

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.4.672-684>

УДК 631.362



Разработка системы технического зрения технологической линии сортировки плодов яблони на основе искусственной нейронной сети

© 2023. П. П. Казакевич¹, Д. И. Комлач², А. Н. Юрин²✉

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь,

²РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», г. Минск, Республика Беларусь

В данной статье рассмотрен процесс создания обучающей выборки 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 цветоножка, плодоножка и лист, а также 10 различных дефектов плодов, каждому из которых присваивалось соответствующее название: сетка, нажим, порез, гниль, парша, градобойна и т. д. Полученные размеченные изображения плодов с дефектами сформировали эталонную обучающую выборку для ИНС. Проверку эффективности работы ИНС осуществляли путем оценки правильности распознавания изображений плодов при сравнении их с эталонными изображениями. Обучение ИНС каждому из дефектов яблок останавливали при достижении 95%-ной вероятности правильной оценки дефекта. ИНС, обученную на созданной выборке, использовали 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 %, по наличию дефектов – 73,1 %.

Ключевые слова: классификация, дефект, лист, плодоножка, чашелистик, парша, градобойна, нажим, гниль, распознавание

Благодарности: работа выполнена 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.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Казакевич П. П., Комлач Д. И., Юрин А. Н. Разработка системы технического зрения технологической линии сортировки плодов яблони на основе искусственной нейронной сети. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(4):672-684. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.4.672-684>

Поступила: 15.03.2023

Принята к публикации: 21.07.2023

Опубликована онлайн: 30.08.2023

Development of a vision system for a technological line for sorting apple fruits based on an artificial neural network

© 2023. Petr P. Kazakevich¹, Dmitry I. Komlach², Anton N. Yurin²✉

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus,

²Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization, Minsk, Republic of Belarus

This article describes the process of creating a training sample of an artificial neural network (hereinafter – ANN) of a vision system. Training the ANN 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, stalk 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 obtained 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. Training the ANN for each of the defects in apples was stopped when 95 % of the probability of 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 sorted 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, defect, leaf, stalk, sepal, scab, hailstone, pressure, rot, recognition

Acknowledgments: the work was carried out as part of task 5 "Develop and master the production of a technological line for sorting and packing apples" of the subprogram "Belselkhozmeckhanizatsiya-2025" of the state scientific and technical program "Innovative agro-industrial and food technologies" 2021-2025.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declared no conflict of interest.

For citation: Kazakevich P. P., Komlach D. I., Yurin A. N. Development of a vision system for a technological line for sorting apple fruits based on an artificial neural network. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(4):672-684. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.4.672-684>

Received: 15.03.2023

Accepted for publication: 21.07.2023

Published online: 30.08.2023

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 производительность¹ [3].

Наиболее подходящим для автоматизации способом идентификации качества плодов является метод оптического контроля с использованием систем технического зрения (СТЗ), поскольку он обеспечивает высокую точность оценки качества и соответствует условиям технологии [4, 5]. В этой связи создание технического средства с СТЗ, позволяющего определить качество поверхности плода без его повреждения, по аналогии как это делает человек, является важной агроинженерной задачей.

Цель исследования – повышение эффективности сортировки яблок посредством внедрения в производство системы технического

зрения с искусственной нейронной сетью для автоматизированной сортировки яблок по размеру и наличию дефектов.

Научная новизна – создан набор данных для глубокого обучения различных дефектов яблок и их сортировки на три товарных сорта.

Материал и методы. Предусмотрено проведение лабораторных опытов по распознаванию дефектов яблок и производственных испытаний изготовленной на основе исследований технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4. Для формирования обучающей выборки помологических особенностей и дефектов плодов использовали яблоки сортов Имант, Вербное и Глостер урожая 2020-2021 гг. производства ОАО «Остромечев», а также была создана лабораторная установка системы технического зрения.

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

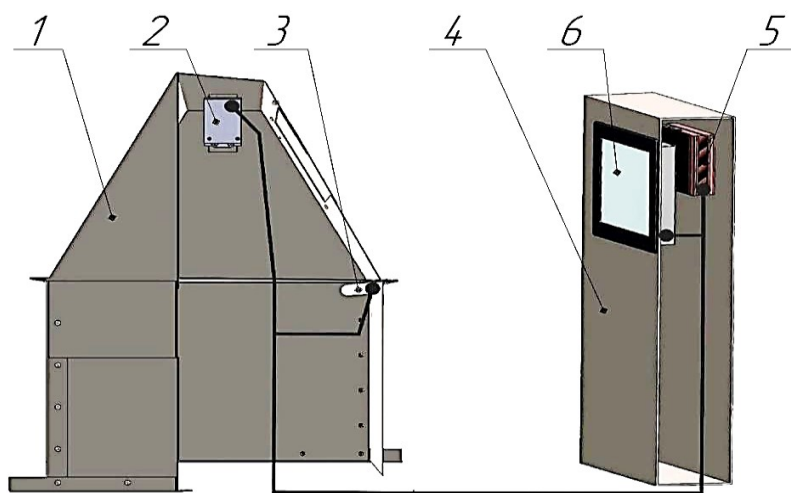


Рис. 1. Схема лабораторной установки системы технического зрения /

Fig. 1. Laboratory installation of a vision system

¹ImageNet. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.image-net.org> (дата обращения: 05.04.2018).

Применяли видеокамеру VCXU-32C фирмы Baumer с оптическим сенсором Sony Pregius CMOS площадью ПЗС-матрицы 1/1.8". Максимальное разрешение камеры составляет 2048x1536 пкс, скорость съёмки до 55 кадров/с. Видеокамера оснащена объективом AZURE-0818M3M с фокусным расстоянием $f = 8$ мм и диафрагмой F1.8.

В качестве вычислительного модуля использовали промышленный компьютер фирмы CINCOSE серии DS-1200, оснащенный процессором Intel® Core™ i7-8700 Hexa-Core с тактовой частотой до 4600 МГц, оперативной памятью DDR4 объёмом 16 ГБ и жёстким диском типа SSD объёмом 256 ГБ. На компьютере установлена операционная система Ubuntu (Linux). Управление вычислительным модулем осуществляли посредством сенсорного промышленного монитора CV-110H/M1001.

В качестве структурированной подсветки применяли светодиодные лампы, со светоди-

одами типа Smd 5050 (тепло-белого свечения), суммарной мощностью 160 Вт.

Для выделения дефектов яблок использовали программу LabelMe, установленную на персональных компьютерах лаборатории с операционной системой Windows 8.1 с пакетами PyQt5² и lxml³.

Результаты и их обсуждение. Любое устройство для сортировки плодов выполняет процессы подачи плодов, их классификации и разделения [6]. В зависимости от целей сортировки, вида продукции и требований к её выходной части, каждый из этих процессов может иметь свои особенности. Так, подачу плодов можно разделить на подпроцессы – формирование потока и транспортирование; классификацию – обнаружение признаков, распознавание структуры и принятие решений; процесс разделения – взвод исполнительного механизма, удар и движение объекта после него (рис. 2).



Рис. 2. Функциональная схема системы сортировки плодов по качеству /
Fig. 2. Functional diagram of the system for sorting fruits by quality

В данной схеме формирование потока и транспортирование являются подготовительными процессами, а подпроцессы механичес-

кого разделения – заключительными. Разделение же плодов на сорта осуществляется в процессе их классификации.

²PyQt5 PyPI. [Электронный ресурс]. URL: <https://pypi.org/project/PyQt5> (дата обращения: 27.03.2021).

³lxml – Processing XML and HTML with Python. [Электронный ресурс]. URL: <https://lxml.de> (дата обращения: 27.03.2021).

В настоящее время актуальным является разделение плодов не только по размеру, но и по наличию дефектов, как это делает человек [7, 8]. 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 функционирование ее положен принцип распознавания изображения плодов, которые система сравнивает с запрограммированными в памяти ИНС эталонными образцами, получившими название «обучающая выборка» [9, 10].

Обоснование процесса обучения искусственной нейронной сети глубокого обучения. Способность моделей глубокого обучения автоматически выделять признаки для классификации образов требует большого объема 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 показала, что наилучшие результаты дает метод обучения на основе реальных моделей. Поэтому обучение ИНС проводили с использованием этого метода [11, 12].

Разметка изображений для создания обучающей выборки ИНС. Обучающая выборка ИНС на основе реальных моделей формировалась поэтапно. Во-первых, было снято реальное видео движения яблок по конвейеру. Для фотографирования яблок со всех сторон, движущихся по конвейеру, 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 осуществлялась разметка реальных изображений целых и поврежденных яблок. Для разметки изображений использовали приложение для обработки LabelMe (рис. 4)⁴ [13].

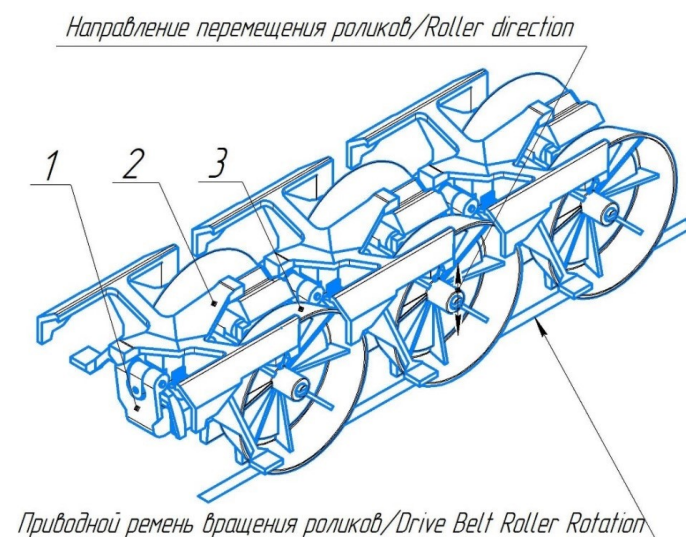


Рис. 3. Индивидуальные каретки для яблок конвейера /

Fig. 3. Separate carriages for moving apples on the conveyor

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.

⁴Tzutalin. LabelImg. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/tzutalin/labelImg> (дата обращения: 18.06.2018).

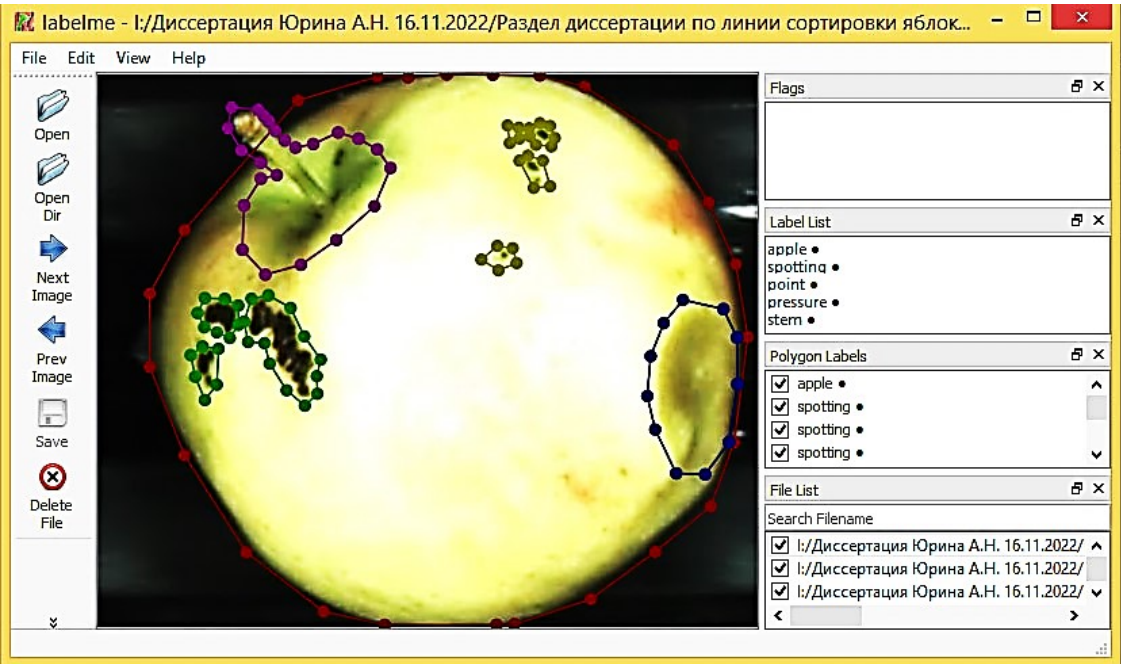
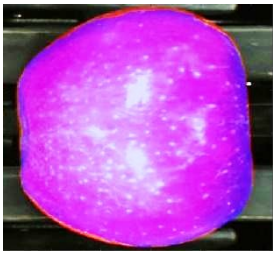
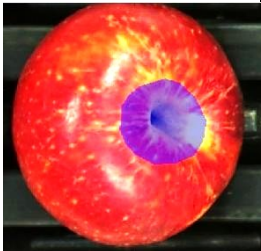
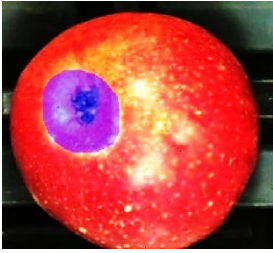





Рис. 4. Графическое окно приложения LabelMe [6] /
Fig. 4. Graphic window of the LabelMe application [6]

Таблица 1 – Помологические особенности яблок /
Table 1– Pomological features of apples



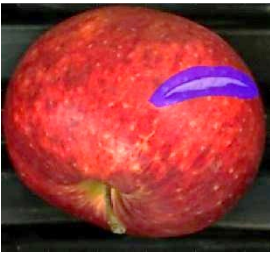





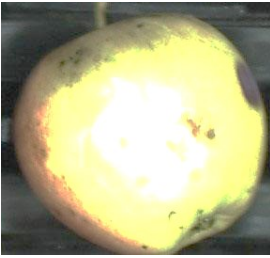

Условное обозначение / Symbol	Наименование / Name	Фото / Photo	Условное обозначение / Symbol	Наименование / Name	Фото / Photo
Apple	Яблоко / Apple		Funnel	«Воронка» плодоножки без плодоножки / "Funnel" of a peduncle without a peduncle	
Sepal	Цветоложе / Receptacle		Leg	Плодоножка без «воронки» (не видна) / Peduncle without funnel (not visible)	
Stam	«Воронка» плодоножки с плодоножкой / "Funnel" of the peduncle with the peduncle		Leaf	Лист / Leaf	

Для обучения ИНС использовали 10 различных дефектов плодов, каждому из которых присваивалось соответствующее название: сетка, нажим, порез, гниль, парша, градобойна (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 2 – Дефекты яблок /

Table 2 – Defects in apples

Условное обозначение / Symbol	Наименование / Name	Фото / Photo	Условное обозначение / Symbol	Наименование / Name	Фото / Photo
Net	Сетка / Net		Point	Парша / Scab	
Scratch	Порез, царапина / Cut, scratch		Spotting	Парша / Scab	
Pressure	Нажим / Pressure		Wart	Парша / Scab	
Hail	Градобойна / Hailstones		Lumps	Парша / Scab	
Rot	Гниль / Rot		Scab	Парша / Scab	

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 2288-2012⁵ 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.

Таблица 3 – Показатели качества выполнения технологического процесса сортировки яблок / Table 3 – Quality indicators of the technological process of sorting apples

Наименование показателя / Name indicator	Характеристика и требования для сорта / Characteristics and requirements for the variety		
	высшего / higher	первого / first	второго / second
Наибольший размер плода, мм / The largest fruit size, mm	70-65	65-60	60-55
<i>Механические повреждения / Mechanical damage:</i>			
- «градобойна» / "hailstone"	Не допускается / Not allowed	До 2 см ² / Up to 2 cm ²	2 см ² – ¼ поверхности / 2 cm ² – ¼ surface
- «прокол», «порез», «нажим» / "puncture", "cut", "pressure"			2-4 см ² / 2-4 cm ²
<i>Повреждения вредителями / Pest damage</i>	Не допускается / Not allowed	До 2 см ² / Up to 2 cm ²	2-4 см ² / 2-4 cm ²
<i>Повреждения болезнями / Disease damage:</i>			
- «гниль» / "rot"	Не допускается / Not allowed		
- «сетка» / "net"	Не допускается / Not allowed	До ¼ поверхности / Up to ¼ surface.	Допускается / Allowed
- «парша» / "scab"		До 2 см ² / Up to 2 cm ²	2 см ² – ¼ поверхности / 2 cm ² – ¼ surface

На третьем этапе после формирования обучающей выборки осуществляли 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, scratch – 493, pressure – 2095, rot – 591, point – 2814, spotting – 426, wart – 355, lumps – 423, scab – 494, hail – 600, apple – 3600, sepal – 931, stam – 765, funnel – 530, leg – 427, leaf – 331.

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

Для задачи распознавания дефектов на изображениях яблок использовали детекторы, которые способны указать местоположение дефекта на изображении и его класс. Анализ работы детекторов, проведенный в работе [14], показал, что подходящей для выполняемой работы является сегментационная сеть Iraspp mobilenetV3 из пакета mmseg-mentation PyTorch. Функция потерь CrossEntropyLoss, optimizer Adam (learning rate 0.01).

Для каждого дефекта 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).

⁵СТБ 2288-2012. Яблоки свежие поздних сроков созревания. Технические условия. Минск: Госстандарт, 2012. 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293724/4293724338.pdf>

Для оценки качества работы детектора использовали метрики Intersection over Union (IoU) и Accuracy [6, 13, 14].

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

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

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

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

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 данных таблицы 4, 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.

Таблица 4 – Значение метрик IoU и Accuracy для различных дефектов яблок / Table 4 – Significance of metrics IoU and Accuracy for various defects in apples

Класс / Class	IoU	Accuracy
Яблоко / Apple	0,981	0,975
Фон / Background	0,932	0,967
Парша / «Point»	0,857	0,874
Нажим / «Pressure»	0,744	0,858
Градобойна / «Hail»	0,691	0,785
Гниль / «Rot»	0,798	0,764
Порез, царапина / «Scratch»	0,774	0,741
Парша / «Scab»	0,815	0,772
Парша / «Spotting»	0,753	0,734
Парша / «Lumps»	0,716	0,758
Сетка / «Net»	0,759	0,682
Парша / «Wart»	0,703	0,697
Среднее значение / Average value	0,793	0,800

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

Результаты определения дефектов яблок представлены на рисунке 5.

Таблица 5 – Значения метрики Accuracy при определении сорта яблок обученной нейронной сетью / Table 5 – Values of the metric Accuracy when determining the variety of apples by the trained neural network

Сорт яблок / Apple variety	Accuracy
Высший / Higher	0,763
Первый / First	0,825
Второй / Second	0,851
Бессортной / Without varietal	0,864

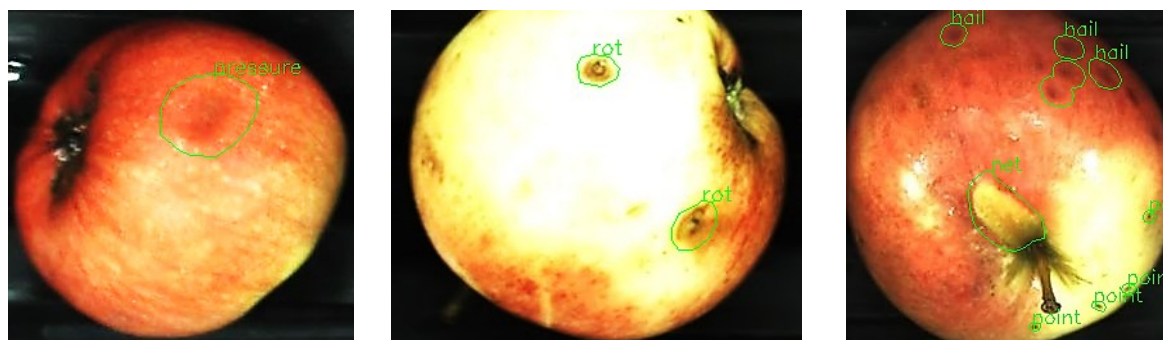


Рис. 5. Результаты определения нейронной сетью дефектов яблок / Fig. 5. Results of determining apple defects by a neural network /

Реализация результатов исследований.
Созданная обучающая выборка использована в системе технического зрения технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4,

разработанной в РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» [15], состоящая из двух частей: приемной (рис. 6) и сортирующей (рис. 7).

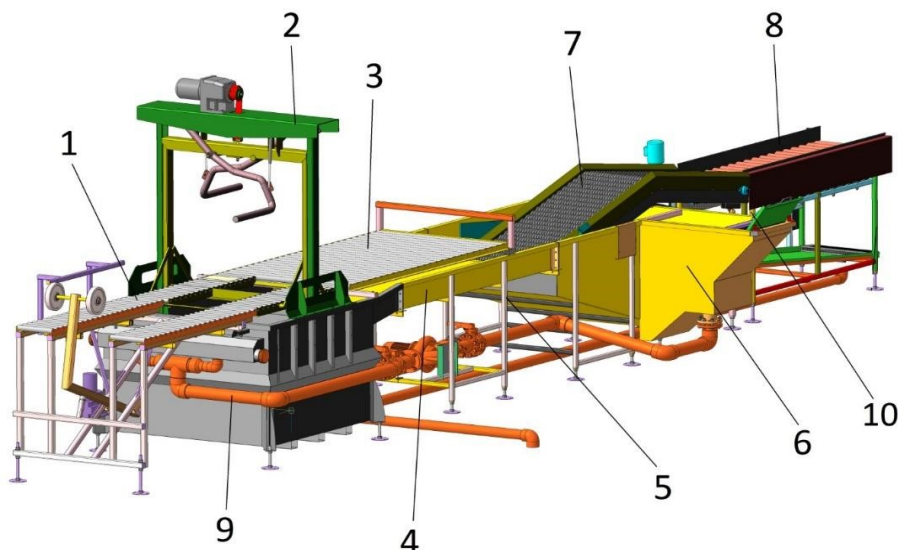


Рис. 6. Приемная часть линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4: 1 – транспортер приемный; 2 – модуль разгрузочный; 3 – ролинг; 4 – лоток; 5 – опора; 6 – ванна; 7 – горка; 8 – сушка; 9 – водовод; 10 – опора/

Fig. 6. Line for technological sorting and packaging of apples LSP-4 (receiving part): 1 – receiving conveyor; 2 – unloading module; 3 – rolling; 4 – tray; 5 – support; 6 – bath; 7 – slide; 8 – drying; 9 – conduit; 10 – support

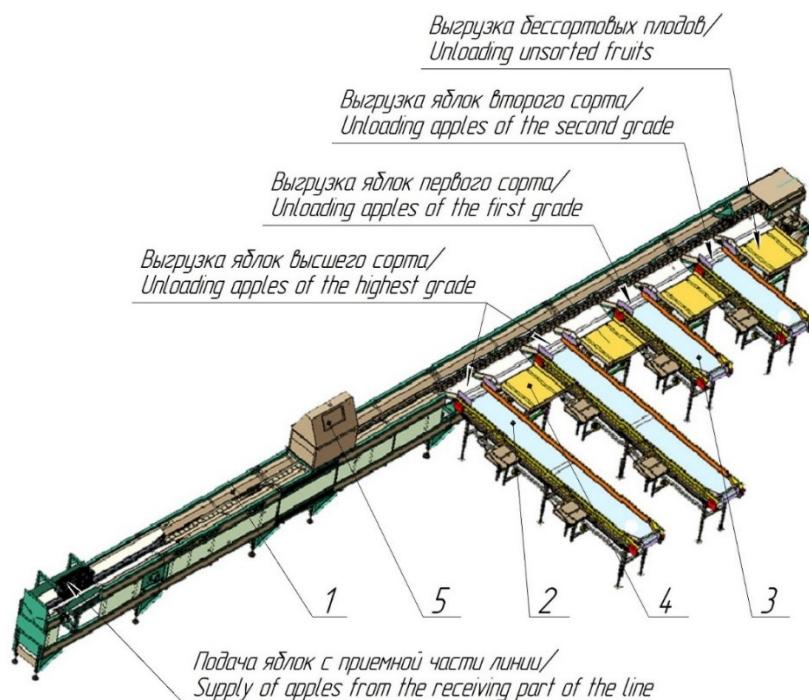


Рис. 7. Сортирующая часть линии ЛСП-4: 1 – основной конвейер; 2 и 3 – выходной транспортер; 4 – стол; 5 – система технического зрения /

Fig. 7. Sorting part of the LSP-4 line: 1 – main conveyor; 2 and 3 – output conveyor; 4 – table; 5 – system of technical vision

Рабочим органом, осуществляющим непосредственную сортировку плодов, является система технического зрения, состоящая из оптического модуля с видеокамерой и структурной подсветкой 1 и электронного блока управления 2 (рис. 8).

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

Техническая характеристика технологической линии приведена в таблице 6.



Рис. 8. Система технического зрения линии сортировки ЛСП-4: 1 – оптический модуль с видеокамерой и структурной подсветкой; 2 – электронный блок управления /

Fig. 8. Vision system sorting line LSP-4: 1 – optical module with a video camera and structural illumination; 2 – electronic control unit

Таблица 6 – Техническая характеристика линии ЛСП-4 /

Table 6 – Technical characteristics of the line LSP-4

<i>Наименование показателя / Name of indicator</i>	<i>Значение / Meaning</i>
Количество отводящих конвейеров, шт. / Number of outfeed conveyors, pcs.	4
Скорость транспортирования плодов на основном конвейере, м/с / Fruit transportation speed on the main conveyor, m/s	0,10-0,78
Производительность за час основного времени, т* / Productivity per hour of main time, t	1,7-2,5
Параметры, по которым осуществляется сортировка / Parameters by which sorting is carried out	Размер, механические повреждения, повреждения от вредителей / Size, mechanical damage, pest damage
Обслуживающий персонал, чел. / Service personnel, pers.	8

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

* depends on the physical and structural-mechanical properties of the fruits fed to the line

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.

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

Приемочные испытания линии ЛСП-4 проведены в ОАО «Остромечово» Брестского района в 2020-2021 годах, по результатам которых получен положительный протокол от 25 февраля 2022 года № 004-1/3-2022⁶.

⁶Протокол приемочных испытаний линии технологической сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 от 25 февраля 2022 г. № 004-1/3-2022. ИЦ ГУ «Белорусская МИС». п. Пивольный, 2022. 99 с.

Экономические показатели использования линии ЛСП-4 сравнивали 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»⁷ и показал, что годовой приведенный экономический эффект от её применения 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. 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 плодов⁸.

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 соста-

вила 75,4 %, а точность сортирования по размеру и наличию дефектов – 73,1 %. Наибольшая точность распознавания обеспечивается при определении дефектов «pressure» и «point» (83 и 85 % соответственно), а наименьшая – для «net» и «wart» (73 и 72 % соответственно). Очевидно, для повышения точности распознавания дефектов плодов необходимо увеличение обучающей выборки не менее чем в 2-3 раза.

Выводы. 1. Создан набор данных для глубокого обучения искусственной нейронной сети системы технического зрения для распознавания различных дефектов яблок и их сортировки на три товарных сорта.

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 обеспечить производительность труда при сортировке плодов в 3 раза по сравнению с ручным трудом.

Список литературы

1. Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Кутырев А. И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;15(4):35-41. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41> EDN: NDDMCH
2. Балабанов П. В., Дивин А. Г., Мищенко С. В., Макарова В. С., Марков А. В., Садомов Я. О. Роботизированный комплекс для сортировки яблок. Цифровизация агропромышленного комплекса: сб. научн. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. Т. II. С. 44-47. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45032750&pff=1> EDN: JHNDCH
3. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Z. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. Cornell University Library. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016. pp. 2818-2826. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>
4. Yuzhen Lu, Renfu Lu. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples. Transactions of the ASABE. 2017;60(4):1379-1389. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.12158>
5. Казакевич П. П., Юрин А. Н., Прокопович Г. А. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание. Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2021;59(4):488-500. DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500> EDN: WGJHOD
6. Юрин А. Н. Инновационные технологические процессы и технические комплексы для интенсивного садоводства Беларуси. Минск: Беларуская навука, 2022. 208 с.

⁷ТКП 151-2008 «Сельскохозяйственная техника. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей». ГУ "Белорусская МИС", 20 с. URL: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/219950/317397>

⁸Гусаков В. Г., Самусь В. А., Аутко А. А., Бельский А. И., Расторгуев П. В. Организационно-технологические нормы возделывания овощных, плодовых, ягодных культур и выращивания посевного материала: сборник отраслевых регламентов. НАН Беларуси, РУНП «Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси». Минск: Беларуская навука, 2010. 520 с.

7. Хорт Д. О., Кутырев А. И., Смирнов И. Г., Филиппов Р. А., Вершинин Р. В. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020;67(1(38)):133-141. DOI: <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141> EDN: BYNXCB
8. Жиркова А. А., Балабанов П. В., Дивин А. Г. Автоматизированная система гиперспектрального контроля дефектов яблок. *Современная наука: теория, методология, практика: мат-лы III Всеросс. (национ.) науч.-практ. конф.* Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А. В., 2021. С. 291-296.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45831350&selid=46177515> EDN: YXUHYM
9. Хорт Д. О., Кутырёв А. И., Филиппов Р. А., Вершинин Р. В., Смирнов И. Г. Нейронная сеть для распознавания плодов и ягод садовых культур: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020660182 Российская Федерация. № 2020619124: заяв. 14.08.2020; опублик. 28.08.2020.
10. Азаренко В. В., Комлач Д. И., Голдыбан В. В., Барановский И. А., Прокопович Г. А. Разработка навесной системы для управления пропашным культиватором в автоматическом режиме. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя аграрных навук*. 2021;59(2):232-242.
DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242> EDN: CYVPGM
11. Дорохов А. С., Аксенов А. Г., Хорт Д. О., Кутырёв А. И., Тетерев А. В., Сибирёв А. В., Московский М. Н., Филиппов Р. А., Семичев С. В., Мосяков М. А. База данных спектральных изображений болезней и повреждений злаковых культур, плодов и клубней картофеля: свидетельство о регистрации базы данных № 2021620285 Российская Федерация. № 2021620155: заяв. 08.02.2021; опублик. 16.02.2021.
12. Kortylewski A., Schneider A., Gerig T., Egger B., Morel-Forster A., Vetter T. Training deep face recognition systems with synthetic data. Cornell University Library. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf>
13. Huang J., Rathod V., Sun Ch., Zhu M., Korattikara A., Fathi A., Fischer I., Wojna Z., Song Ya., Guadarrama S., Murphy K. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. Cornell University Library. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1611.10012.pdf>
14. Ganganagowdar N. V., Gundad A. V. An intelligent computer vision system for vegetables and fruits quality inspection using soft computing techniques. *Agricultural Engineering International*. 2019;21(3):171-178.
URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5188>
15. Юрин А. Н., Викторovich В. В., Игнатчик А. А. Снижение затрат труда применением системы технического зрения при сортировке яблок. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2022;(55):88-95.
Режим доступа: <https://mechel.belab.by/jour/article/view/707/712>

References

1. Smirnov I. G., Khort D. O., Kutyrev A. I. Intelligent Technologies and Robotic Machines for Garden Crops Cultivation. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):35-41. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41>
2. Balabanov P. V., Divin A. G., Mishchenko S. V., Makarova V. S., Markov A. V., Sodomov Ya. O. Robotic complex for sorting apples. Digitalization of the agro-industrial complex: collection of scientific articles of the II International Scientific and Practical Conference. Tambov: *Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet*, 2020. Vol. II. pp. 44-47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45032750&pff=1>
3. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Z. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. Cornell University Library. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016. pp. 2818-2826. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>
4. Yuzhen Lu, Renfu Lu. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples. *Transactions of the ASABE*. 2017;60(4):1379-1389.
DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.12158>
5. Kazakevich P. P., Yurin A. N., Prokopovich G. A. Technical vision system for apple defects recognition: justification, development, testing. *Vestsi Natsyynal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*. 2021;59(4):488-500. (In Belarus). DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>
6. Yurin A. N. Innovative technological processes and technical complexes for intensive horticulture in Belarus. Minsk: *Belaruskaya navuka*, 2022. 208 p.
7. Khort D. O., Kutyrev A. I., Smirnov I. G., Filippov R. A., Vershinin R. V. Developing algorithms for a berry recognition system used in robotized harvesting of garden strawberry. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020;67(1(38)):133-141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141>
8. Zhirkova A. A., Balabanov P. V., Divin A. G. Automated System for Hyperspectral Inspection of Apple Defects. Modern science: theory, methodology, practice: Proceedings of the 3rd All-Russian (national) scientific and practical. conf. Tambov: *Izdatel'stvo IP Chesnokova A. V.*, 2021. pp. 291-296.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45831350&selid=46177515>

9. Khort D. O., Kuttyrev A. I., Filippov R. A., Vershinin R. V., Smirnov I. G. Neural network for recognition of fruits and berries of horticultural crops: certificate of registration of a computer program no. 2020660182 RF. 2020.

10. Azarenko V. V., Komlach D. I., Goldyban V. V., Baranovskiy I. A., Prokopovich G. A. Development of mounted system for controlling row crop cultivator in automatic mode. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series. 2021;59(2):232-242. (In Belarus). DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242>

11. Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Khort D. O., Kuttyrev A. I., Teterev A. V., Sibirev A. V., Moskovskiy M. N., Filippov R. A., Semichev S. V., Mosyakov M. A. Database of spectral images of diseases and injuries of cereal crops, fruits and tubers of potatoes: certificate of registration of the database no. 2021620285 RF. 2021.

12. Kortylewski A., Schneider A., Gerig T., Egger B., Morel-Forster A., Vetter T. Training deep face recognition systems with synthetic data. Cornell University Library. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf>

13. Huang J., Rathod V., Sun Ch., Zhu M., Korattikara A., Fathi A., Fischer I., Wojna Z., Song Ya., Guadarrama S., Murphy K. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. Cornell University Library. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1611.10012.pdf>

14. Ganganagowdar N. V., Gundad A. V. An intelligent computer vision system for vegetables and fruits quality inspection using soft computing techniques. *Agricultural Engineering International*. 2019;21(3):171-178. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5188>

15. Yurin A. N., Viktorovich V. V., Ignatchik A. A. Reducing labor costs by using the vision system when sorting apples. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2022;(55):88-95. (In Russ.). URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/707/712>

Сведения об авторах

Казакевич Петр Петрович, доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси, пр. Независимости, д. 66, г. Минск, Республика Беларусь, 220072, e-mail: oan2011@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9102-2816>

Комлач Дмитрий Иванович, кандидат техн. наук, доцент, генеральный директор РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, д. 1, г. Минск, Республика Беларусь, 220049, e-mail: info@belagromech.by, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2099-8975>

✉ **Юрин Антон Николаевич**, кандидат техн. наук, доцент, заведующий лабораторией РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, д. 1, г. Минск, Республика Беларусь, 220049, e-mail: info@belagromech.by, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9348-8110>, e-mail: anton-jurin@rambler.ru

Information about the authors

Petr P. Kazakevich, DSc in Engineering, professor, Corresponding Member, Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, 66 Nezalezhnosti Ave., Minsk, Republic of Belarus, 220072, e-mail: oan2011@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9102-2816>

Dmitry I. Komlach, PhD in Engineering, Associate Professor. General Director of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization, st. Knorina, 1, Minsk, Republic of Belarus, 220049, e-mail: info@belagromech.by, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2099-8975>

✉ **Anton N. Yurin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization, st. Knorina, 1, Minsk, Republic of Belarus, 220049, e-mail: info@belagromech.by, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9348-8110>, e-mail: anton-jurin@rambler.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author