

УДК 631.362

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-157-3-31-38>

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА ЯБЛОК ПРИ СОРТИРОВКЕ

П.П. Казакевич,

Заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, докт. техн. наук, профессор, чл.-кор. НАН Беларуси

А.Н. Юрин,

зав. лабораторией РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук, доцент

В.В. Микульский,

ст. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук

Г.А. Прокопович,

зав. лабораторией робототехнических систем Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси, канд. техн. наук, доцент

Л.А. Ходасевич,

программист лаборатории цифровых технологий ООО «ЛАЦИТ» (г. Витебск, Беларусь)

В статье рассмотрен процесс создания обучающей выборки для обучения искусственной нейронной сети (ИНС) системы технического зрения. Обучение ИНС проводилось на основе аннотированных изображений реальных яблок, содержащих описание различных дефектов в виде отдельных полигонов посредством программы LabelMe. На изображении плода размечалось само яблоко и его помологические особенности, такие как цветоножка, плодоножка и лист, а также 10 различных дефектов плодов, каждому из которых присваивалось соответствующее название: сетка, нажим, порез, гниль, парша, градобоина и т.д. Полученные размеченные изображения плодов с дефектами сформировали эталонную обучающую выборку для ИНС. Проверка эффективности работы ИНС осуществлялась путем оценки правильности распознавания изображений плодов при сравнении их с эталонными изображениями. Обучение ИНС каждому из дефектов яблок останавливалось при достижении 95 % вероятности правильной оценки дефекта. ИНС, обученная на созданной обучающей выборке, использована в системе технического зрения технологической линии ЛСП-4, обеспечивающей сортировку яблок на три товарных сорта по размеру и дефектам от механических повреждений, болезней и вредителей. Точность сортировки по размеру составила 75,4 %, а по наличию дефектов – 73,1 %.

Ключевые слова: классификация, искусственные нейронные сети, дефект, лист, цветоножка, чашелистик, парша, градобоина, нажим, гниль, распознавание.

The article describes the process of creating a training sample for training an artificial neural network (hereinafter referred to as ANN) of a technical vision system. ANN training was carried out on the basis of annotated images of real apples containing a description of various defects in the form of separate polygons using the LabelMe program. The apple itself and its pomological features, such as receptacle, peduncle and leaf, were placed on the image of the fruit, as well as 10 different fruit defects, each given a corresponding name: mesh, pressure, cut, rot, scab, hailstone, etc. The resulting labeled images of fruit with defects formed a reference training set for the ANN. The performance of the ANN was tested by evaluating the correctness of fruit images recognition when comparing them with reference images. The training of the ANN for each of the defects in apples was stopped when the 95% probability of the correct assessment of the defect was reached. The ANN trained on the created training sample was used in the vision system of the LSP-4 production line, which provides sorting of apples into three commercial varieties by size and defects from mechanical damage, diseases and pests. The accuracy of sorting by size was 75,4%, and by the presence of defects – 73,1%.

Key words: classification, artificial neural networks, defect, leaf, stalk, sepal, scab, hailstone, pressure, rot, recognition.

Введение

Обязательной операцией при товарной обработке плодов является сортирование, в процессе которого

продукцию разделяют на сорта по качеству. Эта операция осуществляется, как правило, вручную при визуальном осмотре плодов рабочими, что требует большого количества ручного труда [1, 2].

Использование автоматизированных сортировальных машин для идентификации и разделения плодов на сорта позволяет значительно повысить качество сортирования и производительность [3, 4].

Наиболее подходящим для автоматизации способом идентификации качества плодов является метод оптического контроля с использованием систем технического зрения, поскольку он обеспечивает высокую точность оценки качества и соответствует условиям технологии [5, 6].

В этой связи создание технического средства с системой технического зрения (СТЗ), позволяющего определить качество поверхности плода без его повреждения, по аналогии как это делает человек, является важной агроинженерной задачей.

В разное время решением данной задачи занимались ученые – Ильинский А.С., Кирина М.В., Балабанов П.В., Жиркова, А.А., Рудник Ю.А., Журавлев С.В., Хорт Д.О. и другие.

Цель настоящей работы – повышение эффективности сортировки яблок посредством внедрения в производство СТЗ с искусственной нейронной сетью для автоматизированной сортировки яблок по размеру и наличию дефектов.

Основная часть

Любое устройство для сортировки плодов выполняет процессы подачи плодов, их классификации и разделения [7] (рис. 1). В зависимости от целей сортировки, вида продукции и требований к ее выходной части, каждый из этих процессов может иметь свои особенности.

Так, подачу плодов можно разделить на подпроцессы формирования потока и транспортирование, классификацию – как обнаружение признаков, распознавание структуры и принятие решений, а процесс разделения – как подпроцессы взвода исполнительного механизма, удара и движения объекта после него (рис. 2).

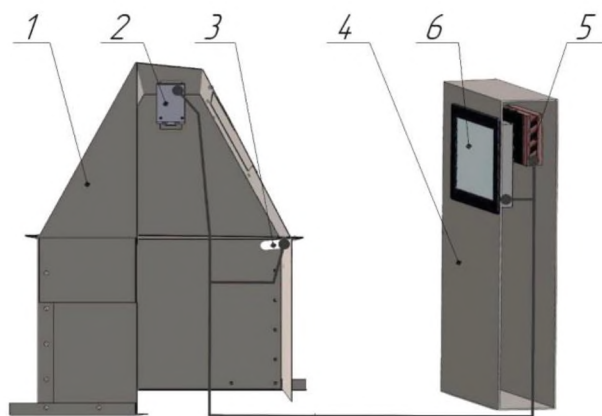


Рисунок 2. Лабораторная установка системы технического зрения

В данной схеме формирование потока и транспортирование являются подготовительными процессами, а подпроцессы механического разделения – заключительными. Разделение же плодов на сорта осуществляется в процессе их классификации.

В настоящее время актуальным является разделение плодов не только по размеру, но и по наличию дефектов, как это делает человек [8, 9]. Для этого оптическая система контроля должна осуществлять высокоскоростную съемку плодов, распознавание дефектов, а также отслеживание плодов в режиме реального времени.

При этом если диаметр яблок можно определить исходя из геометрических размеров, получаемых видеокамерой изображения, то такие параметры, как механические повреждения и повреждения плодов болезнями и вредителями можно выявить только посредством применения аппарата глубокого обучения ИНС, в функционирование которого положен принцип распознавания изображения плодов, которые система сравнивает с запрограммированными в память ИНС эталонными образцами, получившими название «обучающая выборка» [10, 11].

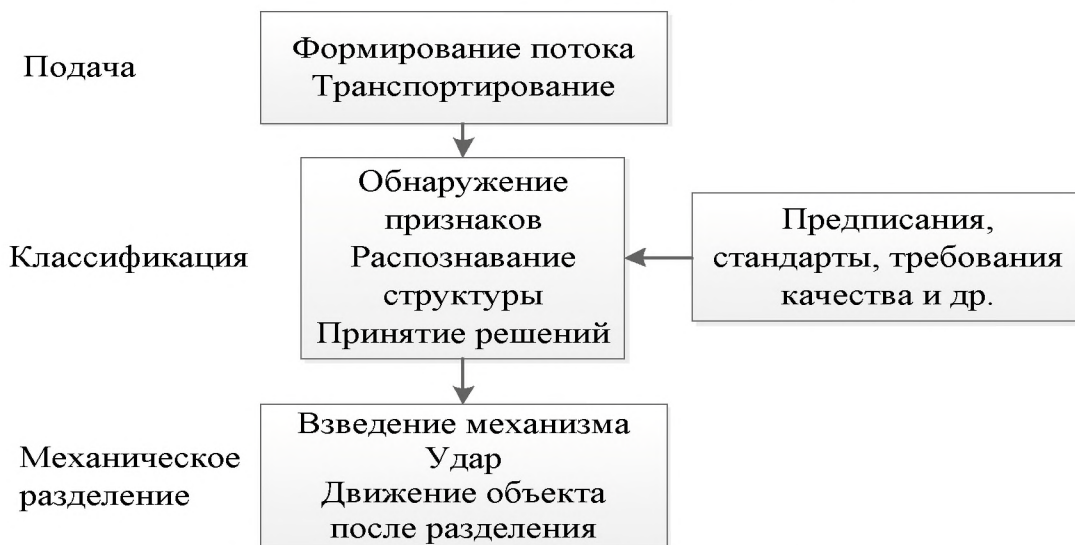


Рисунок 1. Функциональная схема системы сортировки плодов по качеству

Обоснование процесса обучения искусственной нейронной сети глубокого обучения. Способность моделей глубокого обучения автоматически выделять признаки для классификации образов приводит к тому, что для их обучения требуется большой объем обучающих данных. Для ускорения процесса формирования обучающей выборки создаются открытые базы данных цифровых изображений. Однако при решении конкретных практических задач нередки случаи, когда в базах данных отсутствуют изображения, содержащие искомые для конкретной технической задачи эталонные образы. Это требует использования других подходов к формированию обучающей выборки:

- 1) на основе реальных изображений;
- 2) на основе синтетических изображений;
- 3) из синтетических данных, сгенерированных на основе реальных изображений.

Практика показывает, что наилучшие результаты дает метод обучения на основе реальных моделей. Поэтому обучение ИНС проводили с использованием данного метода [12, 13].

Разметка изображений для создания обучающей выборки ИНС. Для создания обучающей выборки помологических особенностей и дефектов плодов использовались плоды урожая 2020-2021гг. производства ОАО «Остромечево» (сорт «Иманти», «Вербное», «Глостер»), а также была создана лабораторная установка системы технического зрения.

Лабораторная установка системы технического зрения (рис. 2) включала в себя фотомодуль, состоящий из механического защищенного корпуса 1 с видеокамерой 2 и структурированной подсветкой 3, защищенного электрического шкафа 4 с вычислительным модулем 5 и сенсорной панелью управления 6.

Видеокамера использовалась VCXU-32C фирмы Vaueg с оптическим сенсором Sony Pregius CMOS площадью ПЗС-матрицы в 1/1.8, оснащенная объективом AZURE-0818M3M с фокусным расстоянием $f=8$ мм и диафрагмой F1.8.

В качестве вычислительного модуля использовался промышленный компьютер фирмы CINCOSE серии DS-1200, оснащенный процессором Intel Core™ i7-8700 Hexa-Core. На компьютере установлена операционная система Ubuntu (Linux).

В качестве структурированной подсветки использовались светодиодные лампы Smd 5050 суммарной мощностью 160 Вт.

Для выделения дефектов яблок использовалась программа LabelMe, установленная на персональных компьютерах лаборатории, с операционной системой Windows 8.1 с установленными пакетами PyQt5 и lxml. [14, 15].

Обучающая выборка ИНС на основе реальных моделей формировалась поэтапно. Для обучения искусственных нейронных сетей, используемых в системе, необходимо создать обучающую выборку. Во-первых, было снято реальное видео движения яблок по конвейеру. Для фотографирования яблок со всех сторон движущимся по конвейеру яблокам придавалось вращение посредством парных роликов 3 индивидуальных кареток конвейера (рис. 3), установленных на одной оси, которые при прохождении под фотомодулем набегают на приводной ремень, придающий им вращение в направлении, противоположном движению конвейера. Ролики, перемещаясь по вертикали относительно корпуса 1, поднимают яблоки с тарелок 2 и заставляют их вращаться.

Во вторых, перед обучением ИНС собранные изображения поврежденных плодов размечались вручную. Для разметки изображений использовалась программа для обработки LabelMe (рис. 4) [16, 17].

На изображении плода размечалось само яблоко (apple) и его помологические особенности, а именно: цветоложе (sepal), плодоножка (stam, funnel, leg) и лист (leaf). Данные «особенности» плода не являются дефектами и необходимы для того, чтобы ИНС в дальнейшем при работе не распознавала их как дефект и не «забраковывала» плод (табл. 1). После этого была выполнена разметка всех обнаруженных дефектов.

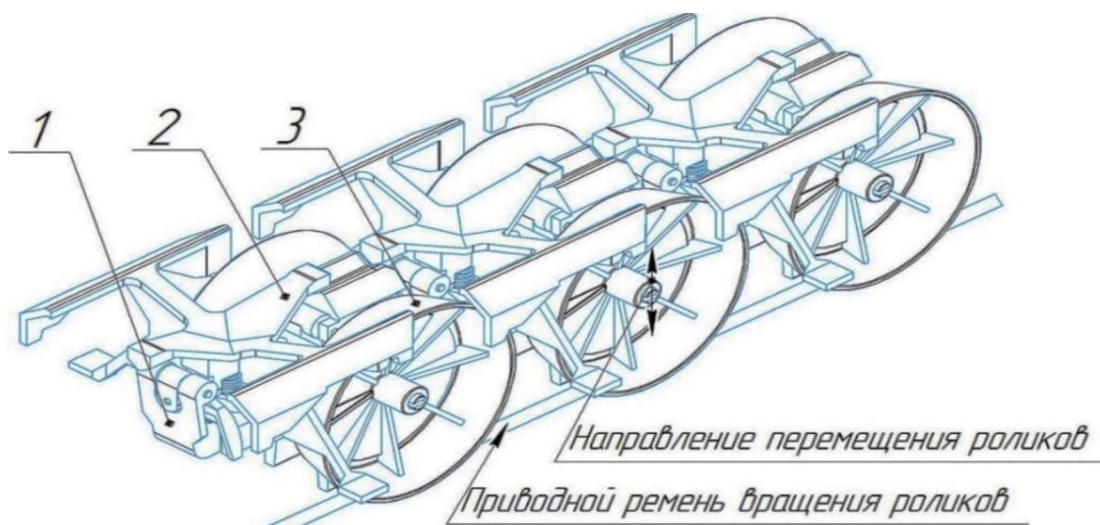


Рисунок 3. Индивидуальные каретки для яблок конвейера

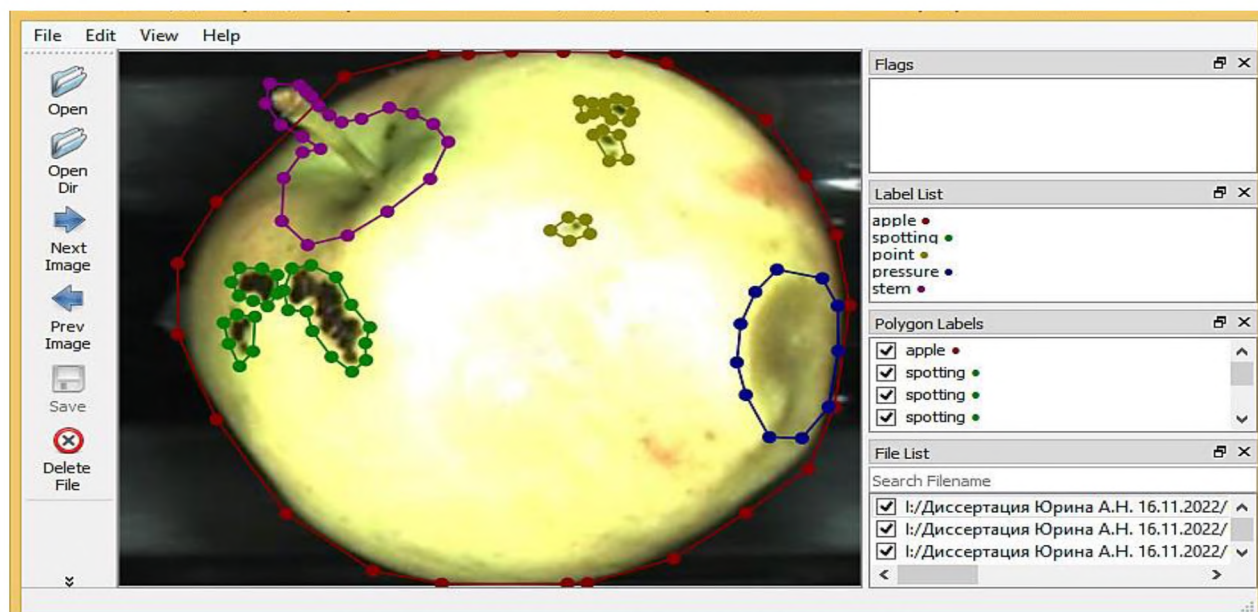


Рисунок 4. Графическое окно приложения LabelMe

Для обучения ИНС использовались 10 различных дефектов плодов, каждому из которых присваивалось соответствующее название: сетка, нажим, порез, гниль, парша, градобоина (табл. 2).

Таблица 1. Помологические особенности яблок

Условное обозначение	Наименование
apple	яблоко
sepal	цветоложе
stam	«Воронка» плодоножки с плодоножкой
funnel	«Воронка» плодоножки без плодоножки
leg	Плодоножка без «воронки» (не видна)
leaf	Лист

Таблица 2. Дефекты яблок

Условное обозначение	Наименование
net	Сетка
scratch	Порез
pressure	Нажим
hail	Градобоина
rot	Гниль
point	Парша
spotting	Парша
wart	Парша
lumps	Парша
scab	Парша

Для более эффективной классификации некоторые из дефектов для обучения ИНС были разделены на несколько подклассов. Так, заболевание паршой может проявляться как наличием мелких черных точек на поверхности плода, так и большим их скоплением, а также «бородавками» и обширной «ороговевшей поверхностью». Поэтому каждому из указан-

ных дефектов был присвоен свой подкласс с отдельной выборкой дефектов.

Особое внимание при создании обучающей выборки уделено разделению таких классов, как нажим (pressure) и гниль (rot), так как в большинстве случаев механическое повреждение плодов с образованием гематомы в последующем приводит к образованию в этом месте загнивания.

Однако если для первого и второго сорта плодов в соответствии с требованиями к их качеству по СТБ 2288-2012 [18] допускается некоторое повреждение, то даже небольшое загнивание плода приводит к его выбраковке (табл. 3). Четко разделять эти виды повреждений яблок важно для качественной сортировки плодов.

На третьем этапе, после формирования обучающей выборки осуществлено ее обучение ИНС. Необученная ИНС, пропуская через себя входное изображение, генерирует координаты ограничивающих прямоугольников и соответствующие им вероятности принадлежности объектов классам. Затем выход, полученный необученной ИНС, сравнивается с эталонным выходом, получая оценку схожести, и методом обратного распространения ошибки параметры нейронов ИНС корректируются таким образом, чтобы максимизировать оценку схожести.

Общее количество обработанных фотографий составило 3600 шт., в которых выделено дефектов и признаков: net – 393 шт., scratch – 493 шт., pressure – 2095 шт., rot – 591 шт., point – 2814 шт., spotting – 426 шт., wart – 355 шт., lumps – 423 шт., scab – 494 шт., hail – 600 шт., apple – 3600 шт., sepal – 931 шт., stam – 765 шт., funnel – 530 шт., leg – 427 шт., leaf – 331 шт.

Кроме обучающих данных, необходимо было также выбрать архитектуру ИНС, приемлемую для решения конкретной задачи.

Таблица 3. Показатели качества выполнения технологического процесса сортировки яблок

Наименование показателя	Характеристика и требования для сорта		
	высшего	первого	второго
Наибольший размер плода, мм	70–65	65–60	60–55
Механические повреждения:			
- «градобоина»	н/д*	до 2 см ²	2см ² –¼ поверхности
- «прокол», «порез», «нажим»	н/д*	до 2 см ²	2–4 см ²
Повреждения вредителями	н/д*	до 2 см ²	2–4 см ²
Повреждения болезнями:			
- «гниль»	н/д*		
- «сетка»	н/д*	до ¼ поверхности	допускается
- «парша»	н/д*	до 2 см ²	2см ² –¼ поверхности
* – не допускается			

Для задачи распознавания дефектов на изображениях яблок используются ИНС, называемые детекторами. Детекторы способны указать местоположение объекта на изображении и его класс. Анализ работы детекторов, проведенный в источнике [19], показал, что подходящей для выполняемой работы является сегментационная сеть Iraspp mobilenetV3 из пакета mmsegmentation PyTorch.

Функция потерь CrossEntropyLoss, optimizer Adam (learning rate 0.01).

Для каждого объекта в выборке возможны 4 ситуации:

- правильное предсказание положительной метки. Такие объекты относятся к группе true positive (TP);
- ошибочное предсказание положительной метки – false positive (FP);
- правильное предсказание отрицательной метки – true negative (TN);
- ошибочное предсказание отрицательной метки – false negative (FN).

Для оценки качества работы детектора использовали метрики IoU и Accuracy.

Метрика Accuracy является величиной, обозначающей долю правильных ответов алгоритма, значение которой определялось по формуле:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}}$$

Метрика Intersection over Union (IoU) – величина показывающая, насколько у двух объектов (эталонного и текущего) совпадает внутренняя площадь:

$$\text{IoU} = \frac{p \text{ BB}}{t \text{ BB}}$$

где pBB – площадь объекта, предсказанная детектором.

tBB – реальная площадь объекта;

Обучение нейронной сети происходило до 400 эпох. Значения метрик для различных дефектов, распознанных нейронной сетью, представлены в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, наибольшие значения показатели метрик соответствуют дефектам «нажим», «гниль», «парша» в виде точек, а наименьшие – сетка,

градобоина. Это объясняется меньшим объемом обучающей выборки именно этих дефектов яблок.

Значения метрики Accuracy при определении сорта яблок обученной нейронной сетью приведены в таблице 5.

Таблица 4. Значение метрик IoU и Accuracy для различных дефектов яблок

Класс	IoU	Accuracy
Apple (яблоко)	0.981	0.975
Background (фон)	0.932	0.967
«Point»	0.857	0.874
«Pressure»	0.744	0.858
«Hail»	0.691	0.785
«Rot»	0.798	0.764
«Scratch»	0.774	0.741
«Scab»	0.815	0.772
«Spotting»	0.753	0.734
«Lumps»	0.716	0.758
«Net»	0.759	0.682
«Wart»	0.703	0.697
Среднее значение	0.793	0.8

Таблица 5. Значения метрики Accuracy при определении сорта яблок обученной нейронной сетью

Сорт Яблок	Accuracy
Высший	0.763
Первый	0.825
Второй	0.851
Без сорта	0.864

Результаты определения дефектов яблок представлены на рисунке 5

Реализация результатов исследований. Созданная обучающая выборка использована в системе технического зрения технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4, разработанной РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» [20]. Она состоит из двух частей: приемной (рис. 6) и сортирующей (рис. 7).

Приемная часть линии (рис. 6) состоит из транспортера приемного 1, модуля разгрузочного 2, ролинга 3, лотка 4, опоры 5, ванны 6, горки 7, сушилки 8, водовода 9, опоры 10.

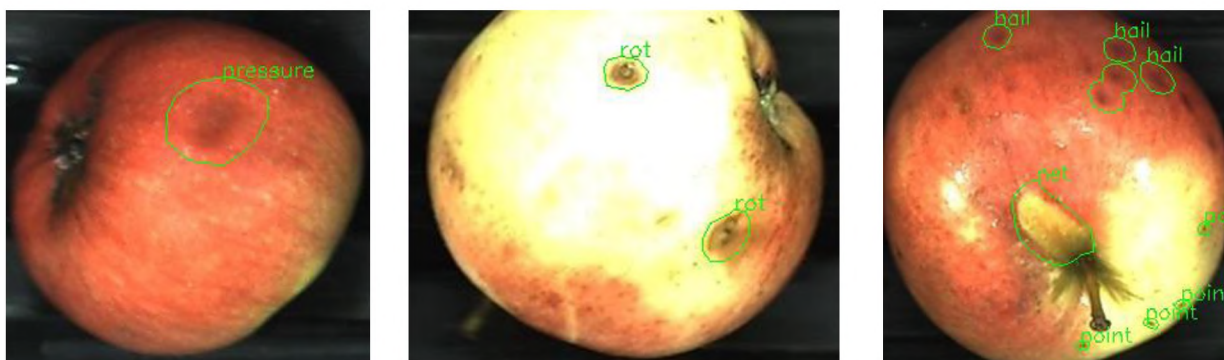


Рисунок 5. Результаты определения нейронной сетью дефектов яблок

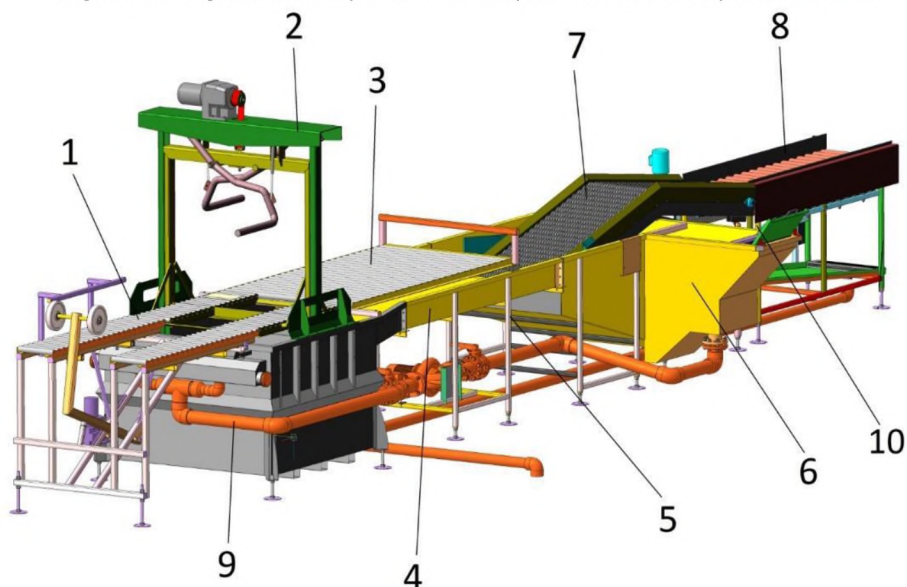


Рисунок 6. Приемная часть линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4: 1 – транспортер приемный; 2 – модуль разгрузочный; 3 – ролинг; 4 – лоток; 5 – опора; 6 – ванна; 7 – горка; 8 – сушка; 9 – водовод; 10 – опора

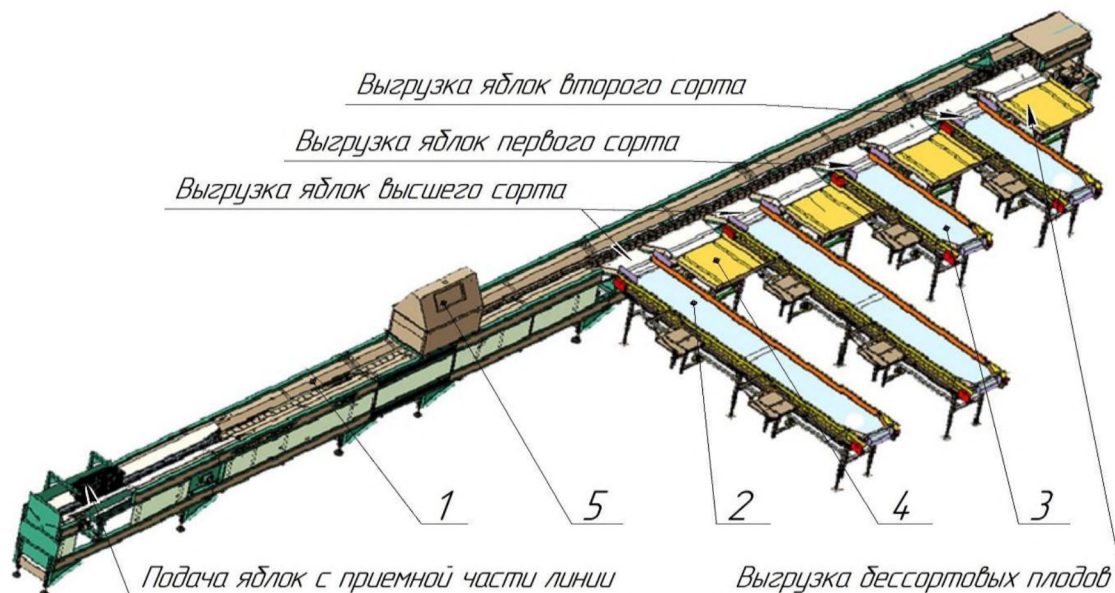


Рисунок 7. Сортирующая часть линии ЛСП-4: 1 – основной конвейер; 2 и 3 – выходной транспортер; 4 – стол; 5 – система технического зрения

Сортирующая часть линии (рис. 7) состоит из основного конвейера 1, конвейеров для выходной продукции 2 и 3, стола 4 и оптического сортировщика 5.

Рабочим органом, осуществляющим непосредственную сортировку плодов, является система технического зрения, состоящая из оптического модуля с видеокамерой и структурной подсветкой и электронного блока управления.

Линия обеспечивает сортировку яблок в зависимости от качества на три товарных сорта: высший, первый и второй в соответствии с показателями качества, указанными в таблице 3.

Техническая характеристика технологической линии ЛСП-4 приведена в таблице 6.

Технологический процесс линии осуществляется следующим образом.

СТЗ обеспечивает получение изображений движущихся яблок, распознавание и обработку полученных изображений, формирование изображений в образы с последующей классификацией яблок по сортам, выдачу управляющего сигнала исполнительному механизму сбрасывателя, осуществляющему опорожнение кареток линии напротив конвейеров соответствующих сортов.

Плоды без сорта транспортируются по основному конвейеру до конца, где сбрасываются на стол устройством, обеспечивающим наклон всех транспортирующих кареток конвейера (рис. 3).

Приемочные испытания линии ЛСП-4 проведены в ОАО «Остромечеве» Брестского района в 2020–2021 гг. [21].

Сравнение экономических показателей использования линии ЛСП-4 производились с импортным аналогом – «Rollerstar CV-C3 1-7+1» фирмы «Aweta» (Голландия) и ручным трудом.

Расчет экономических показателей выполнен по ТКП 151-2008 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей» и показал, что годовой приведенный экономический эффект от применения линии ЛСП-4 в сравнении с импортным аналогом составляет 97142,50 руб., срок окупаемости – 4,59 года, а в сравнении с ручным трудом – 64219,00 руб. и 6,2 года соответственно.

При этом производительность труда составила 1,8 т за час основного времени, или 225 кг/ч на одного человека из обслуживающего персонала линии, что соответствует производительности «Rollerstar CV-C3 1-7+1» и в 3 раза выше производительности при ручной сортировке плодов [22].

Анализ результатов испытаний показал, что технологическая линия соответствует требованиям технического задания и обеспечивает качественное выполнение технологического процесса сортировки яблок по размеру и наличию дефектов от механических повреждений, болезней и вредителей. При этом точность сортирования плодов по размеру составила 75,4 %, а точность сортирования по размеру и наличию дефектов – 73,1 %. Наибольшая точность распознавания обеспечивается при определении дефектов «pressure» и «point» (87 и 86 % соответственно), а наименьшая – для «net» и «wart» (68 и 69 % соответственно). Очевидно, что для повышения точности распознавания дефектов плодов необходимо увеличение обучающей выборки не менее чем в 2-3 раза.

Заключение

1. Создана обучающая выборка искусственной нейронной сети системы технического зрения для распознавания различных дефектов яблок сортов «Иммант», «Вербное» и «Глостер».

2. Применение системы технического зрения на основе ИНС с созданной базой данных моделей реальных дефектов плодов показало высокую эффективность сортировки яблок, обеспечив точность сортирования плодов по размеру на 75,4 %, а точность по наличию дефектов – на 73,1 %.

3. Для повышения точности сортировки яблок посредством ИНС необходимо увеличение объема обучающей выборки минимум в 2-3 раза.

4. Применение линии сортировки плодов ЛСП-4 позволило повысить производительность труда при сортировке плодов в 3 раза по сравнению с ручным трудом.

Работа выполнялась в рамках задания 5 «Разработать и освоить производство технологической линии сортировки и фасовки яблок» подпрограммы «Белсельхозмеханизация-2025» Государственной научно-технической программы «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» 2021-2025 гг.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов, И.Г. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур / И.Г. Смирнов, Д.О. Хорт, А.И. Кутырев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – Т. 15. – № 4. – С. 35-41.

Таблица 6. Техническая характеристика линии ЛСП-4

Наименование показателя	Значение
Количество отводящих конвейеров, шт.	4
Скорость транспортирования плодов на основном конвейере, м/с	0,10–0,78
Производительность за час основного времени, т*	1,7-2,5
Параметры, по которым осуществляется сортировка	размер, механические повреждения, повреждения от вредителей
Обслуживающий персонал, чел.	8

* – зависит от физических и структурно-механических свойств подаваемых на линию плодов

2. Роботизированный комплекс для сортировки яблок / П.В. Балабанов [и др.] // Цифровизация агропромышленного комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 21–23 окт. 2020 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2020. – Т. 1. – С. 44–47.
3. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision [Electronic resource] / C. Szegedy [et al.] // Cornell University Library. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1512.00567.pdf>. – Date of access: 15.05.2018.
4. ImageNet [Electronic resource] // Stanford Vision Lab, Stanford University, Princeton University. – Mode of access: <http://www.image-net.org>. – Date of access: 05.04.2018.
5. Yuzhen, Lu. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples [Разработка мультиспектральной системы визуализации отраженного изображения (SIRI) и ее применение для обнаружения повреждений яблок. (США)] / Lu Yuzhen, Lu Renfu // Transactions of the ASABE / Amer. soc. of agriculture and biol. engineering. -St. Joseph (Mich.), 2017. – Vol. 60, № 4. – P. 1379-1389.
6. Казакевич, П.П. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание / П.П. Казакевич, А.Н. Юрин, Г.А. Прокопович // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 488-500. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>.
7. Юрин, А.Н. Инновационные технологические процессы и технические комплексы для интенсивного садоводства Беларусі / А.Н. Юрин. – Минск: Беларуская навука, 2022. – 208 с. – ISBN 978-985-08-2932-0.
8. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе / Д.О. Хорт [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК / Федер. науч. агроинженер. центр ВИМ. – 2020. – № 1 (38). – С. 133-141.
9. Жиркова, А.А. Автоматизированная система гиперспектрального контроля дефектов яблок / А.А. Жиркова, П.В. Балабанов, А.Г. Дивин // Современная наука: теория, методология, практика: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 13–14 апр. 2021 г. / Тамбов. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2021. – С. 291-296.
10. Нейронная сеть для распознавания плодов и ягод садовых культур / Д.О. Хорт, А.И. Кутырев, Р.А. Филиппов, Р.В. Вершинин, И.Г. Смирнов / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020660182; 28.08.2020. – Заявка № 2020619124 от 14.08.2020.
11. Разработка навесной системы для управления пропашным культиватором в автоматическом режиме / В.В. Азаренко, Д.И. Комлач, В.В. Голдыбан, И.А. Барановский, Г.А. Прокопович // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, №2. – С. 232–242. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242>.
12. База данных спектральных изображений болезней и повреждений злаковых культур, плодов и клубней картофеля / А.С. Дорохов, А.Г. Аксенов, Д.О. Хорт, А.И. Кутырев, А.В. Тетерев, А.В. Сибирев, М.Н. Московский, Р.А. Филиппов, С.В. Семичев, М.А. Мосяков / Свидетельство о регистрации базы данных 2021620285; 16.02.2021. – Заявка № 2021620155 от 08.02.2021.
13. Training deep face recognition systems with synthetic data [Electronic resource] / A. Kortylewski [et al.] // Cornell University Library. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf>. – Date of access: 16.04.2018.
14. PyQt5 PyPI. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://pypi.org/project/PyQt5> (дата обращения: 27.03.2021).
15. lxml – Processing XML and HTML with Python. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://lxml.de> (дата обращения: 27.03.2021).
16. Tzutalin. LabelImg [Electronic resource] / Tzutalin. – Mode of access: <https://github.com/tzutalin/labelImg>. – Date of access: 18.06.2018.
17. Huang, J. Speed /accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors [Electronic resource] / J. Huang // Cornell University Library [Электронный ресурс]. – 2016. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1611.10012.pdf>. – Date of access: 04.06.2019.
18. Яблоки свежие поздних сроков созревания. Технические условия: СТБ 2288-2012. – Введ. 08.11.12. – Минск: Госстандарт, 2012. – 11 с.
19. Ganganagowdar, N.V. An intelligent computer vision system for vegetables and fruits quality inspection using soft computing techniques [Интеллектуальная система компьютерного зрения для проверки качества и сортировки плодов и овощей на основе мягких вычислений (нейронная сеть с обратной связью и вероятностная нейронная сеть). Индия] / N.V. Ganganagowdar, A.V. Gundad // Agricultural Engineering International. – 2019. – Vol. 21, № 3. – P. 171-178.
20. Снижение затрат труда применением системы технического зрения при сортировке яблок / А.Н. Юрин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сборник / Национальная академия наук Беларусі, РУП «НПЦ Беларусі по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П.П. Казакевич [и др.]; рец.: В.В. Азаренко [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2022. – Вып. 55. – С.88-95.
21. Протокол приемочных испытаний линии технологической сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 от 25 февр. 2022 г. № 004-1/3-2022 / ИЦ ГУ «Белорусская МИС». – П. Привольный, 2022. – 99 с.
22. Организационно-технологические нормативы возделывания овощных, плодовых, ягодных культур и выращивания посевного материала: сборник отраслевых регламентов / В.Г. Гусаков [и др.]; НАН Беларусі, Ин-т. системных исследований в АПК НАН Беларусі. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 520 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.06.2023