

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 631.316.4-52

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242>

Поступила в редакцию 03.03.2021

Received 03.03.2021

В. В. Азаренко¹, Д. И. Комлач², В. В. Голдыбан², И. А. Барановский², Г. А. Прокопович³

¹*Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Беларусь*

³*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**РАЗРАБОТКА НАВЕСНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОПАШНЫМ
КУЛЬТИВАТОРОМ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

Аннотация: Автоматизация удаления сорняков представляется очень перспективной технологией исходя из огромных усовершенствований в сфере компьютерной обработки, машинного зрения и робототехники. Системы машинного зрения базируются на разнице в цвете между культурными растениями в рядке и почвы. В статье приводится описание навесной системы для ориентации пропашного культиватора по рядкам и его смещение относительно трактора с помощью систем технического зрения и автоматического управления. Разработанная система технического зрения способна на основе использования технологии искусственных нейронных сетей глубокого обучения четко определять листья сахарной свеклы, а специально разработанный алгоритм выявления центра междурядья направлять подвижную часть культиватора в требуемую сторону для нивелирования неточности хода трактора. Применение управляемого навесного устройства с трактором и орудием на основе систем технического зрения точность выполнения технологических операций по уходу за пропашными культурами, повысит технический уровень машинотракторного агрегата, снизит трудозатраты. Использование систем технического зрения и автоматического управления культиватором позволит повысить качество междурядных обработок пропашных культур и уменьшит пестицидную нагрузку на окружающую среду. Результаты настоящих исследований могут быть использованы при создании машин для возделывания сельскохозяйственных культур с автоматизированной системой управления. **Благодарности.** Работа выполнена в рамках ГПНИ «Качество и эффективность агропромышленного производства» на 2016–2020 годы, подпрограмма «Механизация и автоматизация процессов в АПК».

Ключевые слова: междурядная обработка, машинное зрение, точное вождение, система распознавания, система управления, планирование траектории, защитная зона, сахарная свекла, пропашной культиватор, трактор, пропашные культуры, навигационная система, автоматизированная система управления, сорняки

Для цитирования: 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 // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2021. – Т. 59, №2. – С. 232–242. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242>

Vladimir V. Azarenko¹, Dmitry I. Komlach², Victor V. Goldyban², Ivan A. Baranovsky², Gregory A. Prokopovich³

¹*Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Belarus*

³*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**DEVELOPMENT OF MOUNTED SYSTEM FOR CONTROLLING ROW CROP CULTIVATOR
IN AUTOMATIC MODE**

Abstract: Weed control automation appears to be a very promising technology based on the tremendous advances in computer processing, machine vision and robotics. Machine vision systems are based on size differences between crops and weeds and on the regular structure of crop rows, allowing the system to recognize crop plants and control surrounding weeds. The paper provides description of the mounted system for orienting the row cultivator in rows and its

displacement relative to the tractor using vision systems and automatic control. The developed technical vision system is capable of clearly identifying sugar beet leaves based on the deep learning artificial neural networks technology, and a specially developed algorithm for identifying the center of the row spacing to control the moving part of the cultivator in the required direction to level the inaccuracy of the tractor. The use of controlled mounted device with a tractor and an implement based on vision systems, the accuracy of technological operations for the row crops care, will increase the technical level of the machine and tractor unit, and reduce labor costs. Technical vision systems and automatic control of the cultivator will improve the quality of inter-row cultivation of row crops and reduce the pesticide load on the environment. The results of these studies can be used to create machines for cultivation of agricultural crops with an automated control system. **Acknowledgments.** The research was carried out within the framework of the State Scientific Research Program “Quality and Efficiency of Agroindustrial Production” for 2016-2020, subprogram “Mechanization and Automation of Processes in the Agroindustrial Complex”.

Keywords: inter-row cultivation, machine vision, precision driving, recognition system, control system, trajectory planning, protection zone, sugar beet, row cultivator, tractor, row crops, navigation system, automated control system, weeds

For citation: Azarenko V. V., Komlach D. I., Goldyban V. V., Baranovsky 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, vol. 59, no 2, pp. 232-242 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-2-232-242>

Введение. Проблема засоренности культурных посевов сорняками является общепризнанной [1, 2]. Засоренность культурных посевов сорняками приводит к значительным потерям урожая, особенно в органическом производстве овощей, где культурные растения всегда характеризуются низкой конкурентоспособностью с сорняками, которые хорошо приспособлены к прохладным весенним температурам, быстрее образуют мощную, продуктивную наземную и подземную массу и подавляют посевы культурных растений путем выноса влаги и питательных веществ [3]. Физическая борьба с сорняками является самой распространенной и использует механические средства, применяемые для обработки почвы [4].

За период вегетации пропашных культур рекомендуется проводить не менее 2–4 междурядных обработок. Кроме борьбы с сорной растительностью при культивации междурядий почва быстрее прогревается, усиливается газообмен между почвой и воздухом, активизируется мобилизация питательных веществ, снижаются капиллярные потери влаги и улучшается инфильтрация воды в почву. Это способствует интенсивному развитию формирующейся в это время корневой системы.

При механизированной обработке междурядий культурные растения могут повреждаться рабочими органами культиватора [5–7]¹. Во избежание этого рабочие органы размещают на требуемом расстоянии от рядка культурных растений. Поэтому после прохода культиватора с обеих сторон рядка оставляется необработанная полоска – защитная зона. В разные периоды обработки междурядий защитные зоны составляют 28–43 % от общей площади междурядий [8, 9]. Именно такая площадь остается необработанной, что ведет к резкому снижению урожайности из-за сорняков, расположенных в защитной зоне растений. Группа исследователей поставила цель повысить урожайность и снизить потребность в рабочей силе для прополки, которая часто является основным компонентом стоимости для производителей органических овощей. Цель была достигнута в соответствии с увеличением урожайности укропа и чеснока примерно на 20 и 40 %, в то время как для моркови значительных различий не наблюдалось [10].

Основным препятствием в уменьшении защитных зон является неустойчивость движения рабочих органов культиватора в почве. Работа тракториста при междурядных обработках, как правило, сопряжена с чрезмерно большими психофизическими нагрузками, ему приходится совершать в течение часа от 800 до 1000 поворотов рулевого колеса. В этих условиях частое запаздывание реакции механизатора составляет в среднем не менее 0,25 с. За это время машина при скорости 9–10 км/ч, имея значительную угловую ошибку, отклонится от требуемого направления на 50–100 мм. Все это способствует большому отклонению рабочих органов культиватора от линии защитной зоны. Из-за этого величина защитной зоны по одну сторону от рядка составляет не менее 10 см, а рабочие скорости ряда пропашных культиваторов не превышают 6 км/ч, в то время как по своим техническим параметрам эти машины могут работать при

¹ Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. Минск, 2020. 179 с.

скоростях 10 км/ч и выше. Снижение рабочих скоростей при междурядной обработке как одной из наиболее малоэнергоёмких сельскохозяйственных операций влечет за собой снижение производительности машинно-тракторного агрегата (МТА).

Для увеличения обрабатываемой площади в междурядьях и уменьшения защитной зоны в 1,5–2 раза по сравнению с оставляемыми в настоящее время необходимо повысить точность и стабильность ориентации культиватора в междурядьях в период ухода за посадками [11, 12]². Поэтому основной задачей обеспечения требуемой точности движения культиватора в междурядьях пропашных культур на оптимальной рабочей скорости является ориентация пропашного культиватора по рядкам и его смещение относительно трактора с помощью автоматизированной системы управления. Значительное количество исследований и публикаций посвящена роботизированным технологиям использования культиваторов и борьбы с сорняками [13–19]³.

Группа специалистов американских университетов считает, что автоматизация удаления сорняков представляется очень перспективной технологии, исходя из огромных усовершенствований в сфере компьютерной обработки, машинного зрения и робототехники [16]. Экономические и нормативные ограничения на развитие гербицидов гораздо больше, чем для технологии интеллектуального удаления сорняков. Компании, разрабатывающие интеллектуальные технологии удаления сорняков, сравнительно небольшие по сравнению с традиционными пестицидными компаниями и менее ограничены наследственными проблемами. Системы машинного зрения базируются на разнице в цвете между культурными растениями в рядке и почвы, что позволяет системе распознавать сельскохозяйственные растения и контролировать окружающие сорняки.

Исследователи университета Hohenheim Stuttgart (Germany) в 2013–2014 гг. изучали преимущества новых сенсорных технологий для распознавания посевов культурных растений и сорняков, чтобы ориентировать культиватор точно вдоль ряда, по сравнению с обычной механической борьбой с сорняками [12].

Цель настоящей работы – разработка навесной системы для ориентации пропашного культиватора по рядкам и его смещение относительно трактора с помощью систем технического зрения и автоматического управления.

Теоретическая часть. С целью повышения качества междурядной обработки лабораторией механизации производства овощей и корнеклубнеплодов Научно-практического центра НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства совместно с Объединенным институтом проблем информатики Национальной академии наук Беларуси выполнялась разработка и изготовление автоматической управляемой навесной системы (АУНС) для отслеживания защитной зоны культурных растений при междурядной обработке сахарной свеклы (рис. 1).

АУНС состоит из механической части и аппаратно-программного обеспечения. Механическая часть представляет собой рамную конструкцию с верхней и нижней направляющими, по которым перемещается подвижная рамка с навешиваемым на нее культиватором.

² Применение направляющих щелей при возделывании сахарной свеклы для управления культиватором: методические рекомендации / В. С. Глуховский [и др.]. Чернигов: Десна, 1987. 19 с.; Рабочий орган для нарезки щелей в почве : пат. SU 1396975 / В. С. Глуховский, В. И. Ветохин, В. Н. Данченко, Ю. С. Мухин, К. К. Бернасовский, Г. В. Чернявский. – Оpubл. 23.05.1988; Якименко К. Н. Совершенствование способа и рабочих органов для коррекции направления движения пропашных агрегатов вдоль рядков сахарной свеклы на уходе за посевами: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Киев, 1990. 217 л.; Traffic system, especially public local passenger traffic system: pat. US 4069888 / G. Wolters, P. Striffler. Publ. date 24.01.1978; Positioning system particularly useful for positioning agricultural implements: pat. US 4835691 / A. Rotem, E. Silberg, S. Israeli. Publ. date 30.05.1989.

³ Robotic cultivator : pat. US 5442552 / D. C. Slaughter, R. G. Curley, P. Chen, D. K. Giles. Publ. date 15.08.1995; Универсальная прополочная техника: Chopstar, Rollstar, Hillstar, Row-Guard, Jumbo [Электронный ресурс] / Einböck. Режим доступа: https://www.einboeck.at/uploads/downloads/190123-CHOPSTAR-RU_04.pdf. Дата доступа: 05.07.2020; Camera steering system ROW-GUARD [Electronic resource] // Einböck. Mode of access: <https://www.einboeck.at/en/products/crop-care/camera-steering-system/row-guard>. Date of access: 05.07.2020; Robotic intra-row weed hoeing in maize and sugar beet / R. Gerhards [et al.] // Julius-Kühn-Archiv. 2016. № 452. P. 462–463.

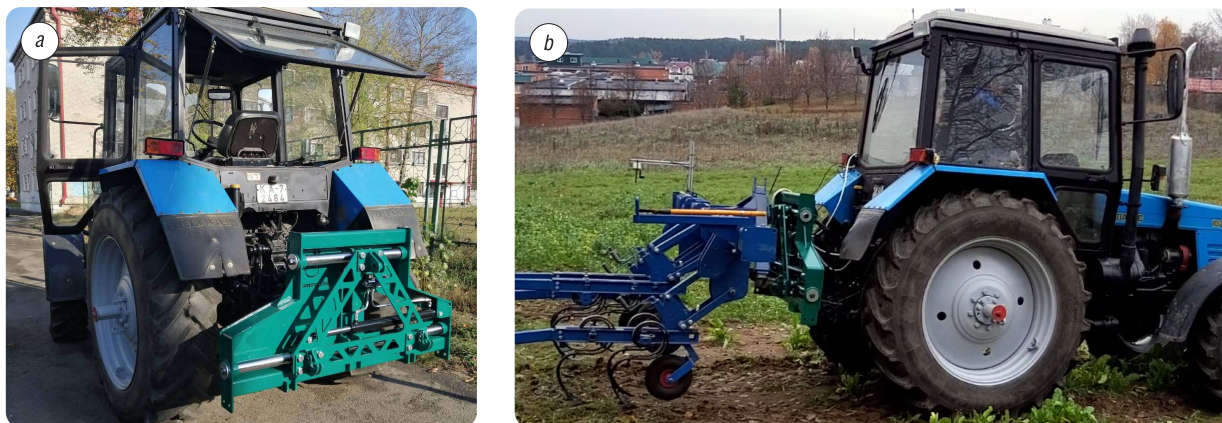


Рис. 1. Автоматическая управляемая навесная система: *a* – исполнительный механизм АУНС; *b* – исполнительный механизм АУНС в агрегате с пропашным культиватором. Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2020 г.

Fig. 1. Automatic controlled mounted system: *a* - executive mechanism AUNS; *b* - executive mechanism AUNS in the unit with till cultivator. Research and Production Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, 2020

Перемещение подвижной рамки вправо или влево осуществляется гидроцилиндром посредством электромагнитного распределителя. Основные характеристики АУНС представлены в табл. 1.

В основу работы системы автоматического управления пропашным культиватором положена концепция использования визуальной информации о положении растений в рядке, полученной с видеокamеры. Вычислительный модуль на основании полученной видеоинформации от камеры и заложенной в него логики способен через блок управления воздействовать на гидрораспределитель, а тот, в свою очередь, посредством гидроцилиндра и подвижной части смещает сельскохозяйственную машину, например культиватор, в нужную сторону. Оператор, которым является механизатор, может самостоятельно влиять на логику работы вычислительного модуля через сенсорный монитор (рис. 2).

Для оценки эффективности АУНС по распознаванию с помощью систем технического зрения всходов культурных растений в посевах сахарной свеклы были заложены экспериментальные делянки сахарной свеклы. Закладка делянок сахарной свеклы производилась с междурядьем 45 см. Разница в сроках посева опытных делянок составляла 2 недели. Рельеф местности выбирался с учетом специфики проведения исследований.

Система технического зрения способна на основе использования технологии искусственных нейронных сетей глубокого обучения четко определять листья сахарной свеклы, а специально разработанный алгоритм выявления центра междурядья направлять подвижную часть культиватора в требуемую сторону для нивелирования неточности хода трактора [20]⁴.

Практическая часть. Посевы в период роста сахарной свеклы использовались для создания обучающей выборки по распознаванию культурных растений. Изначально были рассмотрены алгоритмы распознавания

Таблица 1. Основные характеристики АУНС

Table 1. Main characteristics of AUNS

Показатель	Значение
Тип системы	Навесная
Масса устройства, кг	220
Грузоподъемность, т	До 1,5
Рабочее напряжение бортовой электросети трактора, В	12
Смещающий диапазон подвижной рамки, мм	±250
Габаритные размеры, мм: ширина высота	1635 865
Допустимое количество ошибок, %	3
Скорость движения МТА, км/ч	От 5 до 10
Агрегируемый класс трактора, кН	1,4

⁴ Агротребования к новым машинам для механизации перспективных агротехнологий возделывания пропашных культур / И. И. Гуреев [и др.]. Курск: ГНУ ВНИИЗиПЭ РАСХН, 2013. 35 с.

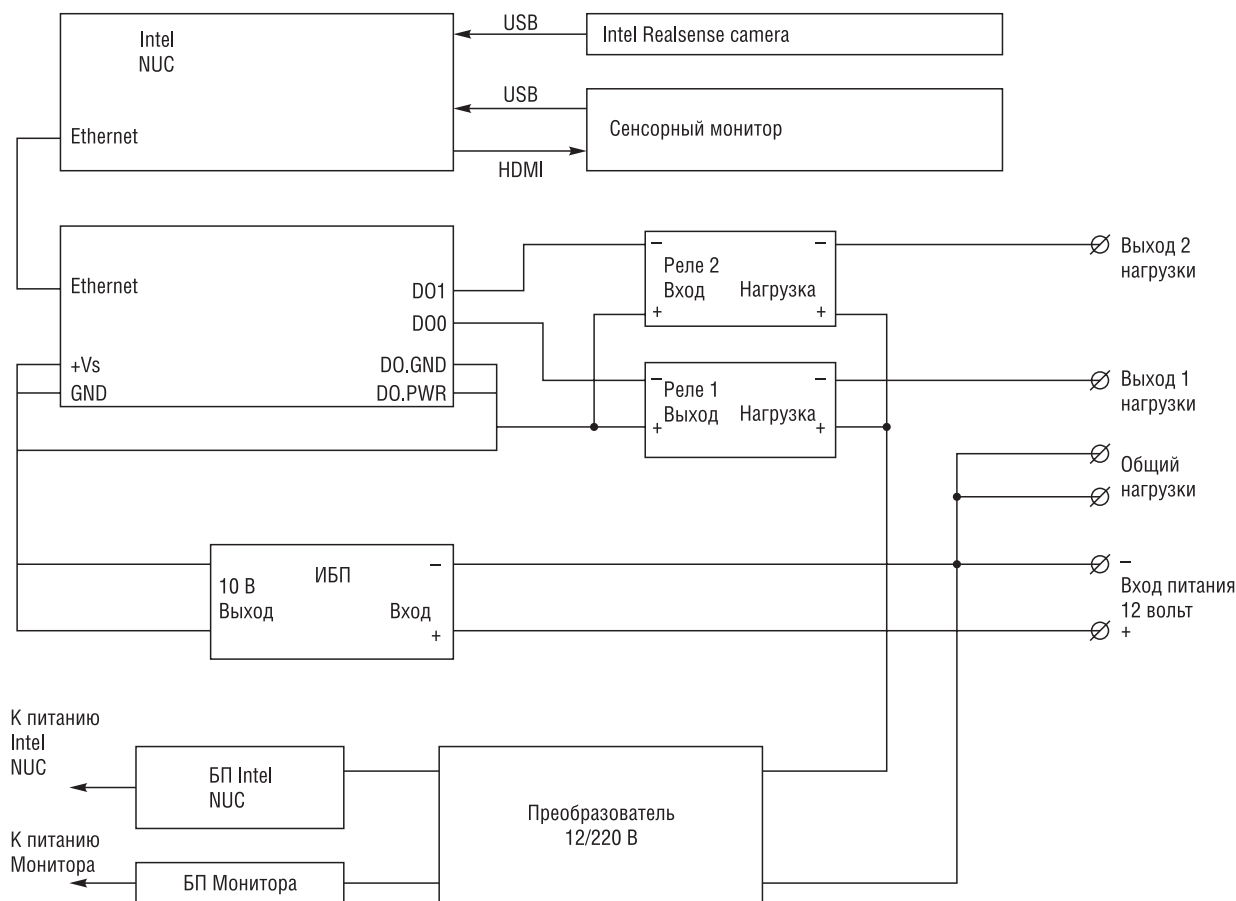


Рис. 2. Экспериментальный стенд САУПК

Fig. 2. Experimental installation SAUPK

листьев сахарной свеклы, которые базируются исключительно на анализе цветовых пространств, проиллюстрированных на рис. 3:

- 1) математическое ожидание в цветовом пространстве Lab ;
- 2) кластеризация методом k -средних в цветовом пространстве HSV ;
- 3) кластеризация с помощью нахождения суперпикселей в цветовом пространстве RGB .

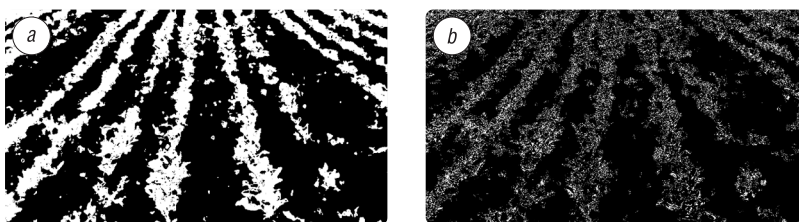


Рис. 3. Результаты сегментации в различных цветовых пространствах: a – математическое ожидание в цветовом пространстве Lab ; b – кластеризация методом k -средних в цветовом пространстве HSV

Fig. 3. Results of segmentation in different color spaces: a - mathematical expectation in the Lab color space; b - clustering by the k -means method in the HSV color space

Оба способа были использованы для обработки изображения, приведенного на рис. 3, b . Кластеризация с помощью нахождения суперпикселей в цветовом пространстве RGB является более сложной и может быть проиллюстрирована на следующих изображениях. Сначала применяется непосредственная кластеризация методом выделения суперпикселей рис. 3, a). Затем цвета

пикселей, относящиеся к одному суперпикселю, усредняются. Однако из-за сложности всей картины и несмотря на хороший эстетический эффект, который можно видеть на рис. 3, *b*, это не привело к значительным результатам. Чтобы это доказать, попробовали кластеризовать полученные суперпиксели на 6 кластеров, как показано на рис. 4, *c*. Как видно из рис. 4, *c*, смысловая нагрузка, к сожалению, размывается.

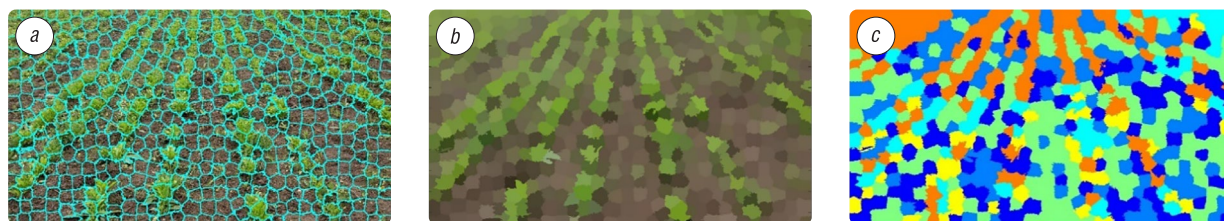


Рис. 4. Результаты сегментации с помощью разделения изображения на суперпиксели: *a* – кластеризация методом выделения суперпикселей; *b* – усреднение цветов, относящихся к одному суперпикселю; *c* – кластеризация полученных суперпикселей на 6 кластеров

Fig. 4. Results of segmentation by dividing the image into superpixels: *a* - clustering by the method of extracting superpixels; *b* - averaging the colors related to one superpixel; *c* - clustering the obtained superpixels into 6 clusters

В связи с этим было предложено скомбинировать приведенные выше методы в новый, который описывается следующими шагами (рис. 5):

- 1) выбрать эталонное изображение и в ручном режиме сформировать бинарную маску, позволяющую выделить искомый объект на всем изображении (рис. 5, *a*);
- 2) вычислить математическое ожидание значений яркости красного и зеленого каналов каждого пикселя в цветовом пространстве *RGB*;
- 3) произвести пороговую бинарную сегментацию входного цветного изображения на основе эмпирически подобранного значения пороговой величины;
- 4) кластеризовать входное цветное изображение на N суперпикселей (рис. 5, *a*);
- 5) наложить границы полученных N суперпикселей на бинарное изображение, полученное на шаге 3 (рис. 5, *b*);
- 6) классифицировать каждый из N суперпикселей на основе сравнения количества пикселей, соответствующих искомому объекту, с заранее эмпирически подобранном пороговым значением (рис. 5, *c*).

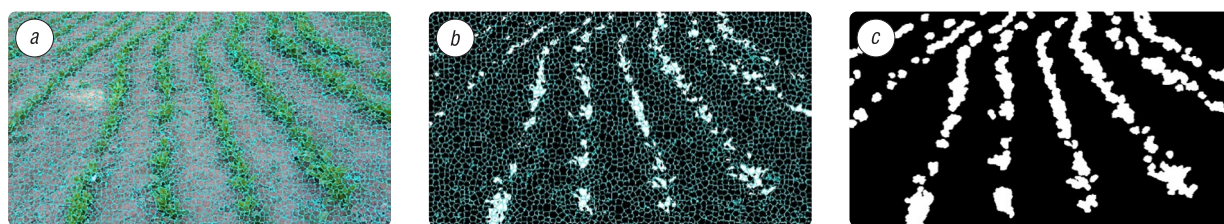


Рис. 5. Процесс бинарной сегментации предложенным методом: *a* – кластеризация входных цветных изображений на N суперпикселей; *b* – наложение границ полученных N суперпикселей на бинарное изображение, полученное на шаге 3; *c* – классификация каждого из N суперпикселей

Fig. 5. Process of binary segmentation by the proposed method: *a* - clustering of input color images into N superpixels; *b* - imposition of the boundaries of the obtained N superpixels on the binary image obtained at step 3; *c* - classification of each of the N superpixels

В приведенном примере в качестве входного изображения использовалось изображение с рис. 3, *a*. Математическое ожидание яркости пикселей по красному и зеленому цветовым каналам ставило 26.6648 и 42.3628 соответственно при пороговом значении 15. Результат предложенной автоматической бинарной сегментации, показанный на рис. 5, *c*, является сопоставимым с ручным.

После того, как предложенный метод бинарной сегментации был готов и протестирован, на основе полученных ранее видеофайлов была сгенерирована обучающая выборка, которая состояла из 1347 цветных изображений в формате *.jpg рядков сахарной свеклы и 1347 соответствующих бинарных изображений в формате *.png. Далее была сформирована архитектура ИНС ГО, состоящая из 10 нейронных слоев.

В результате обученная ИНС способна успешно сегментировать рядки сахарной свеклы на различных цветных изображениях, показанных на рис. 3. В приведенных изображениях полученные бинарные изображения были наложены на исходные цветные изображения, показанные на рис. 6 в виде полупрозрачного голубого тона.

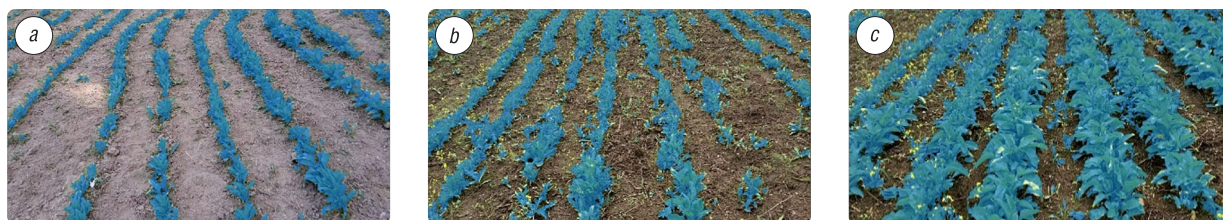


Рис. 6. Результаты работы обученной нейронной сети: *a* – пример 1; *b* – пример 2; *c* – пример 3

Fig. 6. Results of the trained neural network operation: *a* - example 1; *b* - example 2; *c* - example 3

Разработанное программное обеспечение системы автоматического управления пропашным культиватором работает на основе алгоритма Хафа, позволяющего на бинарном изображении определить вероятное расположение линий рядка (рис. 7).

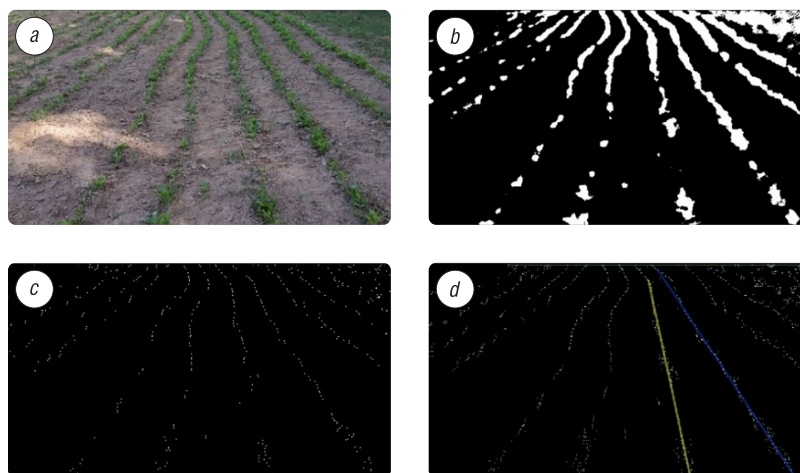


Рис. 7. Процесс выделения рядков с помощью алгоритма Хафа: *a* – исходное цветное изображение; *b* – бинарное изображение; *c* – пиксели, соответствующие всем полученным на предыдущем шаге центрам масс выявленных множеств; *d* – фильтрация полученных отрезков

Fig. 7. Process of rows selecting using the Hough algorithm: *a* - the original color image; *b* - binary image; *c* - pixels corresponding to all the centers of mass of the identified sets obtained at the previous step; *d* - filtering of the obtained segments

Определить геометрически центр рядка лишь по некоторому горизонтальному срезу любой его части будет невозможным либо результат заведомо будет содержать некоторую ошибку. Чтобы нивелировать геометрические искажения рядков свеклы, влияние разрывов между ними, а также несовпадение центра кроны листьев свеклы с расположением геометрического центра самого рядка, предлагается анализировать центр масс m -го числа последних нижних строчек последовательности сегментированных бинарных изображений, получаемых при анализе видеопотока.

Таким образом, нами был предложен алгоритм *FIFO*-буфера в виде так называемой матрицы-аккумулятора размером $m \times n$, где n – ширина анализируемого бинарного изображения, m – глубина аккумулятора, влияющая на величину, которую можно сравнить с инертностью смещения геометрического центра рядка.

Матрица-аккумулятор работает следующим образом. С каждым новым сегментированным кадром все строчки матрицы-аккумулятора сдвигаются вниз на одну позицию, причем самая последняя удаляется, а на место первой записывается последняя строка анализируемого кадра. В результате матрица-аккумулятор содержит в себе последовательность последних строчек сегментированных изображений длиной m .

После каждого обновления матрицы-аккумулятора следует процесс суммирования ее элементов по строчкам. В результате получается одномерный ряд значений целых чисел длиной n (рис. 8) и максимальным значением $m = 24$. Анализ полученного графика наводит на логический вывод, что центры полученных куполообразных участков являются максимально приближенными значениями соответствующих рядков сахарной свеклы.

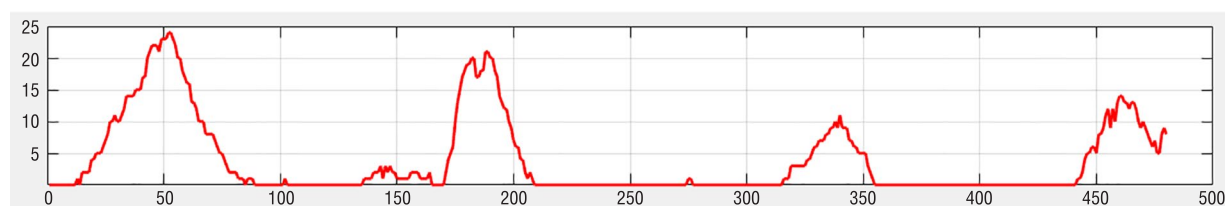


Рис. 8. Результат построчного суммирования матрицы-аккумулятора

Fig. 8. Result of row-by-row summation of the accumulator matrix

Однако анализ достаточно большого числа реальных кадров показал, что очень часто куполообразные участки графика не являются идеальными: они могут иметь различную амплитуду, а также различные локальные максимумы, которые отрицательным образом влияют не только на определение центров, но и количество потенциальных рядков.

В связи с этим было предложено воспользоваться динамически определяемым порогом среза получаемых графиков. Все локальные минимумы, которые являются выше динамического порога, причисляются к глобальным, причем они автоматически ассоциируются с потенциальными рядками.

Значение динамического порога вычисляется путем определения медианного значения отсортированных по возрастанию значений элементов графика (рис. 9).

После этого считается, что геометрические центры полученных плато являются центрами искомых рядков.

На рис. 9 вычисленные центры плато обозначены зелеными кружками, синяя линия – значения вычисленного динамического порога, желтые линии – идеальное расположение центров двух соседних рядков, между которыми должна находиться видеочамера. Таким образом, если центры рядков находятся справа от их ожидаемых расположений, то требуется подать управляющий сигнал электромеханическому узлу, чтобы он двигался в ту же сторону до того момента, пока вычисленные центры не совпадут с ожидаемыми. На главном экране есть сиреневая стрелка, которая дублирует вычисленное направление движения подвижной части культиватора.

Указанная система была успешно отлажена и протестирована на экспериментальном участке сахарной свеклы в агрегате Беларусь 102.1 + КГ-1.

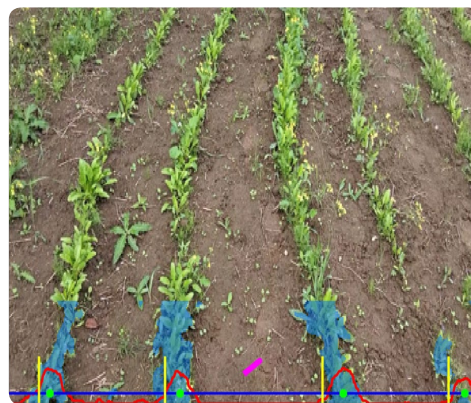


Рис. 9. Проекция центров вычисленных плато на исходное изображение

Fig. 9. Projection of centers of calculated plateaus on the original image

Выводы

1. Разработана навесная система для ориентации пропашного культиватора по рядам и его смещения относительно трактора с помощью систем технического зрения и автоматического управления.

2. Предложена система технического зрения, способная на основе использования технологии искусственных нейронных сетей глубокого обучения четко распознавать листья сахарной свеклы, а подвижную часть культиватора направлять в требуемую сторону движения для нивелирования неточности хода трактора за счет специально разработанного алгоритма выявления центра междурядья.

3. Результаты исследований, проводимых на опытных посевах сахарной свеклы, показали, что точность отслеживания защитной зоны растений составила от $\pm 2,0$ до $\pm 2,3$ см. Кроме того, использование автоматической управляемой навесной системы со скоростью 7,6–7,8 км/ч в контрольных точках показало, что в защитной зоне ряда уничтожалось 91 % сорняков. Повреждаемость культурных растений в процессе исследований находилась в пределах агропуса 3 % при условии работы МТА со скоростью, не превышающей 8 км/ч. Повышение скорости МТА свыше 8 км/ч снижает качество выполнения междурядной обработки, что сказывается на числе поврежденных культурных растений.

Применение управляемого навесного устройства с трактором и орудием на основе систем технического зрения обеспечит точность и эффективность выполнения технологических операций посадки и обработки пропашных культур. Результаты настоящих исследований могут быть использованы при создании машин для возделывания сельскохозяйственных культур с автоматизированной системой управления. Использование систем технического зрения и автоматического управления культиватором позволит повысить качество междурядных обработок пропашных культур и уменьшит пестицидную нагрузку на окружающую среду.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Качество и эффективность агропромышленного производства» на 2016–2020 годы, подпрограмма «Механизация и автоматизация процессов в АПК», задание 4.39 «Исследование точности вождения пропашных культиваторов с целью повышения качества междурядных обработок».

Список использованных источников

1. Научные системы ведения сельского хозяйства Республики Беларусь / В.Г. Гусаков [и др.] ; редкол.: В.Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь. – Минск : Беларус. навука, 2020. – 683 с.
2. Proceedings 8th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed, Zaragoza, Spain, 9–11 March 2009 / Europ. Weed Research Soc. – Zaragoza : [s. n.], 2009. – 147 p.
3. Barberi, P. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? / P. Barberi // Weed Research. – 2002. – Vol. 42, № 3. – P. 177–193. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2002.00277.x>
4. Mechanical weed management / D.C. Cloutier [et al.] // Non-chemical weed management: principles, concepts and technology / ed.: M.K. Upadhyaya, R.E. Blackshaw. – Wallingford, 2007. – P. 111–134. <https://doi.org/10.1079/9781845932909.0000>
5. Паламарчук, В.И. Обработка междурядий с различными защитными зонами / В.И. Паламарчук // Сахар. свекла. – 1986. – № 4. – С. 28–31.
6. Ахмеров, Х.Х. Автоматизированная машина для прореживания всходов сахарной свеклы / Х.Х. Ахмеров // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 1984. – № 7. – С. 19–26.
7. Семичев, С.В. Анализ устройств управления траекторией движения сельскохозяйственных машин / С.В. Семичев // Инновации в сел. хоз-ве. – 2017. – № 4 (25). – С. 217–221.
8. Экологически безопасные технологии механического уничтожения сорняков в защитной зоне пропашных культур / В.П. Луценко [и др.] // Вестн. РАСХН. – 2006. – № 5. – С. 70–71.
9. Алдошин, Н.В. Исследование технологических процессов в растениеводстве при помощи методов матричного исчисления / Н.В. Алдошин // Вестн. Моск. гос. агроинженер. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 64–66.
10. Innovative strategies and machines for physical weed control in organic and integrated vegetable crops / M. Fontanelli [et al.] // Chem. Engineering Trans. – 2015. – Vol. 44. – P. 211–216. <https://doi.org/10.3303/CET1544036>
11. Судаченко, В.Н. О совершенствовании устройства для отслеживания защитной зоны культурных растений при междурядной обработке / В.Н. Судаченко, В.В. Козлов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства в Северо-Западной зоне России : сб. науч. тр. / Сев.-Зап. НИИ механизации и электрификации сел. хоз-ва. – СПб., 2002. – Вып. 73. – С. 71–76.

12. Kunz, C. Benefits of precision farming technologies for mechanical weed control in soybean and sugar beet – comparison of precision hoeing with conventional mechanical weed control / C. Kunz, J. F. Weber, R. Gerhards // *Agronomy*. – 2015. – Vol. 5, N2. – P. 130–142. <https://doi.org/10.3390/agronomy5020130>
13. Camera steered mechanical weed control in sugar beet, maize and soybean / C. Kunz [et al.] // *Precision Agriculture*. – 2018. – Vol. 19, N4. – P. 708–720. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9551-4>
14. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops / M. Pérez-Ruiz [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2012. – Vol. 80. – P. 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.10.006>
15. What is the best multi-stage architecture for object recognition? / K. Jarrett [et al.] // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV) : proceedings, 29 Sept. – 2 Oct. 2009, Kyoto, Japan / Inst. of Electrical and Electronics Engineers. – Kyoto, 2009. – P. 2146–2153. <https://doi.org/10.1109/icc.2009.5459469>
16. Technology for automation of weed control in specialty crops / S. A. Fennimore [et al.] // *Weed Technology*. – 2016. – Vol. 30, N4. – P. 823–837. <https://doi.org/10.1614/WT-D-16-00070.1>
17. Autonomous robots for weed control / A. Ruckelshausen [et al.] // *J. of Plant Diseases and Protection*. – 2006. – Spec. iss. 20. – P. 173–180.
18. Співвідношення регулювання та саморегулювання процесів при роботі ґрунтообробного знаряддя / В. І. Ветохін [та ін.] // Тези наукових доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій», присвяченої 85-річчю від дня народження академіка Л. В. Погорілого та 150-річчю від дня народження професора К. Г. Шиндлера / Укр. НДІ прогнозування техніки і технологій для с.-г. вир-ва. – Дослідницьке, 2019. – С. 15–16.
19. *Бесекерский, В. А.* Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.
20. *Прокопович, Г. А.* Разработка системы технического зрения для сервисного мобильного робота / Г. А. Прокопович // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта», 22–23 сентября 2015 г., Иннополис, Республика Татарстан, Россия : тр. семинара / Рос. ассоц. искусств. интеллекта. – Иннополис, 2016. – С. 127–136.

References

1. Gusakov V. G., Bel'skii V. I., Kazakevich P. P. (et al.). *Scientific farming systems of the Republic of Belarus*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2020. 683 p. (in Russian).
2. *Proceedings 8th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed, Zaragoza, Spain, 9-11 March 2009*. Zaragoza, 2009. 147 p.
3. Barberi P. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research*, 2002, vol. 42, no. 3, pp. 177-193. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2002.00277.x>
4. Cloutier D. C., Van der Weide R. Y., Peruzzi A., Leblanc M. L. Mechanical weed management. *Non-chemical weed management: principles, concepts and technology*. Wallingford, 2007, pp. 111-134. <https://doi.org/10.1079/9781845932909.0000>
5. Palamarchuk V. I. Intertillage of row spacings with different protective zones. *Sakharnaya svekla* [Sugar Beet], 1986, no. 4, pp. 28-31 (in Russian).
6. Akhmerov Kh. Kh. An automated machine for thinning sugar beet seedlings. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva* [Mechanization and Electrification of Agriculture], 1984, no. 7, pp. 19-26 (in Russian).
7. Semichev S. V. Analysis of trajectory control devices for agricultural machines. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve* [Innovations in Agriculture], 2017, no. 4 (25), pp. 217-221 (in Russian).
8. Lutsenko V. P., Tokarev N. A., Sokolova I. M., Nikitina T. V. Environmentally friendly technologies of mechanical weed control in the protective zone of row crops. *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences], 2006, no. 5, pp. 70-71 (in Russian).
9. Aldoshin N. V. Research of technological processes in plant growing using the methods of matrix calculus. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State Agroengineering University], 2007, no. 1, pp. 64-66 (in Russian).
10. Fontanelli M., Frasconi C., Raffaelli M., Peruzzi A., Martelloni L., Pirchio M. Innovative strategies and machines for physical weed control in organic and integrated vegetable crops. *Chemical Engineering Transactions*, 2015, vol. 44, pp. 211-216. <https://doi.org/10.3303/CET1544036>
11. Sudachenko V. N., Kozlov V. V. On improving the device for tracking the protective zone of cultivated plants during inter-row cultivation. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva v Severo-Zapadnoi zone Rossii: sbornik nauchnykh trudov* [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products in the North-West zone of Russia: collection of scientific papers]. St. Petersburg, 2002, iss. 73, pp. 71-76 (in Russian).
12. Kunz C., Weber J. F., Gerhards R. Benefits of precision farming technologies for mechanical weed control in soybean and sugar beet - comparison of precision hoeing with conventional mechanical weed control. *Agronomy*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 130-142. <https://doi.org/10.3390/agronomy5020130>
13. Kunz C., Weber J. F., Peteinatos G. G., Sökefeld M., Gerhards R. Camera steered mechanical weed control in sugar beet, maize and soybean. *Precision Agriculture*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 708-720. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9551-4>
14. Pérez-Ruiz M., Slaughter D. C., Gliever C. J., Upadhyaya S. K. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, vol. 80, pp. 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.10.006>

15. Jarrett K., Kavukcuoglu K., Ranzato M., LeCun Y. What is the best multi-stage architecture for object recognition? *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV): proceedings, 29 September - 2 October 2009, Kyoto, Japan*. Kyoto, 2009, pp. 2146-2153. <https://doi.org/10.1109/iccv.2009.5459469>

16. Fennimore S. A., Slaughter D. C., Siemens M. C., Leon R. G., Saber M. Technology for automation of weed control in specialty crops. *Weed Technology*, 2016, vol. 30, no. 4, pp. 823-837. <https://doi.org/10.1614/WT-D-16-00070.1>

17. Ruckelshausen A., Klose R., Linz A., Marquering J., Thiel S., Tolke S. Autonomous robots for weed control. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2006, spec. iss. 20, pp. 173-180.

18. Vetokhin V. I., Bilovod O. I., Prilepo N. V., Altibaev A. N. The ratio of regulation and self-regulation of processes in the work of tillage implements. *Tezi naukovikh dopovidei KhKh Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii «Naukovo-tekhnichni zasadi rozrobki, viprobuвання та прогнозування sil's'kogospodars'koï tekhniki i tekhnologii», prisvyachenoï 85-richchyu vid dnya narodzhennya akademika L. V. Pogorilogo ta 150-richchyu vid dnya narodzhennya profesora K. G. Shindlera* [Abstracts of scientific reports of the XIX International scientific conference «Scientific and technical principles of development, testing and forecasting of agricultural machinery and technologies», dedicated to the 85th anniversary of the birth of academician L. V. Pogorily and the 150th anniversary of the birth of professor K. G. Shindler]. *Doslidnits'ke*, 2019, pp. 15-16 (in Ukrainian).

19. Besekerskii V. A., Popov E. P. *Theory of automatic control systems*. 4th ed. St. Petersburg, Professiya Publ., 2003. 752 p. (in Russian).

20. Prokopovich G. A. Development of a vision system for a service mobile robot. *Tretii Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta», 22-23 sentyabrya 2015 g., Innopolis, Respublika Tatarstan, Rossiya* [The third All-Russian scientific and practical seminar «Unmanned vehicles with artificial intelligence elements», September 22-23, 2015, Innopolis, the Republic of Tatarstan, Russia]. *Innopolis*, 2016, pp.127-136 (in Russian).

Информация об авторах

Азаренко Владимир Витальевич – член-корреспондент, доктор технических наук, доцент, академик-секретарь Отделения аграрных наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072 Минск, Республика Беларусь). E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by

Комлач Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, генеральный директор, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь). E-mail: komlach.d@mail.ru

Голдыбан Виктор Владимирович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией механизации производства овощей и корнеклубнеплодов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь). E-mail: labpotato@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5332-926X>

Барановский Иван Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механизации производства овощей и корнеклубнеплодов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь). E-mail: labpotato@mail.ru

Прокопович Григорий Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией робототехнических систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук (ул. Сурганова, 6, 220012 Минск, Республика Беларусь). E-mail: prakapovich@newman.bas-net.by

Information about authors

Vladimir V. Azarenko - Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Assistant Professor. Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66 Nezavisimosti Ave., Minsk 220072, Republic of Belarus). E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by

Dmitry I. Komlach - Ph. D. (Engineering). Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1 Knorina Str., Minsk 220049, Republic of Belarus). E-mail: komlach.d@mail.ru

Victor V. Goldyban - Ph. D. (Engineering). Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1 Knorina Str., Minsk 220049, Republic of Belarus). E-mail: labpotato@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5332-926X>

Ivan A. Baranovsky - Ph. D. (Engineering). Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1 Knorina Str., Minsk 220049, Republic of Belarus). E-mail: labpotato@mail.ru

Gregory A. Prokopovich - Ph. D. (Engineering), Assistant Professor. The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6 Surganova Str., Minsk 220012, Republic of Belarus). E-mail: prakapovich@newman.bas-net.by