

Метод измерения дефектов формы лазерными сканирующими системами

К. Епифанцев, к.т.н.¹, О. Заякин, к.т.н.², Е. Фролова, д.т.н.³

УДК 744.42 | ВАК 2.2.4

Оптический датчик лазерного типа, имеющий предварительную систему преобразования, был использован как альтернатива контактного щупа на кругломере RoundTest RA-120p. Описывается ряд экспериментов, проведенных за несколько лет в Физическом институте Академии наук им. П.Н.Лебедева, в лаборатории «Цифровой метрологии» ФГАОУВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», в испытательной лаборатории АО «Бортовые аэронавигационные системы». Сделаны выводы по наиболее рационально собранным схемам лазерных установок, имеющих максимальный отклик и стабильность. Проведено сравнение результатов оптических и контактных измерений.

В условиях импортозамещения многие приборы нуждаются в замене наиболее изнашиваемых компонентов, таких как контактные щупы, подшипники, кронштейны и т. д. В современных условиях по причине увеличения производственных мощностей предприятий, такие элементы, как контактные щупы, изнашиваются более активно.

В настоящее время на кругломерах для организации контроля дефектов формы используются контактные щупы, которые из-за несовершенства поверхности детали могут изнашиваться, ломаться и терять первоначальную огранку. Кроме того, на ряд кругломеров – приборов для измерения дефектов формы, из-за санкций сложно приобрести контактные щупы зарубежного производства. Поэтому были приняты попытки разработать отечественный

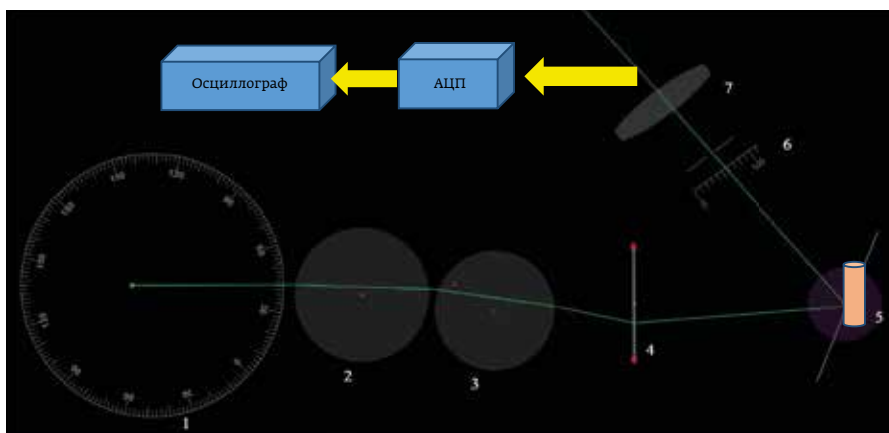


Рис. 1. Схема установки: 1 – лазер, 2 – поляризатор, 3 – светофильтр, 4 – цилиндрическая линза, 5 – деталь на поворотном слое со встроенным смещающимся микрометрическим винтом, 6 – объектив Гелиос, 7 – ПЗС-линейка

бесконтактный датчик для проведения измерения дефектов формы.

В исследованиях применяются элементы когерентной оптики, методы вывода информации после цифровой обработки сигналов, моделирование программных модулей для вывода данных на ПК.

Используя выходные данные с лазерного триангулятора, лазерного дальномера и ПЗС-линейки, провести измерение дефектов формы на деталях из различных материалов с помощью бесконтактного метода. Для этого необходимо решить ряд задач: разработать метод измерения дефекта формы лазерным датчиком с активным откликом

¹ ФГАОУВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», доцент, epifancew@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5705-0282, SPIN-код: 4218-3981.

² Самарский филиал ФГБНУ Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН), инженер.

³ ФГАОУВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», доцент.

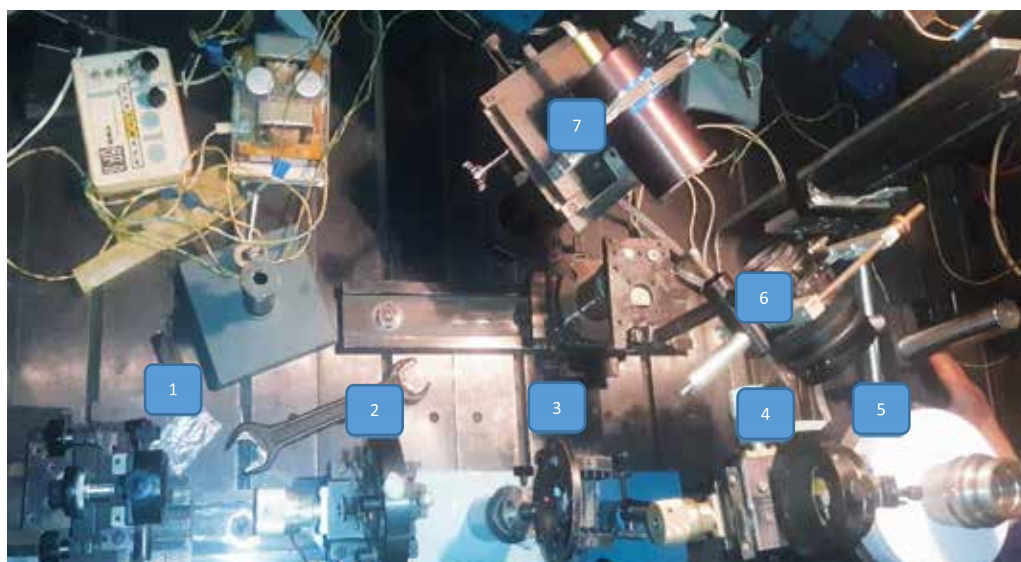


Рис. 2. Фото установки с включенным лазером:

1 – лазер,
2 – поляризатор,
3 – светофильтр,
4 – цилиндрическая линза, 5 – деталь,
6 – объектив Гелиос,
7 – ПЗС-линейка

на осциллограмме, выявить зависимость точности измерения от различных материалов детали, получить четкий перечень оборудования, пригодного для данных измерений, выявить соотношение между движением микрометрического винта и колебаниями осциллограммы.

В результате экспериментов сделаны выводы по наиболее рационально собранным схемам лазерных установок, имеющих максимальный отклик и стабильность. Сравнены результаты оптических измерений с контактными, разработан метод измерения дефекта формы лазерным датчиком с активным откликом на осциллограмме на ПЗС-линейке, лазерном интерферометре, лазерном дальномере, выявлена зависимость по вариации ФЧХ от различных материалов детали. Результаты могут применяться для создания отечественных бесконтактных датчиков для кругломеров, профилометров, 3D-сканеров и других приборов для бесконтактного измерения дефектов формы.

В исследовании [1, 2] описан процесс проектирования лазерного кругломера для исследования дефектов формы деталей приборных подшипников. Прибор основан на методе триангуляции. Данное исследование было взято за прототип для одного из основных датчиков будущей системы.

В ходе экспериментов в Самарском филиале Физического института Российской академии наук им. П. Н. Лебедева в 2023–2024 годах высоко-коллимированный луч, генерируемый диодным лазером DM8-650 (рис. 1, 2), с поперечной шириной 2×3 мм проходил через поляризатор и светофильтр для согласования мощности лазерного луча с чувствительностью фотоприемника, фокусировался цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 10 см на поверхность детали, образуя узкую световую вертикальную линию. Изображение

этой линии формировалось объективом ГЕЛИОС 40-2 с фокусным расстоянием 85 мм и относительным отверстием 1,5 мм на ПЗС-линейке K1200 ЦЛ-1 (апертура 15 мм, дискретность 15 мкм). Натурная модель установки представлена на рис. 2.

В результате проведения измерений было обеспечено четкое устойчивое положение осциллограммы в осциллографе. Максимум сигнала на осциллограмме перемещался влево или вправо при перемещении детали микрометрическим винтом, соответственно, вперед или назад, что позволяет говорить о применимости данного метода к определению дефекта формы.

Расчетная функция преобразования [2]:

$$h \cong \frac{a-f}{f \sin \vartheta} \times h, \quad (1)$$

где h – высота освещенной точки поверхности детали относительно нулевого уровня (то есть среднего положения освещенной точки по радиальному профилю);

h' – смещение максимума сигнала на ПЗС-линейке;

f – фокусное расстояние объектива;

a – расстояние от объектива до освещенной точки поверхности детали;

ϑ – угол триангуляции. Угол ϑ – это угол между двумя лучами, проведенными от освещенной точки поверхности детали. Причем один луч проведен к источнику излучения (лазеру), а второй – к фотоприемнику. Все величины в формуле имеют положительный знак.

Погрешность от нелинейности функции преобразования [2] при замене ее линейной аппроксимирующей функцией, приведенная к $h_{\max}$, имеет вид:

$$(\delta h)_{\max} \cong \frac{h_{\max} \cos \vartheta}{a}, \quad (2)$$

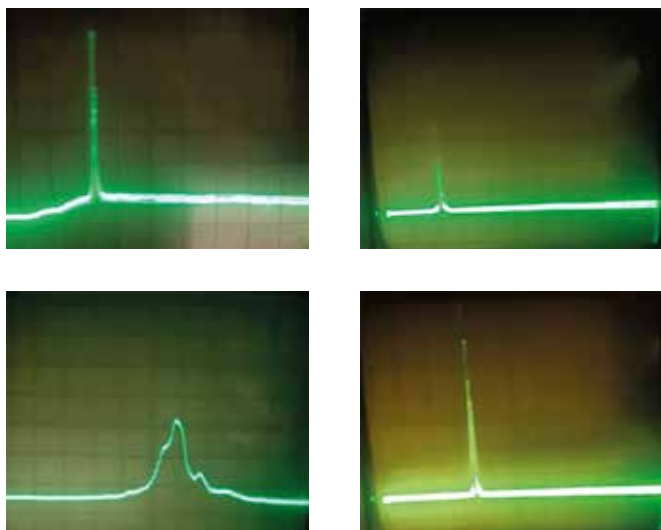


Рис. 3. Движение осциллограммы при микросмещении детали из дюралюминия. Всплески осциллограммы на двух верхних осциллограммах – в темноте, на двух нижних – при включенных люминесцентных лампах освещения

где h_{max} – максимальное отклонение радиального профиля от его среднего уровня.

По расчетам, основанным на лучевом приближении, нелинейность $(\Delta h)_{max}$ функции преобразования (при $a=230$ мм, $\vartheta=45^\circ$, $h_{max}=1$ мм) не превосходит 3 мкм, то есть смещение максимума сигнала в 5 раз меньше дискретности фотоприемника. Это – оценка систематической погрешности. На фото изображены натурные экспериментальные фото.

Результаты отклонения осциллограммы при постепенном движении детали из дюралюминия представлены на рис. 3, 4.

Далее аналогичный эксперимент был осуществлен с деталями из конструкционной стали и полиэтиленрефталата. Результаты представлены на рис. 5 и 6.

Аппроксимируя имеющиеся экспериментальные графики, получили, что суммарная погрешность на рис. 4 не превосходила 5 мкм, а на рис. 5 не превосходила 7 мкм. Это больше, чем расчетная систематическая погрешность (3 мкм). Остальная часть – случайная составляющая. Она удовлетворительно оценивается с помощью математического моделирования [2, 12], включающего в себя аппроксимацию сигнала одномерной гауссовой функцией, дискретность ее отчетов на ПЗС-линейке, представление белого шума добавлением к отсчетам функции суммы двух случайных величин, соответствующих его аддитивной и мультипликативной составляющим. Следует отметить, что часть экспериментов ранее была описана коллективом авторов [3].

Следующая серия экспериментов была проведена в АО «Бортовые аэронавигационные системы». На рис. 7 на анализаторе спектра Rohde показаны скачки осциллограммы, которые были зарегистрированы при микросмещении винта с установленной деталью. Деталь, представленная на рисунке, находилась в постоянном вращении. Использовался лазерный дальномер и поворотный стол с сервоприводом.

Результат измерения лазерным дальномером представлен на основе измерения ступенчатого вала из дюралюминия марки Д16Т на рис. 8. В верхней части графиков виден контур цилиндрической детали (помечено стрелкой).

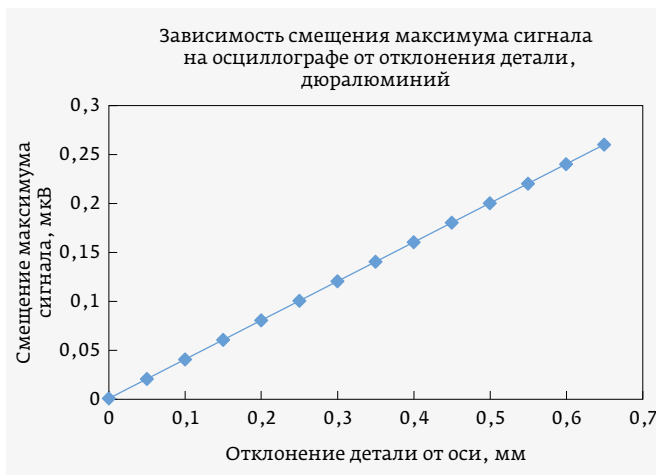


Рис. 4. График результатов экспериментов, дюралюминий. На осциллографе установлены микровольты

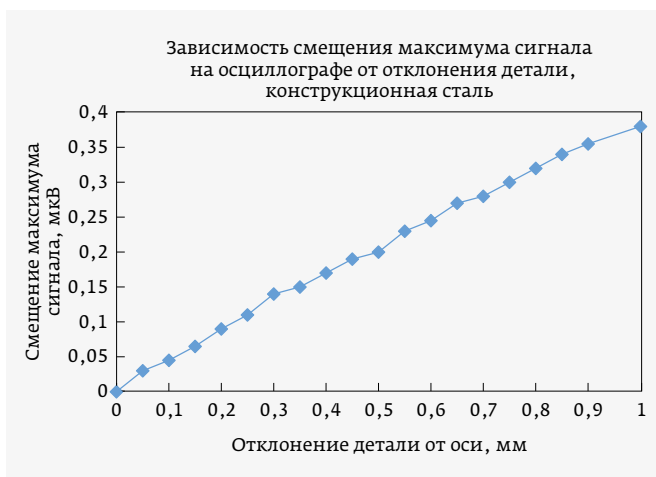


Рис. 5. Результаты экспериментов, конструкционная сталь



ТЕХНОЛОГИИ для микро- электроники

вакуумное напыление

плазмохимическое травление

дисковая резка и обработка

фотолитография

термические процессы

подготовка пластин

испытания

аналитика

измерения



**Разработка и производство
технологического оборудования**



**Поставка зарубежного оборудо-
вания и комплексных технологий**



**Разработка и внедрение совре-
менных технологий**



**Модернизация и сервисное
обслуживание технологического
оборудования**

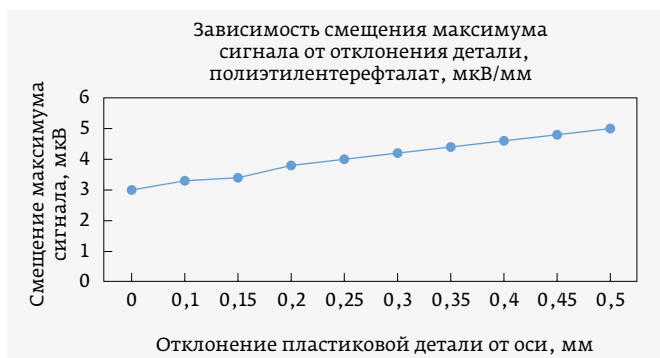


Рис. 6. Результаты экспериментов, полиэтилентерефталат

В исследовании [4] представлен следующий алгоритм обработки данных

$$x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3)$$

где n – число измеренных точек профиля изделия;

x_i, y_i – декартовы координаты измеренных точек профиля изделия;

r_i – радиусы измеренных точек профиля изделия.

В исследовании [5] представлена формула (4)

$$G = \int_0^{2\pi} (r_i - \rho) d\varphi. \quad (4)$$

В первую очередь определяют длину радиуса вектора эксцентриситета, а затем координаты (x, y) , при которых G_{min} принимает наименьшее значение. Центрирование осуществляют путем поиска координат (x, y) центра средней окружности из условия минимума функционала. Ниже представлен способ определения оси поперечного сечения изделия на основе максимума функционала [6]:

$$I = \int_0^{2\pi} \rho d\varphi. \quad (5)$$

В исследовании [7] цилиндр, исследуемый на кругломере, описывается тригонометрическим полиномом:

$$r = r_0 + e \times \cos(\varphi - \gamma) + \sum_{i=1}^p a_i \cos(i\varphi - \gamma_i), \quad (6)$$

где r_0 – радиус средней окружности;

e, γ – амплитуда и начальная фаза основной гармоники;

a_i, γ_i – амплитуда и начальная фаза гармоник изделия.

На рис. 9 представлена программа для считывания сигнала с лазерной установки, свидетельства о регистрации ЭВМ зарегистрированы по ней в виде четырех программ [8–11].

Программа в комплексе с преобразованием Фурье позволяет выводить на экран персонального компьютера результаты фильтрованного усредненного лазером сигнала о дефекте формы детали и выявлять его (речь идет о таких дефектах, как конусообразность, седлообразность, биение). Расстояние от точки нахождения лазера до детали определяется с помощью функции на ПК или с помощью осциллограммы на осциллографе. При создании программы использовался ряд функций Бесселя.

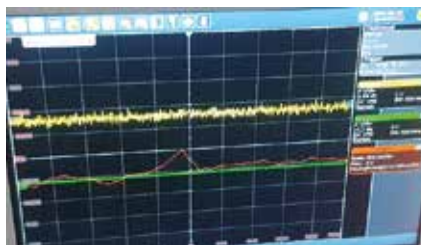
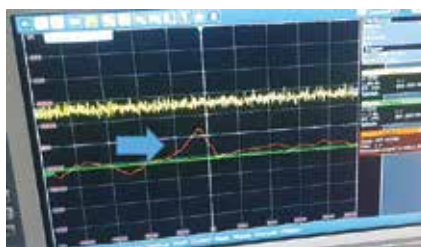
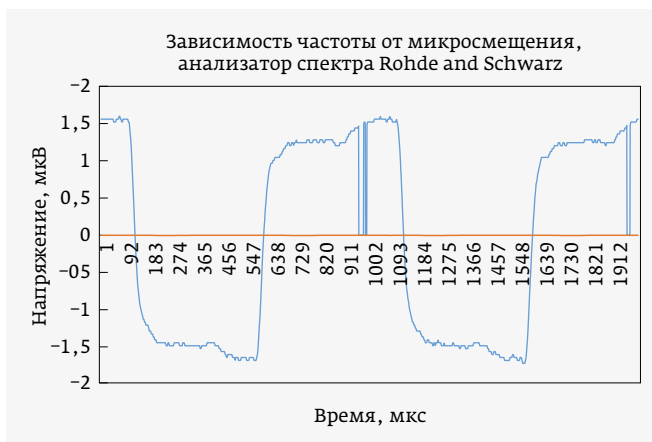
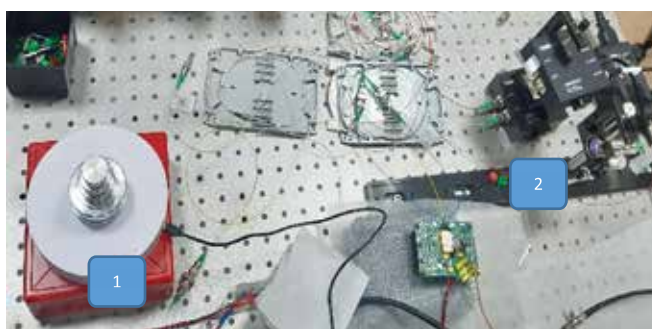


Рис. 7. Графические результаты после испытаний с дальномером лазерного типа (2 – дальномер, 1 – деталь на столе). Верхние фото – показывающая анализатора спектра до и после микросмещения детали



Г4-РТА12

Компания Новэл® – это один из ведущих отечественных производителей радиоизмерительных решений высшего измерительного класса. Наличие собственной высокотехнологичной производственной площадки, сертифицированной по ГОСТ Р ИСО 9001-2015, обеспечивает ответственный и качественный подход к реализации широкого спектра гражданских задач.

Представляем генераторы сигналов Г4-РНА2 (Госреестр СИ №92552-24) и Г4-РТА12 предназначенные для формирования непрерывных гармонических сигналов (Continuous Wave – CW) с возможностью свипирования по частоте. По областям применения эти генераторы закрывают все классические задачи по исследованию, настройке, контролю и испытаниям при производстве СВЧ-устройств и оборудования, используемых в радиосвязи, радиолокации, приборостроении и измерительной технике.

Также Г4-РНА2 и Г4-РТА12 имеют необходимый набор функций для:

- оценки эффективности защиты от утечки информации;
- измерения реального затухания сигнала;
- измерений паразитных излучений.

Первый портативный прибор серии Г4-РНА2 – это малогабаритный и экономичный генератор (Рис. 1), который будет полезен для выполнения измерительных задач в полевых условиях, благодаря возможности установки внутреннего аккумулятора (опция РНА-А1). Возможна работа в автономном режиме без внешней сети питания 220 В более 1 часа при выходном уровне +20 дБмВт.



Рис. 1.
Генератор сигналов Г4-РНА2 (Госреестр СИ №92552-24)

Г4-РНА2

Компактное исполнение Г4-РНА2 (размеры 261×174×111 мм) и малый вес позволят выполнять измерительные задачи в самых труднодоступных местах. С генератором Г4-РНА2 больше не придётся искать компромисс между портативностью и ВЧ-производительностью, ведь характеристики базовой модели могут быть улучшены путем установки аппаратных или программных опций. Удалённое управление осуществляется интерфейсом управления LAN и USB с внешнего персонального компьютера по универсальному протоколу SCPI.

Второй настольный генератор сигналов серии Г4-РТА12 сочетает в себе компактность и характеристики для решения основных задач, например:

- формирование сигнала в режиме немодулированных синусоидальных СВЧ колебаний с нормированными уровнем мощности и частотой выходного сигнала CW,
- качание частоты генерируемого колебания,
- импульсная модуляция (внешний вход).

Удаленное управление генератором сигналов Г4-РТА12 осуществляется интерфейсом управления LAN и USB с внешнего персонального компьютера по универсальному протоколу SCPI. Это позволяет использовать генератор в автоматизированных контрольно-измерительных комплексах.

Т.о. компания Новэл, обладая профессиональной командой специалистов и многолетним опытом разработки и производства, предлагает одни из самых сбалансированных решений в области генерации сигналов.



Рис. 2.
Генератор сигналов Г4-РТА12 (проходит испытания в целях утверждения типа средств измерений)

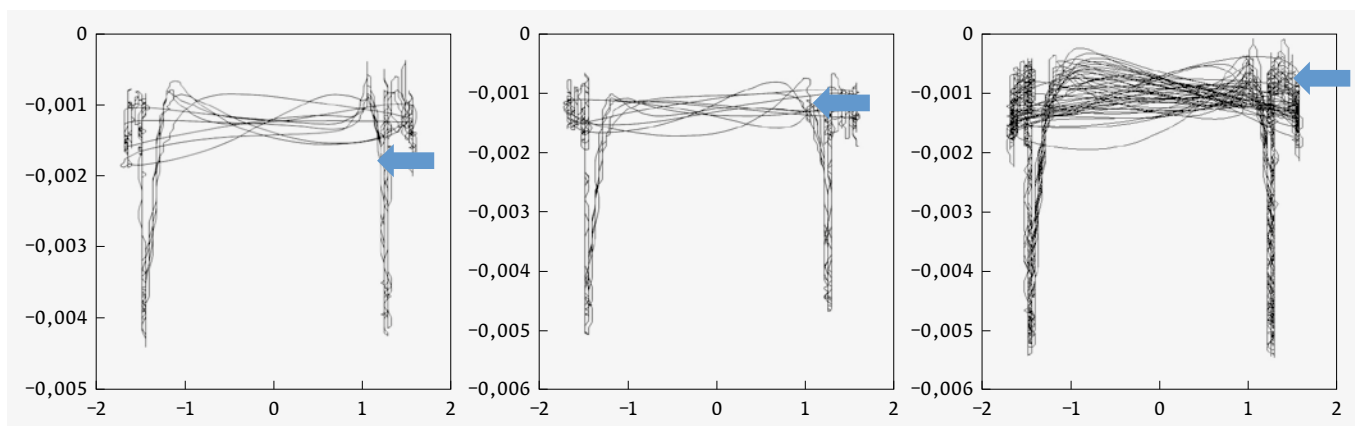


Рис. 8. Результаты обмера цилиндрической детали лазерным дальномером

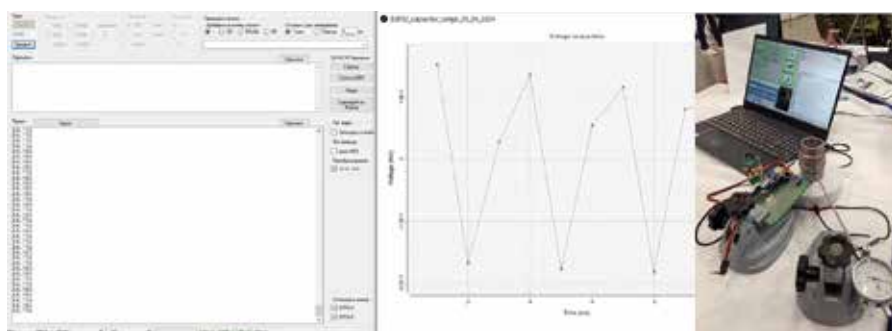


Рис. 9. Разработанная программа по считыванию отраженного лазерного сигнала

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гущина Е.А., Епифанцев К.В., Ефремов Н.Ю.** Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб: ГУАП, 2022. 104 с.
2. **Заякин О.А.** Триангуляционные измерения, вывод функции преобразования, основанный на матричной оптике // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 7. № 2–5. С. 974–977.
3. **Епифанцев К.В., Петров Г.А., Белоухов В.Н., Заякин О.А.** Исследование возможности применения одновиткового вихревого датчика для измерения дефектов формы // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3. № 1. С. 63–76.
4. **Spragg R.C.** Accurate calibration of surface texture and roundness measuring instruments // Proc. Instr. Mech. Engrs. 1967–1968. P. 32.
5. British Standard 3770:1964. Methods for the assessment of departures from roundness.
6. **Немировский А.С.** Центр и направление оси несимметричных сечений и их определение по круглограмме // Измерительная техника. 1971. № 11. С. 22–26.
7. **Авдулов А.Н.** Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1974. С.125.
8. Свидетельство регистрации государственной программы на ЭВМ № 2023612860 «Программа для визуализации и подсчета результатов измерения дефектов формы цилиндрических твердотельных деталей оптическими методами», К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08 февраля 2023 г.
9. Свидетельство регистрации государственной программы на ЭВМ № 2023616324 «Программа обработки сигналов оптических датчиков кругломеров с помощью преобразования Фурье для измерения дефектов формы цилиндрических твердотельных деталей», К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 24 марта 2023 г.
10. Свидетельство регистрации государственной программы на ЭВМ № 2023664436 «Программа обработки сигналов оптических датчиков кругломеров с помощью функции Бесселя для измерения дефектов формы, месторасположения и биения», К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05 июля 2023 г.
11. Свидетельство регистрации государственной программы на ЭВМ № 2024611413 «Программа для адаптации измерений дефектов формы при преобразовании частотных и емкостных параметров электрической цепи». К.В. Епифанцев, А.Э. Егоров. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22 января 2024 г.
12. **Заякин О.А., Белоухов В.Н., Манухин А.В.** Влияние шумов на погрешность измерений экспериментального лазерного кругломера // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4 (4). С. 715–719.



Компания «**ЛионТех-С**» предлагает решения для герметизации микросхем и дискретных компонентов методом литьевого прессования (transfer molding или молдинг).

Герметизация выполняется в системах прессования с применением специальных эпоксидных компаундов (**EMC - Epoxy Molding Compound**).

Мы предлагаем полуавтоматические и полностью автоматизированные системы литьевого прессования, которые могут быть использованы на средне- и крупносерийных производствах микроэлектроники.

Оборудование предназначено для герметизации компонентов как на выводных рамках, так и на органических подложках типа FCBGA/FCCSP.

В дополнение к системам литьевого прессования мы рады предложить автоматическое оборудование для вырубки и формовки выводов.



LIONTECH.RU

8 800 555 68 89