

7. **About** the Unified Modeling Language specification version 2.5.1 [Электрон. ресурс]: [http:// www.opengeospatial.org/](http://www.opengeospatial.org/) (дата обращения: 08.12.2017).

8. **Uckelmann D., Harrison M., Michahelles F.** An Architectural Approach towards the Future Internet of Things // Architecting the Internet of Things; Springer-Berlin: Heidelberg, Germany, 2011. Ch. 1. P. 1–24. DOI: 10.1007/978-3-642-19157-2_1.

9. **Kortuem G., Kawsar, F., Fitton D., Sundramoorthy V.** Smart Objects as Building Blocks for the Internet of Things / IEEE Internet Computing 14. 1. 2010. P. 44–51. DOI:10.1109/MIC.2009.143.

10. **Bröring A., Remke A., Lasnia D.** SenseBox – A Generic Sensor Platform for the Web of Things. In: Puiatti A., Gu T. (eds) Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services. MobiQuitous 2011. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. 2012. V. 104. Berlin: Springer, Heidelberg. Ch. 16. P. 186–196. DOI:10.1007/978-3-642-30973-1_16.

11. **Open** Geospatial Consortium. [Электрон. ресурс]: <http://www.omg.org/spec/UML> (дата обращения: 08.12.2017).

12. **OGC** Sensor Web Enablement (SWE). [Электрон. ресурс]: <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe> (дата обращения: 08.12.2017).

13. **Vermesan O., Friess P.** Volume Bringing IP to Low-power Smart Objects: The Smart Parking Case in the CALIPSO Project // Internet of Things Applications. From Research and Innovation to Market Deployment. The River Publishers; Aalborg,

Denmark. 2014. P. 287–313.

14. **OGC** SensorThings API Part 1: Sensing [Электрон. ресурс]: <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorthings>. (дата обращения: 08.12.2017).

15. **Cox S. J. D.** Geographic Information. Observations and Measurements, OGC Abstract Specification Topic 20 (same as ISO 19156:2011), OGC 10-004r3. 54. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.1142.3042>. (дата обращения: 08.12.2017).

16. **Майоров А. А., Матерухин А. В.** Анализ существующих технологий обработки потоков пространственно-временных данных для современных информационно-измерительных систем // Измерительная техника. 2017. № 4. с.31–34.

17. **Матерухин А. В.** Проблематика создания ГИС на основе систем управления потоками данных // Геодезия и картография. 2017. № 4. С. 44–47. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-922-4-44-47.

18. **Матерухин А. В.** Алгебраический подход к разработке абстрактных типов пространственно-временных данных // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 1. С. 114–117.

19. **Матерухин А. В.** Система типов для потоков пространственно-временных данных в виде расширенной сигнатуры многосортной алгебраической системы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 2. С. 121–125.

Дата принятия: 28.12.2017.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.518

Автомат бесконтактного контроля резьбы на основе метода оптической пространственной фильтрации

Д. Б. ГЕОРГИЕВ, В. И. МИРОНЧЕНКО, С. И. ОРЬКИН, В. Н. ШИШОВ

Научно-исследовательский технологический институт им. П. И. Снегирёва, Балашиха, Россия, e-mail: mirv2010@rambler.ru

Описан переналаживаемый автомат бесконтактного контроля наружной резьбы, позволяющий проводить комплексный контроль мелкой резьбы корпусных деталей с мягким покрытием. Работа автомата основана на методе оптической пространственной фильтрации.

Ключевые слова: оптический метод, резьба, диаметр, контроль, автомат.

The reset automatic tool for contactless control of external thread based on optical spatial filtering method is described. The automatic tool allows to carry out the complex control of fine threads of boxy parts with soft coating.

Kew words: optical method, thread, diameter, control, automatic tool.

Контроль параметров резьбы является одним из самых востребованных видов контроля геометрических параметров. Наиболее широко распространены простые и надёжные контактные методы контроля с применением жёстких резьбовых калибров. Для наружных резьб наиболее часто в

производстве контролируются наружный, средний и приведённый средний диаметры резьбы, внутренний диаметр резьбы контролируется значительно реже. Согласно стандарту [1] с учётом контрольных и установочных калибров только для контроля наружной резьбы существуют резьбовые калибры

16 видов. Использование жёстких калибров приводит к ряду проблем, без решения которых невозможно создать автоматическое средство контроля. К таким проблемам относится обеспечение соосности контролируемой резьбы и калибра, относительного вращения и осевого перемещения детали и калибра, заданных моментов их свинчивания и развинчивания, а также попадание заходных витков контролируемой резьбы в заходные витки резьбы калибра. При этом требуется достаточно высокая производительность автоматического средства, превышающая производительность ручного контроля. В процессе контактного контроля калибры изнашиваются, поэтому их необходимо подвергать периодической калибровке и заменять по мере износа. Для резьбы контролируемой детали с покрытием, особенно мягким, трение скольжения при свинчивании приводит к стиранию покрытия и засветлению резьбовой поверхности, что делает калибр непригодным для контроля деталей с мягким покрытием.

Проблему контроля таких деталей частично решают электрические приборы контроля резьбы, контролирующие приведённый средний диаметр резьбы с помощью разрезных резьбовых полуколец. Деталь вручную устанавливают в прибор, затем с некоторым усилием сдвигают резьбовые полукольца до сжатия с деталью, при несовпадении резьбы контролируемой детали с резьбой калибра ослабляют усилие и поворачивают деталь вручную до совпадения витков, затем снова сдвигают резьбовые полукольца. По расстоянию между резьбовыми полукольцами (настроечному уровню) производится контроль. При этом происходит смятие или частичное стирание мягкого покрытия витков. Поэтому применение раздвижных резьбовых полуколец полностью не устраняет возможность повреждения покрытия. Остаются также проблемы износа резьбовых полуколец и их калибровки.

Использование бесконтактных оптических методов контроля резьбы позволяет избежать всех описанных выше проблем. Наиболее распространёнными средствами бесконтактного контроля являются микроскопы, с помощью которых можно контролировать резьбу поэлементно. Однако средний и приведённый средний диаметры непосредственно контролировать невозможно, эти параметры рассчитывают по результатам измерения элементов резьбы. Микроскопы оснащают системами технического зрения и программами обработки изображений. Создано также специальное автоматизированное оборудование для контроля геометрических параметров резьб.

Краткий обзор существующих автоматизированных средств бесконтактного контроля резьбы. Оптическая измерительная машина Vici Vision M304-Necho (Vici Vision, Италия) позволяет контролировать наружный (до 40 мм), внутренний, средний диаметры наружной резьбы, а также угол профиля, шаг и число витков с погрешностью до 2 мкм. Время измерения 30–60 с. Используется метод проекционного лазерного сканирования резьбы.

Установка оптического контроля качества трубных резьб И100-8 (ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ», Россия) предназначена для оперативного автоматизированного контроля качества наружных резьб насосно-компрессорных труб

диаметром 60, 73 и 89 мм. В состав установки входят следующие элементы: пневмомеханическое устройство фиксации труб; пневматическая система; система технического зрения для контроля резьбовой части труб в двух взаимно перпендикулярных сечениях; устройство коммутации и сопряжения системы технического зрения с компьютером; компьютер для управления, обработки, хранения и отображения информации; специализированное программное обеспечение. Установка позволяет контролировать шаг, высоту и угол профиля, конусность и угол наклона резьбы. Производительность составляет 20 шт./ч, применяется проекционный метод.

Автоматизированная система контроля геометрии резьбы (ООО «Оптические измерительные системы», ООО «Дизель-тест-Комплект», Россия) служит для автоматического бесконтактного лазерного контроля геометрических параметров внешней и внутренней резьбы труб, замковых муфт и пр. Работа системы основана на триангуляционном методе. Система контролирует геометрию резьбы, сигналы о её годности поступают в систему управления, затем эти данные и информация о сортаменте трубы с учётом присвоенного номера измеряемой трубы направляется в автоматическую систему управления. Контроль производится в восьми сечениях, точность контроля геометрии профиля резьбы – согласно допускам, указанным в стандарте [2]. Оператор линии в течение не более 2 ч может перенастроить систему для контроля параметров резьбы труб различного сортамента и типоразмеров. Создано программное обеспечение автоматизированного контроля, регистрации, обработки, отображения, документирования и сохранения результатов с передачей их по компьютерной сети по согласованному протоколу.

Автоматизированные комплексы бесконтактного измерения геометрических параметров и контроля внешнего вида деталей, измерения резьбы и глубины ГЕОМЕТРИКС-С (АО «Виматек», Россия) на основе триангуляционных датчиков контролируют средний диаметр резьбы 16–18 мм с погрешностью измерения 40 мкм, время контроля одной детали составляет 10 с.

В лазерных системах ОПТЭЛ (ООО «Оптэл», Россия) для автоматизированного неразрушающего контроля геометрии наружной и внутренней резьбы осуществляется сканирование лазерным лучом поверхности резьбы, время измерения 20–40 с.

Таким образом, из анализа рассмотренных автоматизированных средств контроля резьбы следует, что основными применяемыми оптическими методами являются проекционный и триангуляционный. Указанные методы используются только для поэлементного контроля резьбы, а реализующее эти методы оборудование имеет невысокую производительность. Это связано как с необходимостью относительного манипулирования измеряемой деталью и средства контроля, так и с большим объёмом обрабатываемой информации.

Метод оптической пространственной фильтрации. Применение метода позволяет осуществлять комплексный контроль резьбы и значительно повышать производительность за счёт предварительной обработки контура проекции резьбы с помощью оптического процессора. Согласно этому методу осуществляется преобразование Фурье контура теневой про-

екции контролируемой резьбы и из полученного пространственного спектра выделяются участки, несущие информацию о контролируемых параметрах. Затем производится обратное преобразование Фурье, и в приборе с зарядовой связью (ПЗС-матрице) формируется изображение в виде полос, параллельных оси резьбы. По расстоянию между полосами определяют искомые параметры. Полученная оптическая картина далее преобразуется в видеосигнал телекамеры.

При контроле резьбы методом полосовой пространственной фильтрации измерительная информация снимается при взаимодействии параллельного пучка света с контролируемой резьбой и определяется положением линии касания винтовой поверхности с освещающим её параллельным пучком света. Параметры контролируемой резьбы в спектре световой картины можно определить следующим образом. Бесконечный профиль резьбы математически описывается бесконечной полуплоскостью, линейная граница которой дополнена повторяющимися трапециями. Поскольку элементом профиля резьбы является трапеция, для расчёта световой картины резьбы необходимо рассчитать дифракционную картину трапеции, затем перейти к дифракционной картине бесконечного резьбового профиля, математически смоделировать пространственную фильтрацию и осуществить обратное преобразование Фурье.

На рис. 1 представлен профиль резьбы в следующей системе координат: начало координат – точка O – принадлежит боковой стороне профиля витка резьбы; оси OY , OX направлены параллельно и перпендикулярно оси резьбы соответственно, $j = \sqrt{-1}$. Тогда высоту профиля резьбы можно представить отрезком $[-h_1, h_2]$. Дифракционная картина трапеции определяется как двумерное преобразование Фурье от единицы с пределами интегрирования, определяемыми сторонами трапеции:

$$F_t(\omega_x, \omega_y) = \int_{-p/2 + x \operatorname{tg}(\alpha''/2)}^{x \operatorname{tg}(\alpha'/2)} \exp(-j\omega_y y) dy \int_{-h_1}^{h_2} \exp(-jx\omega_x) dx, \quad (1)$$

где ω_x , ω_y – пространственные частоты; p – шаг резьбы; α' , α'' – углы профиля; $h_1 = (d_2 - d_1)/2$; $h_2 = (d - d_2)/2$; d , d_1 , d_2 – наружный, внутренний и средний диаметры резьбы, соответственно.

На основании теоремы смещения можно получить выражение для распределения амплитуды света в пространственно-частотном спектре резьбового профиля для N его периодов [3,4]:

$$F_p(\omega_x, \omega_y) = F_t(\omega_x, \omega_y) \sum_{k=1}^N \exp(j(k-1)\omega_y p) = F_t(\omega_x, \omega_y) \gamma(\omega_y, N). \quad (2)$$

При большом числе ($N \rightarrow \infty$) периодов резьбового профиля справедливы равенства

$$\lim \gamma(\omega_y, N) = \begin{cases} 1 & \text{при } \omega_y = 2\pi n/p; \\ 0 & \text{при всех других } \omega_y, \end{cases} \quad (3)$$

где n – номер дифракционного порядка.

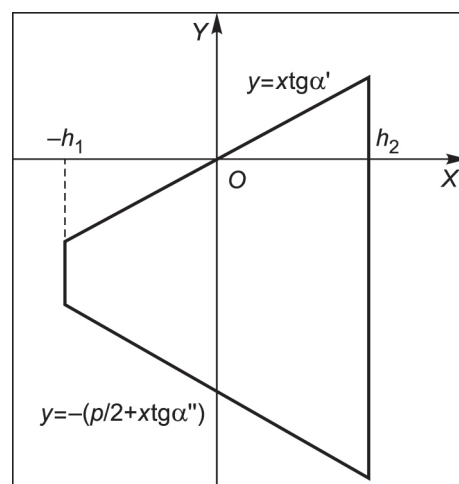


Рис. 1. Профиль резьбы

Из (1)–(3) можно получить окончательное выражение для распределения амплитуды света на дифракционной картине резьбового профиля:

$$F_p(\omega_x, n) = \frac{p}{2\pi n} \{ \Phi[\omega_x + 2\pi n / (p \operatorname{ctg} 0,5\alpha')] + (-1)^{n+1} \Phi[\omega_x - 2\pi n / (p \operatorname{ctg} 0,5\alpha'')] \},$$

где $\Phi(\omega_x) = [\exp(j\omega_x h_1) - \exp(-j\omega_x h_2)] / \omega_x$.

В результате полосовой пространственной фильтрации n становится константой. Если учесть обратное преобразование Фурье функции

$$F^{-1}[\Phi(\omega_x)] = \varphi(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } -h_1 \leq x \leq h_2; \\ 0 & \text{при } x < -h_1, x > h_2, \end{cases} \quad (4)$$

то по теореме смещения можно найти распределение амплитуды в световой картине резьбового профиля:

$$f(x) = F^{-1}[F_p(\omega_x)] = \frac{p}{2\pi n} \varphi(x) \{ \exp[j2\pi n x / (p \operatorname{ctg} 0,5\alpha')] + (-1)^{n+1} \exp[-j2\pi n x / (p \operatorname{ctg} 0,5\alpha'')] \}. \quad (5)$$

Поперечное распределение интенсивности световой картины резьбы, сформированной одним из боковых дифракционных порядков, определяется выражением

$$I = f^2(x - d_2/2) + f^2(-x + d_2/2). \quad (6)$$

При совместном решении системы уравнений (4)–(6) получим

$$I = \begin{cases} I_0 \sin^2[2\pi n(x + 0,5d_2) / p \operatorname{ctg} 0,5\alpha + \pi n/2] & \text{при } -d/2 \leq x \leq -d_1/2; \\ I_0 \sin^2[2\pi n(x - 0,5d_2) / p \operatorname{ctg} 0,5\alpha - \pi n/2] & \text{при } -d_1/2 \leq x \leq d/2; \\ 0 & \text{при всех других } x, \end{cases}$$

где I_0 – интенсивность при максимуме светового распределения; $\alpha = (\alpha' + \alpha'')/2$.



Рис. 2. Пространственно-частотный спектр резьбы

мое количество информации о контролируемых параметрах резьбы.

Следует отметить, что расстояние между порядками спектра обратно пропорционально шагу резьбы, поэтому метод полосовой пространственной фильтрации пригоден только для контроля мелких (с шагом не более 1 мм) резьб. Наибольший контролируемый диаметр резьбы определяется размерами оптической системы.

Полосовую пространственную фильтрацию, как и все оптические методы, можно применять только для контроля чистых и сухих деталей без наружных дефектов на резьбе типа забоин, замятий, наличие которых приводит к ложной как браковке, так и приёмке. Поэтому непосредственно перед контролем диаметров резьбу необходимо проверять. Требования к условиям эксплуатации оптического оборудования для контроля резьбы соответствуют требованиям для оборудования с допускаемыми значениями инструментальной погрешности XI ряда по стандарту [5].

На рис. 2 представлен пространственно-частотный спектр резьбы. С увеличением порядка интенсивность значительно падает, интенсивности при $n=0; 1; 2; 3$ относятся как $1,000 : 0,170 : 0,056 : 0,025$. Нулевой и первый порядки содержат недостаточно информации, необходимой для оценки приведённого среднего диаметра, влияющего на свинчиваемость. Для этого наиболее подходит второй порядок спектра, содержащий требу-

Автоматическое устройство бесконтактного контроля резьбы. Авторами настоящей статьи создано автоматическое устройство бесконтактного контроля резьбы (далее – автомат), реализующее метод полосовой пространственной фильтрации. Данное устройство позволяет контролировать наружный, внутренний, средний и приведённый средний диаметры наружной резьбы SpM18×0,75-7h6h детали типа «корпус» после нанесения покрытия. Покрытие (мягкое, оловянистое) повреждается при контроле резьбовыми калибрами. Автомат можно перенастроить для контроля деталей такого типа с аналогичной резьбой, если осевое сечение резьбы вписывается в диаметр 30 мм. Автомат обеспечивает загрузку деталей в измерительную позицию, контроль наружного, среднего и внутреннего диаметров наружной резьбы, снятие деталей с измерительной позиции, сортировку деталей на две

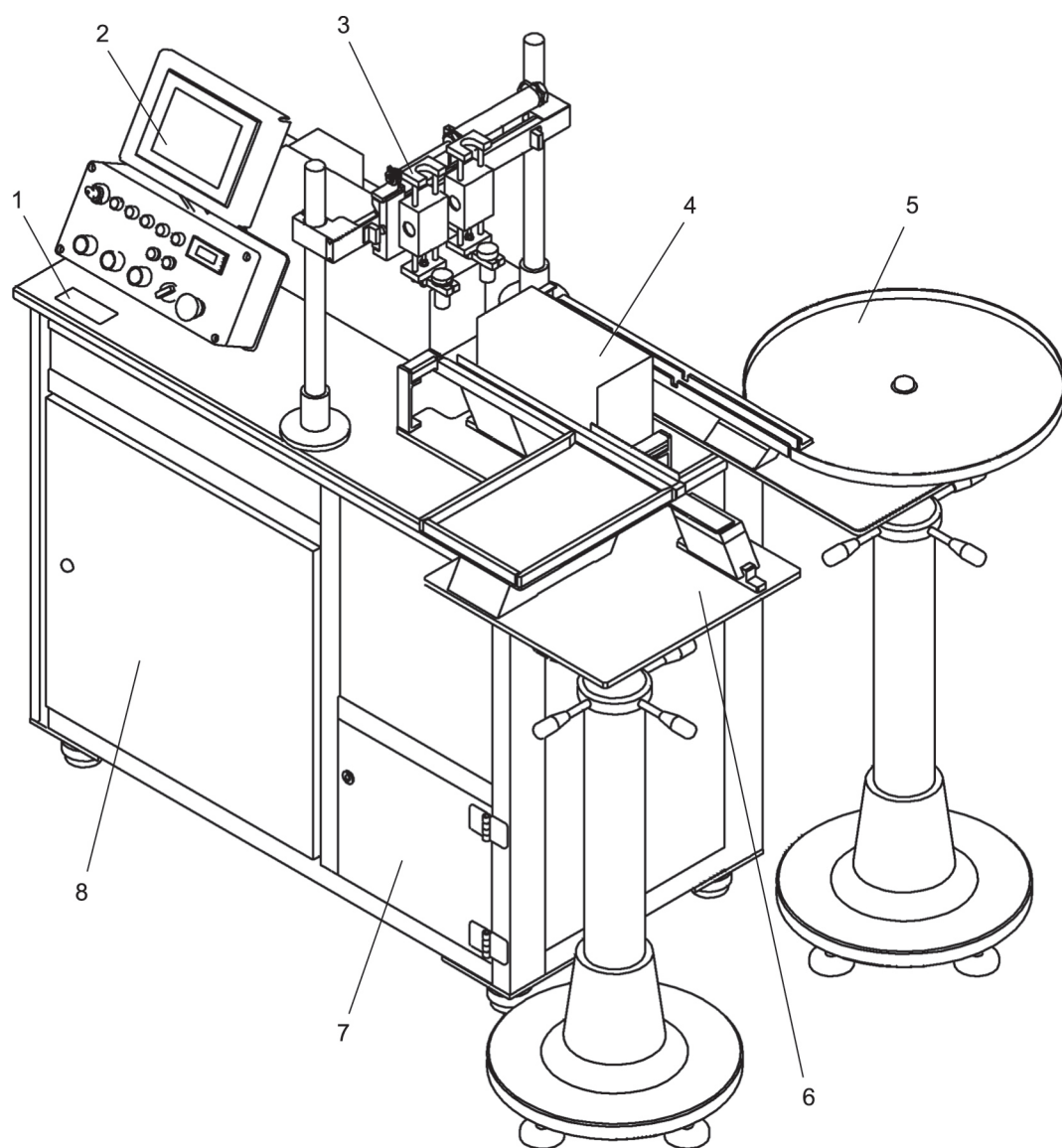


Рис. 3. Автомат бесконтактного контроля резьбы: 1 – стол; 2 – стойка управления; 3 – манипулятор; 4 – устройство контроля; 5, 6 – устройства загрузки и выгрузки, соответственно; 7 – блок пневматический; 8 – первый шкаф управления

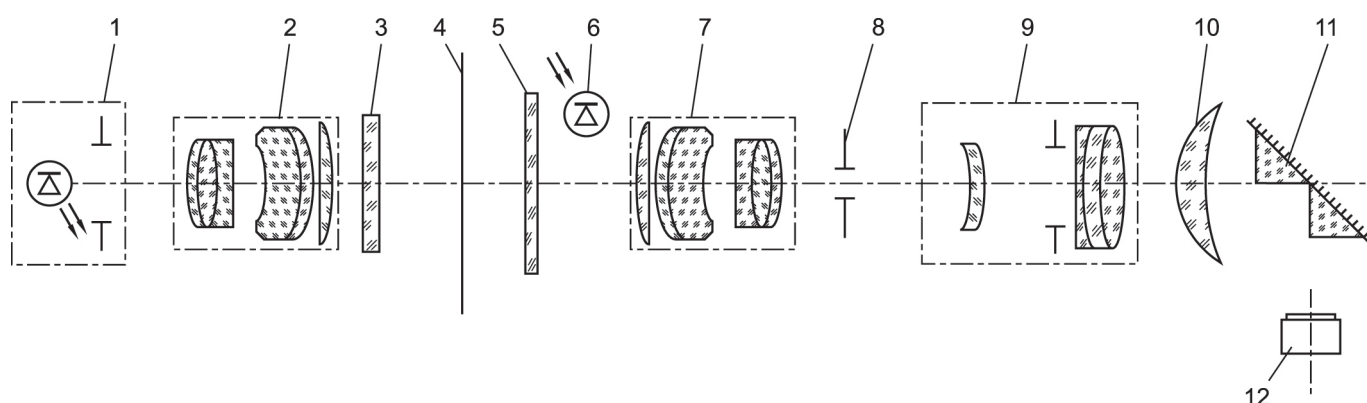


Рис. 4. Оптическая схема автомата:

1 – излучатель с диафрагмой; 2 – коллиматор; 3, 5 – защитные стёкла; 4 – предметная плоскость; 6 – фотоэлектрический датчик; 7, 9 – объективы прямого и обратного преобразований Фурье, соответственно; 8 – оптическая щель; 10 – цилиндрическая линза; 11 – узел поворотных призм; 12 – видеокамера

группы (годные и бракованные) с накоплением последних на транспортировочном поддоне.

Автомат (схема представлена на рис. 3) состоит из стола 1, манипулятора 3, установленных на столе (на отдельных стойках) устройств контроля 4, загрузки 5 и выгрузки 6, пневматического блока 7, первого 8 и второго (на рис. 3 не показан) шкафов управления, стойки управления 2. Устройство контроля 4 содержит оптическую систему. Устройство загрузки 5 включает стойку, круговой и линейный вибраторы, датчики заполнения и опустошения линейного вибратора, толкатель, позицию захвата. В устройство выгрузки 6 входят шлагбаум, толкатель, плита, три линейных вибратора, два датчика, поддон, толкатель брака, лоток. Манипулятор 3 состоит из стоек с направляющими и пневматических захватов. Перемещение захватов, толкателей, захватных цанг осуществляется с помощью пневмоцилиндров.

Оптическая система предназначена для получения измерительной информации о контролируемой резьбе, выполнена в виде блока оптического преобразования информации и закрыта кожухами. Система содержит два модуля – осветителя и коррелятора – с совпадающими оптическими осями, схема системы приведена на рис. 4. Модуль осветителя служит для освещения резьбы контролируемой детали коллимированным монохроматическим пучком света с длиной волны 650 нм и включает установленные на одной оптической оси излучатель 1 с диафрагмой, коллиматор 2 и защитное стекло 3. В качестве излучателя используется лазерный модуль мощностью 15 мВт (3 класс опасности по [6]), в качестве коллиматора – фотографический объектив Юпитер-9. Диаметр пучка на выходе осветителя определяется размером контролируемой резьбы и устанавливается положением диафрагмы объектива.

Модуль коррелятора применяется для оптической обработки контура теневой проекции контролируемой резьбы и преобразования полученной световой картины в видеосигнал. Он содержит установленные на одной оптической оси защитное стекло 5, фотоэлектрический датчик 6, объективы прямого 7 и обратного 9 преобразований Фурье, оптическую щель 8 в задней фокальной плоскости объектива, цилиндрическую линзу 10, узел поворотных призм 11 и видеокамеру

12, входящую в состав системы технического зрения. Фотоэлектрический датчик 6 установлен в пучке света вне оптической оси для контроля уровня освещённости на входе коррелятора.

Система технического зрения состоит из цифровой видеокамеры SDU-R415, выполненной на ПЗС-матрице, компьютера Advantix ER-3000 с программным обеспечением, адаптера питания (питание видеокамеры осуществляется от компьютера через USB-порт). Цифровая видеокамера имеет встроенный контроллер, используемый для обработки изображения и содержащий микроконтроллер стандартной архитектуры и интегрированный контроллер с USB-портом. Адаптеры компьютера и лазера подключены через сетевой фильтр к источнику бесперебойного питания и располагаются вместе с компьютером во втором шкафу управления. Работой автомата управляет контроллер Fastwel I/O (CMP 713), находящегося вместе с остальной электрической частью в первом шкафу 8 управления (см. рис. 3).

Измерительная позиция состоит из сменной оправки в виде цанги, вала и шагового привода. Ось цанги лежит в предметной плоскости объектива прямого преобразования Фурье и проходит через его оптическую ось.

При включении автомата начинает работать излучатель лазерного модуля. Детали из устройства загрузки подаются в позицию захвата, откуда манипулятор берёт деталь за верхний цилиндр и устанавливает на оправку. В модуле коррелятора производится оптическая обработка контура теневой проекции контролируемой резьбы и преобразование полученной световой картины в видеосигнал. Преобразование происходит следующим образом. В объективе выполняется прямое преобразование Фурье теневой проекции контура резьбы контролируемой детали. В задней фокальной плоскости объектива формируется дифракционная картина (пространственно-частотный спектр) проекции контролируемой резьбы. В оптической щели проводится пространственная фильтрация полученного после преобразования Фурье пространственного спектра. В объективе обратного преобразования Фурье осуществляется обратное преобразование отфильтрованной световой картины, которая с помощью цилиндрической лин-

зы сжимается по вертикальной оси. В узле поворотных призм световая картина диаметрально противоположных участков резьбы проецируется на светочувствительную поверхность фотоприёмника видеокамеры, при этом формируется световая картина в виде двух пар параллельных полос. Расстояния между полосами содержат информацию о контролируемых параметрах резьбы.

В видеокамере световая картина преобразуется в видеосигнал, который затем проходит предварительную обработку по заданной программе. Изображение оцифровывается и перед передачей в компьютер записывается в буферную память, имеющую логическую организацию типа FIFO (First In – First Out). Благодаря этому данные могут считываться из буферной памяти и передаваться в компьютер по USB одновременно с процессом их считывания и оцифровки, не дожидаясь окончания записи всего кадра в буфер. Таким образом повышается скорость передачи данных и уменьшается задержка между окончанием экспозиции и передачей кадра в компьютер. Затем по команде контроллера полученный кадр поступает в компьютер для окончательной обработки.

Получение измерительной информации производится в шести осевых сечениях детали (кадрах) при её повороте через каждые 30°. Первый и последний кадры снимаются при неподвижной детали перед началом поворота и после её остановки, соответственно, остальные – в процессе поворота детали, установленной на цанге измерительной позиции, которая вращается под действием шагового привода.

Для работы видеокамеры и передачи с неё кадров используется программное обеспечение CAM VIEW. Обработка кадров и передача информации о контролируемых параметрах в контроллер производится с помощью разработанного на языке C++ программного обеспечения с использованием Microsoft Visual Studio 2010 и библиотеки OpenCV, работающих в операционной среде Windows 7. Программа управления автоматом для контроллера написана на языке FBD (Function Block Diagram), среда разработки, компилятор – CoDeSys 2.3.

Настройка видеокамеры производится по специально изготовленным и аттестованным стандартным образцам. Для устранения влияния помех оптического тракта при настройке снимается позиция контроля без детали, а изображение в этом кадре затем вычитается из изображений всех последующих кадров. Компьютер обрабатывает измерительную информацию видеокамеры, делает заключение о годности детали и результат выдаёт в контроллер системы управления. Контроллер отслеживает состояние датчиков автомата и при соответствии заданным условиям выдаёт соответствующую команду на модуль разбраковки. Деталь снимается с оправки и перемещается в позицию разбраковки, на пневмоцилиндр разбраковки подаётся команда на разбраковку, и деталь либо направляется в накопитель годных по вибрлотку, либо сталкивается в накопитель брака. Одновременно подсчитываются детали, признанные годными, и результаты подсчёта вместе с данными разбраковки последней детали выводятся на табло оператора.

Операции загрузки и выгрузки совмещены, поэтому одновременно с выгрузкой предыдущей детали следующая де-

таль устанавливается из позиции загрузки в измерительную позицию, и процесс контроля повторяется. Если при опросе датчиков контролером устанавливается их ненадлежащее состояние, то включается звуковой аварийный сигнал, на индикаторы пульта управления и панель оператора поступает сообщение о причине аварии, и станок останавливается до её устранения. Настройка и контроль работы автомата проводится с помощью монитора, подключённого к компьютеру. Контроллер производит подсчёт количества забракованных и принятых деталей и выводит эту информацию на панель и табло оператора, соответственно.

Технические характеристики автомата

Контролируемые диаметры резьбы:

наружный $d_{\max}$	18,000 мм
внутренний $d_{1\max}$	17,188 мм
средний $d_{2\max}$	17,513 мм
Основная погрешность, не более	30 мкм
Производительность	900 шт./ч
Напряжение питания	~(220±22) В
Частота промышленной сети	(50±1) Гц
Потребляемая мощность не более	200 Вт
Рабочее давление в пневмосистеме	(0,40±0,05) МПа
Расход воздуха, не более	3 м³/ч
Габаритные размеры Д×Ш×В, не более	1555×1105×1530 мм
Масса, не более	700 кг

По сравнению с описанными выше отечественными и зарубежными аналогами автомат позволяет контролировать приведённый средний диаметр, имеет более высокие производительность и степень автоматизации. В отличие от автомата «Арбитр» [4] созданный автомат контролирует не резьбовую втулку, а резьбу большего диаметра детали типа «корпус», создан на современной элементной базе, имеет при той же точности меньшие массогабаритные характеристики, потребляемую мощность, является переналаживаемым. Для переналадки автомата необходимо на измерительной позиции сменить цангу на соответствующую контролируемой детали, настроить автомат по эталонным мерам этих деталей, установить приёмочные границы, внести требуемые изменения в программу обработки информации. Время переналадки не превышает 2 ч. В отличие от рассмотренных аналогов автомат позволяет проводить комплексный контроль резьбы.

Заводские испытания автомата проводились на деталях типа «корпус» с резьбой СпМ17,96х0,75-7h6h с оловянистым покрытием. Автомат внедрён на предприятии отрасли. Установлено, что при контроле не повреждается покрытие контролируемых деталей, процесс контроля полностью автоматизирован. Кроме того, нет необходимости в изготовлении дорогостоящих изнашиваемых резьбовых калибров, контркалибров и их периодической аттестации.

Л и т е р а т у р а

1. ГОСТ 24997–2004. Калибры для метрической резьбы. Допуски.

2. ГОСТ 632–80. Трубы обсадные и муфты к ним. Технические условия.

3. Миронченко В. И. Автоматизация контроля геометрических параметров изделий. М.: ФГУП «ГосНИП «Расчёт», 2011.

4. Иванов А. А., Миронченко В. И., Мицуро Р. Т. Родин В. М., Шишов В. Н. Автомат бесконтактного контроля на-

ружных резьб // Измерительная техника. 1991. № 9. С. 31–32.

5. ГОСТ 8.050–73. ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.

6. СанПиН 5894-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

Дата принятия: 15.12.2017.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

519.688, 621.373.826, 53.082.54

Минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера с помощью интерферометра Маха–Цендера на основе волокна с сохранением поляризации

А. Б. ПНЕВ, А. В. БОРИСОВА, Я. А. ДЕНИСОВА, К. В. СТЕПАНОВ, А. А. ЖИРНОВ, А. О. ЧЕРНУЦКИЙ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия,
e-mail: apniov@gmail.com, thefrost@list.ru

Предложено устройство для измерений фазовых шумов с использованием интерферометра Маха–Цендера, все волоконные элементы которого выполнены на основе волокна с сохранением состояния поляризации. Это позволяет не применять в устройстве опорный источник излучения и таким образом значительно снизить стоимость установки. В устройстве формируются два интерференционных сигнала от ортогонально поляризованных волн, разделяемые затем поляризационным демультиплексором, что устраняет влияние внешних шумов на результат измерения. Описан алгоритм вычисления фазового шума и приведена оценка влияния температурной неустойчивости. Для оценки работоспособности установки и алгоритма обработки сигнала выполнено сравнение вычисленных и заданных при моделировании характеристик фазового шума.

Ключевые слова: фазовый шум, волокно с сохранением поляризации, интерферометр Маха–Цендера, лазер, относительный шум интенсивности, спектральная плотность мощности.

A scheme for measuring phase noise using a PM-fiber based Mach-Zehnder interferometer is proposed. Two interference signals from orthogonally polarized waves are formed in the scheme, which subsequently are separated by a polarization demultiplexer. This allows to avoid the influence of external noise on the measurement result. An algorithm is described for calculating phase noise and the effect of temperature instability is estimated. In order to assess the operability of the scheme and the signal processing algorithm, the comparison is made of the calculated values of the phase noise and the values specified in the simulation.

Key words: phase noise, PM-fiber, Mach-Zehnder interferometer (MZI), relative intensity noise (RIN), power spectral density.

Фазовый шум лазера представляет флуктуации фазы излучения и количественно характеризуется спектральной плотностью мощности

$$R_{\varphi}(f) = |F\{\varphi(t)\}|^2 / T,$$

где $F\{\varphi(t)\}$ – Фурье-образ флуктуации фазы; $\varphi(t)$ – динамика изменения фазы интерференционного сигнала; T – период измерений.

Часто можно встретить определение фазового шума как корня из спектральной плотности:

$$S_{\varphi}(f) = \sqrt{R_{\varphi}(f)} = \sqrt{|F\{\varphi(t)\}|^2 / T}.$$

Основным источником фазового шума лазера является квантовый шум, связанный со спонтанным излучением активной среды и оптическими потерями. Возможным источником также может стать технический шум, возникающий из-за вибра-