

# Автоматизация и калибровка мультиплексной системы датчиков измерения дефектов формы

К. Епифанцев, к. т. н.<sup>1</sup>, О. Куркова, д.т.н.<sup>2</sup>

УДК 620.1.08 | ВАК 2.2.4

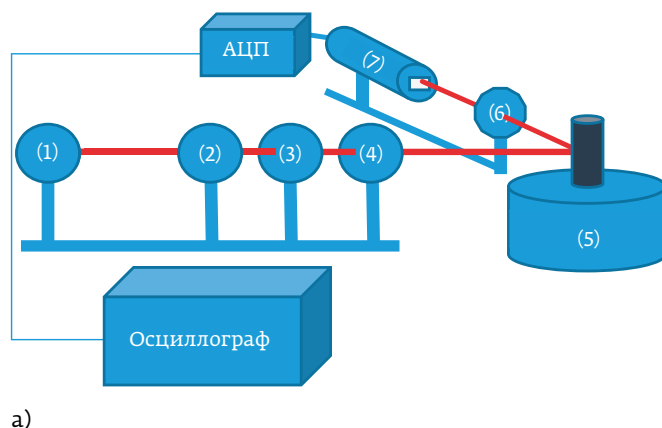
В современных условиях импортозамещение приобретает особую значимость, особенно в отношении быстроизнашивающихся запасных частей (ЗИП) приборов. Оперативность замены этих компонентов напрямую влияет на работоспособность установок. В статье рассматривается возможность замещения контактного датчика кругломера Roundtest RA-120P на бесконтактные датчики. Особое внимание уделяется потенциальной автоматизации измерений, которая становится возможной в результате этой замены.

Эффективность автоматизации измерений во многом определяется тем, насколько автоматизированы такие операции, как калибровка и юстировка. В процессе выполнения данных операций, которые отличаются высокой трудоемкостью, производится оценка методической погрешности и определяются значения аддитивных и мультипликативных поправок.

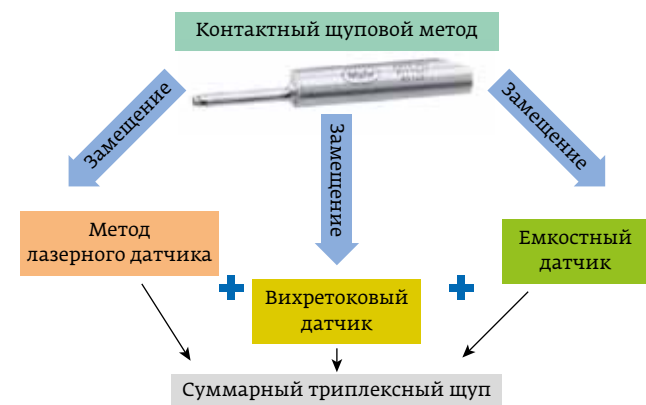
В качестве экспериментального прибора был рассмотрен кругломер Roundtest RA-120P [1]. В настоящее время контактный щуп кругломера (рис. 1) вынуждает использовать ручной труд при калибровке и тратить до 7 мин на одну деталь. Актуальность настоящего исследования заключается не только в необходимости решения проблемы импортозамещения, но и в важности увеличения производительности за счет уменьшения времени, затраченного на калибровку в процессе центрирования-выравнивания детали.

В работе [2] описана физическая и математическая модель экспериментального лазерного кругломера для выявления дефектов формы дорожек качения подшипников, применяемых в авиации. Результаты данного исследования послужили основой для разработки будущей лазерной системы.

При проведении экспериментов в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН в 2023–2024 годах была использована ПЗС-линейка K1200ЦЛ-1, на которую падал прошедший через объектив Гелиос 40-2 с фокусным



а)

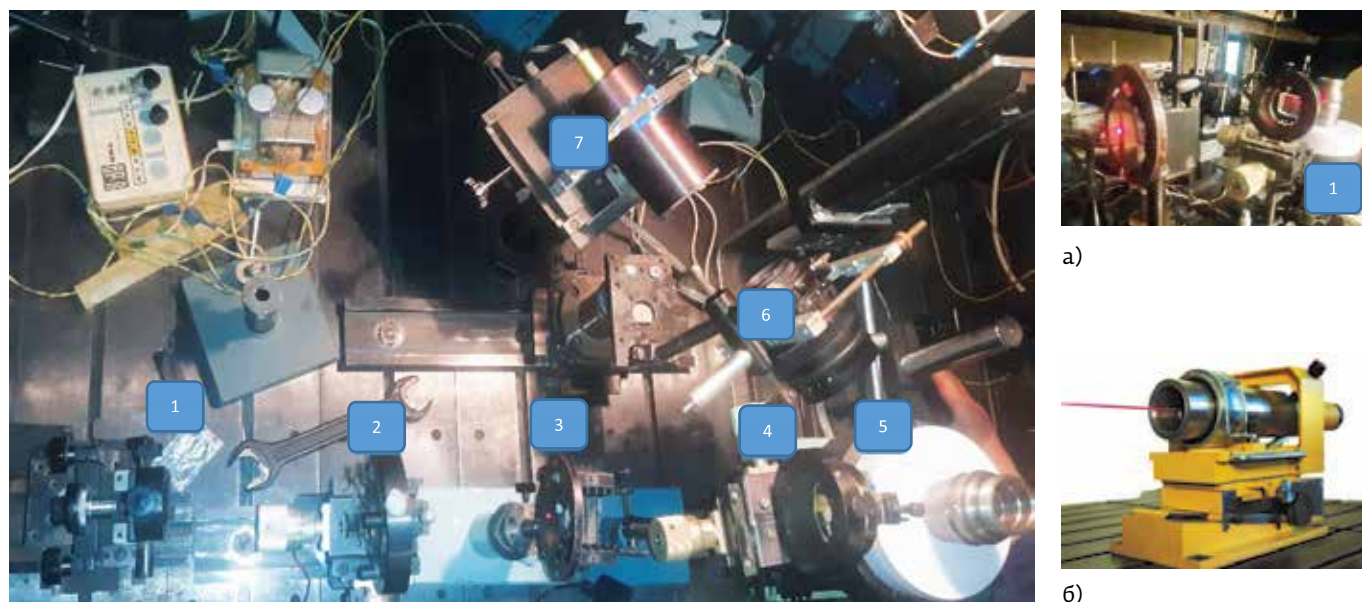


б)

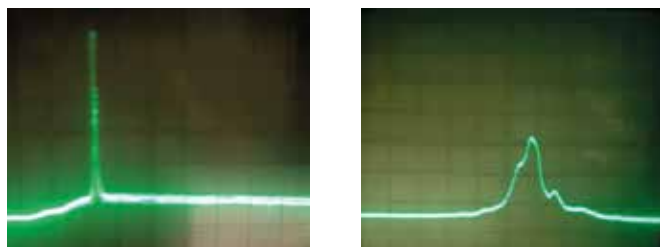
**Рис. 1.** а – схема установки: 1 – лазер ДМ-8-650, 2 – поляризатор, 3 – затемнитель, 4 – цилиндрическая линза, 5 – деталь, 6 – объектив Гелиос, 7 – ПЗС-линейка K1200ЦЛ-1; б – принцип импортозамещения контактных щупов по авторскому методу

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент, epifancew@gmail.com.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор.



**Рис. 2.** а – фото установки с включенным лазером: 1 – лазер ДМ-8-650, 2 – поляризатор, 3 – затемнитель, 4 – цилиндрическая линза, 5 – деталь, 6 – объектив Гелиос, 7 – ПЗС-линейка К1200ЦЛ-1; б) прототип установки «Лазерная струна» разработки АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»



**Рис. 3.** Изменение вида осциллограммы при микросмещении детали

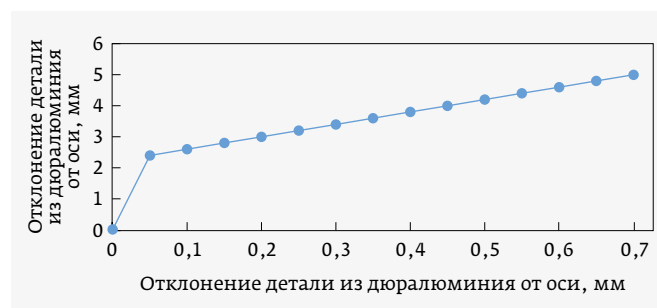
расстоянием 85 мм луч, генерируемый диодным лазером ДМ-8-650 (рис. 1–2).

В результате проведения измерений было обеспечено четкое устойчивое положение осциллограммы на экране осциллографа. Осциллограмма перемещалась влево или вправо при перемещении детали с помощью микрометрического винта, что позволяет говорить о применимости данного метода к определению дефекта формы. В настоящей работе представлены натурные экспериментальные фото.

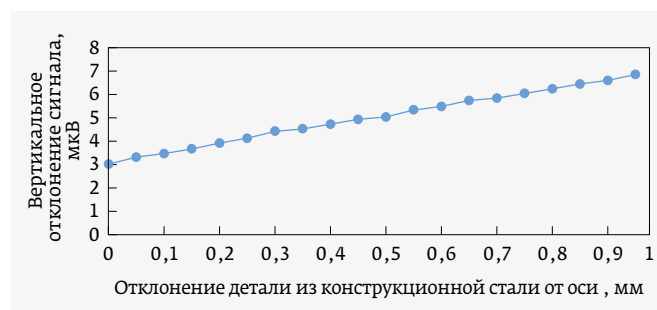
На рис.3–4 представлены изменения осциллограммы при постепенном движении детали из дюралюминия.

Аналогичный эксперимент был осуществлен с конструкционной сталью, результаты которого показаны на рис. 5.

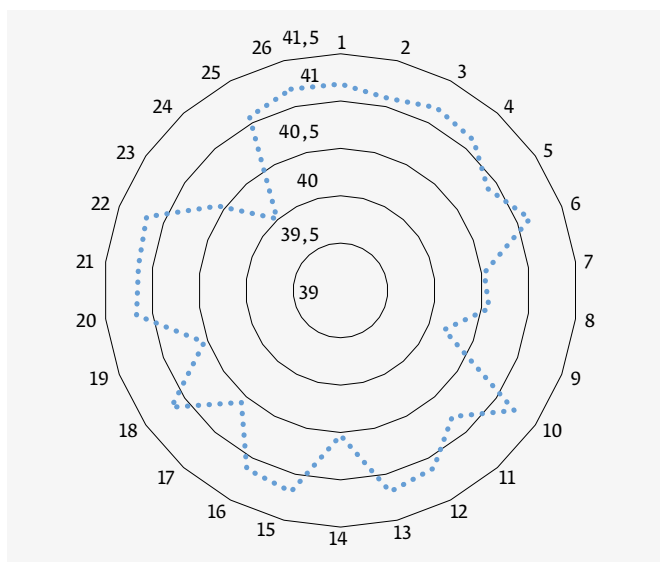
В [3] исследовался вопрос применения вихретокового датчика для контроля дефектов формы (рис. 6), также в данной работе была выявлена зависимость индуктивности датчика от величины воздушного зазора.



**Рис. 4.** График зависимости вертикального отклонения сигнала осциллографа от отклонения детали от оси, полученный экспериментально для детали из дюралюминия на лазерной установке



**Рис. 5.** График зависимости вертикального отклонения сигнала осциллографа от отклонения детали от оси, полученный экспериментально для детали из стали



**Рис. 6.** График зависимости индуктивности от отклонения детали от круглости, полученный экспериментально для детали из дюралюминия на вихретоковом датчике (деталь при этом вращается, по круговой оси – отсчет поворота детали, по вертикальной – мкГн)

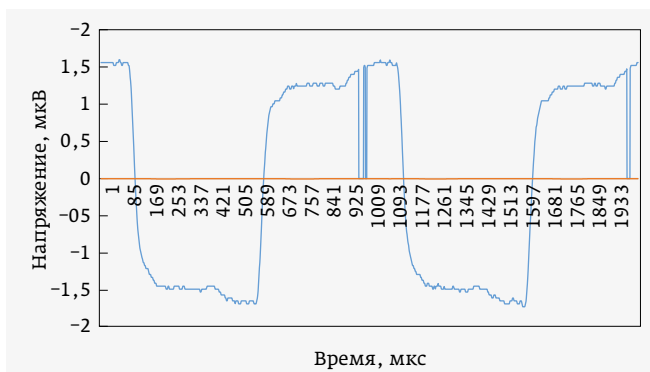
Следующая серия экспериментов была проведена в АО «Бортовые аэронавигационные системы». С помощью анализатора спектра Rohde & Schwarz (рис. 7) были выявлены экстремумы сигнала, которые были зарегистрированы при движении микрометрического винта с установленной деталью. Деталь, представленная на рисунке ниже, находилась в постоянном вращении. Использовался лазерный дальномер и поворотный стол с сервоприводом.

Результаты измерения профиля поверхности ступенчатого вала из дюралюминия марки Д16Т, полученные с помощью лазерного дальномера, показаны на рис. 8. Полученные графики отображают данные сканирования лазером поверхности вращающейся детали, в верхней части каждого графика виден контур цилиндрической детали, если отбросить нижние края (помечено стрелкой).

Третий ряд экспериментов был проведен также в АО «Бортовые аэронавигационные системы» с помощью экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 9, а также с использованием интерферометра Майкельсона. В отличие от предыдущих опытов, где использовались кругломер и ПЗС-линейка, в данном случае был применен коллиматор.

Приведенная оптическая схема соответствует случаю приема излучения на матричный фотоприемник. Изменение взаимного расположения 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 плечо которого поступает опорное излучение от лазерного источника, а во второе – излучение, прошедшее измерительный тракт. В схеме использован оптоволоконный коллиматор Thorlabs F810APC-I550 и волоконно-оптические компоненты LightComm. В качестве фотоприемника использован балансный детектор Thorlabs PDB 425C-AC.



а)

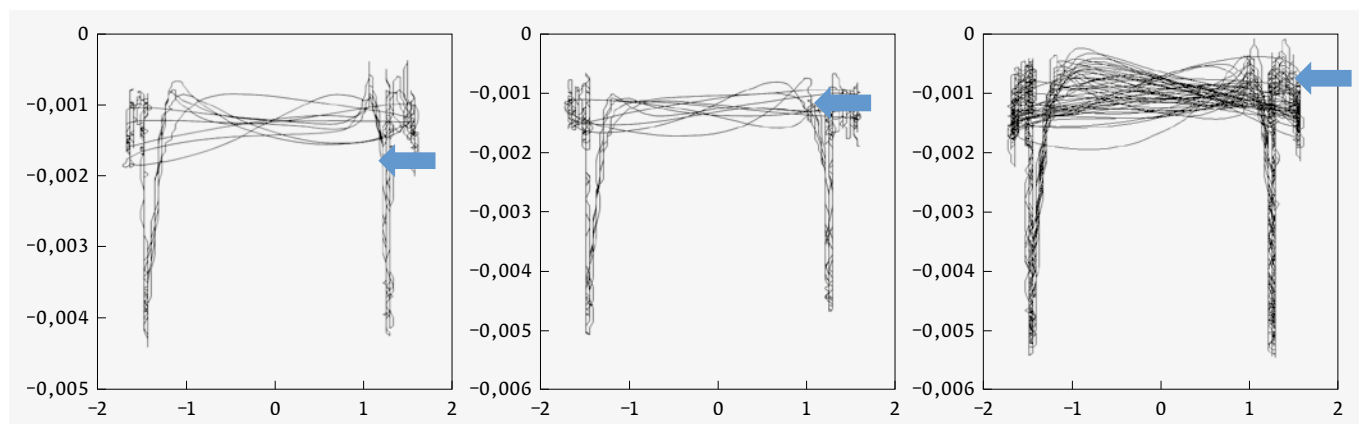


б)



в)

**Рис. 7.** Результаты испытаний с использованием дальномера лазерного типа: а – измерение дефекта формы детали из дюралюминия на анализаторе спектра за несколько секунд; б – показания анализатора спектра до и после микросмещения детали; в – фото экспериментальной установки: 1 – деталь на столе, 2 – дальномер



**Рис. 8.** Результаты обмера цилиндрической детали лазерным дальномером (по оси X – отклонения в мкм, 0 – центр детали, по оси Y – амплитуда получаемой волны)

На рис. 10в представлены осциллограммы, которые были зарегистрированы при микросмещении винта и приближении линзы к лазеру. Такие сигналы используются при анализе смещения поверхности детали, закрепленной на кругломере Roundtest RA-120P.

По осциллограмме на рис. 10в было замечено, что изменение положения детали в пространстве с помощью микрометрического винта дает вертикальное перемещение осциллограммы на 190–200 мВ (смещение обозначено синей стрелкой).

Калибровка в разработанной системе имеет решающее значение. Необходимо в данном случае применять либо индикатор часового типа ИЧ-50 (рис. 11а), либо цифровой глубиномер, закрепленный в штативе (рис. 12).

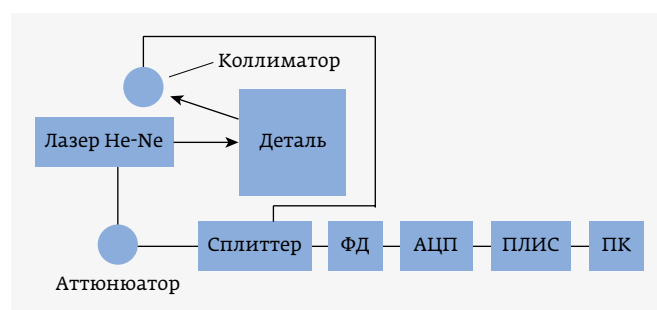
В работе [4] представлен способ определения средней окружности профиля на основе метода наименьших квадратов. Координаты центра  $(x_0, y_0)$  и радиус  $R_0$  средней окружности профиля рассчитывают по формулам

$$x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i; y_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i; R_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число измеренных точек профиля изделия;  $x_i, y_i$  – декартовы координаты измеренных точек профиля изделия;  $r_i$  – радиусы измеренных точек профиля изделия. Недостаток данного метода заключается в низкой точности определения радиуса средней окружности профиля, зависящей от точности предварительного центрирования изделия перед измерением.

Известен другой способ определения параметров средней окружности профиля, применяемый для центрирования при измерении на кругломерах [5]. Координаты центра средней окружности вычисляют из условия минимума функционала

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



**Рис. 9.** Волоконно-оптическая схема измерительного тракта

где  $\varphi$  – полярный угол точки профиля. Вначале определяют радиус  $\rho$  эксцентриситета средней окружности, а затем координаты ее центра  $(x_0, y_0)$ , при которых  $G_{min}$  принимает наименьшее значение.

В [6] представлен способ определения оси поперечного сечения изделия на основе максимума функционала

$$I = \int_0^{2\pi} \rho d\varphi. \quad (3)$$

В работе [7] цилиндр, исследуемый на кругломере, описывают тригонометрическим полиномом:

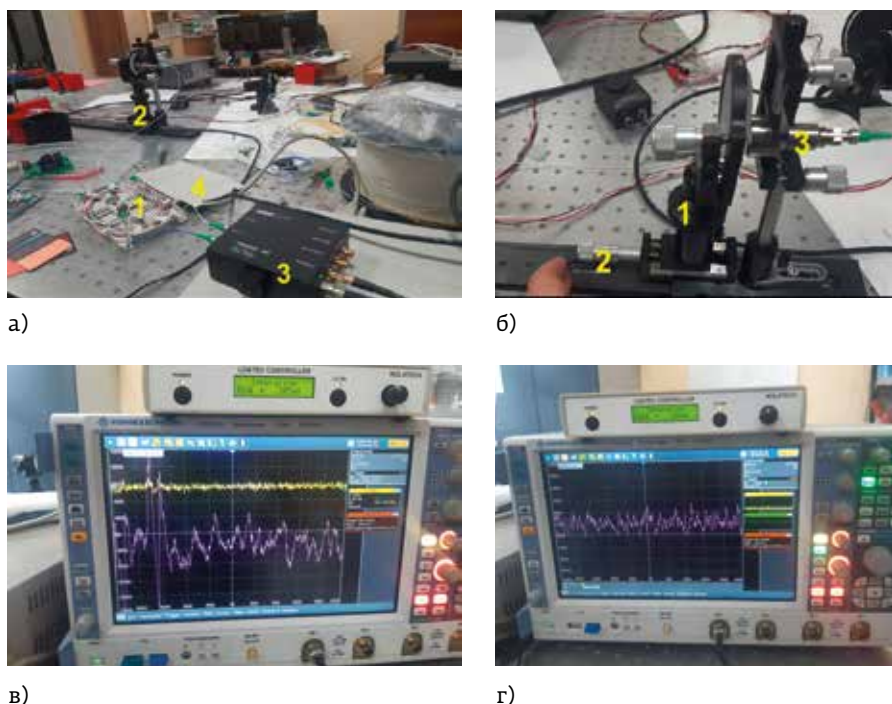
$$r = r_0 + e \cdot \cos(\varphi - \gamma) + \sum_{i=1}^p a_i \cos(i\varphi - \gamma_i), \quad (4)$$

где  $r_0$  – радиус средней окружности;  $e, \gamma$  – амплитуда и начальная фаза основной гармоники;  $a_i, \gamma_i$  – амплитуда и начальная фаза гармоник изделия.

## ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ оригинального прибора и разработанной версии с оптическим датчиком позволил выявить ряд соотношений.





**Рис. 10.** а – схема установки: 1, 4 – волоконно-оптический тракт, 2 – микрометрический винт с установленным коллиматором, 3 – фотоприемник; б – схема установки: 1 – стойка с отражателем, 2 – микрометрический винт, 3 – коллиматор; в – показания осциллографа Rohde & Schwarz при смещении микрометрического винта на 0,05 мкм; г – показания осциллографа Rohde & Schwarz до смещения микрометрического винта на 0,05 мкм

Датчик вихретокового типа показал экспоненциальную зависимость индуктивности от величины зазора вида

$$Y = 43,777e^{0,0065x}. \quad (5)$$

Зависимость по емкостному щупу – логарифмическая:

$$Y = -1,897 \ln(x) + 9,3116. \quad (6)$$

Таким образом из [2] (рис. 13) был взят прототип, который был видоизменен (рис. 2а) и продолжает дорабатываться. Основным элементом, упрощающим и удешевляющим прибор – купленный поворотный стол (позиция 5 на рис. 2а). Данный стол имеет настройку угла поворота, периода и скорости вращения, а также бюджетную стоимость, что в целом удешевляет установку. Для улучшения фильтрации полученных данных необходимо применять кинематические уравнения и дополнять их динамическими уравнениями вращательного движения твердого тела в системе координат, связанной с телом, центр которой находится в центре инерции тела:

$$T \frac{d\omega}{dt} + \omega \times T \omega = M, \quad (6)$$

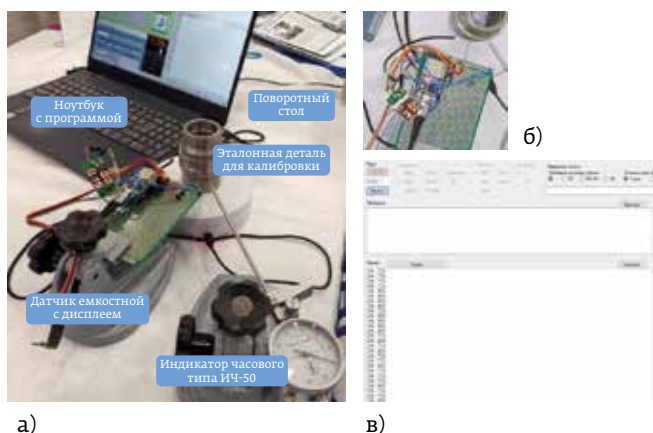
где  $T$  – тензор инерции твердого тела,  $\omega$  – вектор угловой скорости,  $M$  – момент внешних сил, приложенных к телу.

Разработанная установка в сочетании с описанной методикой будут представлять собой мультиметрическую систему, состоящую из ряда моделей, описанных на рис.14.

Научная новизна проведенных исследований заключается в разработке программных продуктов для визуализации данных систем преобразования сигналов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками, а также в создании автоматической программной модели управления этими системами.

Практическая значимость установленных зависимостей состоит в том, что на их основе может быть организована процедура создания программных модулей для работы с приборами данного типа и формирования корректных метрологических отчетов в рамках контроля партии деталей.

Теоретическая значимость разработанной методики подготовки и проведения контроля проявляется в формировании новой концепции для разработки



**Рис. 11.** а – кругломер с калибровочным эталонным образцом, параллельно подключенным индикатором ИЧ-50 и емкостным щупом с электронным дисплеем; б – увеличенный вид установки; в – показания электронного считывающего АЦП на компьютере



Рис. 12. Калибровка емкостного щупа с помощью цифрового глубиномера

алгоритмов программ, с помощью которой можно оптимизировать управление информационными ресурсами и эффективно систематизировать процесс получения и анализа статистических данных измерений.

## 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., Манухин А. В., Ростов А. А.** Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной
3. **Епифанцев К. В.** Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / Г. А. Петров, В. Н. Белопухов, О. А. Заякин // 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.

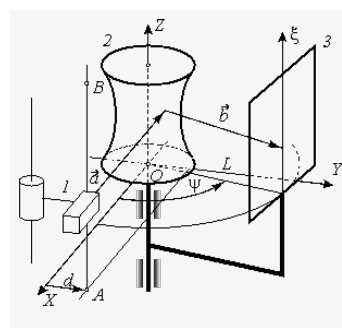


Рис. 13. Кинематическая схема прибора [2]

погрешности // Известия Самар. науч. центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 6. С. 184–188.

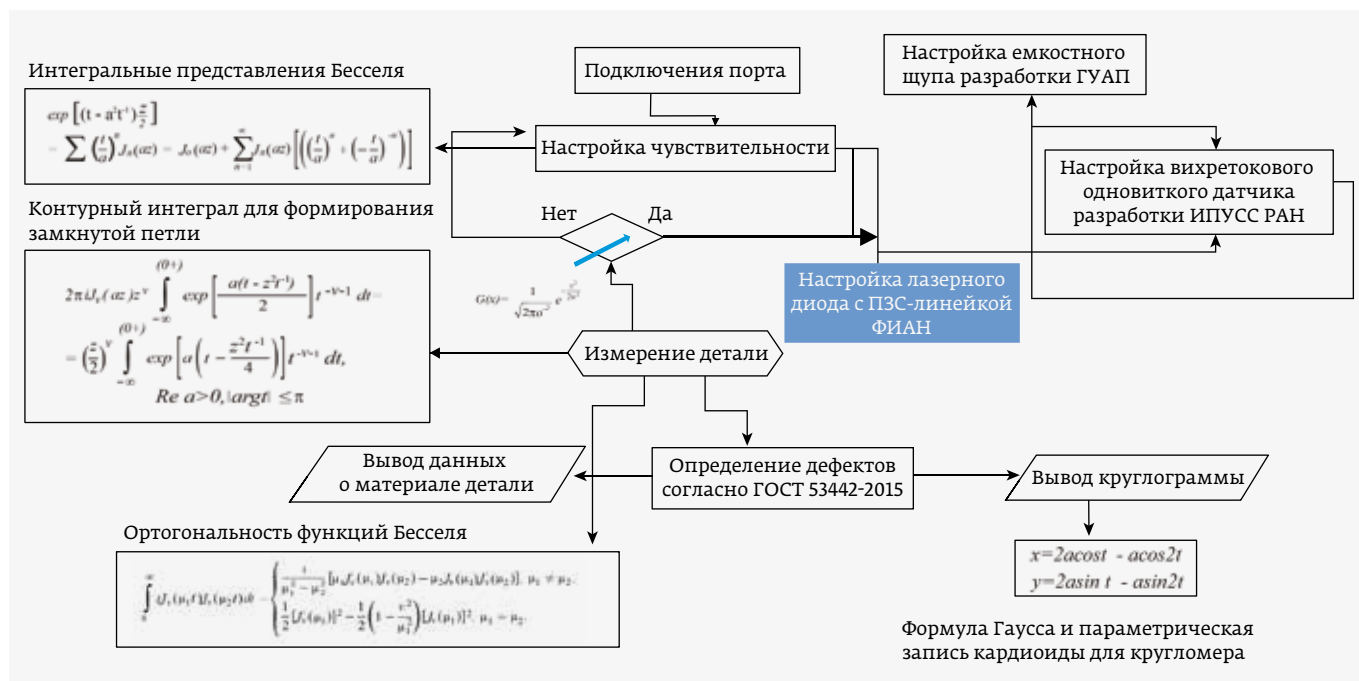


Рис. 14. Модель и компоненты разработанной мультиплексной системы