

Автоматизация и калибровка мультиплексной системы датчиков измерения дефектов формы

К. Епифанцев, к. т. н.¹, О. Куркова, д.т.н.²

УДК 620.1.08 | ВАК 2.2.4

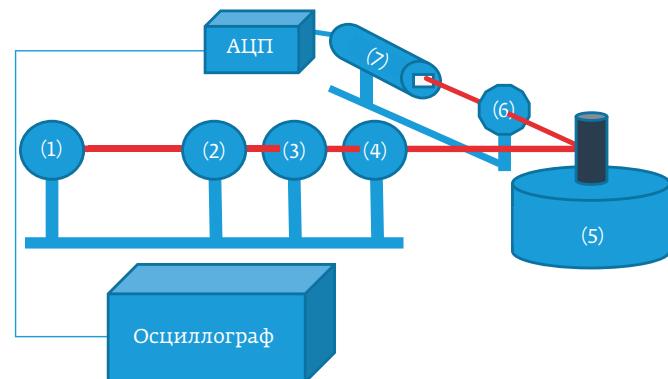
В современных условиях импортозамещение приобретает особую значимость, особенно в отношении быстроизнашивающихся запасных частей (ЗИП) приборов. Оперативность замены этих компонентов напрямую влияет на работоспособность установок. В статье рассматривается возможность замещения контактного датчика кругломера 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 мультиплексивных 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)

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент, epifancew@gmail.com.

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор.

Рис. 1. а — схема установки: 1 — лазер DM-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

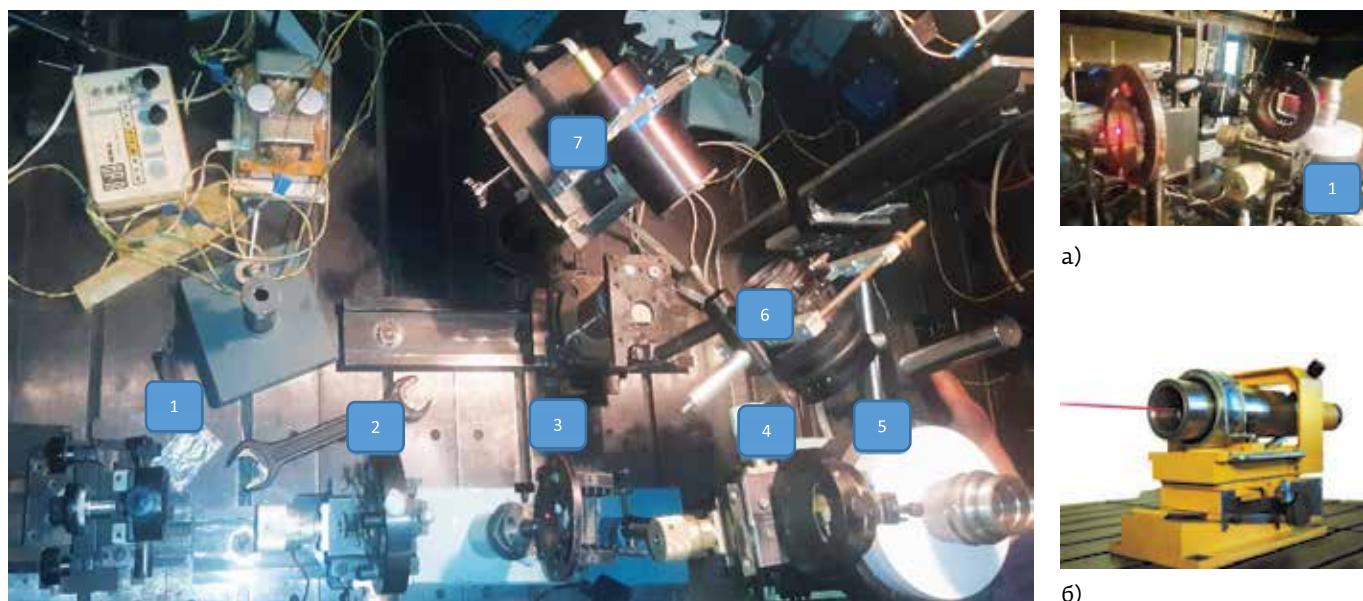


Рис. 2. а - фото установки с включенным лазером: 1 - лазер ДМ-8-650, 2 - поляризатор, 3 - затемнитель, 4 - цилиндрическая линза, 5 - деталь, 6 - объектив Гелиос, 7 - ПЗС-линейка К1200CL-1; б - прототип установки «Лазерная струна» разработки АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»

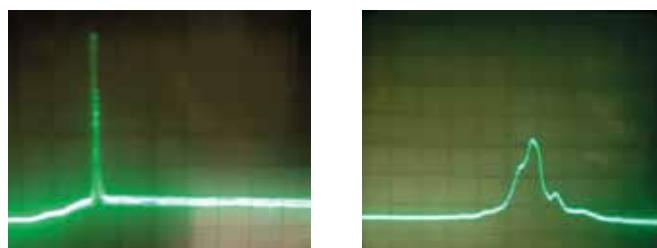


Рис. 3. Изменение вида осциллограммы при микросмещении детали

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 вихревокового датчика для контроля дефектов формы (рис. 6), также в данной работе была выявлена зависимость индуктивности датчика от величины воздушного зазора.

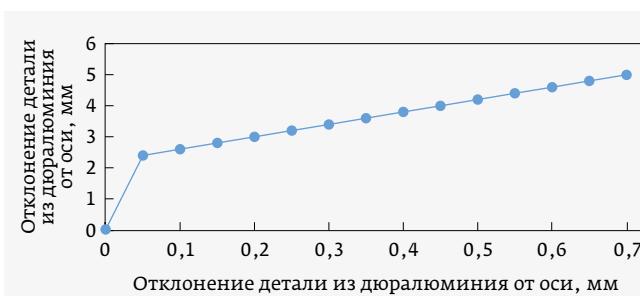


Рис. 4. График зависимости вертикального отклонения сигнала осциллографа от отклонения детали от оси, полученный экспериментально для детали из дюралюминия на лазерной установке

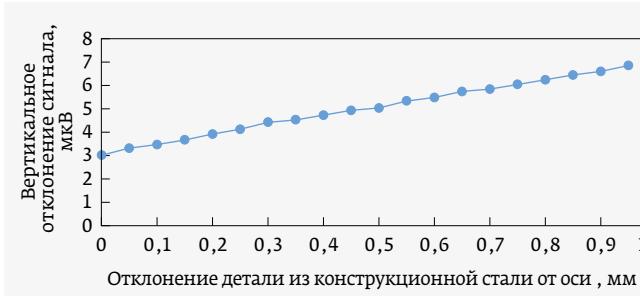


Рис. 5. График зависимости вертикального отклонения сигнала осциллографа от отклонения детали от оси, полученный экспериментально для детали из стали

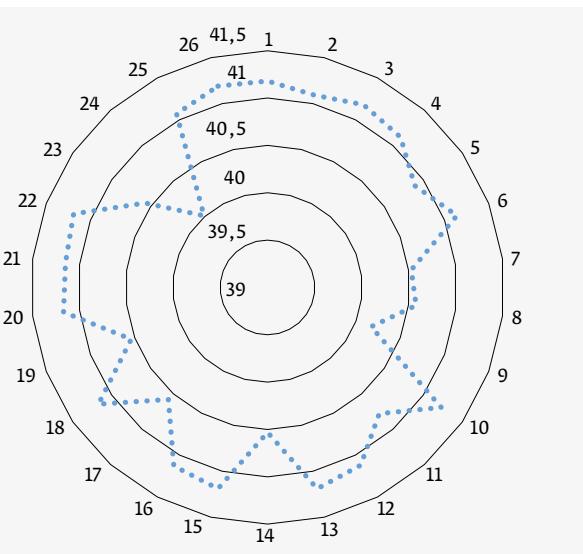


Рис. 6. График зависимости индуктивности от отклонения детали от круглости, полученный экспериментально для детали из дюралюминия на вихревоковом датчике (деталь при этом вращается, по круговой оси – отсчет поворота детали, по вертикальной – мкГн)

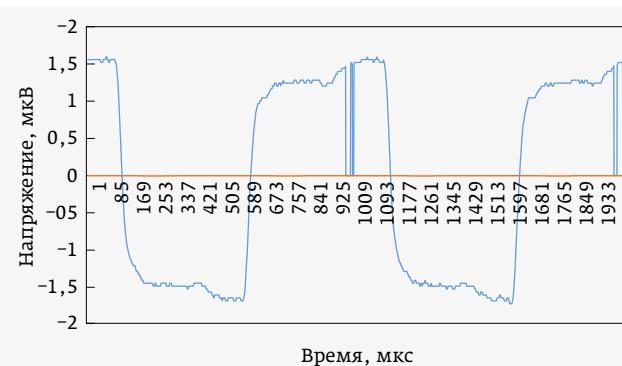
Следующая серия экспериментов была проведена в АО «Бортовые аэронавигационные системы». С помощью анализатора спектра Rohde & Schwarz (рис. 7) были выявлены экстремумы сигнала, которые были зарегистрированы при движении микрометрического винта с установленной деталью. Деталь, представленная на рисунке 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-1550 и волоконно-оптические компоненты LightComm. В качестве фотоприемника использован балансный детектор Thorlabs PDB 425C-AC.



а)

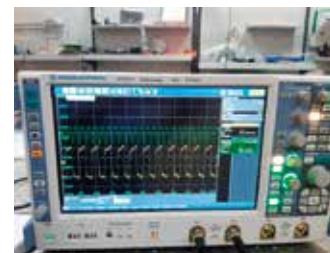
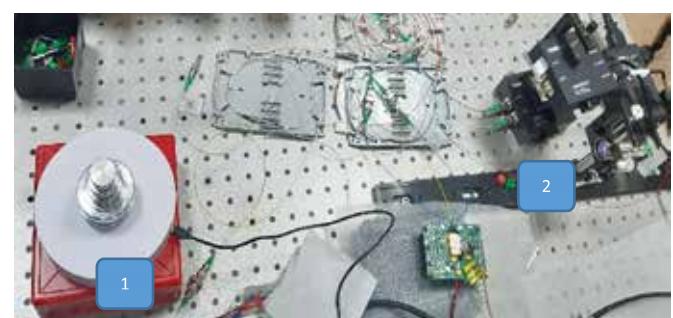


Рис. 7. Результаты испытаний с использованием дальномера лазерного типа: а – измерение дефекта формы детали из дюралюминия на анализаторе спектра за несколько секунд; б – показания анализатора спектра до и после микросмещения детали; в – фото экспериментальной установки: 1 – деталь на столе, 2 – дальномер

б)



в)

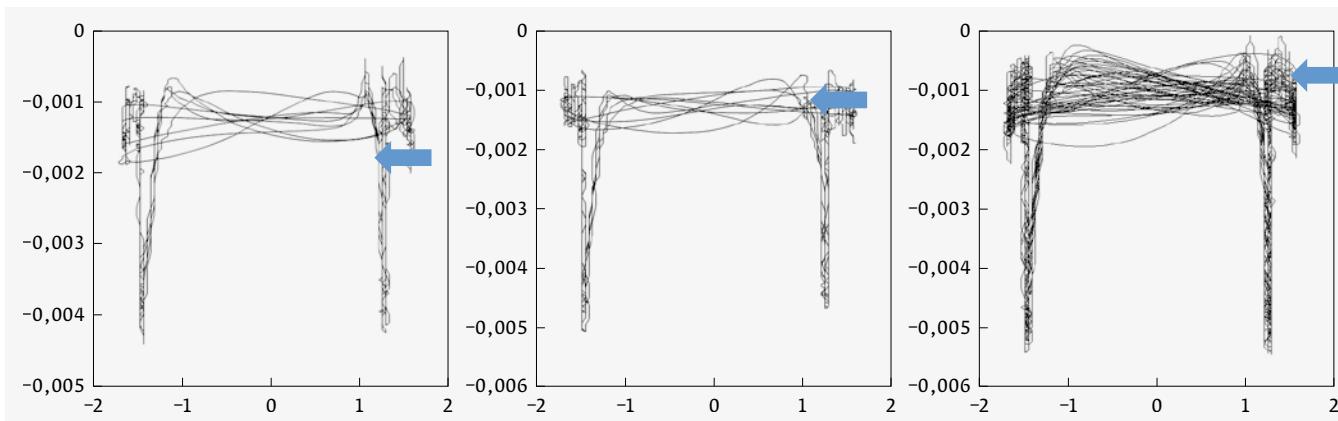


Рис. 8. Результаты обмера цилиндрической детали лазерным дальномером (по оси X – отклонения в мкм, 0 – центр детали, по оси Y – амплитуда получаемой волны)

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 – декартовые 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

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

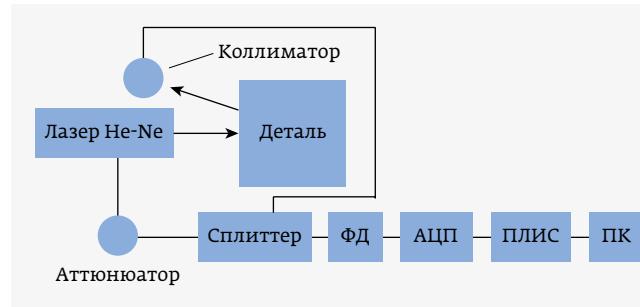


Рис. 9. Волоконно-оптическая схема измерительного тракта

где φ – полярный угол точки профиля. Вначале определяют радиус ρ 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:

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

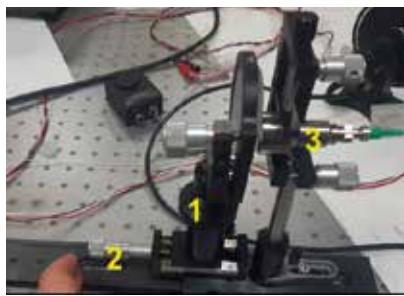
где r_0 – радиус средней окружности; e, γ – амплитуда и начальная фаза основной гармоники; a_i, γ_i – амплитуда и начальная фаза гармоник изделия.

ВЫВОДЫ

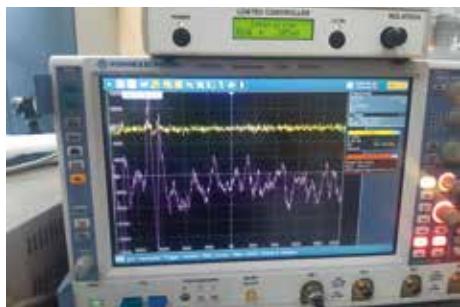
Сравнительный анализ оригинального прибора и разработанной версии с оптическим датчиком позволил выявить ряд соотношений.



а)



б)



в)



г)

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 вихревого 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. Основной элемент, упрощающий и удешевляющий 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, ω – вектор угловой скорости, M – момент внешних сил, приложенных к телу.

Разработанная установка в сочетании с описанной методикой будут представлять собой мультиплексную 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

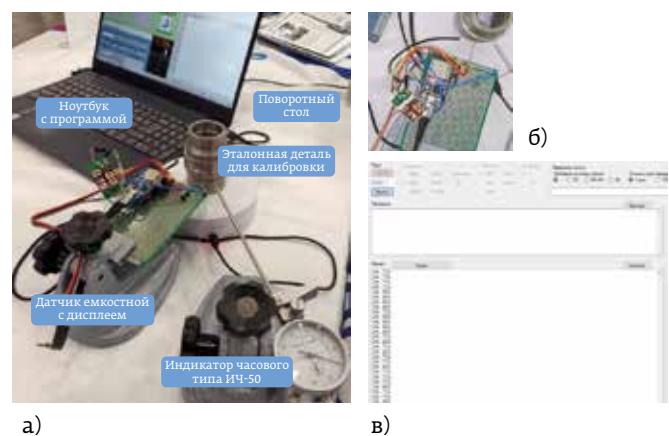


Рис. 11. а – кругломер с калибровочным эталонным образцом, параллельно подключенным индикатором ИЧ-50 и емкостным щупом с электронным дисплеем; б – увеличенный вид установки; в – показания электронного считывающего АЦП на компьютере



Рис. 12. Калибровка емкостного щупа с помощью цифрового глубинометра

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

ЛИТЕРАТУРА

- Гущина Е. А., Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю. Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб: ГУАП, 2022. 104 с.
- Заякин О. А., Манухин А. В., Ростов А. А. Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной

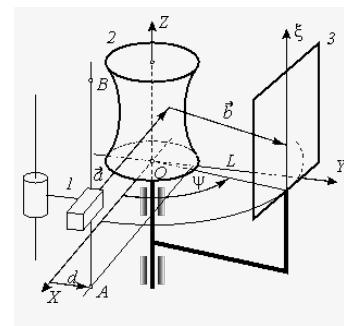


Рис. 13. Кинематическая схема прибора [2]

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

3. Епифанцев К. В. Исследование возможности применения одновиткового вихревого 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.

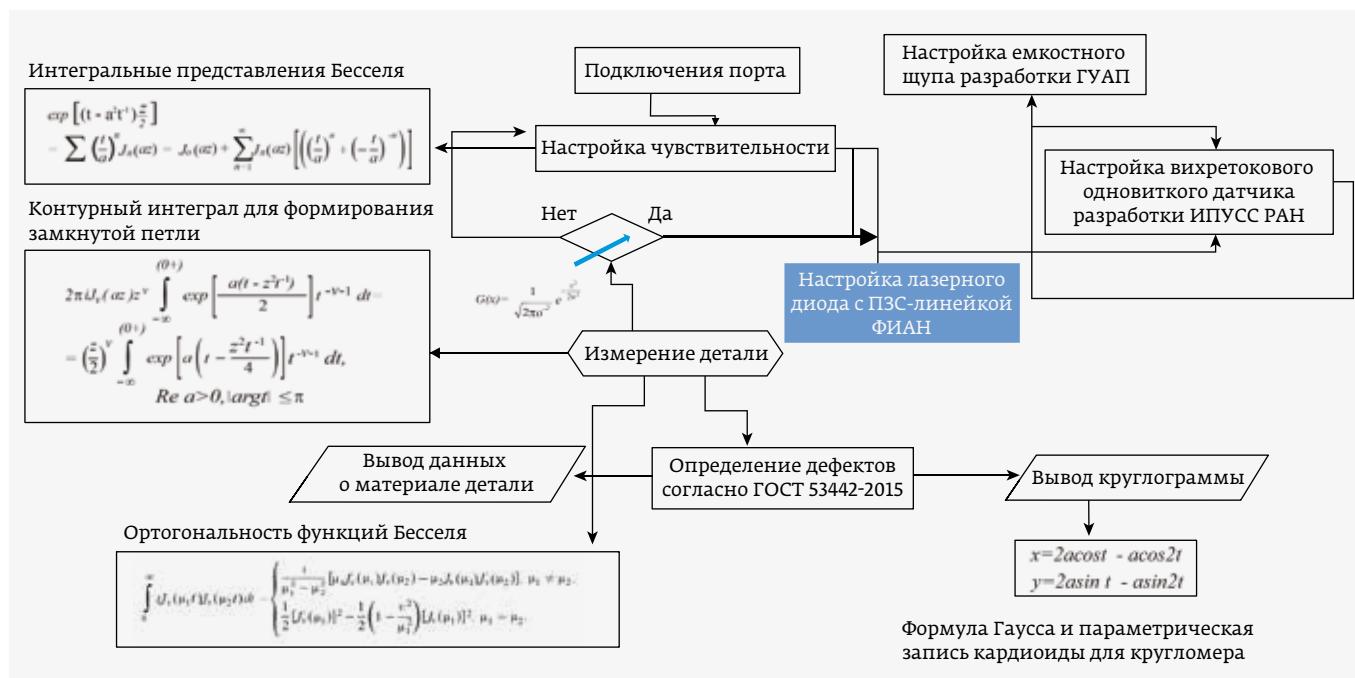


Рис. 14. Модель и компоненты разработанной мультиплексной системы