

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕРКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ И МЕХАТРОННЫХ УЗЛОВ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ В ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Т. В. Бувевич¹, А. Г. Кириллов², В. Н. Сакевич³

¹ Витебский государственный университет имени П. М. Машерова, Витебск, Республика Беларусь

² Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

³ Октябрьская средняя школа Витебского района имени Героя Советского Союза Ивана Павловича Соболева,
аг. Октябрьская, Витебская область, Республика Беларусь

¹ buevih.tv@gmail.com, ² kirillov.malp@gmail.com, ³ igsakevich@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные электронные и мехатронные узлы автотракторной техники характеризуются высокой сложностью и интеграцией. Существующие на приборостроительных предприятиях методы их окончательного контроля, основанные на ручном труде, являются малопроизводительными, субъективными и характеризуются высокой трудоемкостью (до 44,3 % от себестоимости), что создает риски для качества и конкурентоспособности продукции. Цель работы – разработка и внедрение автоматизированного комплекса программно-технических средств для объективного, воспроизводимого и высокоскоростного контроля функциональных параметров широкой номенклатуры таких изделий. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи был применен системный подход, основанный на классификации узлов по типу интерфейса. Разработан комплекс из трех специализированных стендов (САП-1, САП-2, САП-3), охватывающих более 90 % номенклатуры выпускаемых электронных приборов. В работе использовались аппаратная платформа, включающая микроконтроллеры ESP32 для управления, CAN-шина для коммуникации с изделиями, программируемые источники сигналов, роботизированный манипулятор на 11 «пальцев» собственной разработки на базе линейных приводов. Программное обеспечение с двухуровневой архитектурой (нижний уровень на C++/PlatformIO, верхний – на Java). Ключевые технологии включают системы технического зрения на базе MATLAB и OpenCV для оптического контроля индикации, алгоритмы обработки изображений для распознавания стрелочных приборов и анализа состояния узлов. *Результаты.* В результате работы создан и внедрен в производство уникальный комплекс, не имеющий прямых аналогов. Достигнуты количественные показатели: производительность контроля повышена в 4–6 раз (с 3,6 до 18,0 шт./час в среднем); трудоемкость операций проверки снижена на 75–80 %; полностью исключен субъективный человеческий фактор, обеспечена 100 % объективность и документированность результатов; расчетный коэффициент экономической эффективности проекта составил 6,2 при сроке окупаемости 2,9 года. *Выводы.* Проведенная работа доказала эффективность предложенного системного подхода к автоматизации контроля сложных электронно-мехатронных изделий. Разработанный комплекс обеспечил переход к современной технологии, соответствующей принципам «Индустрии 4.0», и позволил решить ключевую производственную проблему, существенно повысив качество, производительность и конкурентоспособность приборостроительного производства. Технические решения защищены патентами и обладают потенциалом для тиражирования на других предприятиях отрасли.

Ключевые слова: автоматизированный контроль, испытательный стенд, системы технического зрения, мехатронные узлы, CAN-интерфейс, микроконтроллер ESP32, приборостроительное производство, Индустрия 4.0, роботизированный манипулятор на 11 «пальцев», метрологическое обеспечение, двухуровневая архитектура ПО

Финансирование: исследования выполнены в рамках гранта ГНТП «Цифровые технологии и роботизированные комплексы» задание 3: «Разработать комплекс программно-технических средств для автоматизированной проверки функциональных параметров электронных и мехатронных узлов автотракторной техники и внедрить на ОАО «ВЗЭП»».

Для цитирования: Бувевич Т. В., Кириллов А. Г., Сакевич В. Н. Автоматизированная технология проверки функциональных параметров электронных и мехатронных узлов автотракторной техники в приборостроительном производстве // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2026. № 3. С. 81–89. doi: 10.21685/2307-5538-2026-3-10

AUTOMATED TESTING TECHNOLOGY FOR FUNCTIONAL PARAMETERS OF ELECTRONIC AND MECHATRONIC UNITS OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR EQUIPMENT IN INSTRUMENT-MAKING PRODUCTION

T.V. Buyevich¹, A.G. Kirillov², V.N. Sakevich²

¹ Vitebsk State University named after P.M. Masharov, Vitebsk, Republic of Belarus

² Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus

³ Oktyabrskaya Secondary School of Vitebsk District named after Hero of the Soviet Union Ivan Pavlovich Sobolev,
Oktyabrskaya Village, Vitebsk Region, Republic of Belarus

¹ buyevih.tv@gmail.com, ² kirillov.malp@gmail.com, ³ igsakevich@yandex.ru

Abstract. *Background.* Modern electronic and mechatronic units for automotive and tractor equipment are characterized by high complexity and integration. Existing methods for their final inspection at instrument-making enterprises, which rely on manual labor, are low-productivity, subjective, and entail high labor intensity (up to 44.3 % of the product cost), creating risks for product quality and competitiveness. The objective of this work was the development and implementation of an automated hardware-software complex for objective, reproducible, and high-speed testing of the functional parameters of a wide range of such components. *Materials and methods.* To address the task, a systematic approach based on classifying units by interface type was applied. A complex of three specialized test benches (SAP-1, SAP-2, SAP-3) was developed, covering over 90 % of the product range. The work utilized a hardware platform comprising ESP32 microcontrollers for control, a CAN bus for device communication, programmable signal sources, and a proprietary 11-"finger" robotic manipulator based on linear actuators. The software featured a two-tier architecture (low-level firmware in C++/PlatformIO, high-level software on a Java). Key technologies included machine vision systems based on MATLAB and OpenCV for optical inspection of indicators, and image processing algorithms for recognizing pointer instruments and analyzing unit status. *Results.* As a result, a unique complex with no direct analogues was created and implemented in production. The following quantitative indicators were achieved: testing productivity increased by 4–6 times (from an average of 3.6 to 18.0 units per hour); labor intensity of inspection operations was reduced by 75–80 %; the subjective human factor was completely eliminated, ensuring 100 % objectivity and traceability of results; the calculated project efficiency ratio was 6.2 with a payback period of 2.9 years. *Conclusions.* The conducted work has proven the effectiveness of the proposed systematic approach to automating the inspection of complex electronic and mechatronic components. The developed complex has enabled a transition to modern technology aligned with "Industry 4.0" principles and solved a critical production problem, significantly enhancing the quality, productivity, and competitiveness of instrument manufacturing. The technical solutions are protected by patents and possess potential for replication at other enterprises within the industry.

Keywords: automated testing, test bench, machine vision systems, mechatronic units, CAN interface, ESP32 microcontroller, instrument manufacturing, "Industry 4.0", robotic manipulator (11-finger), metrological support, two-tier software architecture

Financing: the research was conducted under the grant of the State Scientific and Technical Program "Digital Technologies and Robotic Complexes", task 3: "Develop a complex of software and hardware tools for automated verification of functional parameters of electronic and mechatronic units of automotive and tractor equipment and implement it at JSC 'Vitebsk Plant of Electromechanical Devices'".

For citation: Buyevich T.V., Kirillov A.G., Sakevich V.N. Automated testing technology for functional parameters of electronic and mechatronic units of automotive and tractor equipment in instrument-making production. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2026;(3):81–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2026-3-10

Введение

Все электронные и мехатронные узлы, изготавливаемые на ОАО «ВЗЭП» с учетом их устройства можно разделить на три категории по возможным подходам к способам автоматизации их проверки: измерительно-информационные приборы с матричной и стрелочной формой отображения информации; информационно-управляющие панели и пульта с механическими элементами управления; измерительно-управляющие приборы с информационными каналами обмена данными и без них.

Примеры измерительно-информационных приборов представлены на рис. 1, 2. В измерительно-информационных приборах необходимо проверять функционирование стрелочных и матричных указателей отображения информации.



Рис. 1. Панель приборов информационная ПП8180



Рис. 2. Электронный щиток приборов ЩП8156

Пример информационно-управляющего пульта с механическими элементами управления представлен на рис. 3, 4. Эти системы содержат матричную форму отображения информации и элементы управления мехатронным узлом в виде клавиш или кнопок. В них необходимо проверять функционирование матричных указателей отображения информации и механических элементов управления мехатронными узлами.



Рис. 3. Система управления микроклиматом СУМ8159



Рис. 4. Внешний вид электронной панели управления ЭПУ8212

Примеры приборов с информационными каналами обмена данными и без них представлены на рис. 5–9. В них необходимо проверять функционирование аналоговых, аналого-цифровых и цифроаналоговых каналов преобразования и управления.



Рис. 5. Преобразователь напряжения постоянного тока ПН24/12 М-1



Рис. 6. Конвертер К05



Рис. 7. Блок дверей БД8223



Рис. 8. Блок коммутации датчика дождя и света БК8225



Рис. 9. Датчик объема топлива РД8163

Современное автомобиле- и тракторостроение переживает этап глубокой технологической трансформации, характеризующейся переходом от механических и электромеханических систем к сложным интегрированным электронным и мехатронным комплексам управления. Комбинационные приборы, информационно-управляющие панели, блоки управления двигателем, климатом, дверьми и другими системами стали неотъемлемыми компонентами, определяющими функциональность, безопасность и комфорт конечного продукта. В этой связи ключевым этапом производственного цикла, непосредственно влияющим на надежность и безупречную репутацию техники, является окончательный функциональный контроль таких узлов на предприятии-изготовителе.

Проведенный на ОАО «Витебский завод электроизмерительных приборов» (ОАО «ВЗЭП») – ведущем предприятии в данной области – детальный анализ существовавших технологий контроля выявил ряд критических системных проблем. Традиционные методы, основанные на визуальной оценке регулировщиком показаний стрелочных приборов, цвета светодиодов, работоспособности кнопок и дисплеев, а также на ручных замерах электрических сигналов, показали свою полную несостоятельность в новых условиях. Трудоемкость ручной проверки достигала 44,3 % от общих затрат на изготовление прибора, что являлось экономически недопустимым. Производительность такого контроля была крайне низкой (1,2–6,5 шт./ч), создавая «узкое место» в потоке сборки. Наиболее же серьезным недостатком являлась субъективность и невоспроизводимость результатов, напрямую ведущая к риску пропуска скрытого брака и снижению эксплуатационной надежности продукции, поставляемой таким гигантам, как ОАО «МАЗ», ОАО «МТЗ», ПАО «КамАЗ».

Рыночный анализ подтвердил отсутствие в Республике Беларусь и за рубежом серийных комплексных решений, адаптированных для проверки всего разнообразия изделий автотракторной техники. Таким образом, сформировалась острая научно-техническая проблема, сдерживающая повышение качества, производительности и конкурентоспособности отечественного приборостроения. Ее решение требовало создания принципиально нового автоматизированного комплекса, способного обеспечить объективный, воспроизводимый, высокопроизводительный и гибкий контроль. Научно-технологической основой для разработки послужили защищенные патентами РБ методы автоматической поверки [1, 2].

В рамках выполнения комплексной НИОКР был разработан, изготовлен, испытан и введен в серийное производство ОАО «ВЗЭП» уникальный комплекс программно-технических средств, включающий три специализированных стенда автоматизированной проверки (САП-1, САП-2, САП-3). Данная статья обобщает методологию, архитектурные решения, ключевые технологии и итоговые результаты этого масштабного проекта.

1. Системная методология и архитектура комплекса автоматизированных стендов

В основу разработки был положен системный инженерный подход, начинающийся с детальной классификации контролируемых объектов. Вся номенклатура изделий ОАО «ВЗЭП» была разделена на три технологически однородные категории, для каждой из которых спроектирован целевой стенд с оптимальным набором инструментов контроля.

1.1. Стенд САП-1: комплексная проверка узлов со смешанным типом индикации

Целевые изделия: щитки приборов (ЩП-8155, ЩП-8156), приборные панели (ПП-8180) (рис. 10–12).



Рис. 10. Автоматизированный стенд САП-1-01 для проверки печатной платы щитка приборов ЩП8155 и ЩП8156

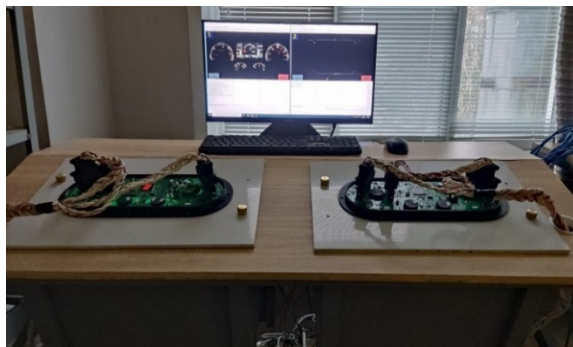


Рис. 11. Автоматизированный стенд САП-1-02 для проверки печатной платы панели приборов информационной ПП8180



Рис. 12. Автоматизированный стенд САП-1-03 для автоматизированной проверки измерительно-информационных приборов с матричной и стрелочной формой отображения информации

Ключевая решающая технология – неинвазивный оптический контроль на основе системы технического зрения (СТЗ) высокой точности.

Детализация аппаратно-программной реализации

Аппаратный уровень: в основе лежит связка персонального компьютера (ПК) и микроконтроллера ESP32 DevKit V4 [3, 4]. ESP32, оснащенный драйверами CAN (MCP2515), выполняет функции управления прибором через CAN-шину [5], формирования аналоговых сигналов и коммутации программируемого источника питания. Используется USB-видеокамера с полным высоким разрешением Full HD.

Программный уровень нижний (прошивка ESP32): реализован на C++ в среде PlatformIO [3, 4]. Состоит из модулей инициализации и обмена по CAN-протоколу [6, 7].

Программный уровень верхний (ПК): представлен двумя взаимосвязанными приложениями. Одно из управляющих приложений (Shp8155CV, Shp1856CV, Pp8180CV) на языке Java формирует сценарий проверки. Модуль анализа изображений, использующий библиотеку OpenCV, осуществляет захват видеопотока, предобработку кадра, автоматическое позиционирование и сегментацию областей интереса (ROI), определение угла отклонения стрелки, анализ цвета светодиодов и проверку дисплея, используя фундаментальные алгоритмы обработки изображений [8–12]. Все результаты сохраняются в базе данных PostgreSQL.

1.2. Стенд САП-2: автоматизация проверки узлов с механическим интерфейсом

Целевые изделия: системы управления микроклиматом (СУМ-8159) (рис. 13, 14).

Ключевая решающая технология – роботизированное воздействие и последующий оптический анализ отклика.

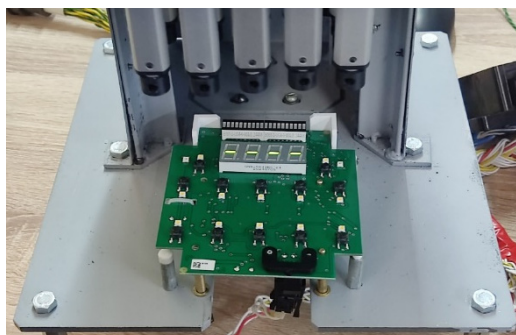


Рис. 13. Автоматизированный стенд САП-2-01 для автоматизированной проверки платы печатной системы управления микроклиматом СУМ8159

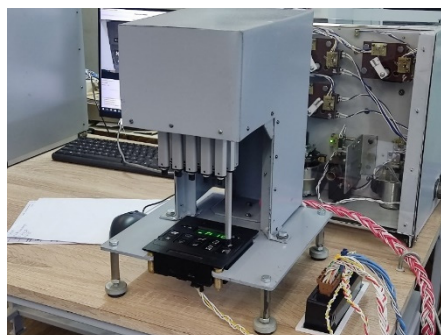


Рис. 14. Автоматизированный стенд САП-2-02 предназначен для автоматизированной проверки панелей и пультов с механическими элементами управления (клавиши, кнопки), имеющих светодиодные индикаторы и силовые ключи

Детализация аппаратно-программной реализации

Аппаратный уровень: архитектура включает два микроконтроллера ESP32 WROOM V4 [3, 4]. Первый управляет приводным механизмом роботизированного манипулятора на 11 «пальцев». Второй ESP32 управляет драйвером исполнительных устройств (L293D).

Программный уровень: прошивки для ESP32 написаны на C++ (PlatformIO) [6, 13]. ПО верхнего уровня разработано на Java с использованием библиотек компьютерного зрения OpenCV [14], выполняющего калибровку камеры, планирование траектории манипулятора и распознавание состояния ПУ.

1.3. Стенд САП-3: прецизионный электрический контроль узлов с цифровыми интерфейсами

Целевые изделия: блоки управления дверьми (БД-8223), конвертеры сигналов (K05), преобразователи напряжения (ПН) (рис. 15–17).



Рис. 15. Автоматизированный стенд САП-3-01 предназначен для автоматизированной проверки конвертера K05

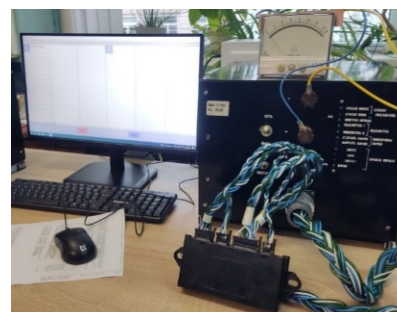


Рис. 16. Автоматизированный стенд САП-3-02 предназначен для автоматизированной проверки блока дверей БД8223



Рис. 17. Автоматизированный стенд САП-3-03 предназначен для автоматизированной проверки преобразователей напряжения постоянного тока ПН24/12 М-1 и ПНПТ 14/28

Ключевая решающая технология – программируемое формирование и высокоточное измерение широкого спектра электрических сигналов.

Детализация аппаратно-программной реализации:

– аппаратный уровень: основу стенда составляют два микроконтроллера ESP32 [3, 4, 7], чьи аппаратные периферийные модули используются для работы с аналоговыми и цифровыми сигналами, а также с шиной CAN;

– программный уровень: прошивка ESP32 (C++/PlatformIO) содержит модули генерации и анализа сигналов [3, 5, 6]. ПО верхнего уровня (Java, JavaFX) позволяет создавать сложные сценарии проверки, визуализировать данные и формировать протокол.

2. Принципы интеграции, метрологическое обеспечение и программная архитектура

Успех проекта определила не только разработка отдельных стендов, но и применение единых принципов интеграции.

2.1. Унифицированная двухуровневая программная архитектура

Для всех трех САП была применена архитектура «Верхний уровень – нижний уровень». Нижний уровень (прошивка ESP32) отвечает за временные критические операции и непосредственное управление аппаратурой [6, 7]. Верхний уровень (ПО на ПК) реализует графический интерфейс, бизнес-логику, сложные вычисления и хранение данных.

2.2. Комплексное метрологическое обеспечение

Точность и достоверность измерений были заложены на этапе проектирования и реализованы через аппаратную калибровку, программную компенсацию погрешностей и итерационный процесс верификации и валидации (V&V). Алгоритмы технического зрения для САП-1 и САП-2 основаны на классических методах обработки изображений [8, 15–17].

2.3 Патентная чистота и научно-техническая новизна

Разработка опирается на защищенную патентами РБ научно-технологическую базу [1, 2]. Новизна комплекса подтверждена патентными исследованиями и заключается в комплексности, интеграции технологий и адаптивности созданных решений.

3. Результаты промышленного внедрения и всесторонняя оценка эффективности

После завершения пуско-наладочных работ комплекс был введен в промышленную эксплуатацию на ОАО «ВЗЭП».

3.1. Количественные производственно-технические результаты

Рост производительности: средняя производительность процесса контроля возросла с 3,6 до 18,0 изделий в час (увеличение в 5 раз).

Снижение трудоемкости: удельная трудоемкость контрольных операций сокращена на 75–80 %.

Повышение качества: полное исключение человеческого фактора привело к нулевому проценту пропуска брака по контролируемым параметрам.

3.2. Экономическая эффективность

Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений составил 6,2.

Срок бюджетной окупаемости комплекса – 2,9 года.

3.3. Стратегические и инновационные эффекты

Проект стал ключевым элементом цифровизации производственного процесса предприятия, соответствующим принципам «Индустрии 4.0».

Заключение и перспективы развития

Разработанный и внедренный комплекс программно-технических средств представляет собой законченное, успешное и высокоэффективное решение актуальной производственно-технологической проблемы. Комплекс САП-1, САП-2, САП-3 обеспечил переход к современной, объективной и интеллектуальной автоматизированной технологии контроля.

Накопленный задел обладает значительным потенциалом для тиражирования на других предприятиях приборостроительного и автомобильного кластеров.

Логичными направлениями дальнейшего развития системы являются:

- интеграция в MES (Manufacturing Execution System);
- развитие искусственного интеллекта в модулях технического зрения;
- создание цифрового двойника изделия для управления качеством на новом уровне

(Quality 4.0).

Таким образом, выполненная работа не только успешно решила поставленные задачи, но и заложила прочный фундамент для инновационного технологического развития предприятия в рамках современной парадигмы «умного» производства.

Список литературы

1. Пат. 13628 Республика Беларусь. Способ автоматической поверки стрелочного измерительного прибора с матричной системой отображения информации и устройство для его осуществления / Алексеев А. Н. [и др.]. // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 2.
2. Пат. 24365 Республика Беларусь. Автоматизированный стенд для тестирования функциональных состояний мехатронного узла техники и способ тестирования / Колпаков В. И. [и др.]. // Изобретения. Полезные модели. 2024. № 5.
3. ESP32 datasheet. Espressif Systems. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата обращения: 10.08.2025).
4. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата обращения: 10.08.2025).
5. CAN Bus Explained – A Simple Intro. URL: <https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-simple-intro-tutorial> (дата обращения: 10.03.2025).
6. Getting Started with the ESP32 Development Board. URL: <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/> (дата обращения: 10.08.2025).
7. Programming ESP32 with Arduino IDE. URL: <https://lastminuteengineers.com/programming-esp32-arduino-ide/> (дата обращения: 10.08.2025).
8. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4th ed. Pearson, 2018.
9. Jain A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice Hall, 2020.
10. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2010.
11. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision. Cengage Learning, 2014.
12. Forsyth D. A., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Pearson, 2012.
13. The Official ESP32 Book. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/> (дата обращения: 10.08.2025).
14. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. 2nd ed. O'Reilly Media, 2018.
15. Криушичев А. В. Основы технического зрения : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2017.
16. Яковлев А. В. Системы технического зрения : учеб. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2016.
17. Безобразов С. В. Математические методы обработки изображений в задачах технического зрения. Минск : БГУ, 2019.

References

1. Patent 13628 Republic of Belarus. *Sposob avtomaticheskoy poverki strelochnogo izmeritel'nogo pribora s matrichnoy sistemoy otobrazheniya informatsii i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* = Method for automatic calibration of a pointer measuring instrument with a matrix information display system and a device for its implementation. Alekseyev A.N. et al. Inventions. Utility models. 2008. № 2. (In Russ.)
2. Patent 24365 Republic of Belarus. *Avtomatizirovannyi stend dlya testirovaniya funktsional'nykh sostoyaniy mekhatronnogo uzla tekhniki i sposob testirovaniya* = Automated test bench for testing the functional states of a mechatronic unit of equipment and a testing method. Kolpakov V.I. et al. Inventions. Utility models. 2024. № 5. (In Russ.)
3. *ESP32 datasheet*. Espressif Systems. Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (accessed 10.08.2025).
4. *Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual*. Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (accessed 10.08.2025).

5. *CAN Bus Explained – A Simple Intro*. Available at: <https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-simple-intro-tutorial> (accessed 10.03.2025).
6. *Getting Started with the ESP32 Development Board*. Available at: <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/> (accessed 10.08.2025).
7. *Programming ESP32 with Arduino IDE*. Available at: <https://lastminuteengineers.com/programming-esp32-arduino-ide/> (accessed 10.08.2025).
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 4th ed. Pearson, 2018.
9. Jain A.K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2020.
10. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer, 2010.
11. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Cengage Learning, 2014.
12. Forsyth D.A., Ponce J. *Computer Vision: A Modern Approach*. Pearson, 2012.
13. *The Official ESP32 Book*. Available at: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/> (accessed 10.08.2025).
14. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. 2nd ed. O'Reilly Media, 2018.
15. Kriushichev A.V. *Osnovy tekhnicheskogo zreniya: ucheb. posobiye = Fundamentals of Technical Vision: a textbook*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017. (In Russ.)
16. Yakovlev A.V. *Sistemy tekhnicheskogo zreniya: ucheb. posobiye = Technical Vision Systems: a textbook*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2016. (In Russ.)
17. Bezobrazov S.V. *Matematicheskiye metody obrabotki izobrazheniy v zadachakh tekhnicheskogo zreniya = Mathematical Methods of Image Processing in Technical Vision Tasks*. Minsk: BGU, 2019.

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Владимировна Буюевич

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой инженерной физики,
Витебский государственный
университет имени П. М. Машерова
(Республика Беларусь, г. Витебск,
Московский пр-кт, 33)
E-mail: buevih.tv@gmail.com

Tatyana V. Buyevich

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of engineering physics,
Vitebsk State University
named after P.M. Masherov
(33 Moskovskiy avenue, Vitebsk,
Republic of Belarus)

Алексей Геннадьевич Кириллов

кандидат технических наук, доцент
кафедры информационных систем
и автоматизации производства,
Витебский государственный
технологический университет
(Республика Беларусь, г. Витебск,
Московский пр-кт, 72)
E-mail: kirillov.malp@gmail.com

Aleksey G. Kirillov

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of information systems
and production automation,
Vitebsk State Technological University
(72 Moskovskiy avenue, Vitebsk,
Republic of Belarus)

Валерий Николаевич Сакевич

доктор технических наук, педагог,
Октябрьская средняя школа
Витебского района имени Героя Советского
Союза Ивана Павловича Соболева
(Республика Беларусь, Витебская область,
аг. Октябрьская, ул. Октябрьская, 8)
E-mail: igsakevich@yandex.ru

Valeriy N. Sakevich

Doctor of technical sciences, teacher,
Oktyabrskaya Secondary School of Vitebsk District
named after Hero of the Soviet Union
Ivan Pavlovich Sobolev
(8 Oktyabrskaya street, Oktyabrskaya Village,
Vitebsk Region, Republic of Belarus)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 12.01.2026

Поступила после рецензирования / Revised 09.02.2026

Принята к публикации / Accepted 02.03.2026