

УДК 681.5.08

## АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

© 2022 И.В. Малкина

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.06.2022

Цель работы – разработка автоматизированной системы контроля геометрических параметров деталей станков при их производстве с применением методов активного контроля. Для достижения этой цели в работе представлен анализ процесса изготовления и контроля качества деталей, производимых на предприятии машиностроительной отрасли ООО «Стангидромаш» (г. Самара). Проведён анализ методов измерений геометрии детали, точности изготовления поверхностей шпинделя токарного станка 16Б16П (SAMAT). Произведёно обоснование выбора оптического датчика системы контроля геометрических параметров детали. Рассмотрена схема сопряжения датчика с блоком обработки информации, и с контроллером системы. Разработана методика выполнения измерений, выполнен точностной анализ системы.

*Ключевые слова:* металлообрабатывающий станок, геометрические параметры, оптический датчик положения, контроллер, точность измерения, автоматизированная система, погрешность измерений.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-34-41

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного машиностроительного производства неразрывно связано с ростом эффективности выполняемых работ, обеспечением безопасности и технологичности конструкций машин. Измерительные процессы сопровождаются увеличением доли автоматизации контроля качества изготовления изделия, что значительно снижает появление брака на заключительном этапе выхода готовой продукции.

На сегодняшний момент на отечественных предприятиях машиностроения всё ещё широко используется ручной контроль деталей с помощью универсальных средств измерений, что не даёт требуемой точности, значительно замедляет процесс контроля, провоцируют грубые ошибки с высокими значениями погрешностей измерения.

Совместное применение активного контроля и автоматизации управления позволяет существенно повысить контроль качества выпускаемой продукции. Своевременно поступающая информация о контролируемых параметрах (в том числе о геометрических параметрах деталей) позволяет значительно оптимизировать технологический процесс изготовления и сборки, компенсировать погрешности, обусловленные износом инструмента, исключить субъективные составляющие погрешности от применения универсального измерительного оборудования.

*Малкина Ирина Валериевна, старший преподаватель кафедры ТМСИ. E-mail: malkina\_dom@mail.ru*

Средства активного контроля позволяют совместить два технологических процесса: процесс обработки и процесс контроля качества изделия, исключая необходимость периодических остановок обрабатывающего оборудования. При активном контроле размеров можно управлять процессами обработки изделия путём подачи сигнала на переход от черновой к чистовой обработке, на смену инструмента, на отвод инструмента по окончании обработки и т. п.

Автоматизация процесса обработки на базе измерительных систем активного контроля повышает производительность труда, снижает уровень требований к квалификации станочных рабочих, позволяет решить комплекс технологических, метрологических и экономических задач, состоящих в повышении качества и эффективности развития производства. Положительный эффект определяется не только точностью измерений, надёжностью оборудования, простотой обслуживания и ремонта, но и возможностью непрерывного получения измерительной информации, что позволяет своевременно управлять и корректировать режимы обработки, отслеживать износостойкость инструмента и качество материала заготовок.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Общество с ограниченной ответственностью «Стангидромаш» является производителем токарных и токарно-винтовых станков повышенной точности. Предприятие самостоятельно производит комплектующие для своего оборудования: станины, шпиндели, шпиндель-

ные бабки и многие другие детали. Особые требования к точности среди общей номенклатуры изготавливаемых деталей предъявляют к шпинделям станков

Шпиндель – узел станка, передающий вращательное движение от двигателя к объекту обработки. Данный узел обеспечивает устойчивость вращения обрабатываемого изделия, чем обеспечивает точность и качество её обработки. В связи с этим на данный элемент станка накладываются определённые требования по точности вращения, виброустойчивости, жёсткости, износостойкости и т.п. [1].

В качестве объекта контроля в работе рассматривается шпиндель станка 16Б16П, выпускаемого на предприятии ООО «Стангидромаш». Эскиз данного шпинделя представлен на рисунке 1.

В таблице 1 представлен маршрут обработки детали в условиях серийного производства [1].

На предприятии ООО «Стангидромаш» для измерительных процедур используется универсальное оборудование. Оперативный точный контроль ответственных деталей и взаимного расположения поверхностей осуществляется координатно-измерительными машинами FARO Gage, которые помимо контроля стандартных геометрических элементов позволяют измерять сложные криволинейные поверхности методом сравнения с CAD – моделями [4].

В данной работе решается задача разработки автоматизированной высокоточной системы контроля геометрических параметров деталей на примере контроля точности шпинделя станка 16Б16П (рис. 1).

К информационно-измерительной системе предъявляются требования высокой точности измерения, мобильности, быстродействия и

универсальности (способность быстрой перенастройки на изделия разной номенклатуры).

В качестве измерительных преобразователей в системе используется современное, высокоточное оборудование. Система оснащена блоками управления параметрами станка, а также фиксирования и хранения информации.

Измерительные преобразователи входят в государственный реестр средств измерений, поверка оборудования осуществляется по утвержденным методикам не реже одного раза в год.

Для выполнения поставленных целей и задач наиболее удобен вариант использования активного контроля. Приборы активного контроля позволяют полностью автоматизировать процесс обработки, исключив при этом влияние случайных и систематических факторов, вызывающих погрешность системы.

Активный контроль подразумевает проведение контрольно-измерительных процедур при непосредственной обработке изделия, в связи с чем, возникает задача точного отслеживания координат перемещения обрабатывающего инструмента. Для решения данной задачи возможно построение математической модели обрабатываемой поверхности, которая программным путём сравнивается с шаблонной CAD-моделью [2].

На рисунке 2 представлена структурная схема разрабатываемой автоматизированной системы контроля геометрических параметров деталей, отвечающая заявленным требованиям.

Обрабатываемое оборудование (станок токарный с числовым программным управлением САК50135di–SMTCL), используемое на предприятии ООО «Стангидромаш» имеет ограничение максимальной длины обрабатываемых изделий, что влияет на выбор длины инкрементальных линеек [3]. В качестве инкрементальных ли-

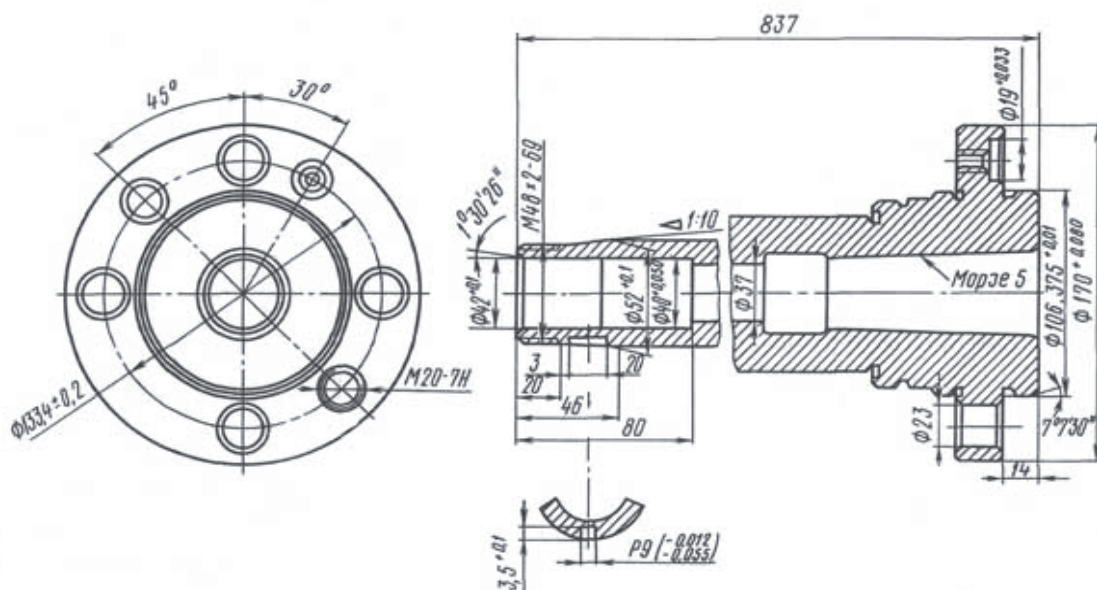


Рис. 1. Шпиндель станка токарного 16Б16П

**Таблица 1.** Технологический маршрут изготовления шпинделя токарного станка

№ опер.	Наименование и содержание операций	Технологические базы	Оборудование
1	Фрезерно-центровальная. Фрезерование торцов, сверление центровых отверстий	Поверхности шеек и торец	Фрезерно-центровальный станок
2	Токарная. Черновая токарная обработка наружных поверхностей	Поверхности центровых отверстий	Токарный станок
3	Сверлильная. Сверление осевого отверстия	Поверхности опорных шеек	Станок для глубокого сверления
4	Термическая. Стабилизирующий отжиг в вертикальном положении	—	Печь шахтная
5	Токарная. Чистовая токарная обработка переднего и заднего конических отверстий	Поверхности опорных шеек	Токарный станок
6	Токарная. Чистовая токарная обработка по контуру наружных поверхностей, нарезание резьбы	Поверхности центровых гнезд в пробках	Универсальный токарный станок
7	Шпоночно-фрезерная. Фрезерование шпоночных пазов	Поверхности центровых гнезд в пробках	Шпоночно-фрезерный станок
8	Шлицефрезерная. Фрезерование шлицев	Поверхности центровых гнезд в пробках	Шлицефрезерный станок
9	Сверлильная. Сверление отверстий на фланце, зенкерование фасок, нарезание внутренней резьбы	Поверхности опорных шеек и торец	Радиально-сверлильный станок
10	Термическая. Закалка шеек, наружного и внутреннего конусов.	—	Установка ТВЧ
11	Шлифовальная. Отделочная обработка опорных шеек, наружных поверхностей	Поверхности центровых гнезд в пробках	Круглошлифовальный станок
12	Внутришлифовальная. Отделка исполнительных поверхностей: внутреннего конуса и торца	Поверхности опорных шеек	Внутришлифовальный станок
13	Промывка и контроль	—	—

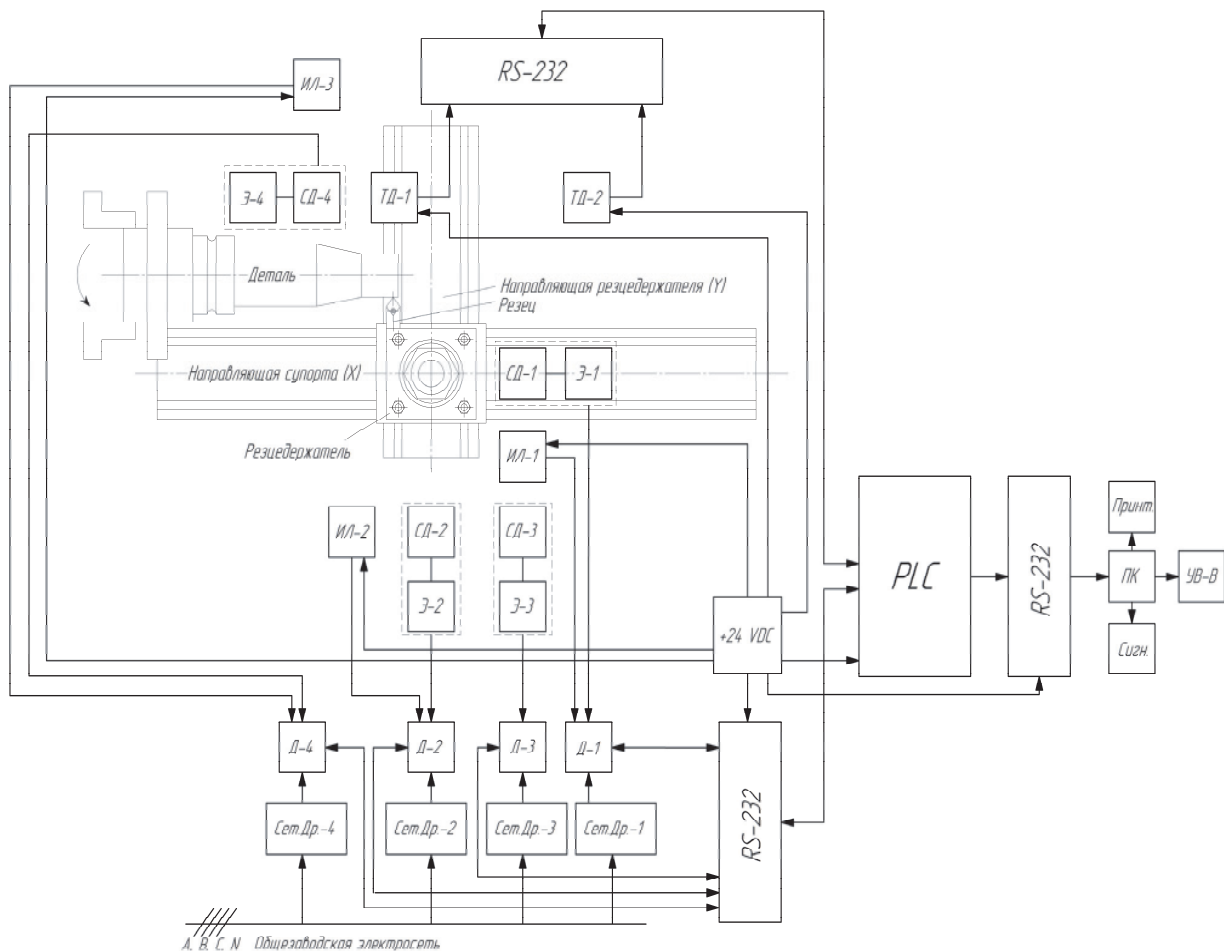
неек для координатных перемещений суппорта и резцедержателя станка выбраны линейки производства компании Heidenhain (Германия).

Открытые датчики линейного перемещения типов LIP и LIF отличаются небольшим шагом измерения в сочетании с высокой точностью контроля. В качестве шкалы используется фазовая решетка на носителе из стекла или керамики [5].

В конструкции станка использованы горизонтальные закаленные направляющие, в главном приводе применяются двухскоростные электродвигатели с частотным преобразователем. В качестве серводвигателей системы предложена китайская модель ЕСМА-С10807ES. Данная серия включает серводвигатели 5-и типоразмеров с фланцами 40 мм, 60 мм, 80 мм, 86 мм, 100 мм, 130 мм, 180 мм. Диапазон номинальных скоростей от 1000 об/мин до 5000 об/мин. [3].

Поскольку в шпинделе станка перемещение обрабатываемой детали происходит с очень высокой скоростью, контактные методы контроля в данном случае не актуальны. В качестве контрольного датчика используется триангуляционный датчик перемещений, обеспечивающий бесконтактный контроль. Данный датчик, расположенный вне области обработки изделия, также позволяет отслеживать правильность расположения резца и его износ.

Лазерные триангуляционные датчики используются в системах автоматизации для бесконтактного контроля различных геометрических параметров: толщина, прямолинейность, внутренний и внешний диаметры, сканирование профиля изделий сложной формы, определения положения объектов. На базе датчиков могут быть построены системы автоматическо-



**Рис. 2.** Структурная схема автоматизированной системы контроля геометрических параметров деталей:  
 ТД-1 – триангуляционный датчик перемещения; ТД-2 – триангуляционный датчик для контроля реза;  
 СД-1 – серводвигатель для перемещения суппорта станка; СД-2 – серводвигатель резцедержателя;  
 СД-3 – серводвигатель поворота резцедержателя; СД-4 – серводвигатель датчика перемещения;  
 Э-1 ... Э-4 – энкодеры серводвигателей; ИЛ-1 – инкрементальная линейка для контроля перемещения резцедержателя; ИЛ-2 – инкрементальная линейка для контроля перемещения каретки с датчиком ТД-1; ИЛ-3 – инкрементальная линейка для контроля перемещения детали суппорта;  
 Д-1 ... Д-4 – драйверы серводвигателей;  
 Сет.Др.-1 ... Сет.Др.-4 – сетевые дроссели; RS-232 – интерфейс; PLC – программируемый логический контроллер;  
 +24 VDC – блок питания; ПК – персональный компьютер; Сигн. – система сигнализации;  
 Принт. – печать и копирование протоколов контроля; УВ-В – устройства ввода-вывода

го управления различными процессами (следящие системы управления, правка изделий, прокат листовых материалов и др.) Помимо этого датчик имеет возможность подключения позиционирующих сигналов от станков для реализации 3D сканирующих систем. Калибровка триангуляционных датчиков проводится по схеме, разработанной в соответствии с ГОСТ Р 8.763-2011.

В качестве триангуляционного датчика для контроля размеров и поверхности обрабатываемых деталей выбран датчик LK-N150 производства компании Keyence (Япония). Технические характеристики датчика представлены в таблице 2 [5,6].

Датчик системы контроля геометрических параметров деталей при активном контроле на металлообрабатывающих станках выполняет следующие функции:

- 1) измерение расстояния до поверхности перемещающегося объекта;
  - 2) передача измеренного расстояния на другое устройство;
  - 3) обеспечение обмена информацией через согласованные аппаратный и программный интерфейсы с компьютером или другим устройством;
  - 4) сохранение установленных параметров датчика в энергонезависимой памяти;
  - 5) возможность выдавать сигналы управления на исполнительные механизмы с использованием программируемых параметров;
  - 6) индикация сообщения «ВНЕ ДИАПАЗОНА» при положении объекта измерений на расстоянии менее минимального расстояния до объекта и за пределами диапазона измерений.
- На рисунке 3 приведена схема подключения триангуляционного датчика через интерфейс RS-232.

Таблица 2. Триангуляционный лазерный датчик LK-H150

Характеристика	Значение	
Параметра лазерной системы	тип	Red semiconductor laser
	длина волны	655 нм
	класс лазера (JIS C6802)	класс 3R
	мощность	4,8 мВт
Наименьший диаметр	Ø120 мкм	
Линейность	±0,02% от диапазона измерений	
Повторяемость	0,25 мкм	
Температурная погрешность	0,01% от диапазона измерений на 1 °С	
Середина диапазона измерений	150 мм	
Диапазон измерений	±40 мм	
Вес	300 г	

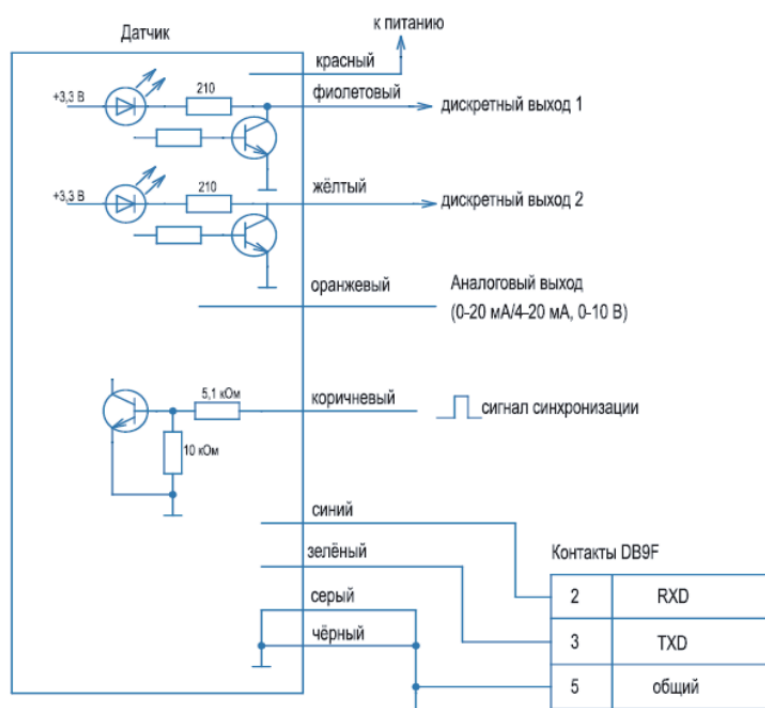


Рис. 3. Схема подключения триангуляционных датчиков через интерфейс RS-232

Для контроля профиля режущей кромки резца используется лазерный сканирующий микрометр на базе триангуляционных датчиков фирмы Takikawa Engineering (Япония), модель LDM-303H-XY. У данной модели датчика есть ряд преимуществ: 100000 часовой ресурс работы лазера; малая погрешность даже при вибрации измеряемой детали; возможность измерения матовых и прозрачных объектов. Установка датчика в измерительное оборудование производится таким образом, чтобы контролируемый объект располагался в зоне рабочего диапазона датчика [5,6].

Главным элементом системы, предназначенным для приёма сигналов с датчиков и исполнительных механизмов, является программируемый логический контроллер (ПЛК). Контроллер системы выполняет сбор и обра-

ботку информации, а также выполняет функции управляющего устройства.

Существенное отличие ПЛК от контрольно-измерительной аппаратуры заключается в отсутствии жестко прописанного алгоритма работы, что позволяет реализовывать практически любые алгоритмы управления. Для создания алгоритма, его тестирования и записи в контроллер используется соответствующее программное обеспечение. ПЛК может обрабатывать дискретные и аналоговые сигналы, управлять клапанами, сервоприводами, преобразователями частоты и осуществлять регулирование. Также программируемый логический контроллер является микропроцессорным устройством для осуществления целей сбора и хранения информации [7].

Для использования в проектируемой автоматизированной системе предложен кон-



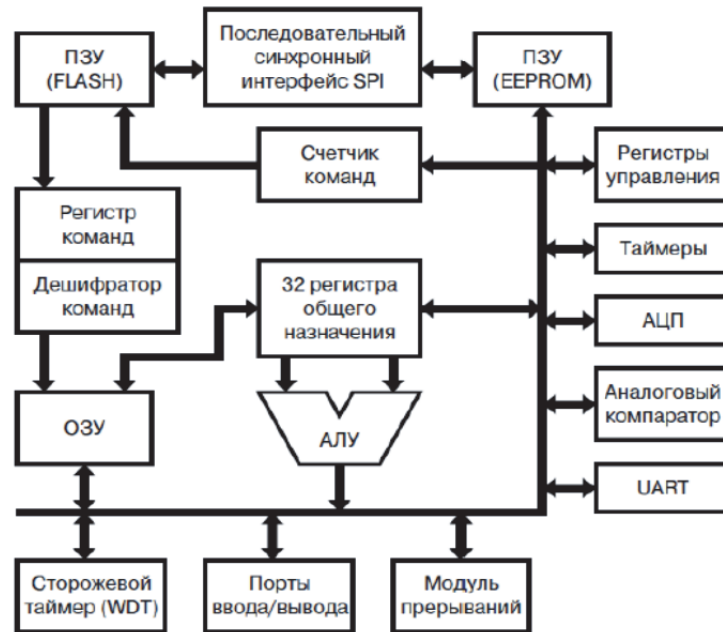


Рис. 4. Архитектура ядра микроконтроллера AVR ATmega88

троллер Atmel ATmega88, 8-битный микроконтроллер AVR фирмы ATMEL (рис. 4). Данное устройство имеет усовершенствованную RISC архитектуру, 32×8 рабочих регистров, объединенных в регистровый файл, скорость вычислений до 20 MIPS/МГц.

**ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Качество контроля определяется совокупностью объективных и субъективных факторов, влияющих на погрешность измерительного оборудования.

Инструментальные (аппаратурные, приборные) погрешности обусловлены свойствами конкретного средства измерения (СИ), определяются при его испытаниях с последующим занесением в паспорт СИ. Инструментальные погрешности отдельного СИ методами обработки не устранимы, но их влияние на измерительные операции может быть уменьшено путём применения соответствующих методик выполнения измерения с последующей обработкой полученной информации.

На практике используются две методики расчёта инструментальных погрешностей:

1) статистическое суммирование математических ожиданий и дисперсий всех составляющих, с целью определения точечных и интервальных характеристик для заданной доверительной вероятности определяется:

$$\Delta_1 = \sqrt{\sum \Delta_i^2} ; \tag{1}$$

2) арифметическое суммирование модулей наибольших значений составляющих:

$$\Delta_2 = \sum \Delta_i . \tag{2}$$

В рассматриваемой системе контроля геометрических параметров деталей инструмен-

тальная погрешность анализируется по двум каналам с триангуляционными датчиками и по трем каналам с инкрементальными линейками.

Элементы информационно-измерительной системы имеют следующие значения погрешностей:

- 1) датчик ТД-1 – 0,02 %;
- 2) датчик ТД-2 – 0,01%;
- 3) инкрементальные линейки – 0,01 %;
- 4) драйверы сервоприводов системы – 0,05 %;
- 5) интерфейс RS-232 – 0,01 %;
- 6) программируемый контроллер – 0,05 %;
- 7) управляющий компьютер системы (ПК) – 0,01 %.

Рассчитываем значения погрешности по каналам датчиков:

1) канал датчика ТД-1:

$$\Delta_{Вязк.} = \sqrt{\sum \Delta_i^2} = \sqrt{0,02^2 + 2 \cdot 0,01^2 + 0,05^2 + 0,01^2} = 0,057 (\%);$$

2) канал датчика ТД-2:

$$\Delta_{Вязк.} = \sqrt{\sum \Delta_i^2} = \sqrt{0,01^2 + 2 \cdot 0,01^2 + 0,05^2 + 0,01^2} = 0,054 (\%);$$

3) канал инкрементальных линейек:

$$\Delta_{Вязк.} = \sqrt{\sum \Delta_i^2} = \sqrt{0,01^2 + 0,05^2 + 2 \cdot 0,01^2 + 0,05^2 + 0,01^2} = 0,073 (\%);$$

Погрешность по каналам системы не должна превышать 0,1 %.

Полученные значения свидетельствуют о высокой точности разработанной системы и правильном выборе измерительных преобразователей.

**ВЫВОДЫ**

На основании проведенного анализа методов контроля, измерительного оборудования, а также исходя из особенностей объекта контроля (шпинделя токарного станка 16Б16П (SAMAT)), можно сделать вывод о высокой точности ин-

формационно-измерительной системы и целесообразности её применения для целей контроля геометрических параметров деталей машиностроения на предприятии машиностроительной отрасли ООО «Стангидромаш».

Внедрение данного измерительного оборудования значительно упрощает контрольно-измерительные процедуры и сокращает времени простоя станка.

Система контроля выполняет следующих функций:

- 1) автоматическое сканирование геометрии поверхности обрабатываемой детали;
- 2) вывод сигналов датчика на экран монитора с подробной визуализацией контура обрабатываемого изделия;
- 3) возможность сканирования посредством изменения параметров датчика;
- 4) управление перемещением датчика по поверхности с заданным шагом и с учетом быстрой реакции датчиков;
- 5) возможность передачи данных по каналу связи в ПК.

Измерения в процессе обработки имеют следующие достоинства:

- 1) возможность раннего обнаружения погрешностей обработки и их устранения до окончания технологического цикла;
- 2) высокая эффективность измерения благодаря исключению времени на транспортирование, установку детали на измерительную позицию;
- 3) экономия производственной площади;
- 4) сравнительно невысокая стоимость средства измерения.

Система корректно функционирует, выдавая результаты измерений в удобной для оператора форме.

Метрологическое обеспечение процесса контроля осуществляется непрерывно методом

регулярных калибровок и юстировок, проводимых перед проведением контрольно-измерительных процедур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология изготовления шпинделей. Материал и методы получения заготовок. – URL: [https://studopedia.su/10\\_8598\\_tehnologiya-izgotovleniya-shpindelley.html](https://studopedia.su/10_8598_tehnologiya-izgotovleniya-shpindelley.html) (дата обращения 15.05.2022)
2. Активный контроль размеров при обработке деталей на станках – URL: <http://electricalschool.info/main/drugoe/1171-aktivnyjj-kontrol-razmerov-pri.htm> (дата обращения 15.06.2022)
3. Современные технологии производства. Токарные станки. Классификация, технические характеристики станков – URL: <https://extxe.com/5992/tokarnye-stanki-klassifikacija-tehnicheskie-harakteristiki-stankov/> (дата обращения 10.06.2022)
4. Машины координатно-измерительные мобильные FARO Laser Scanner Focus S 70, FARO Laser Scanner Focus S 150, FARO Laser Scanner Focus S 350, FARO Laser Scanner Focus M 70 – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/70272-18-mashiny-koordinatno-izmeritelnye-mobilnye-mashiny-koordinatno-izmeritelnye-mobilnye> (дата обращения 20.06.2022)
5. Обзорный каталог (26 августа 2020 г.). Датчики линейных перемещений Инкрементальные щупы Датчики угловых перемещений Датчики вращения Системы управления для станков Измерительные щупы Устройства цифровой индикации – URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2013/03/14/Obzornyj-katalog.pdf> (дата обращения 20.06.2022).
6. Триангуляционные лазерные датчики серия LD3. Руководство по эксплуатации – URL: [http://iicom.com/download/documents/LD3/LD3\\_rus.pdf](http://iicom.com/download/documents/LD3/LD3_rus.pdf) (дата обращения 02.07.2022).
7. Введение в ПЛК: что такое программируемый логический контроллер – URL: <https://www.compel.ru/lib/95591> (дата обращения 20.06.2022).

## AUTOMATION OF QUALITY CONTROL OF GEOMETRIC PARAMETERS OF PARTS IN MECHANICAL ENGINEERING

© 2022 I.V. Malkina

Samara State Technical University, Samara, Russia

The aim of the work is to develop an automated system for controlling geometric parameters of machine parts during their production using the methods of active control. To achieve this goal, the paper presents an analysis of the manufacturing process and quality control of parts produced at the machine-building industry enterprise “Stangydromash” LLC (Samara). The analysis of measuring methods of part geometry, accuracy of manufacturing surfaces of the spindle of 16B16P lathe (SAMAT) is carried out. A justification for selecting an optical sensor for the control system of geometric parameters of a part is made. The interface scheme of the sensor with the information processing unit and with the system controller is considered. A technique of measurement fulfillment is developed, a precise analysis of the system is made.

*Key words:* metalworking machine tool, geometrical parameters, optical position sensor, controller, measurement accuracy, automated system, measurement uncertainty.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-34-41

## REFERENCES

1. Tekhnologiya izgotovleniya shpindelej. Material i metody polucheniya zagotovok. – URL: [https://studopedia.su/10\\_8598\\_tehnologiya-izgotovleniya-shpindelej.html](https://studopedia.su/10_8598_tehnologiya-izgotovleniya-shpindelej.html) (data obrashcheniya 15.05.2022)
2. Aktivnyj kontrol' razmerov pri obrabotke detalej na stankah – URL: <http://electricalschool.info/main/drugoe/1171-aktivnyj-kontrol-razmerov-pri.htm> (data obrashcheniya 15.06.2022)
3. Sovremennye tekhnologii proizvodstva. Tokarnye stanki. Klassifikaciya, tehničeskie harakteristiki stankov – URL: <https://extxe.com/5992/tokarnye-stanki-klassifikaciya-tehničeskie-harakteristiki-stankov/> (data obrashcheniya 10.06.2022)
4. Mashiny koordinatno-izmeritel'nye mobil'nye FARO Laser Scanner Focus S 70, FARO Laser Scanner Focus S 150, FARO Laser Scanner Focus S 350, FARO Laser Scanner Focus M 70 – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/70272-18-mashiny-koordinatno-izmeritelnye-mobilnye-mashiny-koordinatno-izmeritelnye-mobilnye> (data obrashcheniya 20.06.2022)
5. Obzornyj katalog (26 avgusta 2020 g.). Datchiki linejnyh peremeshchenij Inkremental'nye shchupy Datchiki uglovyh peremeshchenij Datchiki vrashcheniya Sistemy upravleniya dlya stankov Izmeritel'nye shchupy Ustrojstva cifrovoj indikacii – URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2013/03/14/Obzornyj-katalog.pdf> (data obrashcheniya 20.06.2022).
6. Triangulyacionnye lazernye datchiki seriya LD3. Rukovodstvo po ekspluatácii – URL: [http://iic-incom.com/download/documents/LD3/LD3\\_rus.pdf](http://iic-incom.com/download/documents/LD3/LD3_rus.pdf) (data obrashcheniya 02.07.2022).
7. Vvedenie v PLK: chto takoe programmiruemyj logičeskij kontroller – URL: <https://www.compel.ru/lib/95591> (data obrashcheniya 20.06.2022).