

БЕСКОНТАКТНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЗЬБЫ¹

NON-CONTACT AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE GEOMETRY OF THREAD

A. Cherepanov
Yu. Bochkarev
S. Pesterev
M. Popova
I. Tyshchenko

Summary. This article provides an over view of the development and the construction of non-contact automated control system of the geometry of thread. Few types of possible compositions are mentioned. In addition, the accuracy of measurements is discussed. The description of the main electrical circuit blocks is also given.

Keywords: Optoelectronic sensor, optical systems, geometry of thread, psd photo-sensor, automated measurement systems, photoelectric sensor, laser, laser triangulation.

Черепанов Александр Николаевич

К.ф.-м.н., доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
tchustu@mail.ru

Бочкарев Юрий Владимирович

Инженер,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
bocha@d-test.ru

Пестерев Сергей Николаевич

Директор, ООО «Оптические измерительные системы» г. Екатеринбург, Россия
pesterev@d-test.ru

Попова Мария Александровна

Лаборант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
mari.mashapopova@mail.ru

Тыщенко Игорь Сергеевич

Лаборант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
tis-public@yandex.ru

Аннотация. В данной статье приведен обзор разработки и построения бесконтактной автоматизированной системы контроля геометрии резьбы. Описаны несколько возможных вариантов компоновки устройства. Кроме того, обсуждается точность измерений. Дано описание основных блоков электрических цепей.

Ключевые слова: Оптоэлектронный датчик, оптические системы, геометрия резьбы, psd фотосенсор, автоматизированные измерительные системы, фотоэлектрический сенсор, лазерная триангуляция.

Введение

Для контроля элементов резьбы — шага, диаметров, формы профиля — применяются универсальные и специальные инструменты. Выбор того или иного инструмента зависит от типа резьбы и главным образом от ее точности. В первую очередь контролируются шаг, средний диаметр и форма профиля и затем уже наружный и внутренний диаметры.

При скоростном нарезании резьбы и нарезании резьбы в упор трудно вручную управлять процессом отвода резца от детали. Для этой цели применяется ряд приспособлений, облегчающих труд токаря и повышающих производительность — это, так называемые, системы контроля резьбы, разработка которых представляет из себя сложную и комплексную задачу. Общие принципы этого процесса будут освещены в данной статье.

¹ Работы по статье выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора от 01.12.2015г № 02.G25.31.0161.

Бесконтактная автоматизированная измерительная система контроля геометрии резьбы (далее по тексту «система») разрабатывается как комплексное средство измерения, предназначенное для установки в цехах, лабораториях, внедрения в конвейерные линии.

Система предназначена для комплексного измерения геометрических параметров профиля поверхности, в частности, резьбы труб и замковых муфт. С использованием системы обеспечивается 100% сканирование поверхности резьбы с высокой точностью, выявляются все виды брака. Результатом такого сканирования будет являться облако точек измеряемой поверхности в абсолютных величинах с требуемыми метрологическими характеристиками, а также геометрические параметры согласно применяемого на предприятии стандарта в табличной форме.

Наибольшее применение системы автоматического контроля резьбы находят в областях металлургии и нефтегазовой промышленности.

Согласно стандартам в системе ГОСТ и API системы должны с требуемой точностью измерять: шаг резьбы, высоту профиля, углы наклона сторон профиля, радиус закругления вершины профиля, радиус закругления впадины профиля, угол наклона, конусность, диаметр цилиндрической выточки, угол заходной фаски, натяг по резьбовому калибру, перпендикулярность торца муфты относительно оси резьбы, соосность, разность диаметров резьбы (овальность), форму профиля резьбы.

Концепция построения датчика

Конструктивно система состоит из двумерного лазерного датчика (датчика профиля поверхности оптоэлектронного) и комплекса сбора, обработки информации и управления циклом измерения, включающего ПК и специализированное программное обеспечение. Датчик состоит из источника светового излучения, фокусирующей оптической системы, приемного объектива и позиционно-чувствительного фотоприемника.

В основу работы датчика положен принцип оптической триангуляции в двумерном пространстве [1]. Излучение полупроводникового лазера формируется объективом в виде линии, проецируемой на объект. Рассеянное на объекте излучение в виде контура профиля контролируемой поверхности собирается на двумерной матрице фотоэлектрического преобразователя и анализируется сигнальным процессором. Процессор рассчитывает расстояние до объекта для каждой точки и передает на компьютер. После обработки результатов ПК отображает фактические значения параметров резьбы.

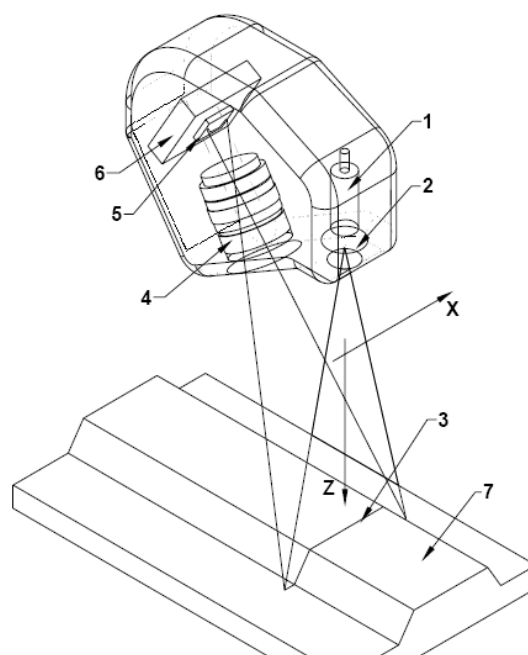


Рис. 1. Оптоэлектронный датчик профиля поверхности

Принцип действия датчика иллюстрируется рисунком 1.

Упрощенно датчик состоит из следующих элементов:

- ◆ источник светового излучения;
- ◆ фокусирующая оптическая система;
- ◆ приемный объектив;
- ◆ позиционно-чувствительный фотоприемник.

В основу работы двумерного триангуляционного датчика (оптоэлектронного датчика профиля поверхности) положен принцип оптической триангуляции. Излучение полупроводникового лазера 1 формируется объективом 2 в виде линии 3 и проецируется на объект 7. Рассеянное на объекте излучение объективом 4 собирается на двумерной CMOS-матрице 5. Полученное изображение контура объекта анализируется сигнальным процессором 6, который рассчитывает расстояние до объекта (координата Z) для каждой из множества точек вдоль лазерной линии на объекте (координата X).

Размеры световой линии составляют 10–100 мкм.

Угол расположения датчиков подобран таким образом, чтобы величина переотраженного (паразитного) сигнала вызывающего помехи была минимальна.

Схему лазерного триангуляционного датчика условно можно разделить на три части (рис. 2): излучающий канал, контролируемая поверхность, приемный канал.

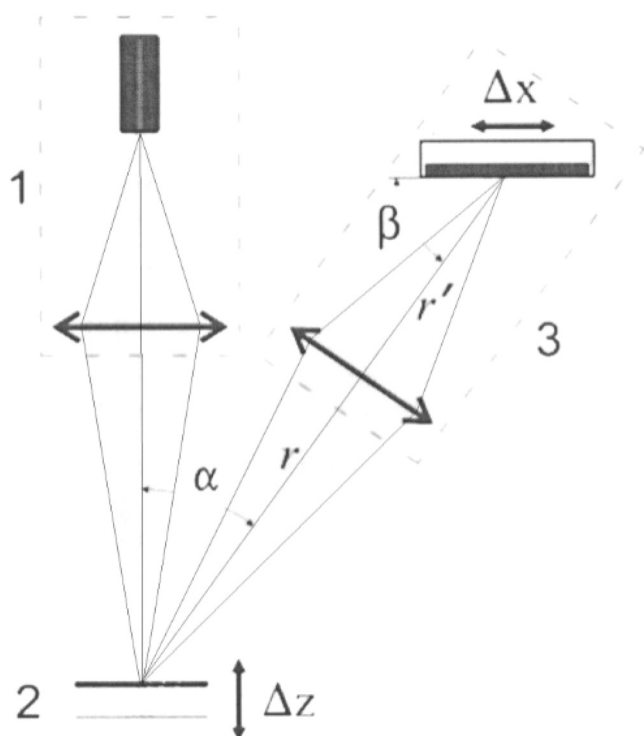


Рис. 2. Схема лазерного триангуляционного датчика

Первая часть схемы — излучающий канал, который состоит из источника излучения и объектива, который формирует зондирующий пучок на контролируемой поверхности. В качестве источника излучения, как правило, используется лазерный диод. Распределение света, создаваемое такими источниками, называется гауссовым (рис. 3)[2].

Шириной d зондирующего пучка называется расстояние между точками профиля интенсивности на уровне I_{\max}/e .

Перетяжкой пучка Гаусса называется минимальная ширина пучка вдоль направления распространения. На рис. 4 перетяжка расположена в плоскости А. Очевидно, в этой плоскости интенсивность зондирующего пучка достигает максимального значения [3].

Объектив состоит из одной или нескольких оптических линз. Относительное положение объектива и лазерного диода определяет настройку излучающего канала. Чтобы настроить лазерный модуль необходимо выставить перетяжку в центр диапазона измерения и отцентрировать зондирующий пучок.

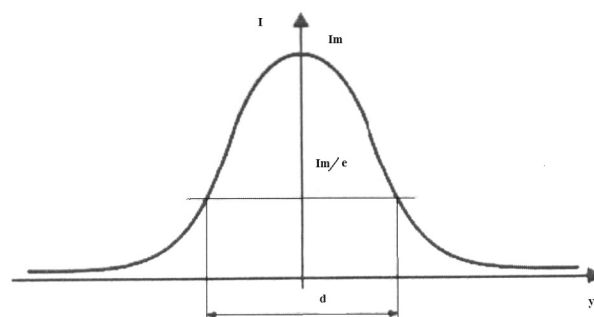


Рис. 3. Распределение Гаусса (I — интенсивность света, y — направление перпендикулярное распространению излучения, d — ширина зондирующего пучка).

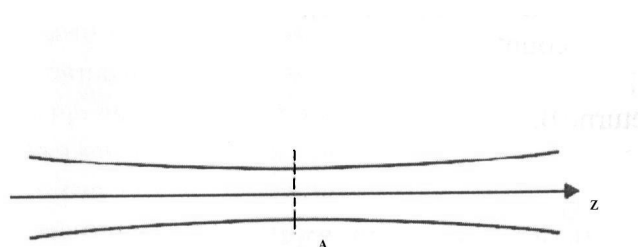


Рис. 4. Пучок Гаусса в продольном разрезе

Результатом хорошей настройки является отцентрированный пучок, ширина и интенсивность которого симметрично изменяются относительно центра диапазона измерений.

Вторая неотъемлемая часть схемы лазерного триангуляционного датчика — это контролируемая поверхность. Каждая поверхность имеет свойство отражать или рассеивать падающее излучение. Рассеяние зондирующего излучения поверхностью контролируемого объекта используется в триангуляции как физическая основа для получения информации о расстоянии до этой поверхности. Поэтому, свойство контролируемой поверхности рассеивать зондирующее излучение является неотъемлемой частью лазерного триангуляционного датчика.

Третья часть схемы лазерного триангуляционного датчика — приемный канал, который состоит из проекционного объектива и фотоприемника.

Проецирующий объектив формирует изображение зондирующего пятна в плоскости фотоприемника. Чем больше диаметр D объектива, тем выше его светосила,

Таблица 1. Основные технические характеристики датчика

Тип системы	Автоматическая бесконтактная оптическая измерительная система
Типы контролируемых резьб	Треугольная резьба (круглая) с шагом 2,54мм и 3,175мм, OTTM, LC, Buttress
Минимальный диаметр трубы, мм	57
Максимальный диаметр трубы, мм	324
Приведенная относительная погрешность измерений согласно ГОСТ 633–80, API 5CT 9ed, API 5B но не хуже, мм	0,1
Интерфейс связи	EthernetIPv4, RS485 в систему ERP и АСУТП цеха
Электропитание, В	220/400 В, 50Гц
Защита от внешних воздействий	IP54
Масса, кг, не более	500
Потребляемая мощность, кВт, не более	1
Габариты размеры (Д×Ш×В), мм, не более	600x900x2200

тем интенсивнее и качественнее строится изображение пятна.

В зависимости от конкретной реализации, для регистрации сформированного изображения в качестве приемника используют либо фотодиодную матрицу (ПЗС), либо позиционно-чувствительный фотоприемник (PSD). По разрешающей способности PSD превосходит ПЗС в 10 раз. Также при использовании PSD может быть достигнута большая частота измерений, чем при использовании ПЗС. Однако PSD фотоприемники могут быть использованы только при построении 1D триангуляционного датчика, имеют ряд ограничений по использованию и не рассматриваются в рамках настоящей статьи.

Погрешности выставки 2D датчиков возникающие при перенастройке установки с одного типоразмера на другой устраняются специальным алгоритмом в программном обеспечении в автоматическом режиме.

Все датчики размещены в закрытой «капсуле», которая собирается, калибруется и поверяется на заводе-изготовителе. Капсула имеет единый корпус. Все оптические и электронные компоненты находятся внутри этого корпуса. Оптическая система от внешней среды защищается защитными кварцевыми или сапфировыми стеклами.

Капсула размещается на консоли транспортной системы, которая представляет собой колонну с монтированной на ней системой 3D перемещения. Транспортная

система обеспечивает перемещение датчика вдоль измеряемой резьбы, тем самым производя сканирование изделия.

Система является стационарным промышленным оборудованием и требует установки и закрепления на полу или фундаменте, подвод постоянных энергоносителей и внутренних инженерных коммуникаций.

Требуемые технические характеристики датчика для возможного промышленного применения представлены в Таблице 1.

Структурное построение разрабатываемой системы представлено на рисунке 5.

Расчет триангуляционного датчика

Схема лазерного триангуляционного датчика, приведенная на рис. 2, работает следующим образом. Излучающий канал 1 формирует изображение светового пятна на контролируемой поверхности 2. Далее рассеянный контролируемой поверхностью свет попадает в приемный канал 3. Таким образом, в плоскости фотоприемника создается изображение освещенного участка контролируемой поверхности (световое пятно). При смещении контролируемой поверхности на величину dZ , световое пятно в плоскости фотоприемника смещается на величину dX (рис. 2). Зависимость смещения контролируемой поверхности dZ от смещения светового пятна в плоскости фотоприемника dX в общем случае имеет следующий вид:

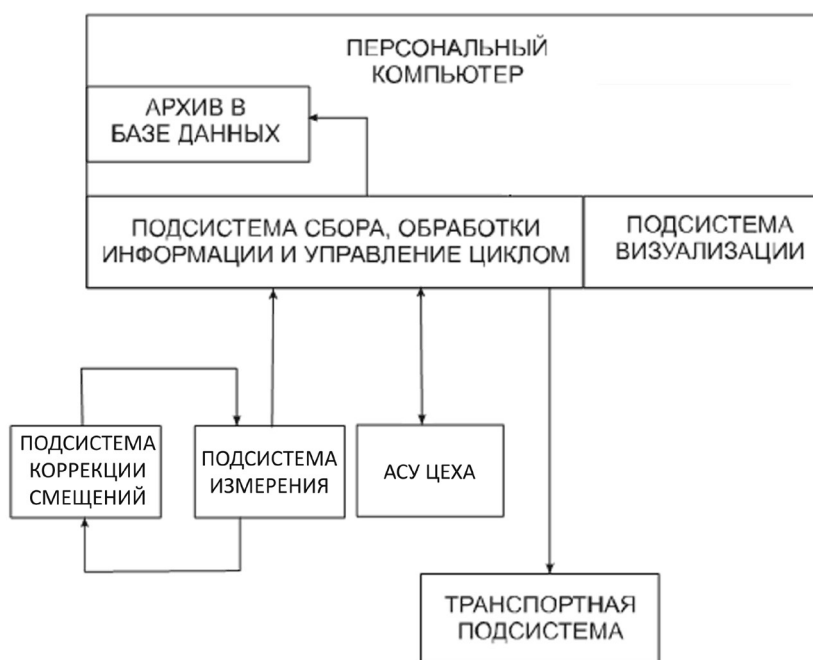


Рис. 5. Структурная схема датчика

$$Z = \frac{X}{\gamma * \sin \alpha}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{f}{r + f}$,

для случая $r \gg f$, где f — фокусное расстояние линзы проецирующего объектива, r — расстояние от контролируемой поверхности 2 до проецирующего объектива приемного канала, α — угол между оптической осью приемного канала и зондирующим лучом передающего канала пересекающиеся на контролируемой поверхности расположенной в центре диапазона измерений смещений (рис. 2).

Это уравнение выполняется только для $dZ \ll r$, так как в этом случае угол α можно считать постоянным.

При условии, что мы можем конструктивно выполнить датчик таким образом и точно измерить угол α (который будет всегда постоянным и нам известным) мы можем вывести формулы, точно описывающие зависимость Z от X во всем диапазоне измерений. Например, для $\alpha=45^\circ$ формула приобретает вид:

$$Z = \frac{2 * X}{\gamma * (1 + \frac{X}{r})} \quad (2)$$

При движении поверхности объекта в вертикальном направлении происходит изменение величины r и свя-

занной с ней величины r' . При этом изображение световой точки перемещается не только по оси X , но и вдоль оси оптической системы. Это означает, что только для единственного положения объекта (в центре диапазона измерения смещений) световая точка сфокусирована на оси X . При перемещении объекта из центрального положения в какую-либо сторону происходит размытие изображения. Этот эффект можно исключить, повернув плоскость изображения на угол β таким образом, чтобы изображение световой точки всегда было резким. Выражение для угла β будет иметь вид:

$$\beta = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\gamma}{\tan \alpha}\right) \quad (3)$$

Также существуют программные методы повышения точности измерений лазерным триангуляционным датчиком, связанные с алгоритмами дополнительной обработки сигнала такие, как: интерполяция дискретного изображения для достижения субпиксельного разрешения, сглаживание видеосигнала для уменьшения влияния шероховатостей и неоднородностей и др. методы [4].

Концепция построения электронной части датчика

Электронная часть системы представляет из себя набор датчиков, плат, компонентов и преобразователей, обеспечивающих управление всеми механизмами системы, сбор данных с датчиков и обмен информацией

с АСУ (автоматическая станция управления) цеха объединенных в единую систему, управляемую программным обеспечением системы.

Предполагается использование оптоэлектронного датчика профиля поверхности, который и будет являться основным измерительным сенсором системы.

Управление перемещением механизмов транспортной системы, капсулы с датчиком и т.д. производится с помощью контроллеров и драйверов шаговых двигателей. Все контроллеры имеют выход RS-232 и позволяют производить синхронное передвижение механизмов.

На каждом механизме находится датчик обратной связи: типа ЛИР на вращающихся валах и кольцах и магнитно-стрикционные датчики перемещения на линейных механизмах. Обратная связь позволяет контролировать точность перемещения механизмов и отслеживать аварийные ситуации заклинивание двигателей и т.п.

Также каждый механизм оснащен индуктивными выключателями — датчиками безопасности, которые расположены в крайних положениях механизмов. Данные датчики запитаны по параллельной схеме и останавливают систему в случае если программное обеспечение дало сбой и не отслеживает датчики обратной связи. Данная опция необходима для исключения саморазрушения системы.

Все электронные модули засинхронизированы вдоль всей электрической схемы и работают «в унисон».

Внутри системы потоки информации разделены на быстрые и медленные. Для быстрых потоков реализованы две Ethernet линии, для медленных несколько линий RS-232 и RS-485.

Питание обеспечивается вторичными источниками питания. Вторичные источники питания снабжают блоки разных типов отдельно. Это позволяет устранить помехи по линиям питания, например, тех, которые передаются с двигателя, работающего в тяжелом режиме, на датчик.

Конструктивное решение датчика

В соответствии с предъявляемыми требованиями конструктивное исполнение системы должно быть следующее:

Измерительная головка и рама транспортной системы должны быть выполнены из профилированного алюминиевого проката. Сервомеханизмы (рельсы, валы, шариковинтовые пары) должны быть выполнены из не-

ржавеющей стали (или стали со специальным покрытием). Все открытые части должны быть закрыты кожухами из стали или композитных алюминиевых панелей, покрытой порошковой эмалью. Движущие части должны быть закрыты складывающимися шторками из ткани, резинового листа или полимера.

Шкаф управления и индикации должен быть выполнен в промышленном исполнении и покрыт порошковой эмалью.

Соединительные информационные и питающие кабели должны быть выполнены в бронированной оплетке, исключающей повреждение. В системе должны быть применены быстросъемные байонетные соединители, исключающие неправильное подключение.

Электрическое оборудование: преобразовательная техника, распределительные шкафы, шкафы управления и индикации входящие в состав транспортной системы должны иметь степень защиты не менее IP54.

Система также должна обеспечивать:

- ◆ компактность;
- ◆ удобство размещения и закрепления;
- ◆ механическую прочность и жесткость конструкции для стабильной работы и виброзащитности;
- ◆ эргономичный внешний вид (товарный вид);
- ◆ влаго- и пылезащищенность;
- ◆ исключение несанкционированного доступа к элементам и блокам и возможности перенастройки или искажения характеристик.

Рабочая температура окружающей среды: от 0°C до плюс 50°C.

Система разрабатывается как промышленное стационарное оборудование, требующее надежного закрепления на полу или фундаменте и постоянного подключения к энергоносителю и линиям связи.

Система может переноситься с позиции на позицию с помощью специальных подъемных средств.

Управление системой осуществляется по интерфейсу RS-232/485 или по Ethernet 10/100BASE-TX через локальную или глобальную информационную сеть. Таким образом, для управления применимы любые стандартные решения, например, систему, при необходимости, можно подключить к модему, к системе АСУ или устройству беспроводного доступа.

Управляющая ПЭВМ может быть размещена как в непосредственной близости от системы, так и на про-

извольном удалении (в том числе через сеть Интернет) от него для обеспечения возможности размещения системы в условиях, где постоянное нахождение персонала нежелательно.

Поскольку все задачи реального времени, а также значительная часть задач управления и контроля решаются ПЛИС и процессором «на борту» встроенных датчиков, а ПЭВМ обеспечивает только вторичный расчет и пользовательскую визуализацию, требования к вычислительным возможностям управляющей ПЭВМ, объему памяти и т.п. не предъявляются и допускают использование устройств различных классов, таких как ноутбук в зависимости от их наличия и удобства использования.

Заключение

В данной статье приводится обзор проблем, возникающих при построении бесконтактной автоматизированной системы контроля геометрии резьбы, а также приведены решения некоторых из них. Представлены основные принципы построения таких датчиков.

Было разработано конструктивное решение для профилометров, являющихся основной чувствительной частью системы. Подробно описан расчет триангуляционной части датчика, смоделирована его структурная схема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев Д.Т. Оптические измерения. — М.: Машиностроение, 1987. — 264 с.
2. Ю.М. Климков Прикладная лазерная оптика. — М.: Машиностроение, 1985. — 66 с.
3. В.П. Коронкевич, А.Г. Полещук, А.Г. Седухин, Г.А. Ленкова Лазерные интерферометрические и дифракционные системы // Компьютерная оптика. — 2010, том 34, № 1, с. 4–23.
4. Н.П. Заказов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев Теория оптических систем. — М.: Физматлит, 1992. — 448 с.

© Черепанов Александр Николаевич (tchustu@mail.ru), Бочкарев Юрий Владимирович (bocha@d-test.ru),
Пестерев Сергей Николаевич (pesterev@d-test.ru), Попова Мария Александровна (mari.mashapopova@mail.ru),
Тыщенко Игорь Сергеевич (tis-public@yandex.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина