

**А. Н. Юрин**

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

## **СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ С ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ ДЛЯ СОРТИРОВКИ ЯБЛОК**

*Аннотация.* В данной статье рассмотрен процесс создания обучающей выборки для обучения искусственной нейронной сети (в дальнейшем – 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 цветоложе, 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, плодоножка, чашелистик, парша, градобоина, нажим, гниль, распознавание.

**Anton N. Yuryn**

*RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: anton-jurin@rambler.ru*

## **CREATION OF A VISION SYSTEM WITH AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR SORTING APPLES**

*Abstract.* This article describes the process of creating a training sample for training an artificial neural network (hereinafter referred to as ANN) of a 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. On the image of the fruit, the apple itself and its pomological features, such as receptacle, peduncle and leaf, were marked, as well as 10 different fruit defects, each of which was given an appropriate name: mesh, pressure, cut, rot, scab, hailstone, etc. The resulting labeled images of fetuses with defects formed a reference training set for the ANN. The performance of the ANN was tested by evaluating the correctness of recognition of fetal images 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 %.

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

### Результаты и их обсуждение

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.



Рис. 1. Функциональная схема системы сортировки плодов по качеству

Так **подачу** плодов можно разделить на подпроцессы формирования потока и транспортирования, **классификацию** – на обнаружение признаков, распознавание структуры и принятие решений, а процесс **разделения** – на подпроцессы взвода исполнительного механизма, удара и движения объекта после него (рис. 1).

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 изображений, то такие параметры, как механические повреждения и повреждения плодов болезнями и вредителями можно выявить только посредством применения аппарата глубокого обучения ИНС, в основу функционирования которой положен принцип распознавания изображений плодов, которые система сравнивает с запрограммированными в память ИНС эталонными образами, получившими название «обучающая выборка» [10, 11].

*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 этого метода [12, 13].

*Разметка изображений для создания обучающей выборки ИНС.* Для создания обучающей выборки помологических особенностей и дефектов плодов использованы плоды урожая 2020–2021 гг. производства ОАО «Остромечово» сортов «Имант», «Вербное» и «Глостер», а также была создана лабораторная установка системы технического зрения.

Лабораторная установка системы технического зрения, как показано на 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.

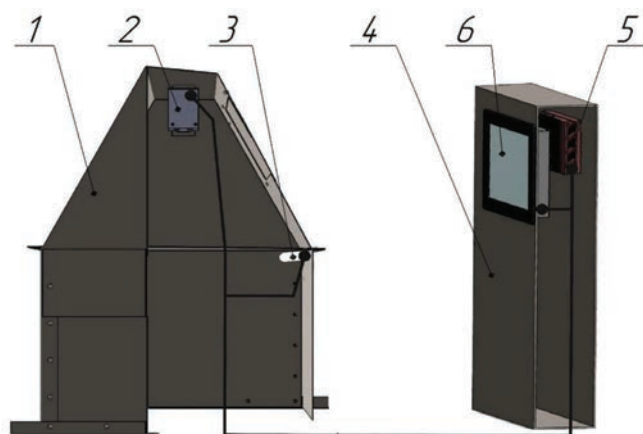


Рис. 2. Лабораторная установка системы технического зрения

Видеокамера использовалась VCXU-32C фирмы Baumer с оптическим сенсором Sony Pregius CMOS площадью ПЗС-матрицы в 1/1.8". Видеокамера оснащалась 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.

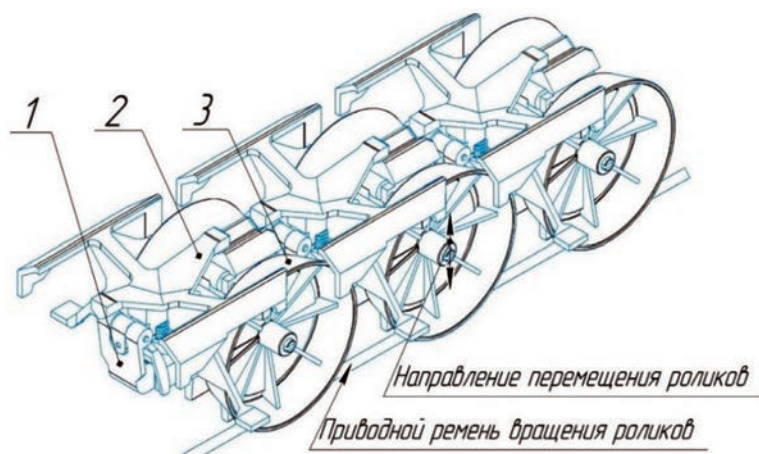


Рис. 3. Индивидуальные каретки для яблок конвейера

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

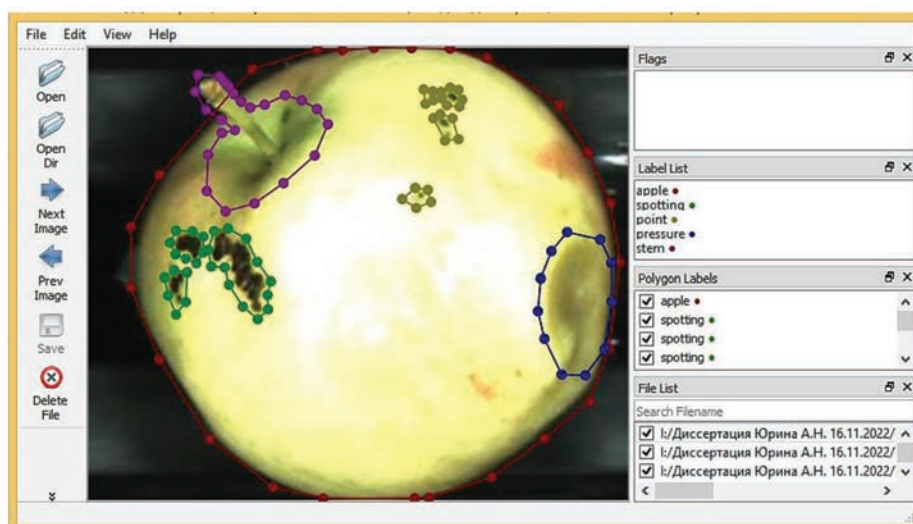


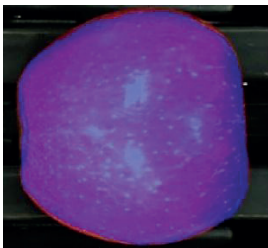
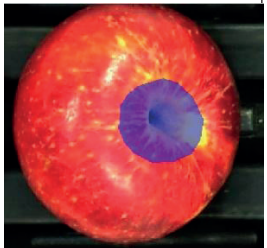
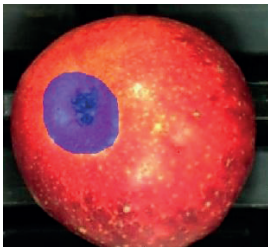
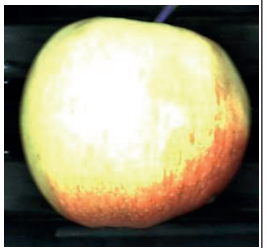

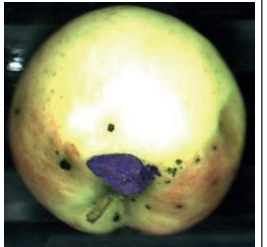
Рис. 4. Графическое окно приложения LabelMe

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.

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





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 указанных дефектов был присвоен свой подкласс с отдельной выборкой дефектов.

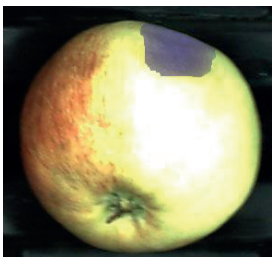
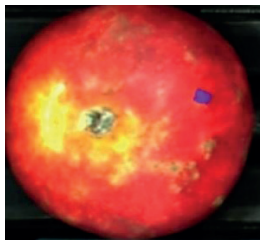




Таблица 1. Помологические особенности яблок

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

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.

Таблица 2. Дефекты яблок

Условное обозначение	Наименование	Фото	Условное обозначение	Наименование	Фото
<b>net</b>	Сетка		<b>point</b>	Парша	
<b>scratch</b>	Порез		<b>spotting</b>	Парша	

Условное обозначение	Наименование	Фото	Условное обозначение	Наименование	Фото
pressure	Нажим		wart	Парша	
hail	Градобоина		lumps	Парша	
rot	Гниль		scab	Парша	

Однако если для первого и второго сорта плодов в соответствии с требованиями к их качеству по СТБ 2288-2012<sup>1</sup> допускается некоторое повреждение, то даже небольшое загнивание плода приводит к его выбраковке (табл. 3). То есть 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.

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 <sup>2</sup>	2 см <sup>2</sup> –¼ поверхности
– «прокол», «порез», «нажим»	н/д*	до 2 см <sup>2</sup>	2–4 см <sup>2</sup>
Повреждения вредителями	н/д*	до 2 см <sup>2</sup>	2–4 см <sup>2</sup>
Повреждения болезнями:			
– «гниль»	н/д*		
– «сетка»	н/д*	до ¼ поверхности	допускается
– «парша»	н/д*	до 2 см <sup>2</sup>	2 см <sup>2</sup> –¼ поверхности

\* н/д – не допускается.

<sup>1</sup> Яблоки свежие поздних сроков созревания. Технические условия: СТБ 2288-2012. – Введ. 08.11.12. – Минск : Госстандарт, 2012. – 11 с.

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.

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 работе [18], 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:

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

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

$$IoU = \frac{pBB}{tBB},$$

где  $tBB$  – реальная площадь объекта;  $pBB$  – площадь объекта, предсказанная детектором.

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

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

Как видно из таблицы, наибольшие значения показателей метрик соответствуют дефектам «нажим», «гниль», «парша» в виде точек, а наименьшие – сетка, градобойна. Это объясняется меньшим объемом обучающей выборки именно этих дефектов яблок.

Значения метрики Ассигасу при определении сорта яблок обученной нейронной сетью приведены в табл. 5.

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

Сорт яблок	Accuracy
Высший	0.763
Первый	0.825
Второй	0.851
Бессортовой	0.864

Результаты определения дефектов яблок на представлены на рис.5.



Рис. 5. Результаты определения нейронной сетью дефектов яблок

*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» [19].

Она состоит из двух частей: приемной (рис. 6) и сортирующей (рис. 7).

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

Сортирующая часть линии (рис. 7) состоит из основного конвейера 1, конвейеров для выходной продукции 2 и 3, кареток 4, столов 5 и оптического сортировщика 6.

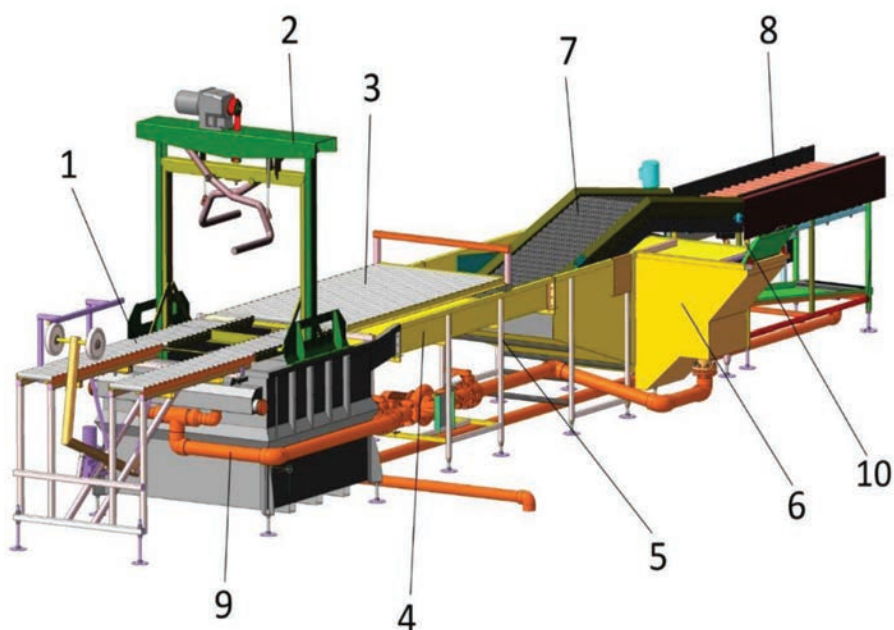


Рис. 6. Приемная часть линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4: 1 – транспортер приемный, 2 – модуль разгрузочный, 3 – ролинг, 4 – лоток, 5 – опора, 6 – ванна, 7 – горка, 8 – сушка, 9 – водовод, 10 – опора



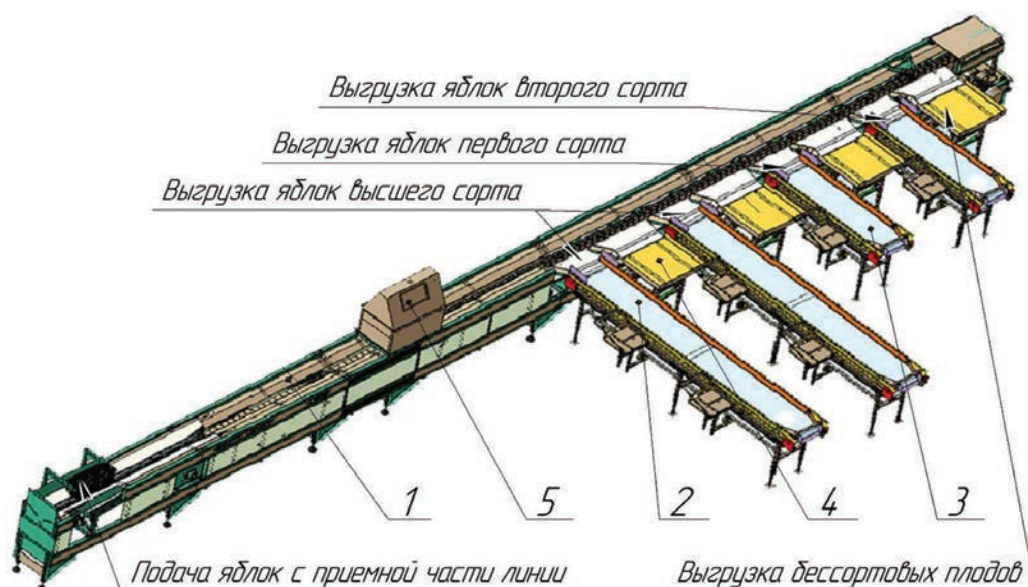


Рис. 7. Сортирующая часть линии ЛСП-4: 1 – основной конвейер, 2 и 3 – выходной транспортер, 4 – стол, 5 – система технического зрения

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 табл. 3.

Технические характеристики технологической линии приведены в табл. 6.

Таблица 6. Технические характеристики 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

Технологический процесс сортировки 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.

Бессортные плоды транспортируются по основному конвейеру до конца, где сбрасываются на стол устройством, обеспечивающим наклон всех транспортирующих кареток конвейера (рис. 6).

Приемочные испытания линии проведены в ОАО «Остромечево» Брестского района в 2020–2021 годах. По результатам приемочных испытаний линии ЛСП-4 получен положительный протокол от 25.02.2022 № 004-1/3-2022<sup>1</sup>.

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

<sup>1</sup> Протокол приемочных испытаний линии технологической сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 от 25.02.2022 № 004-1/3-2022 / ИЦ ГУ «Белорусская МИС». – п. Привольный, 2022. – 99 с.

Расчет экономических показателей выполнен по ТКП 151-2008 «Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей»<sup>1</sup> и показал, что годовой приведенный экономический эффект от применения линии ЛСП-4 в сравнении с импортным аналогом составляет 97142,50 руб. Республики Беларусь, срок окупаемости – 4,59 года, а в сравнении с ручным трудом – 64219,00 руб. Республики Беларусь 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 [20].

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, для повышения точности распознавания дефектов плодов необходимо увеличение обучающей выборки не менее чем в 2–3 раза.

### Выводы

1. Создана обучающая выборка искусственной нейронной сети системы технического зрения для распознавания различных дефектов яблок сортов «Имант», «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 позволяет повысить производительность труда при сортировке плодов в 3 раза по сравнению с ручным трудом.

**Благодарности:** 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.
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 Беларуси. Сер. аграр. наук. – 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 Беларуси / А. Н. Юрин. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 208 с.

<sup>1</sup> Сельскохозяйственная техника. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей : ТКП 151-2008 (02150). – Введ. 01.02.2009. – Минск : Минсельхозпрод Республики Беларусь, 2009. – 20 с.

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 : прЭВМ RU 2020660182 / Д. О. Хорт, А. И. Кутырёв, Р. А. Филиппов, Р. В. Вершинин, И. Г. Смирнов. – Оpubл. 28.08.2020.
11. Разработка навесной системы для управления пропашным культиватором в автоматическом режиме / В. В. Азаренко [и др.] // Вес. Нац. акад. наук 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 : БД RU 2021620285 / А. С. Дорохов, А. Г. Аксенов, Д. О. Хорт, А. И. Кутырёв, А. В. Тетерев, А. В. Сибирёв, М. Н. Московский, Р. А. Филиппов, С. В. Семичев, М. А. Мосяков. – Оpubл. 16.02.2021.
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]. – Режим доступа: <https://pypi.org/project/PyQt5>. – Дата доступа: 27.03.2021.
15. lxml – Processing XML and HTML with Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lxml.de>. – Дата доступа: 27.03.2021.
16. Tzutalin. Labellmg [Electronic resource] / Tzutalin. – Mode of access: <https://github.com/tzutalin/labellmg>. – 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. – 2016. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1611.10012.pdf>. – Date of access: 04.06.2019.
18. 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.
19. Снижение затрат труда применением системы технического зрения при сортировке яблок / А. Н. Юрин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомственный тематический сборник / Нац. акад. наук Беларусі, Науч.-практ. центр НАН Беларусі по механизации сельского хозяйства»; ред.: П. П. Казакевич [и др.] ; рец.: В. В. Азаренко [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2022. – Вып. 55. – С.88–95.
20. 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.