

Разработка системы автоматизации визуального контроля маркировки шин на производственной линии с использованием машинного зрения

Михаил В. Алексеев	¹	mwa1976@mail.ru	 0000-0001-7768-8550
Владимир С. Кудряшов	¹	kudryashovvs@mail.ru	 0000-0001-6237-0881
Александр Н. Гаврилов	¹	ganiwrn@mail.ru	 0000-0002-0132-4563
Андрей В. Иванов	¹	andrious@rambler.ru	 0000-0002-6034-9672
Иван А. Козенко	¹	kosenko211986@mail.ru	 0000-0002-1508-9875
Екатерина Ю. Прокофьева	¹	prokofevae019@gmail.com	
Дарья А. Савельева	¹	dsavelevas@yandex.ru	

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Статья посвящена решению задач разработки системы машинного зрения для автоматического контроля процесса маркировки шин после операции балансировки в ЗАО «Воронежский шинный завод». Разработана структура системы визуального контроля на базе контроллера SIMATIC S7-1500, модулей ввода/вывода SM 521, SM 522, панели оператора SIMATIC HMI TP1200 Comfort Panel и камеры машинного зрения AR0234. Выбор камеры AR0234 обусловлен не только её высоким разрешением и высокой частотой кадров, что позволяет фиксировать маркировочную точку на движущейся шине без смазывания изображения, но и спектральными характеристиками её КМОП-сенсора. Алгоритм функционирования системы контроля реализуется следующим образом. После завершения операции балансировки и нанесения маркировочной точки шина поступает в зону визуального контроля. Камера машинного зрения выполняет захват изображения поверхности шины в заданной области. Осуществляется предварительная фильтрация для подавления шумов и повышения контрастности изображения. Далее выполняется сегментация изображения с целью выделения области, которая соответствует маркировочной точке. Цветовое пространство RGB, традиционно используемое для представления изображений, объединяет информацию о цвете и яркости, что делает пороговую обработку чувствительной к перепадам освещенности. В отличие от RGB, пространство HSV разделяет цветовой тон, насыщенность и яркость, что позволяет выполнять сегментацию по цвету независимо от уровня освещения. В системе контроля предлагается преобразование пространства RGB в HSV. После преобразования каждого пикселя изображения в цветовое пространство HSV для выделения маркировочной точки применяется метод пороговой сегментации, основанный на сравнении цветовых характеристик пикселей с эталонными значениями, соответствующими типам маркировки. После выделения области изображения производится вычисление пространственного положения точки относительно принятой системы координат и определение ее цветовых характеристик. Результаты обработки изображения передаются в управляющий контроллер SIMATIC S7-1500, где выполняется их сопоставление с технологической информацией, полученной от балансировочного станка по протоколу PROFINET. Разработанная система машинного зрения позволяет минимизировать ошибки ручной проверки шин и повысить объективность контроля их качества.

Ключевые слова: маркировка шин, контроль качества, машинное зрение, спектральные характеристики камеры, сегментация изображения.

Development of a system for automated visual inspection of tire markings on a production line using machine vision

Mikhail V. Alekseev	¹	mwa1976@mail.ru	 0000-0001-7768-8550
Vladimir S. Kudryashov	¹	kudryashovvs@mail.ru	 0000-0001-6237-0881
Alexander N. Gavrilov	¹	ganiwrn@mail.ru	 0000-0002-0132-4563
Andrey V. Ivanov	¹	andrious@rambler.ru	 0000-0002-6034-9672
Ivan A. Kozenko	¹	kosenko211986@mail.ru	 0000-0002-1508-9875
Ekaterina Yu. Prokofieva	¹	prokofevae019@gmail.com	
Daria A. Savelyeva	¹	dsavelevas@ya.ru	

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This article addresses the development of a machine vision system for automatic monitoring of tire marking after balancing at CJSC «Voronezh Tire Plant». The visual inspection system is based on a SIMATIC S7-1500 controller, SM 521 and SM 522 input/output modules, a SIMATIC HMI TP1200 Comfort Panel operator panel, and an AR0234 machine vision camera. The AR0234 camera was chosen not only for its high resolution and high frame rate, which allow for the recording of a marking dot on a moving tire without image blur, but also for the spectral characteristics of its CMOS sensor. The monitoring system operates as follows. After balancing and the application of a marking dot, the tire enters the visual inspection zone. The machine vision camera captures an image of the tire surface in a specified area. Preliminary filtering is performed to suppress noise and enhance image contrast. Next, the image is segmented to isolate the area corresponding to the marking dot. The RGB color space, traditionally used to represent images, combines color and brightness information, making thresholding sensitive to changes in illumination. Unlike RGB, the HSV color space separates hue, saturation, and brightness, enabling color segmentation regardless of illumination levels. The inspection system offers RGB-to-HSV conversion. After each image pixel is converted to HSV, a threshold segmentation method is used to identify the marking dot. This method compares the pixel color characteristics with reference values corresponding to the marking types. After the image area is identified, the point's spatial position relative to the adopted coordinate system is calculated and its color characteristics are determined. The image processing results are transmitted to the SIMATIC S7-1500 controller, where they are compared with process information received from the balancing machine via the PROFINET protocol. The developed machine vision system minimizes errors in manual tire inspection and improves the objectivity of quality control.

Keywords: tire marking, quality control, machine vision, camera spectral characteristics, image segmentation.

Для цитирования

Алексеев М.В., Кудряшов В.С., Гаврилов А.Н., Иванов А.В., Козенко И.А., Прокофьева Е.Ю., Савельева Д.А. Разработка системы автоматизации визуального контроля маркировки шин на производственной линии с использованием машинного зрения // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 315–321. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-315-321

For citation

Alekseev M.V., Kudryashov V.S., Gavrilov A.N., Ivanov A.V., Kozenko I.A., Prokofieva E.Yu., Savelyeva D.A. Development of a system for automated visual inspection of tire markings on a production line using machine vision. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 315–321. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-315-321

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Современные автоматизированные линии производства шин включают операции формирования, вулканизации, балансировки и последующей маркировки готовых изделий [1–6]. После выполнения операции балансировки на поверхность шины наносится маркировочная точка определённого цвета (белого, жёлтого или красного), указывающая оптимальное положение корректирующего груза. Корректность нанесения данной маркировки является важным фактором, влияющим на качество дальнейших технологических операций и соответствие готовой продукции требованиям технологического регламента [7, 8]. На практике контроль наличия, цвета и положения маркировочной точки осуществляется оператором визуально. Такой подход увеличивает вероятность ошибок, обусловленных человеческим фактором.

Цель работы – разработка системы машинного зрения для автоматического контроля процесса маркировки шин после операции балансировки.

Разрабатываемая система должна обеспечивать фиксацию положения и цвета маркировочной точки на поверхности шины, сравнение полученных данных с информацией,

поступающей от балансировочного станка, а также формирование сигналов оповещения в случае обнаружения несоответствий.

Результаты

Для реализации системы визуального контроля выбраны следующие технические средства (рисунок 1): камера машинного зрения USB 2.0 Global Shutter 2 Mn CMOS AR0234 (60 кадр/с) со встроенными средствами обработки изображений; контроллер SIMATIC S7–1500; модули ввода-вывода SM 521 и SM 522; панель оператора SIMATIC HMI TP1200 Comfort Panel. В качестве интерфейса связи между компонентами системы используется промышленная сеть Ethernet (PROFINET).

Выбор камеры AR0234 обусловлен не только её высоким разрешением (1920x1200 пикселей; 2,3 МП) и высокой частотой кадров, что позволяет фиксировать маркировочную точку на движущейся шине без смазывания изображения, но и спектральными характеристиками её КМОП-сенсора (CMOS sensor). График квантовой эффективности демонстрирует сбалансированную чувствительность в красной, зелёной и синей областях спектра, что обеспечивает корректное разделение цветовых каналов (рисунок 2).

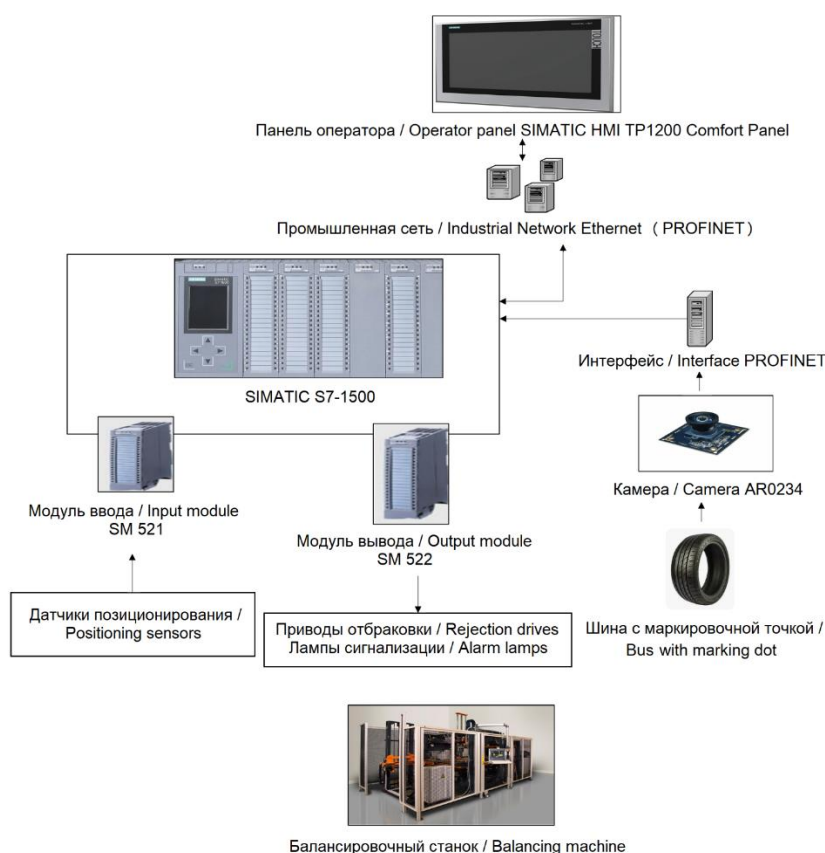


Рисунок 1. Схема комплекса технических средств системы контроля маркировки шин
Figure 1. Scheme of the complex of technical means of the tire marking control system

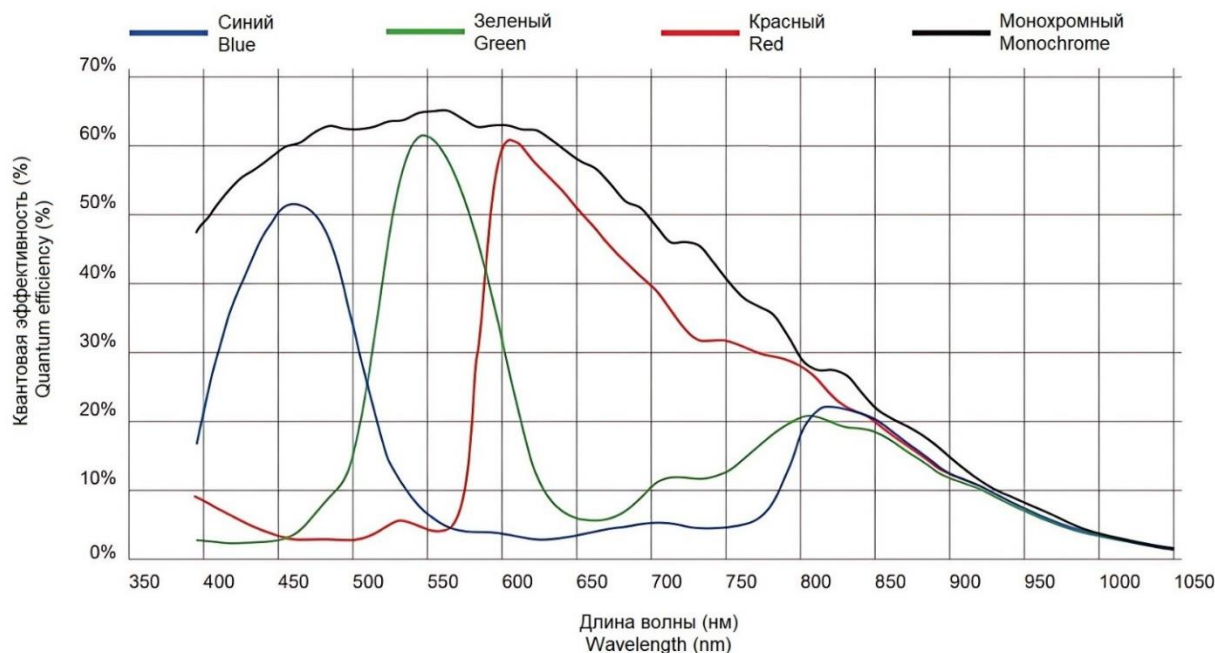


Рисунок 2. Спектральные характеристики камеры AR0234

Figure 2. Spectral characteristics of the AR0234 camera

В сочетании с глобальным затвором, широким диапазоном рабочих температур (от -30 до $+70$ °C) и устойчивостью к вибрациям (1G в диапазоне 5–500 Гц, ударная нагрузка 15G) это гарантирует стабильное распознавание цветных меток (белый, желтый, красный) в производственных условиях. Наличие встроенных средств обработки изображений разгружает центральный контроллер и сокращает время цикла. Контроллер SIMATIC S7–1500 обеспечивает высокую скорость обработки сигналов и надежность работы в условиях промышленного производства. Модульная архитектура позволяет наращивать систему в случае добавления новых параметров контроля, а поддержка PROFINET гарантирует быстрый обмен данными с камерой и панелью оператора.

Алгоритм функционирования системы реализуется следующим образом. После завершения операции балансировки и нанесения маркировочной точки шина поступает в зону визуального контроля. Камера машинного зрения выполняет захват изображения поверхности шины в заданной области. Обработка изображения выполняется в несколько этапов. Осуществляется предварительная фильтрация для подавления шумов и повышения контрастности изображения.

Далее выполняется сегментация изображения с целью выделения области, которая соответствует маркировочной точке. Для этого применяется метод пороговой обработки

в цветовом пространстве HSV (англ. Hue, Saturation, Value – «тон, насыщенность, значение»), который не чувствителен к изменению освещения [9, 10]. Цветовое пространство RGB, традиционно используемое для представления изображений, объединяет информацию о цвете и яркости, что делает пороговую обработку чувствительной к перепадам освещенности [11]. В отличие от RGB, пространство HSV разделяет цветовой тон, насыщенность и яркость, что позволяет выполнять сегментацию по цвету независимо от уровня освещения (рисунок 3).

Преобразование из RGB в HSV выполняется по следующим формулам [12–14]. Пусть значения компонент R (red), G (green), B (blue) нормированы к интервалу $[0, 1]$.

Обозначим:

$$\begin{aligned} Max &= \max(R, G, B), \\ Min &= \min(R, G, B). \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда яркость V (Value) определяется как

$$V = Max. \quad (2)$$

Насыщенность S (Saturation) вычисляется по правилу:

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } V \text{ максимально,} \\ 1 - Min/Max, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Тон H (Hue) вычисляется следующим образом. Если $Max = Min$, тон не определен (т. е. изображение ахроматическое) и обычно полагают $H = 0$.

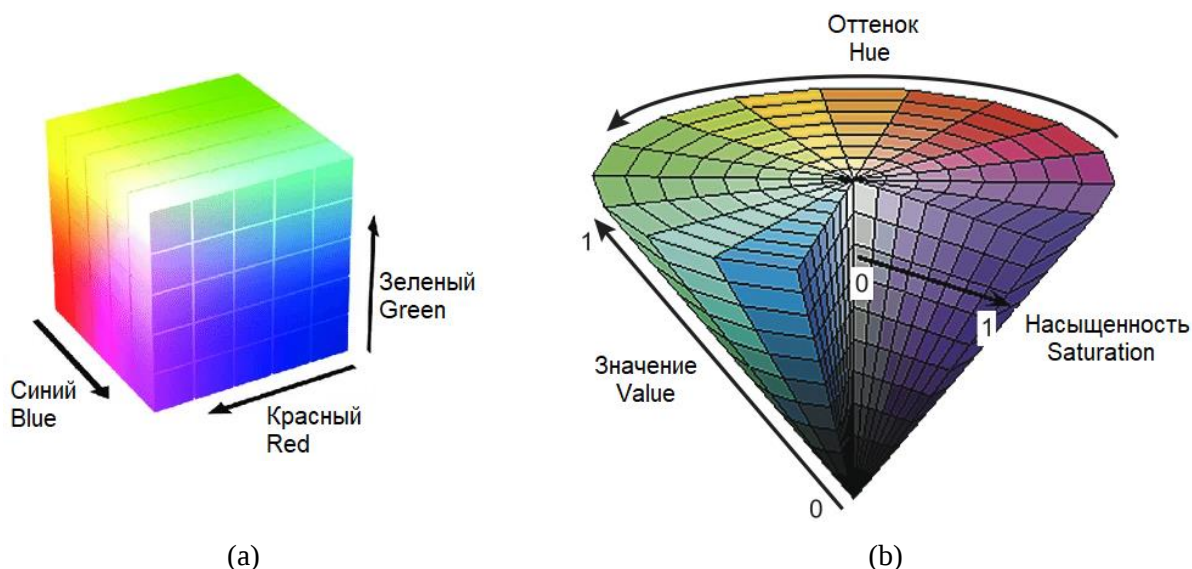


Рисунок 3. Сравнение цветковых моделей RGB и HSV: (a) в модели RGB цвет и яркость связаны, модель чувствительна к освещению; (b) в модели HSV цвет отделен от яркости, модель устойчива к перепадам освещения

Figure 3. Comparison of RGB and HSV color models: (a) in the RGB model, color and brightness are linked, and the model is sensitive to lighting; (b) in the HSV model, color is separated from brightness, and the model is robust to changes in lighting

В противном случае:

$$Hm[0,360], \quad (4)$$

$$S, V, R, G, Bm[0,1],$$

$$H = \begin{cases} 60 \cdot \frac{G-B}{Max-Min} + 0, & \text{если } Max = R \text{ и } G \geq B, \\ 60 \cdot \frac{G-B}{Max-Min} + 360, & \text{если } Max = R \text{ и } G < B, \\ 60 \cdot \frac{B-R}{Max-Min} + 120, & \text{если } Max = G, \\ 60 \cdot \frac{R-G}{Max-Min} + 240, & \text{если } Max = B. \end{cases}$$

Получается, что значение тона H лежит в диапазоне $[0^\circ, 360^\circ]$. В результате такого преобразования красный цвет соответствует областям вблизи 0° и 360° , желтый – около 60° , зеленый – 120° , синий – 240° . Разделение информации о цвете (тон) и яркости (значение) обеспечивает инвариантность к изменениям освещенности, что критически важно для промышленных условий эксплуатации.

После преобразования каждого пикселя изображения в цветовое пространство HSV для выделения маркировочной точки применяется метод пороговой сегментации, основанный на сравнении цветовых характеристик пикселей с эталонными значениями, соответствующими типам маркировки (белый, желтый, красный). Эталонные векторы $c_k = (H_k, S_k, V_k)$

определяются в процессе калибровки системы. Для каждого пикселя с координатами (i, j) , вычисляется расстояние до эталонов по формуле:

$$d_k = \sqrt{(H_{ij} - H_k)^2 + (S_{ij} - S_k)^2 + (V_{ij} - V_k)^2}. \quad (5)$$

Пиксель относится к маркировочной точке, если $\min_k d_k < \varepsilon$, где ε – эмпирически подобранный порог.

В результате формируется бинарная маска, в которой выделены области, потенциально соответствующие маркировочной точке выделенной области. После выделения области изображения производится вычисление пространственного положения точки относительно принятой системы координат и определение ее цветовых характеристик [15].

Результаты обработки изображения координаты центра выделенной области и усредненные цветовые характеристики H, S, V передаются в управляющий контроллер SIMATIC S7-1500, где выполняется их сопоставление с технологической информацией, полученной от балансировочного станка по протоколу PROFINET (ожидаемый цвет маркировочной точки и её номинальное положение) [16, 17]. В случае соответствия положения и цвета маркировочной точки заданным параметрам система фиксирует успешное прохождение контроля. При обнаружении несоответствия формируется сигнал тревоги, который

передается на панель оператора для визуального оповещения, а также может использоваться системой управления линией для принятия корректирующих действий.

В системе предусмотрена визуализация результатов контроля на автоматизированном рабочем месте оператора (рисунок 4) [18].

На панели оператора SIMATIC HMI TP1200 Comfort Panel отображаются текущие

данные о состоянии контроля, а также статистическая информация по результатам проверки маркировки шин. Интерфейс так же позволяет настраивать допустимые отклонения (по цвету и положению) и вести журнал ошибок.

Интерфейс панели обеспечивает наглядное представление результатов работы системы машинного зрения и позволяет оператору оперативно контролировать процесс маркировки шин.



(a)



(b)



(c)



(d)

Рисунок 4. Экранные формы интерфейса панели оператора системы визуального контроля маркировки шин: (a) система контроля маркировки шин; (b) настройки системы; (c) ошибка маркировки; (d) журнал ошибок

Figure 4. Screen forms of the operator panel interface of the visual tire marking control system: (a) tire marking control system; (b) system settings; (c) marking error; (d) error log

Заключение

Для разработки системы машинного зрения для автоматического контроля процесса маркировки шин после операции балансировки в ЗАО «Воронежский шинный завод» предложена модульная архитектура и выбраны современные технические средства: контроллер SIMATIC S7–1500, модули ввода / вывода SM 521, SM 522, панель оператора SIMATIC HMI TP1200 Comfort Panel и камера AR0234. Для обработки изображения поверхности шины применяется метод пороговой обработки в цветовом пространстве HSV, что позволяет выполнять сегментацию по цвету независимо от уровня освещения.

Разработано математическое и программное обеспечение преобразования цветового пространства RGB в HSV. Результаты обработки изображения координаты центра выделенной области и усредненные цветовые характеристики передаются в управляющий контроллер SIMATIC S7–1500, где выполняется их сопоставление с технологической информацией, полученной от балансировочного станка. В системе предусмотрена визуализация результатов контроля на автоматизированном рабочем месте оператора. Разработанная система машинного зрения позволяет минимизировать ошибки ручной проверки шин и повысить объективность контроля их качества.

Литература

- 1 Дик Дж.С. Технология резины: рецептуростроение и испытания. СПб.: НОТ, 2010. 620 с.
- 2 Алексеев М.В., Кудряшов В.С., Авцинов И.А., Гаврилов А.Н. и др. Разработка и реализация цифровой системы управления форматором-вулканизатором // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 262–268.
- 3 Ikeda Y., Kato A., Kohjiya S., Nakajima Y. Rubber Science: A Modern Approach. Singapore: Springer, 2018. 226 p.
- 4 Rogers B. Tire Engineering: An Introduction. London: CRC Press, 2020. 256 p.
- 5 Mark J.E., et al.. The Science and Technology of Rubber. 3rd ed. London: Academic Press, 2005. 728 p.
- 6 Parker D.W. Tire Design and Manufacturing. Chichester: Wiley, 2018. 416 p.
- 7 Kumar A., Singh R. Quality Control in Tire Manufacturing: A Review of Nondestructive Testing Methods // Journal of Materials Engineering and Performance. 2021. Vol. 30. No. 8. P. 5890–5905.
- 8 Müller L., Weber K. Statistical Process Control (SPC) in Tire Production: Case Study at a European Plant // International Journal of Quality & Reliability Management. 2022. Vol. 39. No. 5. P. 1234–1250.
- 9 Корк П. Машинное зрение. Основы и алгоритмы с примерами на MATLAB / пер. с англ. В. Яценкова. Москва: ДМК Пресс, 2023. 584 с.
- 10 Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, В.А. Князь и др. 2-е изд. Москва: ДМК Пресс, 2023. 465 с.
- 11 Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. Sebastopol: O'Reilly Media, 2008. 556 p.
- 12 Forsyth D., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. 2nd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011. 816 p.
- 13 Ронкин М.В., Долганов А.Ю. Глубокое обучение систем компьютерного зрения. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2025. 124 с.
- 14 Сацюк А.В. Компьютерное зрение. Практика. Вологда; Москва: Инфра-Инженерия, 2025. 272 с.
- 15 Learning OpenCV 4: Computer Vision with Python. Birmingham: Packt Publishing, 2025. 372 p.
- 16 Berger H. Automating with SIMATIC S7-1200/S7-1500 in TIA Portal: Programming with SCL and Graph. Berlin: Wiley-VCH, 2020. 480 p.
- 17 Schröder D. SIMATIC S7-1500 Advanced Programming and Diagnostics. Munich: Siemens AG, 2022. 520 p.
- 18 WinCC flexible 2005. Компактная \ Стандартная \ Расширенная. Руководство пользователя. Siemens AG, 2005. 146 с.

References

- 1 Dik, Dzh.S. Tekhnologiya repiny: recepturostroenie i ispytaniya [Rubber Technology: Formulation and Testing]. NOT, 2010. (in Russian).
- 2 Alekseev, M.V., et al. "Razrabotka i realizatsiya tsifrovoy sistemy upravleniya formatorom-vulkanizatorom [Development and implementation of a digital control system for a former-vulcanizer]." Vestnik VGUIt [Vestnik of VGUIt], vol. 86, no. 2, 2024, pp. 262–268. (in Russian).
- 3 Ikeda, Y., et al. Rubber Science: A Modern Approach. Springer, 2018.
- 4 Rogers, B. Tire Engineering: An Introduction. CRC Press, 2020.
- 5 Mark, J.E., et al. The Science and Technology of Rubber. 3rd ed., Academic Press, 2005.
- 6 Parker, D.W. Tire Design and Manufacturing. Wiley, 2018.
- 7 Kumar, A., and R. Singh. "Quality Control in Tire Manufacturing: A Review of Nondestructive Testing Methods." Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 30, no. 8, 2021, pp. 5890–5905.
- 8 Müller, L., and K. Weber. "Statistical Process Control (SPC) in Tire Production: Case Study at a European Plant." International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 39, no. 5, 2022, pp. 1234–1250.
- 9 Kork, P. Mashinnoe zrenie. Osnovy i algoritmy s primerami na MATLAB [Computer Vision. Fundamentals and Algorithms with MATLAB Examples]. Translated by V. Yatsenkov, DMK Press, 2023. (in Russian).
- 10 Vizilter, Yu.V., et al. Obrabotka i analiz tsifrovyykh izobrazhenii s primerami na LabVIEW IMAQ Vision [Digital Image Processing and Analysis with LabVIEW IMAQ Vision Examples]. 2nd ed., DMK Press, 2023. (in Russian).
- 11 Bradski, G., and A. Kaehler. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media, 2008.
- 12 Forsyth, D., and J. Ponce. Computer Vision: A Modern Approach. 2nd ed., Pearson, 2011.
- 13 Ronkin, M.V., and A.Yu. Dolganov. Glubokoe obuchenie sistem kompyuternogo zreniya [Deep Learning of Computer Vision Systems]. Ural University Press, 2025. (in Russian).
- 14 Satsyuk, A.V. Kompyuternoe zrenie. Praktika [Computer Vision. Practice]. Infra-Inzheneriya, 2025. (in Russian).
- 15 Learning OpenCV 4: Computer Vision with Python. Packt Publishing, 2025.
- 16 Berger, H. Automating with SIMATIC S7-1200/S7-1500 in TIA Portal: Programming with SCL and Graph. Wiley-VCH, 2020.
- 17 Schröder, D. SIMATIC S7-1500 Advanced Programming and Diagnostics. Siemens AG, 2022.
- 18 WinCC Flexible 2005. Kompaktnaya \ Standartnaya \ Rasshirennaya. Rukovodstvo polzovatelya [WinCC Flexible 2005. Compact \ Standard \ Extended. User Manual]. Siemens AG, 2005. (in Russian).

Сведения об авторах

Михаил В. Алексеев к.т.н., доцент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mwa1976@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7768-8550>

Владимир С. Кудряшов д.т.н., профессор, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kudryashovvs@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6237-0881>

Александр Н. Гаврилов д.т.н., профессор, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ganivm@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0132-4563>

Андрей В. Иванов к.т.н., доцент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, andrious@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6034-9672>

Иван А. Козенко к.т.н., доцент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kosenko211986@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1508-9875>

Екатерина Ю. Прокофьева студент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, prokofevae019@gmail.com

Дарья А. Савельева студент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, dsavelevas@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Mikhail V. Alekseev Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Automated Control Systems for Processes and Productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, mwa1976@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7768-8550>

Vladimir S. Kudryashov Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Automated Control Systems for Processes and Productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, kudryashovvs@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6237-0881>

Alexander N. Gavrilov Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Automated Control Systems for Processes and Productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, ganivm@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0132-4563>

Andrey V. Ivanov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Automated Control Systems for Processes and Productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, andrious@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6034-9672>

Ivan A. Kozenko Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Automated Control Systems for Processes and Productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, kosenko211986@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1508-9875>

Ekaterina Yu. Prokofieva student, Department of Automated Control Systems for Processes and Productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, prokofevae019@gmail.com

Daria A. Savelyeva student, Department of Automated Control Systems for Processes and Productions, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, dsavelevas@yandex.ru

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 10/03/2026	После редакции 20/04/2026	Принята в печать 25/04/2026
Received 10/03/2026	Accepted in revised 20/04/2026	Accepted 25/04/2026