности может изменяться произвольным образом во времени. Такое свойство описываемого метода позволяет достичь известных преимуществ по сравнению с доплеровскими виброизмерительными методами. Появляется возможность измерять параметры вибраций объектов с быстро меняющимся коэффициентом отражения поверхности (например, вращающиеся объекты). Результатами измерения служат изменения во времени координаты вибрирующей поверхности, а не изменения ее скорости, что видно из (2) и (3). Поэтому данный измеритель параметров вибраций обладает большей чувствительностью на малых частотах ( $< 5$  Гц) по сравнению с его доплеровскими аналогами.

Точность метода определяется отношением сигнал/шум на выходе интерферометра. Использование в составе интерферометра простых отечественных оптических компонент позволяет достичь величины порядка 30 дБ, что бес-

печивает точность измерения в диапазоне частот от 0 до 30 кГц: 0,01 мкм для линейных перемещений и 0,0001 мкм для амплитуд спектральных составляющих вибраций.

В заключение отметим также, что в предлагаемом виброизмерителе отсутствуют аналоговые блоки обработки сигналов с фотодатчиков (смесители, полосовые фильтры, сумматор, частотный детектор и т.д.). В совокупности с отсутствием высокотехнологических оптических компонент в интерферометре Майкельсона это обстоятельство обуславливает относительно низкую себестоимость измерителя.

### Технические характеристики

Диапазон частот и амплитуд измеряемых вибраций определяется исключительно быстродействием платы сбора данных. При использовании видеоинтерфейсов для персональных компьютеров можно проводить измерения в полосе от 0 до 750 кГц. Точность измерений параметров вибраций зависит от отношения сигнал/шум на выходе интерферометра и от погрешности длины волны лазера. С помощью используемой оптической зондирующей системы можно измерить амплитудный спектр вибраций с точностью 0,0001 мкм, а линейные перемещения объектов — с точностью 0,01 мкм.

Время измерений определяется только требованиями к точности и типом персонального компьютера. Процессор Intel 80286 обеспечивает проведение измерений в реальном времени с максимальной точностью в полосе звуковых частот.

В разработанной системе измерения вибраций осуществлено совмещение процессов измерений и калировки, причем последняя не требует наличия эталонных средств. Эталонном служит длина волны источника излучения. Программное обеспечение позволяет измерять параметры вибраций или линейные перемещения объектов самой сложной формы. Оно легко может быть установлено на большинстве применяемых в промышленности компьютеров (IBM, HP, Macintosh).

### Возможные области применения

С помощью описываемого лазерного виброизмерителя можно проводить измерения параметров вибраций, их анализ, и выдавать измерительную информацию в законченном виде на любое периферийное устройство контроллера. Измерительная виброаппаратура, реализующая данный неконтактный метод, способна осуществлять постоянный автоматический контроль за паразитными вибрациями и биениями любых машин и механизмов.

При настройке прецизионных обрабатывающих центров и контроле за их работой с успехом может применяться измеритель, основанный на данном методе с использованием лазерного интерферометра. Спектр измеренных паразитных биений вращающейся детали предоставит исчерпывающую информацию о станке, форме обрабатываемой детали и точности ее обработки. При этом нет необходимости в остановке станка и извлечении из него детали, что гарантирует значительную экономию времени и сохранность обрабатываемых деталей.

Постоянное наблюдение за спектром вибраций турбины позволяет осуществить раннее прогнозирование неисправностей с указанием возможных источников поломки. Регистрация выхода амплитуды вибраций турбины за предельные значения может служить надежным источником информации для отслеживания опасных осложнений, которая позволяет изменить рабочие параметры или провести плановую остановку турбины для предотвращения аварийной ситуации.

В авиакосмической и автомобильной промышленности возможно проведение конструкционных и прочностных виброиспытаний крыльев, фюзеляжа, шасси, корпуса автомобиля, двигателей и т.д. Данный измеритель параметров вибраций в сочетании с простейшим сканирующим устройством позволяет измерять в реальном времени картины вибраций поверхностей и вращающихся объектов. Разработанный виброметр можно применять для измерения биения ротора и поверхности диска накопителя и регистрировать паразитные вибрации вращающихся головок видеомагнитофона.

Из других возможных приложений следует отметить калибровку контактных датчиков перемещений, скорости и ускорений с повышенной точностью по отношению к методу оптической калибровки с использованием лазерного интерферометра.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что разработанный бесконтактный измеритель параметров вибраций и линейных перемещений обладает по сравнению со своими аналогами, среди которых можно выделить следующие, рядом несомненных преимуществ: 1) самокалибровка системы в процессе каждого измерения; 2) более низкие требования к оптическим компонентам (лазер, интерферометр, источник питания); 3) возможность исследования вибрирующих объектов с быстроизменяющимся коэффициентом отражения поверхности (например, вращающиеся объекты); 4) возможность измерения непосредственного перемещения объекта в отличие от обычно используемого способа измерения его скорости; 5) более высокая точность измерения перемещений; 6) отсутствие аналоговых устройств обработки сигнала и необходимости их прецизионной настройки; 7) относительно низкая себестоимость.

Оптимальные в смысле минимума среднеквадратичной ошибки алгоритмы обработки измерительной информации позволяют резко расширить функциональные возможности прибора. Универсальность разработанного виброметра делает возможным его применение в различных областях техники, связанных с регистрацией вибраций и линейных перемещений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Львов А. А., Моржаков А. А., Кудряшов Ю. Ю., Галкина Л. В. // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1989. Вып. 8 (422). С. 57-67.
2. Кудряшов Ю. Ю., Львов А. А., Моржаков А. А., Ширшин С. И. // Там же. 1988. Вып. 4 (408). С. 55-57.