

УДК 533.9.082.5

ЛАЗЕР КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Сакович А.П., Навицкая Т.В., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрен проект лазерного 3D-сканера, предназначенного для оценки качества продукции и выявления поверхностных дефектов. Показаны принцип работы системы на основе лазерной триангуляции, состав функциональной схемы и логика обработки измерительных данных. Выполнен краткий сравнительный анализ промышленных роботизированных комплексов AM-DESK, AutoScan-T и AM-CELL C Series. Обоснован выбор параметров разрабатываемого лазерного модуля PL450B, а также описан процесс его цифрового моделирования. Полученные результаты могут быть использованы при создании учебного и демонстрационного образца системы контроля качества.

Ключевые слова. Лазерный 3D-сканер, контроль качества, триангуляция, роботизированное сканирование, цифровое моделирование, PL450B.

Введение. В последние годы бесконтактные методы контроля качества получили широкое распространение в промышленности, медицине, строительстве и инженерной диагностике. Одним из наиболее эффективных решений в этой области является лазерное 3D-сканирование, позволяющее быстро получать цифровые копии изделий, измерять геометрию поверхностей и обнаруживать отклонения формы без механического контакта с объектом [4, 5]. Целью данной работы является анализ принципов функционирования лазерного 3D-сканера для оценки качества продукции, сравнение существующих промышленных решений и обоснование параметров собственного проектного варианта системы.

1. Принцип работы лазерного 3D-сканера. В основе рассматриваемой системы лежит метод лазерной триангуляции. Лазерный излучатель формирует световой луч или линию, которая проецируется на поверхность изделия. Отражённое излучение регистрируется приёмной оптикой и фотодиодным или камерным модулем, после чего измерительный блок вычисляет расстояние до точки поверхности и передаёт данные на микрокомпьютер. На основе массива таких измерений строится облако точек, а затем трёхмерная модель объекта. Эта модель используется для контроля размеров, сравнения с эталоном и поиска дефектов поверхности.

Функциональная схема такой системы приведена на рисунке 1. В неё входят полупроводниковый лазер, блок измерения временных интервалов, фотодиод-приёмник, передающая и приёмная оптика, а также вычислительный модуль. Практическая ценность подобной схемы состоит в том, что она позволяет автоматизировать измерения и уменьшить влияние человеческого фактора при контроле качества изделий сложной формы. При использовании роботизированного манипулятора сканер может перемещаться по заданной траектории и проводить инспекцию объекта с разных ракурсов, что особенно важно для обнаружения локальных дефектов.



Рисунок 1 – Функциональная схема лазерного 3D-сканера для контроля качества продукции

2. Сравнительный анализ существующих систем. Для выбора концепции разрабатываемой установки был выполнен обзор промышленных систем лазерного сканирования [1–3]. В таблице 1

приведены основные характеристики комплексов AM-DESK Automated 3D Measurement Station, AutoScan-T 3D System и AM-CELL C Series Optical Automated 3D Measurement System. Сравнение показало, что эти решения ориентированы на автоматизированный контроль геометрии изделий, имеют значительные рабочие зоны и поддерживают интеграцию в производственную среду.

Таблица 1 – Сравнение промышленных роботизированных систем лазерного 3D-сканирования

Параметр	AM-DESK	AutoScan-T	AM-CELL C
Рабочая зона, м	4 × 3 × 1,3	4,5 × 4 × 1,5	5 × 4 × 1,8
Тип робота	Кобот		
Подключение	TCP/IP, USB 3.0, OPC UA		
Питание	~220 V / 50-60 Hz		
Мощность, кВт	1,5	2,2	3,0
Масса, кг	200	500	800
Макс. размер объекта, мм	D≤1200, H≤1000	D≤1500, H≤1200	D≤1800, H≤1500
Класс лазера	Класс II (безопасный для глаз)		
Форматы вывода	.stl, .ply, .obj, .igs, .wrl, .xyz, .dae, .fbx, .ma, .asc		
Страна-производитель	Китай		
Ориентировочная стоимость	100-300 тыс. \$	70-150 тыс. \$	100-300 тыс. \$

Сопоставление параметров показывает, что промышленные комплексы отличаются высокой стоимостью и предназначены прежде всего для интеграции в крупные производственные линии. Для учебного проекта целесообразно сосредоточиться не на создании полного промышленного комплекса, а на разработке компактного лазерного модуля и его цифрового прототипа. Такой подход позволяет изучить физические принципы работы системы и подготовить основу для последующей модернизации конструкции.

3. Выбор параметров и цифровое моделирование. На основании проведённого обзора для проектного варианта был выбран лазерный диод PL450B с длиной волны 450 нм и классом безопасности 2. Для него характерны беспроводная передача данных, скорость сбора информации порядка 30 000-36 000 точек/с, а также толщина линии 27,1 мм при минимальном рабочем расстоянии, 39,2 мм при среднем и 51,3 мм при максимальном. Рабочий температурный диапазон эксплуатации составляет от 5 до 40 °С, а диапазон хранения – от -25 до +70 °С. Такой набор параметров делает выбранный модуль пригодным для демонстрационного сканирования и оценки заметных поверхностных дефектов.

Компоновка проектируемого лазерного модуля приведена на рисунке 2. В конструкции предусмотрены окно лазерного излучателя и приёмника, отсек для батареи, интерфейс программирования и крепление для установки на манипулятор. Подобная схема даёт возможность разместить модуль на роботизированной платформе и использовать его для сканирования объектов с различной геометрией.

Работа подобной системы на практике включает несколько последовательных этапов: подготовку и позиционирование объекта, проецирование лазерной линии, регистрацию отражённого сигнала, построение облака точек, формирование трёхмерной модели и её сравнение с эталоном. Такой алгоритм позволяет не только визуализировать изделие, но и использовать результаты измерений для автоматизированного контроля допусков, выявления деформаций, перекосов и локальных повреждений поверхности. В этом состоит одно из главных преимуществ лазерного 3D-сканирования перед традиционными контактными методами измерения [4, 5].

Вместе с тем, при проектировании сканирующей системы необходимо учитывать и ряд ограничений. На точность результатов влияют свойства поверхности объекта, уровень внешней освещённости, расстояние до изделия и толщина формируемой лазерной линии. Для объектов с мелкими дефектами или сложной отражающей поверхностью требуется более тонкий луч, дополнительная калибровка и корректная программная фильтрация шумов. Поэтому даже учебный прототип должен рассматриваться не только как средство визуализации, но и как основа для дальнейших экспериментальных исследований параметров лазерного контроля.



Рисунок 2 – Компоновка разрабатываемого лазерного модуля

Перспективными направлениями развития проекта являются интеграция модуля с роботизированным манипулятором, разработка программной обработки облака точек и автоматическое сравнение результата сканирования с эталонной геометрией. В прикладном плане такие решения востребованы при контроле качества деталей в машиностроении, анализе поверхности изделий после обработки, а также при подготовке цифровых моделей для архивирования и обратного проектирования. Следовательно, тема проектной работы обладает не только учебной, но и практической значимостью.

К достоинствам выбранной конфигурации можно отнести применение лазера с длиной волны 450 нм (область синего цвета), достаточную скорость передачи данных и возможность беспроводного взаимодействия с вычислительным модулем. При контроле качества такие свойства важны, поскольку позволяют быстрее получать измерительную информацию и использовать сканер в составе гибких роботизированных систем. Кроме того, бесконтактный характер измерения делает возможной работу с изделиями сложной формы и с объектами, для которых нежелательно механическое воздействие.

Одновременно необходимо учитывать, что точность контроля зависит от соблюдения рабочих расстояний и температурного режима, а сравнительно большая толщина линии ограничивает возможности обнаружения микродефектов. Это означает, что созданную модель следует рассматривать как основу для дальнейшего инженерного уточнения. Последующее совершенствование проекта может быть связано с выбором более чувствительного приёмника, оптимизацией оптики и созданием программного модуля, автоматически оценивающего расхождение между измеренной и эталонной геометрией.

Цифровое моделирование выполнялось поэтапно. Сначала были изучены аналоги и определены основные конструктивные элементы будущей системы. Затем в Autodesk Maya 2022 была собрана геометрия устройства и сцены, после чего в Adobe Substance 3D Painter подготовлены текстуры отдельных компонентов. На завершающем этапе были настроены освещение, камеры и анимация перемещения. Полученная 3D-модель может использоваться как для визуализации проекта, так и для демонстрации принципа работы роботизированного лазерного сканера.

Заключение. Выполненная адаптация результатов исследований к формату конференционной статьи показывает, что ключевые результаты проекта можно представить в компактной форме без потери основной технической идеи. Рассмотренная система лазерного 3D-сканирования основана на бесконтактном измерении свойств поверхности и предназначена для оценки качества продукции по геометрическим признакам. Сравнение существующих промышленных комплексов позволило обосновать выбор характеристик учебного прототипа, а цифровое моделирование подтвердило реализуемость выбранной компоновки. В дальнейшем работа может быть продолжена в направлении повышения точности измерений, уменьшения толщины лазерной линии и расширения программной обработки данных.

Список использованных источников:

1. m&h LS-R-4.8 Radio laser scanner for machine tools [Электронный ресурс] / Hexagon. — URL: <https://hexagon.com/products/m-h-ls-r-4-8> (дата обращения: 29.03.2026).
2. AM-CELL C Series Optical Automated 3D Measurement System [Электронный ресурс] / SCANOLGY. — URL: <https://www.3d-scantech.com/am-cell-c-series-optical-automated-3d-measurement-system/> (дата обращения: 29.03.2026).

3. AutoScan-T 3D System [Электронный ресурс] / SCANOLOGY. — URL: <https://www.3d-scantech.com/product/autoscan-t-3d-system/> (дата обращения: 29.03.2026).
4. 3D-сканер [Электронный ресурс] // Википедия. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/3D-%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D1%80> (дата обращения: 29.03.2026).
5. Лазер [Электронный ресурс] // Википедия. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80> (дата обращения: 29.03.2026).
6. Donges, A. *Laser triangulation* / A. Donges, R. Noll // *Laser Measurement Technology: Fundamentals and Applications*. — Berlin ; Heidelberg : Springer, 2015. — P. 247–278. — DOI: 10.1007/978-3-662-43634-9_10.
7. Ding, D. *Research progress of laser triangulation on-machine measurement technology for complex surface: A review* / D. Ding, W. Ding, R. Huang [et al.] // *Measurement*. — 2023. — Vol. 216. — Art. 113001. — DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113001.
8. Swojak, N. *Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors* / N. Swojak, M. Wiczorowski, M. Jakubowicz // *Measurement*. — 2021. — Vol. 176. — Art. 109190. — DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109190.
9. Liu, Z. *Modeling and compensation integration for multi-source errors in laser triangulation* / Z. Liu, S. Ji, J. Zhao // *Applied Physics B*. — 2024. — Vol. 130. — Art. 40. — DOI: 10.1007/s00340-024-08173-5.

UDC 533.9.082.5

LASER AS AN EFFECTIVE TOOL FOR MONITORING SURFACE DEFECTS IN MATERIALS

Sakovich A.P., Navitskaya T.V., students

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Abstract. The paper presents a project of a laser 3D scanner intended for product quality assessment and surface defect detection. The operating principle of the system based on laser triangulation, its functional layout and the logic of data processing are described. A brief comparison of the AM-DESK, AutoScan-T and AM-CELL C Series industrial systems is provided. The choice of the PL450B laser module parameters and the stages of its digital modeling are substantiated. The obtained results can be used for developing an educational prototype of a robotic inspection system.

Keywords. Laser 3D scanner, quality control, triangulation, robotic scanning, digital modeling, PL450B.