

Возможность применения бесконтактных датчиков для измерения дефектов формы

К. Епифанцев, к. т. н.¹

УДК 744.42 | ВАК 2.2.4

Процесс измерения дефектов формы, согласно ГОСТ 53442-2015 год, необходим для контроля круглости, осевого биения, концентричности, параллельности. Основные датчики, используемые в стандартных приборах-кругломерах, индуктивного контактного типа. Однако с целью импортозамещения и предотвращения постепенного истирания щупа были проведены эксперименты с датчиком вихретокового типа и датчиком лазерным гелиево-ионного типа с целью создания вдвоенной измерительной головки для определения дефектов формы.

Кругломер (рис. 1) – важный элемент для контроля дефекта формы в условиях крупносерийного производства [1]. Результат сканирования детали на приборе представляется в виде круглограммы (рис. 2).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В условиях импортозамещения многие приборы, такие как профилометры, кругломеры, контурографы, нуждаются в замене наиболее изнашиваемых компонентов, таких как контактные щупы, подшипники, кронштейны и т.д. В современных условиях при расширении производственных мощностей предприятий увеличивается объем контролируемых деталей, и такие элементы как контактные щупы изнашиваются более активно, также в более активном режиме происходит износ и других механизмов. В настоящее время увеличилась и номенклатура деталей, включающая в себя множество габаритных деталей, которые необходимо измерять непосредственно в патроне станка по причине их больших массово-габаритных свойств. Такие детали нельзя установить на кругломер. В качестве эталона по центрированию перед настройкой прибора будет выбран эталонный цилиндр с нулевым биением и круглостью. Разность между эталонным значением и деталью после токарной обработки будет вычислена программой. Это ускорит процесс центрирования-выравнивания и снизит процедуру измерения на 7–10 мин в пересчете на одну деталь. Применение одной комбинированной головки уменьшило бы время

смены головок, повысило бы универсальность по работе с деталями из различных материалов.

Многие авторы выявляют необходимость перехода к комбинированным щупам. Так, в исследовании [4] подчеркивается важность создания измерительных головок нового типа. Авторы подчеркивают необходимость гибридного датчика. Гибрид достигается в данном случае комбинацией контактного и бесконтактного метода измерения за счет встраивания бесконтактной измерительной головки внутрь контактной. Гибридная измерительная головка (рис. 3) состоит из контактного 1 и бесконтактного 2 (на основе низкокогерентного интерферометра) измерителей, измерительного стержня 3 со сферическим рубиновым (сапфировым) наконечником 4. Внутри стержня размещен световодный элемент 5, созданный из оптически связанных прямого 6 и спирального 7



Рис. 1. Работа на кругломере RoundTest RA-120P

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент.

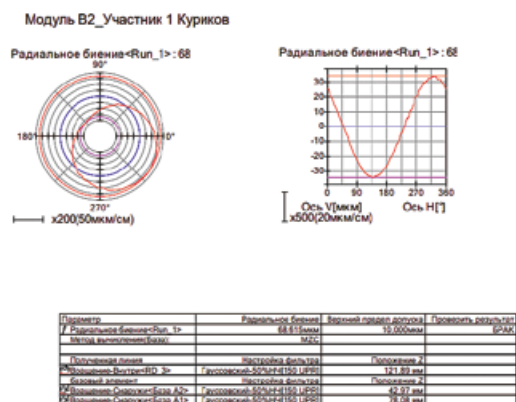


Рис. 2. Пример круглограммы, снимаемой с контактного индуктивного датчика

многомодовых световодов с нанесенным внешним металлическим покрытием 8 и установленным на его торце рассеивающей микролинзой 9.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Вихретоковые датчики (ВД) нашли широкое применение при контроле и диагностике состояния вращающихся валов различных энергетических установок [2].

В качестве датчика в экспериментальной установке исследован датчик вихретокового типа. С этой целью были проведены измерения в ИПУСС РАН на одновитковом вихретоковом преобразователе. В качестве подвижного устройства был выбран индикатор частоты, доработан-

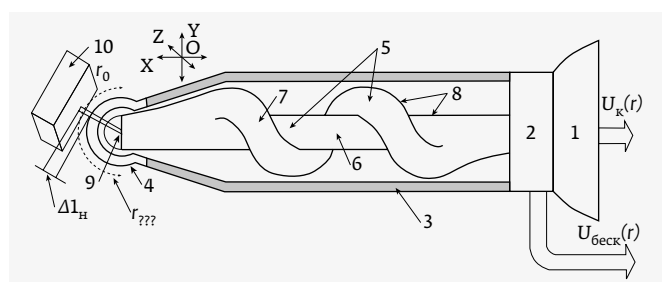


Рис. 3. Гибридная 3D измерительная головка

ный на конце пластинчатым, прямоугольным, 5-мм щупом, который выполнял роль имитации детали. Задача была сведена к измерению зависимости индуктивности от смещения на микрометрическое расстояние. Это позволило увидеть зависимость смещения от индуктивности. В будущем данное графическое представление позволит четко определить зависимость при обработке сигналов на соответствующей программе. Также применение

данных датчиков может быть использовано для компенсации лазерных триангуляторов, которые также могут применяться для неметаллических, но отражающих поверхностей. Идея создания мультисенсорного кругломера в том, что в нем будет работать два датчика – оптического типа (для определенных материалов) и вихретокового (для всех металлов).

Зависимость индуктивности вихретокового датчика от зазора между ним и дюралевого деталью исследовалась на индикаторе частоты (позиция 2 на рис. 4) с часовым индикатором с ценой деления 0,01 мм.

Измерения проводились цифровым измерителем L, C, R типа E7-12. Активное входное электрическое сопротивление датчика равно 0,055 кОм. На рис. 4 – установка с вихретоковым преобразователем, на рис. 5 – результаты измерений.

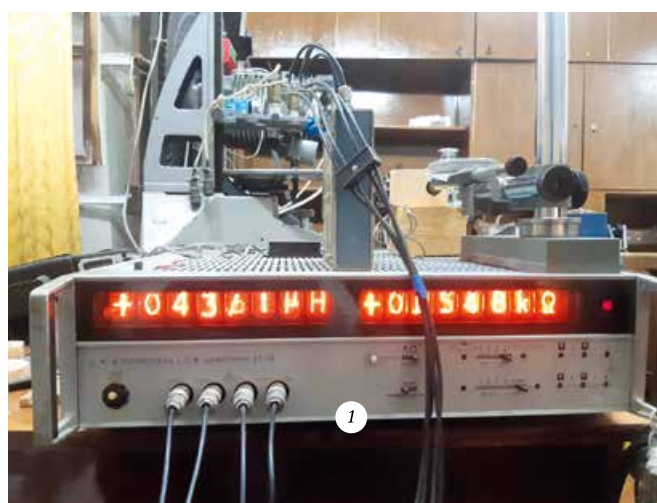
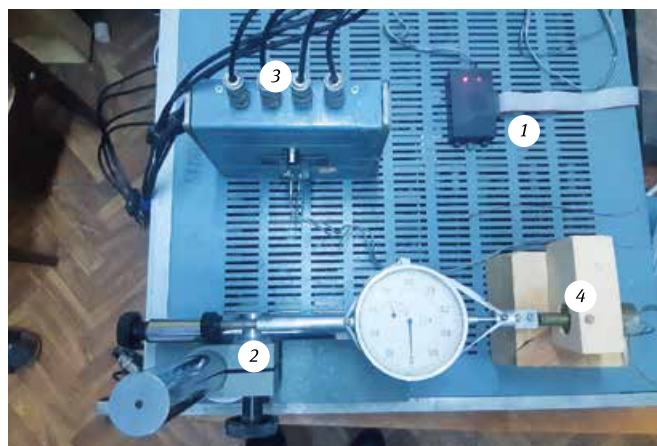


Рис. 4. Установка с вихретоковым преобразователем: 1 – измеритель L, C, R E7-12, 2 – индикатор частоты, 3 – преобразователь, 4 – вихретоковый одновитковый преобразователь

Для лучшего понимания график был разбит на ряд подграфиков, с минимальными смещениями, которые могли бы быть интересны для создания подобного датчика в устройствах для измерения дефектов формы (рис. 6а, б, в, г, д).

Далее была проведена еще серия экспериментов, уже на большем удалении от детали. Здесь шаг был уже по 0,02 мм, поэтому на графике появились характерные ломанные элементы («ступеньки»), которые свидетельствуют о резких скачках емкости при смещении микрометрического винта (рис. 7).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Важно сказать, что на вихретоковые преобразователи также влияет множество погрешностей, которые могут значительно ухудшать качество сигнала. Так, авторы [4] рассматривают теорию фракталов в качестве основной для выявления истинного сигнала. Индекс фрактальности реализован в виде формулы Хёрста [4, 5–9]:

$$D = E - H, \tag{1}$$

где D – фрактальная размерность временного ряда; E – евклидова размерность задачи; H – показатель Хёрста.

$$D = Dt + \lambda, \tag{2}$$

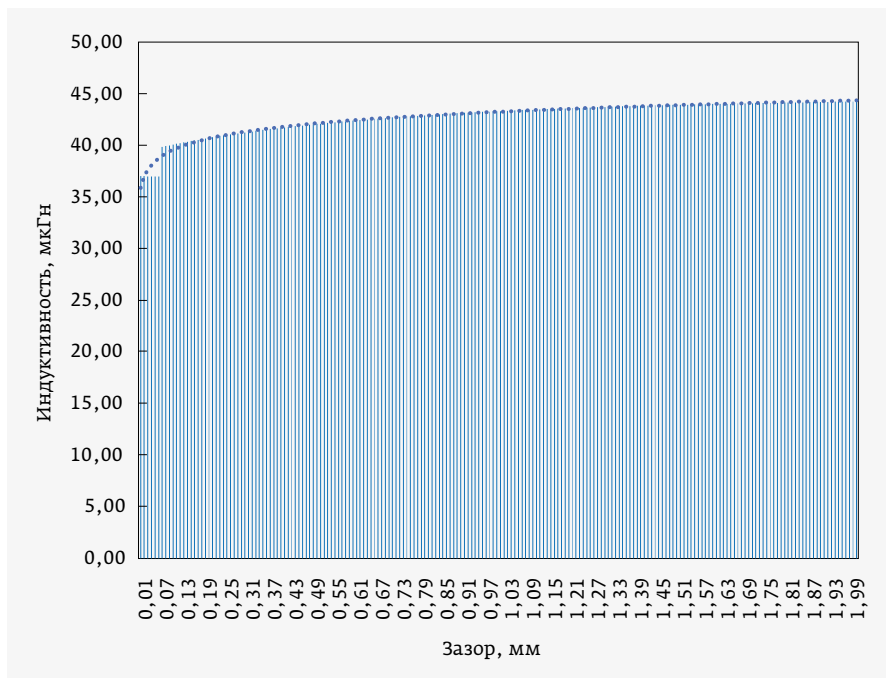


Рис. 5. Результат измерения на вихретоковом датчике при зазоре от 0,01 до 1,91 мм

где D – топологическая размерность; λ – индекс фрактальности.

Для того чтобы рассчитать показатель Хёрста временного ряда $\xi(t)$, необходимо вычислить среднее значение массива $\xi(t)$ за время

$$\xi(t)_{cp} = \frac{1}{T} \sum_1^T \xi(t). \tag{3}$$

Г. Э. Хёрстом было установлено следующее соотношение:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \approx \tau^H. \tag{4}$$

Таким образом, при обучающем эксперименте можно рассчитать фрактальную размерность и доверительный интервал для классификации дефектов.

Также важным элементом работы преобразователя является магнитная проницаемость различных металлов. Так, авторами [3] были проведены исследования, которые отражены в следующем: «Как видно из приведенных графиков, при длительности импульса питания 0,58 мкс на выходе ИЦ формируются напряжения с равной амплитудой при взаимодействии ЧЭ как с немагнитной (+0,000214 В), так и с магнитной (-0,000214 В с учетом инверсии) частицами металла» (рис. 8).

В исследовании [2] подчеркивается, что для повышения точности измерения и уменьшения температурных погрешностей при датчиках вихретокового типа дополнительно используются фильтры (рис. 9).

Также наряду с вихретоковым щупом авторами работы [2] были сделаны попытки исследовать применение оптического датчика для измерения дефектов формы. В процессе физического моделирования измерительного тракта была собрана система, показанная на рис. 10.

Приведенная оптическая схема соответствует приему излучения на матричный фотоприемник. Разница во взаимном положении зеркал в плечах интерферометра приводит к изменениям положения максимумов интерференции на фотоприемнике.

Измерительный тракт построен на основе полупроводникового лазера с длиной волны 1,54 мкм. Излучение лазера передается по одномодовому поляризованному оптоволокну. В измерительной схеме реализован интерферометр, в одно

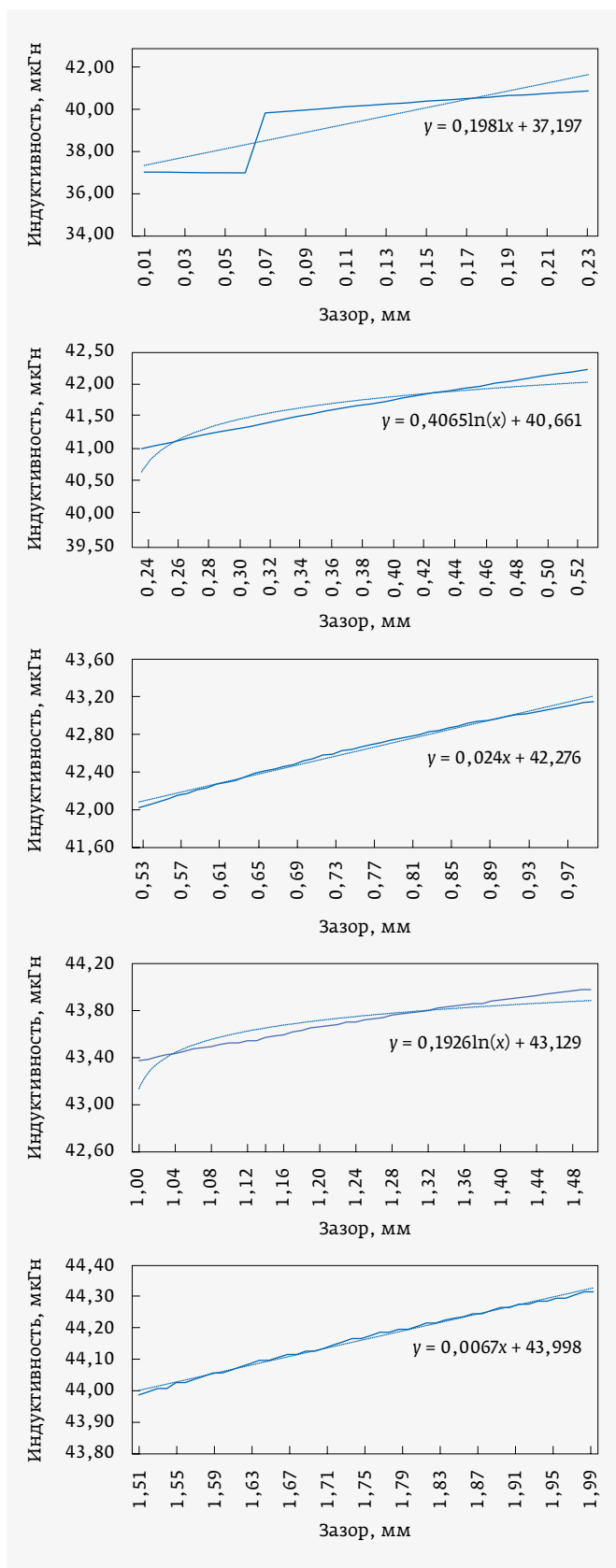


Рис. 6. Результаты измерения при разных величинах зазора

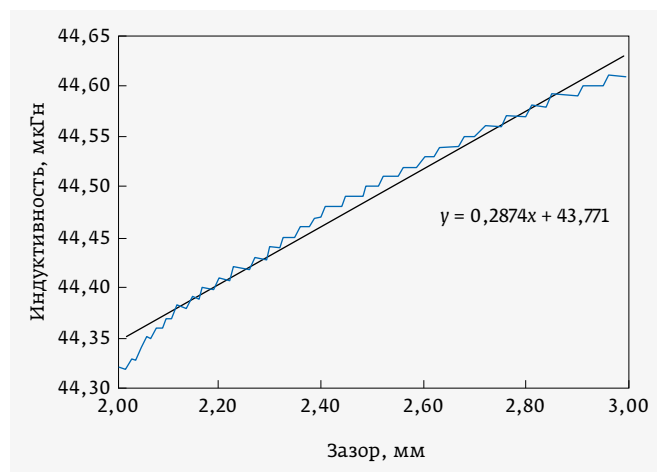


Рис. 7. Результаты экспериментов

плечо которого поступает опорное излучение от лазерного источника, а во второе – излучение, прошедшее измерительный тракт. Для формирования опорного сигнала использован волоконный делитель, после которого 10% энергии лазера поступает в опорный канал, а 90% в канал измерений. Излучение и прием осуществляются через коллиматор. Для разделения каналов излучения и приема установлен волоконно-оптический циркулятор. Излучение с первого входа циркулятора поступает на второй канал циркулятора и передается через коллиматор в среду, а отраженное от измеряемой поверхности излучение проходит со второго на третий порт циркулятора. Далее излучения опорного и сигнального каналов смешиваются в оптическом сплиттере и поступают на вход балансного фотоприемника. В схеме использован оптический циркулятор Thrlabs F810APC-1550 и волоконно-оптические компоненты LightComm. В качестве фотоприемника использован балансный детектор Thorlabs PDB 425C-AC.

Используемый метод измерений позволяет получать только переменную составляющую сигнала интерференции. Поэтому необходимым условием осуществления измерений является непрерывное вращение измеряемой поверхности.

При используемой длине волны лазера, 1,54 мкм, минимально возможное регистрируемое смещение составляет 385 нм. Такое смещение поверхности приводит к появлению на сигнале одной целой гармоники. Без применения дополнительных методов обработки сигнала данное смещение можно считать порогом обнаружения. Такой уровень измерений с запасом перекрывает требования к пороговой чувствительности прибора измерения поверхности вращения. В процессе измерений подтверждено отсутствие влияния на результат измерений внешних источников света и естественного фона. Это

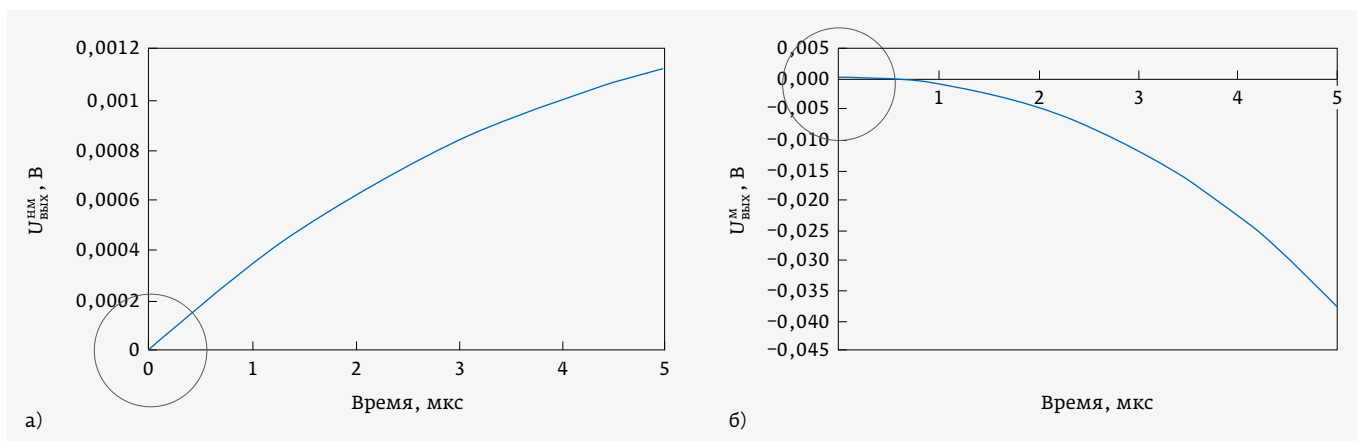


Рис. 8. Пульсации напряжения на выходе ИЦ при взаимодействии ЧЭ с немагнитными (а) и магнитными (б) материалами диаметром 0,5 мм

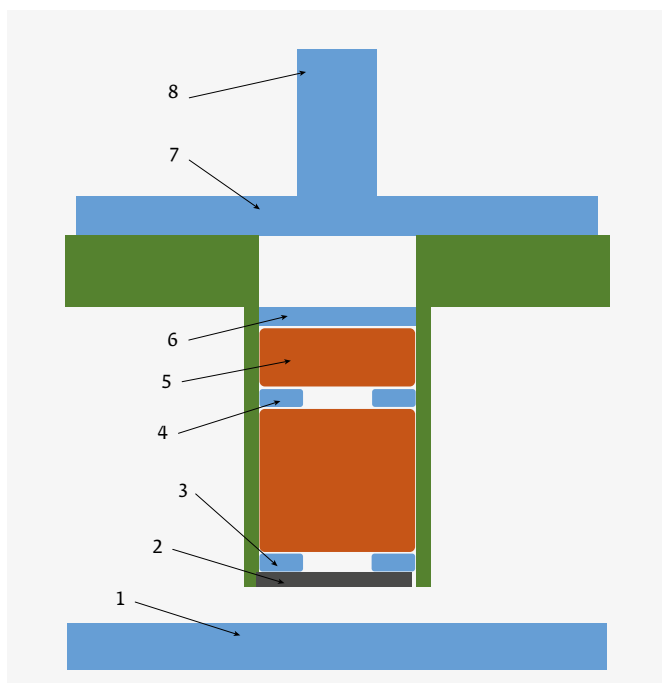


Рис. 9. Квазидифференциальная схема включения: 1 - объект; 2 - керамический корпус; 3 - измерительная катушка; 4 - компенсационная катушка; 5 - керамический каркас; 6 - экранирующая пластина; 7 - металлическая катушка; 8 - кабельная перемычка

связано с регистрацией на фотоприемнике лишь переменной составляющей светового потока, которая возникает вследствие интерференции опорного и сигнального каналов излучения.

На рис. 11, на осциллографе, визуализированно представлены осциллограммы, которые были зарегистрированы при микросмещении винта и приближении линзы

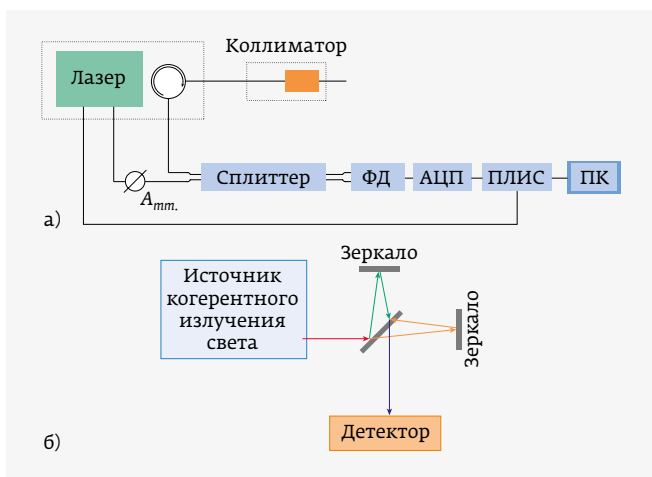


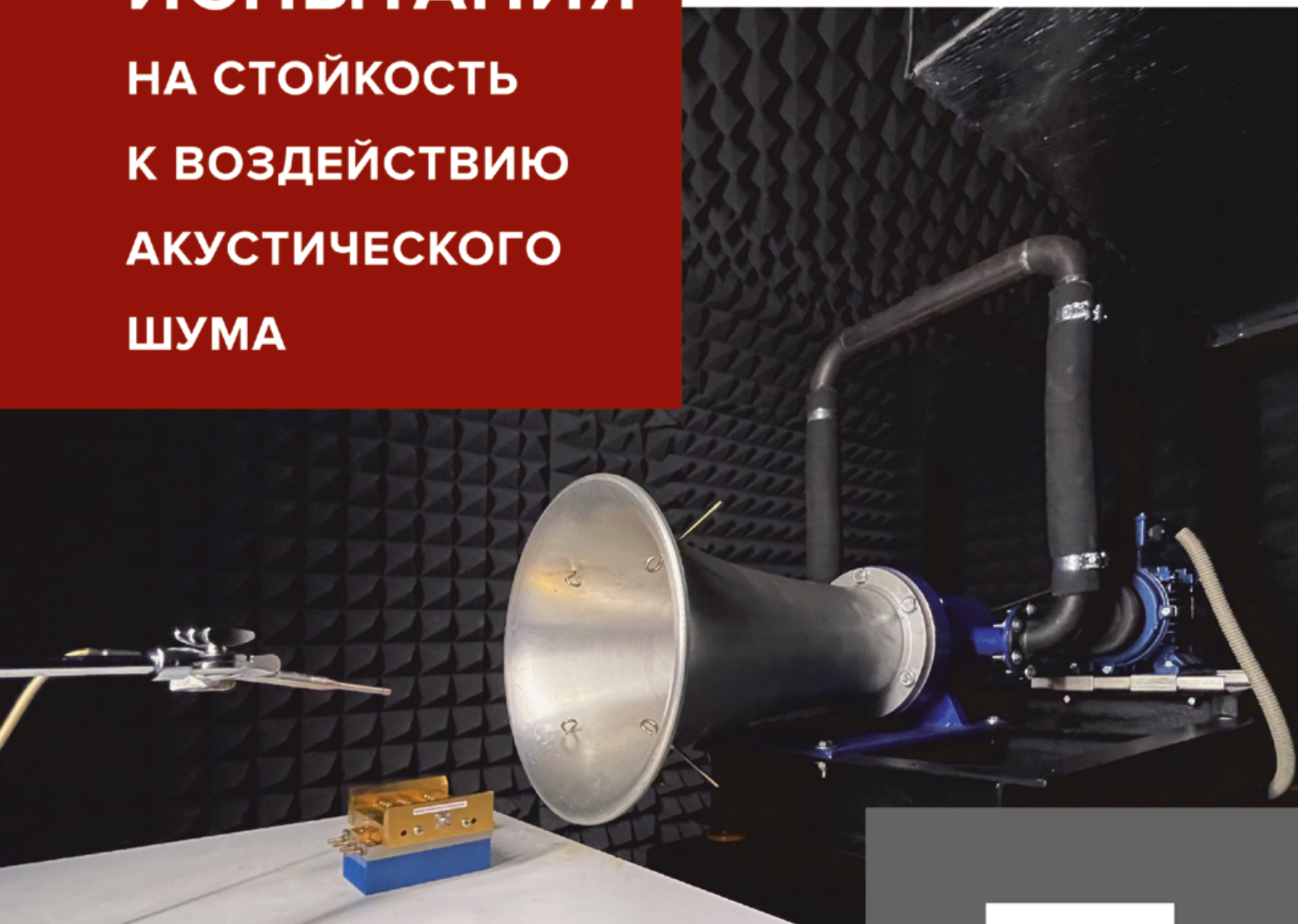
Рис. 10. Оптическая схема интерферометра Майкельсона (а), волоконно-оптическая схема измерительного тракта (б)

к лазеру. Такие сигналы используются при анализе смещения поверхности детали, закрепленной на кругломере RoundTest.

По осциллограмме на рис. 11 было замечено, что приближение линзы к коллиматору с помощью микрометрического винта дает повышение осциллограммы (график красного цвета) на 190–200 мВ (смещение обозначено синей стрелкой).

Далее в лаборатории ГУАП, где находится кругломер, был установлен лазерный датчик (рис. 12), предварительно протестированный в составе установки ООО «Бортовые аэронавигационные системы» (см. рис. 11). Это было сделано для сравнения показаний измеренного значения на лазере с измеренным значением на кругломере в идеальных условиях.

ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА



**Испытательная лаборатория
АО «ТЕСТПРИБОР» проводит испытание
на воздействие акустического шума до 160 дБ
и на частоте 50 – 10 000 Гц.**

В отличие от испытаний изделий на вибростендах, акустический шум воздействует непосредственно на все детали и узлы и может вызвать вибрации отдельных его элементов, размеры которых сравнимы с длиной акустической волны в рассматриваемом частотном диапазоне.

Особо чувствительными изделиями к акустическому шуму являются, например:

- параболические антенны или солнечные батареи,
- электронные устройства,
- печатные монтажные платы,
- электропроводка,
- оптические элементы
- и т.п.



125480, МОСКВА,
УЛ. ПЛАНЕРНАЯ, Д. 7А

ТЕЛ.: 8 (495) 657-87-37

ТР@TEST-EXPERT.RU

WWW.TEST-EXPERT.RU



Рис. 11. Схема установки: (а) 1, 4 – волоконно-оптический тракт, 2 – микрометрический винт с установленным коллиматором, 3 – фотоприемник. (б) – показания осциллографа Rohde and Schwarz при смещении микрометрического винта на 0,05 мкм

Сигнал с лазерного датчика был снят с виртуального осциллографа АК ИП. Результаты измерения поворота осей на лазерной установке с помощью цифрового виртуального осциллографа АК ИП 75244D приведены на рис. 13.

По итогам сделанных измерений в программе PicoScope 6 (рис. 13) получены результаты, которые

необходимо соотнести с результатами центрирования-нивелирования кругломера (рис. 8), так как необходимо понимать соотношение между показаниями контактного щупа кругломера и бесконтактного датчика, внедренного авторами статьи. Данные представлены табл. 1. В программу необходимо вводить фильтры Гаусса. Соотношение микрометрического отклонения и зависимости осциллограммы имеет обратно

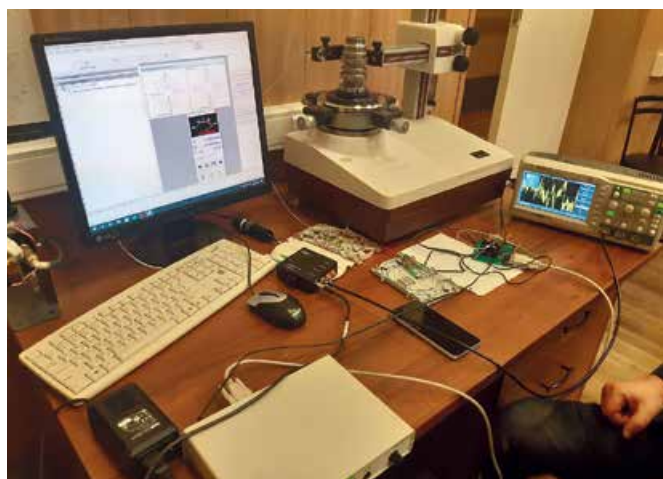


Рис. 12. Кругломер с лазером вместо контактного щупа (справа) и собранная установка (слева)

Таблица 1. Результаты измерения на контактном и оптическом датчиках

ОСИ	Центрирование на кругломере, мм	Результаты измерения на оптическом лазерном датчике, вариация, В	Δ , снятые с лазерного датчика, В	Сумма по модулю данных, снятых с лазерного датчика, В
CX	-0,04	-0,6...+0,2	-0,4	0,8
CY	0,01	0,2...-0,2	0	0,4
LX	0,042	-0,2...+0,65	0,45	0,85
LY	-0,011	+1...-0,4	0,6	1,4



Главное событие отрасли
в России и странах СНГ

ФОТОНИКА

МИР
ЛАЗЕРОВ
И ОПТИКИ

26–29 марта 2024

18-я международная специализированная выставка
лазерной, оптической и оптоэлектронной техники

Реклама



12+

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

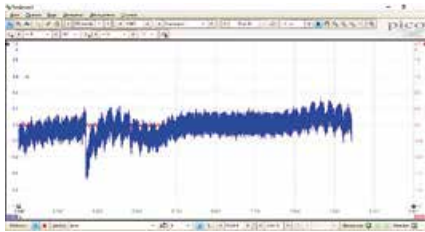
www.photonics-expo.ru



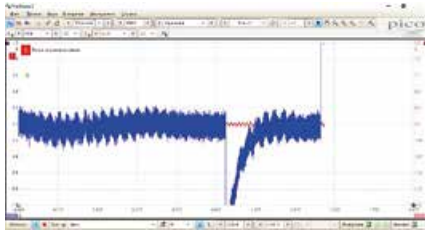
ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

65 ЭКСПОЦЕНТР

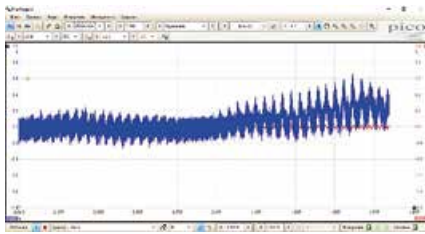
CX,
поворот детали
на 0 град.



CY,
поворот детали
на 90 град.



LX,
поворот детали
на 180 град.



LY,
поворот детали
на 270 град.

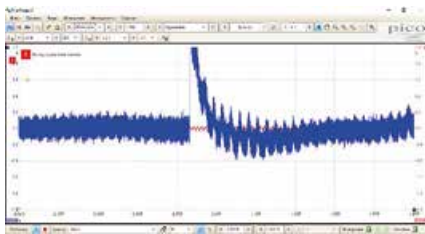


Рис. 13. Результаты измерения поворота осей на лазерной установке

пропорциональную зависимость по осям CX и LX, в среднем по зависимости:

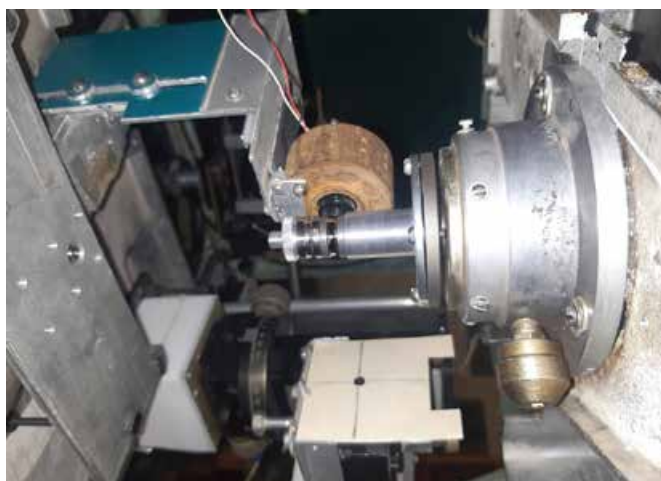
$$L=0,1I=Lf. \tag{5}$$

Датчик вихретокового типа показал более линейную зависимость, которая была представлена на рис. 5, однако пятно контакта достаточно расплывчато, необходимо проводить дальнейшее сужение пятна, которое характеризует площадку исследуемой детали. При работе с вихретоковым датчиком, о котором шла речь в первой части статьи, необходимо исследовать апертуру сигнала для уточнения места детали, с которой будут значения сниматься. Это очень важно, чтобы датчик «смотрел» не на расплывчатую часть детали, а только на точку диаметром не более 1 мм.

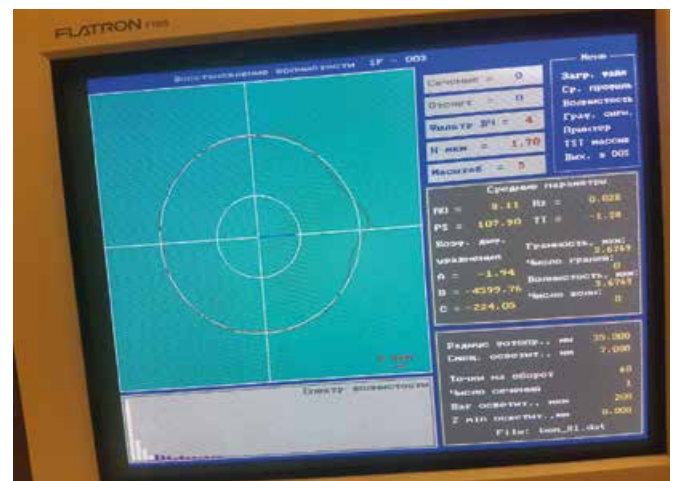
Таким образом, по результатам исследований можно сказать, что сдвоенный датчик был бы интересен универсальностью к различным типам материалов, для которых невозможно применение оптического и вихретокового датчиков по отдельности в силу отражающих факторов, особенностей плотности материалов.

На рис.14а представлен лазерный триангулятор конструкции Олега Александровича Заякина (ФИАН, г. Самара), который был создан из импортозамещенных материалов и отлично зарекомендовал себя в работе. В настоящее время данный прибор проходит дальнейшую модернизацию для увеличения производительности. Также уникальной является и программа, написанная для данного прибора и представленная на рис. 14б.

Автор выражает благодарность за помощь в проведении экспериментов к.т.н., с.н.с. В.Н.Белопухову, к.т.н., м.н.с. О.А.Заякину, сотрудникам Института проблем управления сложными системами РАН (ИПУСС РАН), г. Самара.



а)



б)

Рис. 14. Лазерный триангулятор и программа, написанная для этого прибора

ЛИТЕРАТУРА

- Гущина Е.А.**
Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. Е. А. Гущина, К. В. Епифанцев, Н. Ю. Ефремов. СПб: ГУАП, 2022. 104 с.
- Абрамов С.В.** Повышение информативной способности вихретоковых датчиков с различной магнитной проницаемостью. Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4 (10). С. 76–81.
- Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов И.Н.**
Выбор параметров импульсного питания одновиткового вихретокового датчика для обеспечения близкой чувствительности к частицам металла. Sensors & Systems. 2021. № 3.
- Игнатьев М.А., Березина Е.В., Игнатьев А.А.**
Анализ теории фракталов для применения в автоматизированной системе контроля качества поверхности подшипников // В сборнике: автоматизация и управление в машино- и приборостроении. Сборник научных трудов. Саратов, 2021. С. 56–60.
- Леун Е.В., Сысоев В.К., Шалай В.В., Беловолов М.И., Курлов В.Н., Волков П.В., Шулепов А.В.** Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий ракетно-космической промышленности // Контенант. 2018. Т. 17. № 1. С. 134–144.
- Иудин Д.И., Копосов Е.В.**
Фракталы: от простого к сложному / Нижегород. гос. арх.-строит. ун-т. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. 200 с. 11.
- Старченко Н.В.** Индекс фрактальности как анализ хаотических временных рядов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18, 01.01.03. М., 2005. 122 с.
- Мухаметзянов И.З., Майский Р.А., Янтудин М.Н.** Методические особенности применения стохастических показателей при анализе потоковых данных природных или технических процессов и объектов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2015. № 5. С. 446–492.
- Латыпова Н.В.** Компьютерная обработка данных. Фракталы: учеб. пособие. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 78 с.
- Латыпова Н.В.** Фрактальный анализ: учеб. пособие. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2020. 120 с.

XIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА СВЧ»

27 - 31 мая 2024

WWW.MWELECTRONICS.ETU.RU

РИЦ

Россия, Санкт-Петербург

Физические явления и материалы СВЧ электроники и микроэлектроники
 Пассивные элементы и устройства СВЧ электроники и микроэлектроники
 Приборы твердотельной СВЧ электроники и микроэлектроники
 Приборы вакуумной и плазменной СВЧ электроники и микроэлектроники
 Антенны и фазированные антенные решетки
 Измерения на СВЧ и междисциплинарные исследования
 Компонентная база силовой электроники
 Радиофотоника

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

- Широкий спектр оборудования предприятий-спонсоров!
- Проведение измерений параметров устройств участников конференции!
- Повышение квалификации «Перспективные направления развития электроники и микроэлектроники СВЧ» (80 ак. часов, удостоверение).

+7(812) 234-99-83
+7(812) 346-46-37
mwelectronics@etu.ru
IRVC.eltech@mail.ru