

## АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДСИСТЕМЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ОТБРАКОВКИ ФОТОСЕПАРАТОРА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ

### HARDWARE IMPLEMENTATION OF PHOTOSEPARATOR PNEUMATIC REJECTION SUBSYSTEM WITH TIME DELAY COMPENSATION

**Ключевые слова:** фотосепаратор, пневматическая отбраковка, машинное зрение, глобальный затвор, твердотельное реле, аппаратная задержка, предиктивный трекер, джиттер, татарская гречишка, программное обеспечение, распознавание

Представлена аппаратная реализация подсистемы пневматической отбраковки фотосепаратора, предназначенной для удаления трудноотделимых сорных примесей из зернового потока в реальном времени. Подсистема построена по модульному принципу и включает промышленную CMOS-камеру с глобальным затвором (1280×1024 пикс., 255 кадр/с), вычислительный узел с графическим процессором, микроконтроллерный блок управления на базе архитектуры AVR с 14 каналами твердотельных реле и пневматическую систему с быстродействующими клапанами. Для минимизации суммарной задержки между захватом изображения и срабатыванием исполнительного механизма предложен метод компенсации, основанный на предиктивном трекере с экспоненциальным сглаживанием скорости и детерминированном бинарном протоколе обмена данными. Разработана асинхронная многопоточная архитектура программного обеспечения, разделяющая процессы машинного зрения (YOLOv8) и управления актуаторами. Результаты стендовых испытаний подтверждают стабильность сквозного видеозахвата без пропуска кадров и время инференса нейросети на уровне 65–80 кадр/с. Стендовые испытания были проведены на разработанной экспериментальной установке, которая отличается от всех существующих тем, что вибрлоток имеет направляющие в виде прямоугольных пластинок для принудительной ориентации частиц зернового материала вдоль направления движения для быстроты распознавания частиц зернового материала. Видеокамеры оснащены поляризационными фильтрами для устранения бликов, и по их бокам установлены источники освещения. Управляющий компьютер оснащен программным обеспечением, включающем сверточную нейронную сеть, обученную на датасете, содержащем изображения семян основной культуры

и семян трудноотделимых примесей. Экспериментально установлено, что джиттер передачи управляющей команды не превышает 1 мс, что подтверждает эффективность предложенного архитектурного решения для задач прецизионной оптической сепарации.

**Keywords:** photo sorter, pneumatic rejection, machine vision, global shutter, solid-state relay, hardware delay, predictive tracker, jitter, Tatar buckwheat (*Fagopyrum tataricum*), software, identification.

A hardware implementation of a pneumatic sorter rejection subsystem designed to remove hard-to-separate foreign matter from a grain flow in real time is discussed. The subsystem is modular and includes an industrial CMOS camera with a global shutter (1280 × 1024 pixels, 255 fps), a computational node with a graphics processor, a microcontroller unit based on the AVR architecture with 14 solid-state relay channels, and a pneumatic system with high-speed valves. To minimize the total delay between image capture and actuator response, a compensation method based on a predictive tracker with exponential speed smoothing and a deterministic binary data exchange protocol is proposed. Asynchronous multithreaded software architecture is developed that separates machine vision (YOLOv8) and actuator control processes. Bench test results confirm the stability of end-to-end video capture without dropped frames and a neural network inference time of 65–80 fps. Bench tests were conducted on a newly developed experimental setup which differs from all existing setups in that the vibrating chute is equipped with rectangular plate guides to force grain particle orientation along the direction of movement for rapid particle recognition. The video cameras are equipped with polarizing filters to eliminate glare and are flanked by light sources. The control computer is equipped with software including a convolutional neural network trained on a dataset containing images of the main crop seeds and seeds of difficult-to-separate impurities. The experiments have shown that the jitter in control command transmission does not exceed 1 ms confirming the effectiveness of the proposed architectural solution for precision optical separation tasks.

**Ямпиллов Сэнгэ Самбуевич**, д.т.н., профессор, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, e-mail: yampilovss@mail.ru.

**Нехуров Нима Андреевич**, аспирант, ст. преподаватель, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, e-mail: nexurov@gmail.com.

**Стрикунов Николай Иванович**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: strikunov555@mail.ru.

**Yampilov Senge Sambuevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation, e-mail: yampilovss@mail.ru.

**Nekhurov Nima Andreevich**, post-graduate student, Asst. Prof., East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation, e-mail: nexurov@gmail.com.

**Strikunov Nikolay Ivanovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: strikunov555@mail.ru.

## Введение

Глубокая очистка зерновых партий от трудноотделимых примесей, в частности семян татарской гречишки (*Fagopyrum tataricum*), морфологически сходных с зерновками пшеницы, остаётся актуальной задачей послеуборочной обработки [1]. Традиционные воздушно-решётные машины во многом исчерпали потенциал повышения качества очистки, в связи с чем центр тяжести в отрасли смещается в сторону оптических сепараторов, технологическим ядром которых является высокоскоростная подсистема отбраковки.

Анализ современных исследований показывает, что при построении систем технического зрения для сортировщиков доминируют два подхода. Первый базируется на программируемых логических интегральных схемах (FPGA), обеспечивающих детерминированную задержку за счёт аппаратной реализации алгоритмов. Например, специализированные ускорители позволяют достичь стабильной обработки при минимальном временном джиттере [2, 3]. Второй подход опирается на графические процессоры (GPU) благодаря их гибкости и поддержке современных нейросетевых архитектур. Решения на базе YOLOv5 и YOLOv8 демонстрируют точность детекции дефектов зерна до 88-95% при промышленной производительности [4-6]. Сравнение глубокого обучения с классическими классификаторами (SVM) подтверждает преимущество нейросетей по обобщающей способности [7].

Однако при использовании GPU возникает фундаментальная проблема: время инференса нейросети непостоянно, а операционная система вносит стохастические задержки (джиттер) в контур управления. Синхронизация момента детекции и физического срабатывания пневмоклапана становится критически сложной

задачей [8]. Традиционные подходы на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) со сдвигowymi регистрами [9] предполагают постоянную скорость потока, что не соответствует реальной аэродинамике сыпучих сред. Стохастические предиктивные контроллеры требуют значительных вычислительных ресурсов [10-12].

Таким образом, существует потребность в гетерогенной аппаратно-программной архитектуре, которая объединяла бы вычислительную мощность GPU для нейросетевой классификации и обеспечивала строгую детерминированность задержек (не более 30 мс) на исполнительном уровне.

Так как использовали детекторы на базе модели YOLOv8 для распознавания частиц зернового материала (пшеницы, татарской гречишки), и его скорость в момент использования составляет 65-80 кадр/с, а частота обработки данных промышленной видекамеры 255 кадр/с, необходимо разработать программный алгоритм, который на основе текущей скорости, ускорения и траектории движения частиц зернового материала прогнозирует его будущую позицию в ближайшие миллисекунды для четкого выделения татарской гречишки из зернового материала.

**Цель** исследования – разработка аппаратной части и алгоритмического обеспечения подсистемы пневматической отбраковки фотосепаратора, реализующей компенсацию аппаратных и программных задержек при частоте видеозахвата 255 кадр/с, с последующей экспериментальной апробацией.

### Задачи исследований:

- обосновать блок сопряжения и исполнительные механизмы;
- обосновать пневматическую систему;
- разработать программную архитектуру и математическую модель компенсации.

### Объекты и методы

В ВСГУТУ разработан лабораторный стенд, который включает виброток с системой принудительной продольной ориентации частиц зернового материала, блок оптического детектирования и высокоскоростную пневматическую систему отбраковки. Для обеспечения качества изображений применена промышленная видеокамера с глобальным затвором, установленные под углами  $90^\circ$  к потоку, а для устранения зеркальных бликов от поверхности зерна используется система кросс-поляризационного освещения [13].

Объект исследования – лабораторный стенд подсистемы пневматической отбраковки. Структурно комплекс разделён на оптико-сенсорный блок, вычислительный узел, микроконтроллерный модуль согласования и пневматический тракт.

*Оптико-аппаратная часть.* В качестве сенсора применена промышленная CMOS-камера с глобальным затвором ( $1280 \times 1024$ , USB 3.0, до 255 кадр/с). Глобальный затвор критически важен для исключения геометрических искажений («rolling shutter effect») при скорости зернового потока около 2 м/с. Бестеневое освещение зоны инспекции реализовано двумя широкополосными LED-источниками ( $5500\text{ K}$ ,  $\text{CRI} > 90$ ).

Анализ видеопотока осуществляется на вычислительном узле с графическим ускорителем NVIDIA GeForce RTX 3060 (6 ГБ VRAM), поддерживающим тензорные вычисления пониженной точности (FP16).

*Блок сопряжения и исполнительные механизмы.* Аппаратная платформа модуля сопряжения показана на рисунке 1. Для минимизации коммуникационных задержек модуль согласования построен на базе микроконтроллера ATmega32U4 (Arduino Leonardo, 16 МГц) с встроенным аппаратным USB-интерфейсом [11]. Это исключает применение дополнительных мостов UART-USB. Задействованы 14 дискретных каналов управления, коммутирующих быстродействующие твердотельные реле (SSR, время переключения  $< 1\text{ мс}$ ).

Аппаратная логика защиты и пневматический тракт проиллюстрированы далее (рис. 2). Схема реализует операцию «исключающее ИЛИ» (XOR) для предотвращения ложных срабатываний клапанов при инициализации контроллера и учитывает инверсную логику части модулей реле.

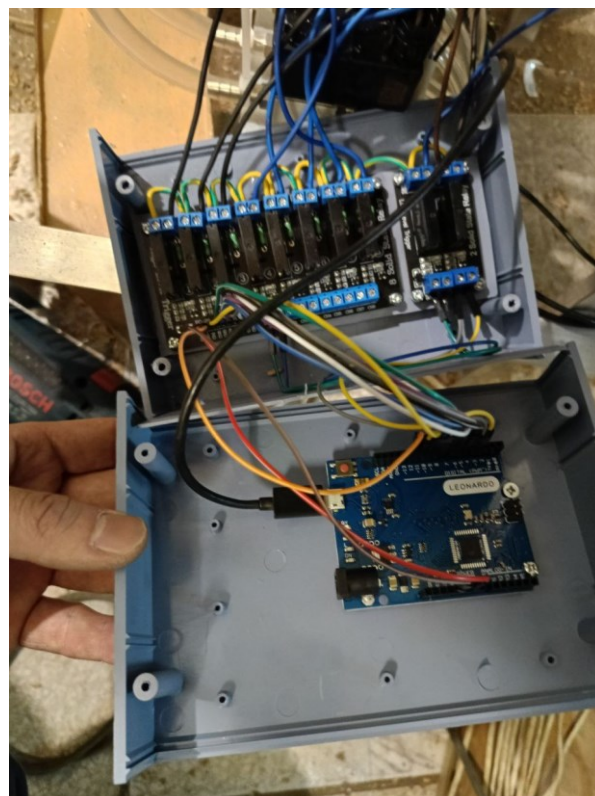


**Рис. 1. Блок управления на базе микроконтроллера и модулей твердотельных реле**

Пневматическая система включает ресивер с рабочим давлением 8 бар и 14 электропневматических нормально-закрытых клапанов Airtac 3V110-06-NC (время отклика  $\leq 20\text{ мс}$ ). Расстояние от оптической оси камеры до среза воздушных сопел – 120 мм, что при средней скорости падения зерна 1,8-2,0 м/с обеспечивает номинальное время подлёта около 60 мс.

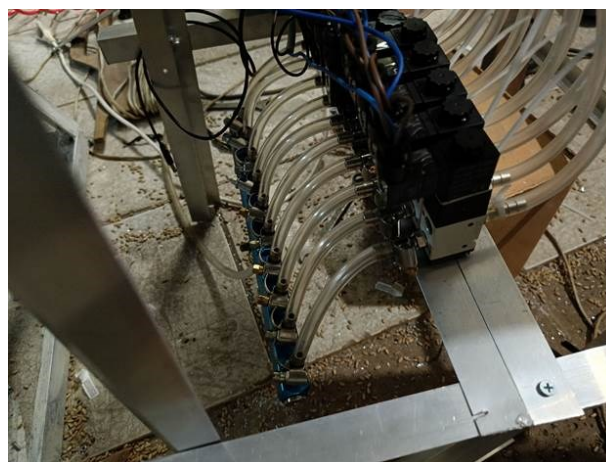


**Рис. 2. Блок электропневматических клапанов и воздушных сопел**

*Программная архитектура и математическая модель компенсации.* Структурная схема разработанного аппаратно-программного комплекса представлена на рисунке 3. Для нивелирования недетерминированности операционной системы разработана асинхронная многопоточная архитектура. Процессы изолированы в независимые потоки: аппаратный захват кадров в кольцевой буфер, ресурсоёмкий инференс нейросети, обновление интерфейса и передача сигналов управления через потокобезопасные очереди. На схеме отражены ключевые информационные потоки и связи между компонентами – от оптического сенсора до пневматических сопел.

Поскольку инференс YOLOv8 выполняется медленнее частоты камеры (65-80 кадр/с против 255 кадр/с), разработан модуль предиктивного трекинга. При успешной детекции вычисляются координаты центра масс и вектор скорости с экспоненциальным сглаживанием (EMA,  $\alpha = 0,6$ ):

$$v_x(k) = \alpha \frac{x(k) - x(k-1)}{\Delta t} + (1 - \alpha)v_x(k-1),$$

$$v_y(k) = \alpha \frac{y(k) - y(k-1)}{\Delta t} + (1 - \alpha)v_y(k-1).$$

На кадрах, пропускаемых нейросетью, трекер экстраполирует положение:

$$\hat{x}(t + \tau) = x(t) + v_x \tau, \quad \hat{y}(t + \tau) = y(t) + v_y \tau,$$

где  $\tau$  – системное время упреждения (инференс + передача + отклик клапана).

Теоретически траектория зерновки описывается уравнением [12]:

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = m_p \vec{g} + \frac{1}{2} C_D \rho_g A_p |\vec{v}_g - \vec{v}_p| (\vec{v}_g - \vec{v}_p).$$

Однако для дистанции 120 мм доминирующим фактором является начальный импульс частицы при сходе с лотка, поэтому линейной экстраполяции трекером достаточно для точного попадания в «окно» эжекции.

Передача команды на микроконтроллер осуществляется оптимизированным трёхбайтовым пакетом (0xAA, ID\_клапана, delay\_ms) на скорости 115200 бод. Такая бинарная организация гарантирует строгую очередность срабатываний и минимизацию джиттера.

## Результаты и обсуждение

В ходе стендовых испытаний аппаратно-программный комплекс был выведен на рабочий режим, что позволило оценить эффективность предложенных архитектурных решений.

*Производительность программного контура.* Разделение процессов посредством многопоточности полностью устранило проблему переполнения буфера камеры. Инструментальный мониторинг подтвердил стабильный видеозахват 255 кадр/с. Инференс модели YOLOv8 (тензор 1024×1024, точность FP16) выполняется со скоростью 65-80 итераций в 1 с. Промежутки между нейросетевыми детекциями (в среднем 3-4 кадра) успешно компенсируются предиктивным трекером, который непрерывно обновляет координаты объектов, обеспечивая контроль над зерновым потоком.

*Анализ джиттера и задержек.* Ключевым результатом является валидация стабильности канала связи. Измерения цифровым осциллографом на серии из 1000 тестовых импульсов показали, что стохастическая задержка (джиттер) между отправкой команды из потокобезопасной очереди ПК и фронтом сигнала на выходном пине микроконтроллера не превышает 1,0 мс.

Столь низкое значение джиттера подтверждает эффективность применения прямого USB-интерфейса микроконтроллера ATmega32U4 и бинарного протокола. Поскольку время электромагнитного отклика клапана составляет ~15-20 мс, а время подлёта зерна ~60 мс, погрешность в 1 мс составляет менее 2% от общего времени процесса и не оказывает статистически значимого влияния на точность пневматического удара по дефектной зерновке.

*Работоспособность системы.* Апробация показала, что система устойчиво формирует управляющие импульсы на SSR-модули без деградации производительности при одновременном обнаружении множественных дефектов. Аппаратная логика XOR и учёт инверсных каналов исключили нештатное открытие клапанов и потерю давления в ресивере при перезагрузках управляющего узла.

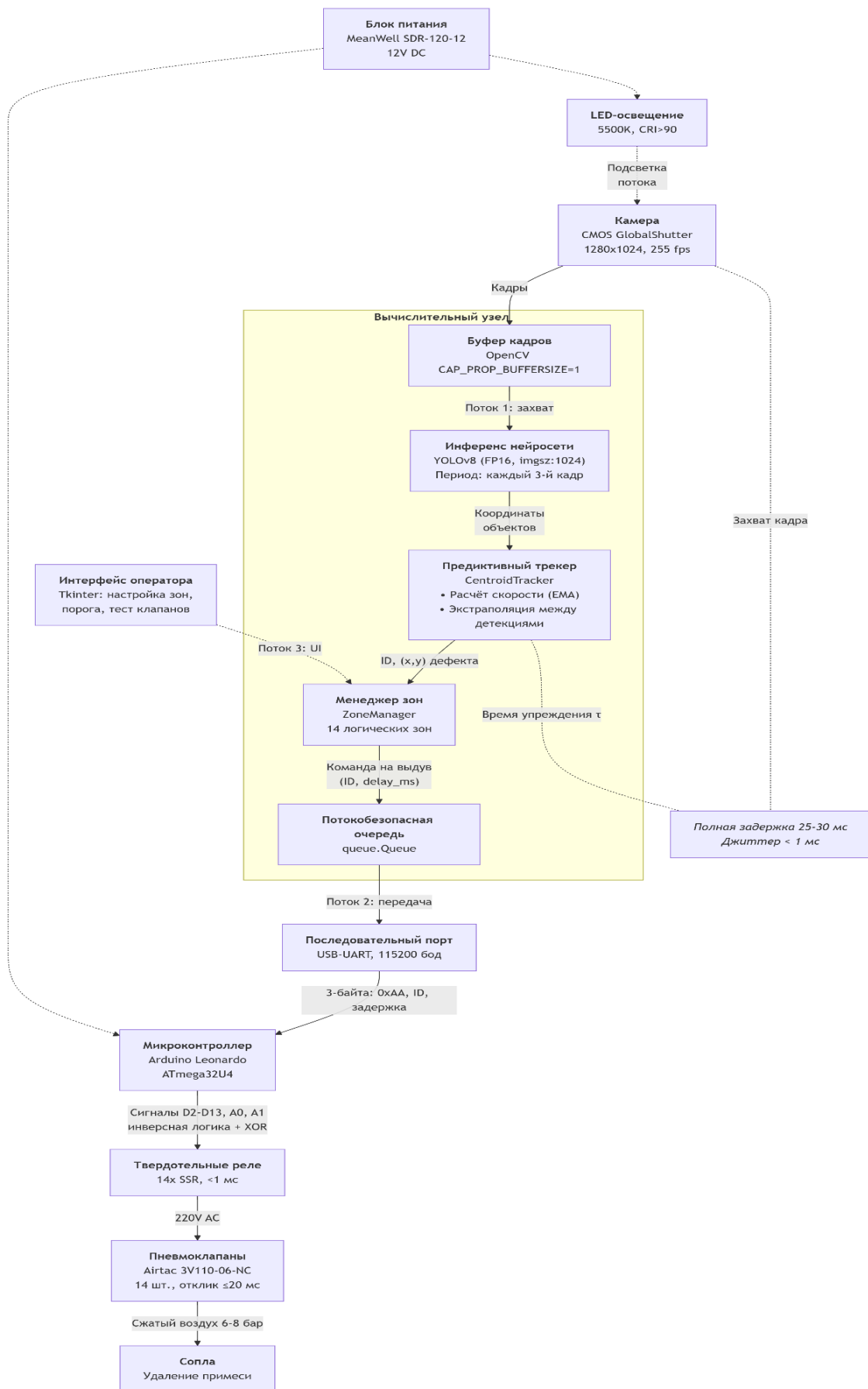


Рис. 3. Структурная схема аппаратно-программного комплекса подсистемы отбраковки

### Заключение

Разработана и физически реализована гетерогенная аппаратная архитектура подсистемы пневматической отбраковки фотосепаратора, объединяющая высокоскоростную CMOS-камеру (255 кадр/с), GPU-вычислитель и микроконтроллерный модуль управления 14 пневмоклапанами.

Доказано, что применение асинхронной многопоточной программной архитектуры и предиктивного трекинга (ЕМА-сглаживание скорости) позволяет использовать GPU с недетерминированным временем инференса в системах реального времени. Экспериментально подтверждено, что джиттер управляющего сигнала не превышает 1 мс, что полностью удовлетворяет жёстким требованиям синхронизации при сортировке зерна. Направления дальнейших исследований включают интегральное измерение полной системной задержки с применением высокоскоростной теневой видеосъёмки и оптимизацию длительности пневматического импульса для минимизации потерь годного зерна.

### Библиографический список

1. Петров, В. В. Анализ материалов оптическими методами / В. В. Петров. – Москва: Машгиз, 1970. – 364 с. – Текст: непосредственный.
2. Zhao Y. et al. (2021). A Block-Based and Highly Parallel CNN Accelerator for Seed Sorting. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 32: 1–15. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3119705.
3. Cao, Y., Jiang, H., Li, H., et al. (2025). HMSA: High-Performance Heterogeneous Mixed-Precision CNN Systolic Array Accelerator on FPGA. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 24(5s), Article 107. <https://doi.org/10.1145/3759458>
4. Zhang Y. et al. (2025). Enhanced YOLO-based framework for accurate detection and identification of common wheat impurities. *Scientific Reports*. 15: 40436. DOI: 10.1038/s41598-025-23032-9.
5. Li X. et al. (2025). YOLO-RBSD: A novel Rice Blast Spore Detector based on You Only Look Once algorithm. *Frontiers in Plant Science*. 15: 1527508. DOI: 10.3389/fpls.2025.1527508.
6. Yan J. et al. (2025). Y-MFEP: YOLO-Integrated Morphological Feature Fusion for Wheat Seed Grading. *Plant Methods*. 21: 45. DOI: 10.1186/s13007-025-01300-8.

7. Kuznetsov D.I., Muzyka I.O., Ivashchenko O.R. (2026). A Machine Vision System for Real-Time Grain Quality Classification Using Machine Learning. *AAIT*. 9 (1): 25–36. DOI: 10.15276/aaIT.09.2026.02.

8. Galka D., Sharan A. (2025). Optical grain sorting machines: review of principles of operation and classification. *Ukrainian Journal of Food Science*. 13 (2): 274–285. DOI: 10.24263/2310-1008-2025-13-2-12.

9. Gao J., Li Y., Hou J. (2022). Design and Optimization of a Machine-Vision-Based Complementary Seeding Device. *Agronomy*. 12 (9): 2180. DOI: 10.3390/agronomy12092180.

10. Vieth, J., Reith-Braun, M., Bauer, A., et al. (2023). Improving Accuracy of Optical Sorters Using Closed-Loop Control of Material Recirculation. *American Control Conference, ACC*. 3257-3263. DOI: 10.23919/ACC55779.2023.10156014.

11. ATmega32U4 8-bit Microcontroller with 16/32K bytes of ISP Flash and USB Controller : Datasheet. – Microchip Technology Inc., 2020. – 438 p.

12. Bulgakov V. et al. (2023). Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal of Central European Agriculture*. DOI: 10.5513/JCEA01/24.1.3732.

13. Техническое зрение в сортировке и анализе зерна / С. С. Ямпиров, Н. А. Нехуров, В. Б. Балданов [и др.]. – Текст: непосредственный // Наука в центральной России. – 2025. – № 1. – С. 64-72.

### References

1. Petrov V.V. Analiz materialov opticheskimi metodami. – Moskva: Mashgiz, 1970. – 364 s.
2. Zhao Y. et al. (2021). A Block-Based and Highly Parallel CNN Accelerator for Seed Sorting. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 32: 1–15. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3119705.
3. Cao, Y., Jiang, H., Li, H., et al. (2025). HMSA: High-Performance Heterogeneous Mixed-Precision CNN Systolic Array Accelerator on FPGA. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 24(5s), Article 107. <https://doi.org/10.1145/3759458>
4. Zhang Y. et al. (2025). Enhanced YOLO-based framework for accurate detection and identification of common wheat impurities. *Scientific Reports*. 15: 40436. DOI: 10.1038/s41598-025-23032-9.

5. Li X. et al. (2025). YOLO-RBSD: A novel Rice Blast Spore Detector based on You Only Look Once algorithm. *Frontiers in Plant Science*. 15: 1527508. DOI: 10.3389/fpls.2025.1527508.
6. Yan J. et al. (2025). Y-MFEP: YOLO-Integrated Morphological Feature Fusion for Wheat Seed Grading. *Plant Methods*. 21: 45. DOI: 10.1186/s13007-025-01300-8.
7. Kuznetsov D.I., Muzyka I.O., Ivashchenko O.R. (2026). A Machine Vision System for Real-Time Grain Quality Classification Using Machine Learning. *AAIT*. 9 (1): 25–36. DOI: 10.15276/ait.09.2026.02.
8. Galka D., Sharan A. (2025). Optical grain sorting machines: review of principles of operation and classification. *Ukrainian Journal of Food Science*. 13 (2): 274–285. DOI: 10.24263/2310-1008-2025-13-2-12.
9. Gao J., Li Y., Hou J. (2022). Design and Optimization of a Machine-Vision-Based Complementary Seeding Device. *Agronomy*. 12 (9): 2180. DOI: 10.3390/agronomy12092180.
10. Vieth, J., Reith-Braun, M., Bauer, A., et al. (2023). Improving Accuracy of Optical Sorters Using Closed-Loop Control of Material Recirculation. *American Control Conference, ACC*. 3257-3263. DOI: 10.23919/ACC55779.2023.10156014.
11. ATmega32U4 8-bit Microcontroller with 16/32K bytes of ISP Flash and USB Controller: Datasheet. - Microchip Technology Inc., 2020. - 438 p.
12. Bulgakov V. et al. (2023). Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal of Central European Agriculture*. DOI: 10.5513/JCEA01/24.1.3732.
13. Yampilov S.S. Tekhnicheskoe zrenie v sortirovke i analize zerna / S. S. Yampilov, N. A. Nekhurov, V. B. Baldanov [i dr.] // Vestnik VSGUTU. – 2025. – No. 1 (96). – S. 74-80. – DOI 10.53980/24131997\_2025\_1\_74.

