

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМБАЙНА ДЛЯ УБОРКИ КАРТОФЕЛЯ С ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЧВЕННЫХ КОМКОВ И ИХ ОТДЕЛЕНИЯ ОТ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ*

Алексей Семенович Дорохов, *академик РАН*
Алексей Викторович Сибирёв, *доктор технических наук*
Максим Александрович Мосяков, *кандидат технических наук*
Николай Викторович Сазонов, *кандидат технических наук*
Сергей Николаевич Петухов, *кандидат сельскохозяйственных наук*
Мария Михайловна Годяева, *аспирант*
Дмитрий Николаевич Кынев, *аспирант*
Оксана Сергеевна Чистякова, *магистрант*

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия
E-mail: dorokhov@rgau-msha.ru

Аннотация. В ФНАЦ ВИМ разработаны концептуальные основы создания автоматизированного комбайна для уборки картофеля с цифровой системой идентификации почвенных комков и их отделения от товарной продукции. Существующие машины выполняют технологический процесс в условиях повышенной влажности почвы, что отрицательно влияет на показатели качества уборки в результате снижения полноты сепарации. Для определения оптимальных значений разработанной сепарирующей системы и рекомендаций в последующих изменениях конструктивно-технологических параметров машин представлена конструктивная схема автоматизированного комбайна, принципиальная схема моделирования системы идентификации почвенных комков в среде Matlab/Simulink, выполнена выборка данных полевых исследований качества сепарирующей системы уборочной машины, а также показана работа нейронной сети и поверхность ошибки нейрона по идентификации почвенных комков в процессе движения по сепарирующей поверхности.

Ключевые слова: автоматизированный комбайн, цифровая система идентификации, уборка, сепарация, картофель, рабочие органы, сепарирующая система

CONCEPTUAL FRAMEWORKS FOR CREATING AN AUTOMATED POTATO HARVESTER WITH A DIGITAL SYSTEM FOR IDENTIFYING SOIL LUMPS AND SEPARATING THEM FROM COMMERCIAL POTATO PRODUCTS

A.S. Dorokhov, *Academician of the RAS*
A.V. Sibirev, *Grand PhD in Engineering Sciences*
M.A. Mosyakov, *PhD in Engineering Sciences*
N.V. Sazonov, *PhD in Engineering Sciences*
S.N. Petukhov, *PhD in Agricultural Sciences*
M.M. Godyaeva, *PhD Student*
D.N. Kynev, *PhD Student*
O.S. Chistyakova, *Master Student*

FGBNU "Federal Scientific Agroengineering Center VIM", Moscow, Russia
E-mail: dorokhov@rgau-msha.ru

Abstract. FSC VIM has developed the conceptual basis for creating an automated potato harvester with a digital system for identifying soil lumps and separating them from marketable products. Existing machines carry out the technological process in conditions of high soil moisture, which negatively affects the quality of harvesting as a result of a decrease in the completeness of separation. To determine the optimal values of the developed separating system and recommendations for subsequent changes in the design and technological parameters of the machines, a design diagram of an automated harvester is presented, a schematic diagram of modeling a system for identifying soil lumps in the Matlab/Simulink environment, data selection from field studies of the operation quality of the harvesting machine separating system, as well as the work of the neural network system and the neuron error surface for identifying soil lumps while moving along the separating surface are shown.

Keywords: automated harvester, digital identification system, harvesting, separation, potatoes, working parts, separating system

* Работа выполнена при государственной поддержке РФФ конкурса 2022 года «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными № 22-76-10002 / The work was carried out with the state support of the RNF of the 2022 contest "Conducting research by scientific groups under the leadership of young scientists" of the Presidential Program of research projects implemented by leading scientists, including young scientists No. 22-76-10002.

Повреждение клубней картофеля при механизированной уборке зависит от конструкции картофелеуборочных машин, материала, из которого изготовлены их рабочие органы и режимов работы. Не последнюю роль играют физико-механические свойства клубней, определяемые сортом, агротехникой возделывания, структурой почвы, климатическими условиями. [1, 7, 11] Но основное влияние на полноту сбора продукции, сохранение урожайности картофеля и экономический эффект производства оказывают технологии уборки.

Существующие конструкции уборочных машин представляют совокупность различных систем сепарации, для повышения качества работы и материалоемкости которых используют сочетание известных схем очистки, учитывая отрицательное действие веса на уплотнение почвенного слоя при уборке. [3, 5, 10]

В настоящее время не достает автоматизированных инструментов принятия решений, комплексно берущих данные различных информационных источников для поддержки и оптимизации производственных и технологических процессов.

Для повышения уровня автоматизации следует регистрировать важные параметры в реальном времени и включать их в массив данных. Необходимо выполнить обзор конструктивных схем специализированных машин, по результатам определить процессы автоматизации и разработать принципиальную конструктивно-технологическую схему комбайна для совершенствования технологического процесса уборки картофеля. [4, 8, 12]

Цель исследования – разработка автоматизированного уборочного комбайна с цифровой системой идентификации почвенных комков и их отделения от товарной продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На территории России наибольшее распространение получили элеваторные комбайны – AVR Esprit, Grimme GV 3000, Kverneland UN 2212, Bolko, Dewulf RA-3060.

Выбор данных машин обусловлен более высокими показателями качества работы по сравнению с устаревшей техникой производства ГДР (E-684, E665) и СССР (ККУ-2А, КПК-2, ККР-2), что подтверждается протоколами машинно-испытательных станций.

На основании анализа конструктивных решений, представленных выше машин для уборки картофеля можно сделать вывод, что для более качественного и оперативного управления сложными процессами в современном сельскохозяйственном производстве, их оптимизации по определенным критериям, необходимо слияние различных показателей, получаемых от сенсоров разных типов и информационных источников. [2] Доступные важные и ценные данные не могут быть полностью использованы, если неизвестны алгоритмы их взаимосвязей.

Приводы элеваторов большинства уборочных машин выполнены с возможностью регулировки скорости вращения, но на практике для повышения чистоты сходового вороха чаще всего этот параметр устанавливается на максимальное значение, что

в значительной мере увеличивает содержание травмированных корнеплодов и луковиц.

Все чаще применяют электронные системы контроля и поддержания оптимальных режимов работы машин для уборки корнеплодов и лука с помощью специальных датчиков, оценивающих уровень загрузки сепарирующих элеваторов. Данные обрабатываются бортовым компьютером, и по заданному оптимизационному алгоритму устанавливается скорость элеваторов. Это позволяет исключить вмешательство человека в технологический процесс сепарации и снизить количество травмированных корнеплодов и луковиц. [9]

Основное условие эффективного использования картофелеуборочных машин – загрузка рабочих органов. В зависимости от физико-механических свойств продукта одно и то же количество товарной продукции, поступающее в комбайн, может привести к различной степени загрузки. Для уборочных агрегатов и самоходных шасси разработана широкая номенклатура универсальных систем автоматического контроля (УСАК) частоты вращения рабочих органов и сигнализации отклонений данных параметров от нормы.

Система внедрена на ботвоуборочных (БМ-4, БМ-6), свеклоуборочных (РКС-4, КС-6, РКМ-6) машинах, картофелеуборочном комбайне КСК-4. Известно, что сепарирующая способность пруткового элеватора зависит от угла наклона α и скорости $v_{эл}$ (рис. 1).

Схема картофелеуборочного комбайна с цифровой системой элементов искусственного интеллекта показана на рисунке 2 [6].

При движении машины по полю катки-диаболо 2, перемещаясь по междурядьям, обеспечивают необходимую глубину подкапывания. Пассивные плоские обрезные диски 4 подрезают почвенный пласт секционными лемехами 3 на глубину ниже залегания корнеплодов, картофеля и лука и предотвращают его разваливание. Затем масса вороха поступает на приемный сепарирующий элеватор 5, где от продукта отделяется крупноразмерная примесь с помощью встряхивателя 9. Далее ворох попадает на поперечно-пальчатое полотно переноса продукта элеватора 6 для очищения от более мелких примесей. В случае небольшой массы вороха положение полотна элеватора 6 не изменяется и остается горизонтальным, при ее увеличении автоматически происходит срабатывание датчиков 12, размещенных на полотне, сигнал поступает на блок управления 10,

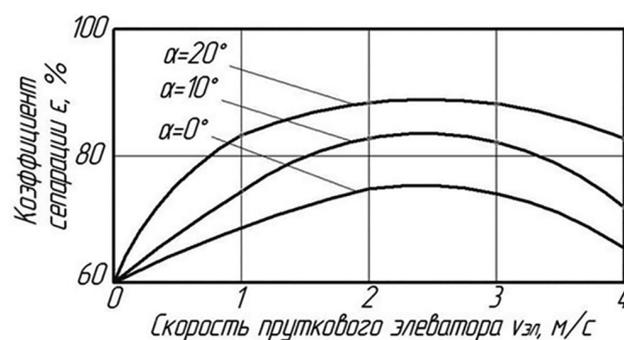


Рис. 1. График зависимости коэффициента сепарации ϵ от угла наклона α пруткового элеватора и поступательной скорости движения $v_{эл}$.

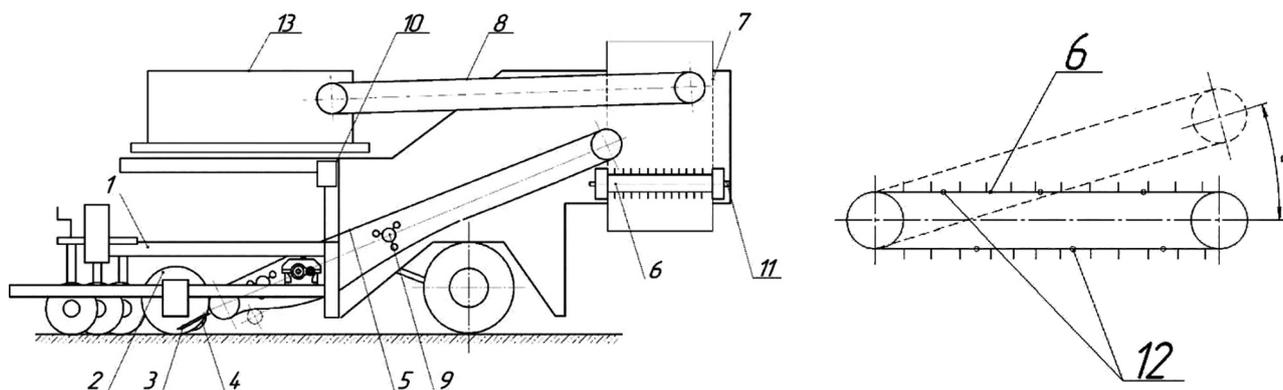


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема картофелеуборочного комбайна с цифровой системой элементов искусственного интеллекта: 1 – рама; 2 – каток-диаболо; 3 – плоский секционный лемех; 4 – диск обрезной; 5 – приемный элеватор; 6 – элеватор переноса продуктов; 7 – горка выносная; 8 – основной элеватор; 9 – встряхиватель; 10 – блок управления; 11 – механизм исполнительный; 12 – датчик массы; 13 – бункер приемный.

который приводит в действие исполнительный механизм 11, поднимающий заднюю часть полотна на угол 15...20°. Он считается оптимальным, поскольку увеличивается время сепарации, что позволяет более эффективно отделять примеси. После снижения массы снова срабатывают датчики 12 и по той же схеме полотно возвращается в исходное положение. Величина заданной массы зависит от урожайности убираемой культуры, а время сепарации – от физико-механического состава и влажности почвы. Качество убираемой продукции повышается и снижается ее травмируемость. Отсепарированная масса поступает на продольную выносную горку 7, которая перемещает корнеплоды, картофель и лук в безударном рабочем режиме на основной сепарирующий прутковый элеватор 8, при этом удаляются оставшиеся почвенно-растительные примеси. Затем поток поступает в бункер 13 машины, который после заполнения сбрасывает очищенный продукт, например, в кузов транспортного средства.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приводы элеваторов большинства уборочных машин выполнены с возможностью регулировки скорости вращения, но на практике для повышения чистоты сходового вороха чаще всего данный параметр устанавливается на максимальное значение, что приводит к росту травмированных корнеплодов и луковиц в сходе.

Применение нейронных сетей в системах управления повышает качество функционирования сложных систем с нелинейными объектами и связями (рис. 3).

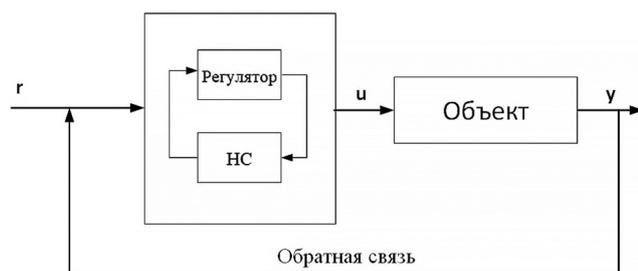


Рис. 3. Схема системы регулирования с использованием нейросетевой модели.

В вычислительном модуле системы синтезируется нейроконтроллер, который для определенного момента времени при известных данных входных возмущений с помощью нейросети (НС) находит значение управляющего воздействия с последующей его реализацией на управляющем модуле. На вход системы подается сигнал текущего значения скорости и вычисляется эталонное. Соответствующие массивы входных и выходных данных регулятора применяют для нахождения управляющего воздействия, минимизирующего отклонение оптимальных и фактических величин очистки клубней картофеля от механических примесей. Информация поступает в систему управления (СУ) машины. На основании данных о скорости u (в нашем случае – V) строится и обучается нейромодель объекта, ее выходные сигналы максимально приближены к выходным сигналам реального объекта, в качестве которого будет выступать поливная норма – y (в нашем случае – m). Строится процесс обучения нейромодели управления полнотой сепарации. Для создания обучающего множества на вход объекта управления подается случайный процесс V – значения полноты сепарации (согласно агротехническим требованиям и протоколам машинно-испытательных станций). На территории Российской Федерации для этой цели построены государственные зональные машиноиспытательные станции (МИС). За время их существования были исследованы образцы картофелеуборочных комбайнов элеваторного и бункерного типа: Grimme SE 150-60; AVR Esprit; AVR Spirit 6200; AVR Spirit 8200; Grimme BR-150; Grimme DR 150; Grimme GT 170; Grimme GT 300; Grimme SE-260; двухрядный AVR Accent; ККР-2 (см. таблицу).

Задача обучения нейронной сети – найти значения $w_{1,k}, w_{2,k}, \dots, w_{n,k}$ и b_k , имея заданные наборы данных.

На первом этапе собирали исходные данные действующих широкозахватных дождевальных машин, необходимые для синтеза нейроконтроллера, а также программы расчета оптимальных показателей качества уборки. [8] Выборка данных полевых исследований фактических значений представлена на рисунке 4.

Задача синтеза нейроконтроллера требует скрупулезной работы по подбору топологии нейронных

Результаты испытаний картофелеуборочной техники

Марка и модель	Технологический показатель, %	Скорость комбайна, км/ч	Протокол
Grimme SE 150-60	Потери – 1,7 чистота вороха клубней – 98,3 повреждение клубней – 12,5	5,6	№ 10-41-17 (6240632)
AVR Esprit	Потери – 0,7...0,8 чистота вороха клубней – 91,2...91,8 повреждение клубней – 1,2	3,9...4,6	№ 03-60-06 (4090062)
AVR Spirit 6200	Потери – 1,8 чистота вороха клубней – 95,4 повреждение клубней – 1,5	3,96	№ 03-70-13 (5090052)
AVR Spirit 6200	Потери – 0,1 чистота вороха клубней – 99,7 повреждение клубней – 4	2,9	№ 03-34-16 (2090052)
AVR Spirit 8200	Потери – 0,3 чистота вороха клубней – 99 повреждение клубней – 3,3	5,8	№ 03-43-19 (5090012)
AVR Spirit 8200	Потери – 1...1,1 чистота вороха клубней – 88,4...90,6 повреждение клубней – 1,3...1,4	3,55...5,6	№ 03-54-06 (4090132)
Grimme BR150	Потери – 0,4 чистота вороха клубней – 89,8 повреждение клубней – 5	5,5	№ 08-20-2015 (5090022)
Grimme DR 150	Потери отсутствуют чистота вороха клубней – 80,4 повреждение клубней отсутствуют	4,8	№ 08-26-2016 (5090092)
Grimme GT 170	Потери – 1,5 чистота вороха клубней – 87,5 повреждение клубней – 0,35	4,5	№ 08-39-2013 (5090022)
Grimme GT 300	Потери – 2 чистота вороха клубней – 85,7 повреждение клубней – 0,5	4,3	№ 08-37-2013 (5090032)
Grimme SE260	Потери – 1 чистота вороха клубней – 86,7 повреждение клубней – 2,6	5,3	№ 08-29-2015 (5090032)
AVR Accent	Потери – 0,5...0,8 чистота вороха клубней – 86,1...88,6 повреждение клубней – 2,94...3,25	3,7	№ 03-53-06 (4090052)
ККР-2	Потери – 0,5 чистота вороха клубней – 100 повреждение клубней – 3,3	2,8	№ 03-91-19 (5090022)

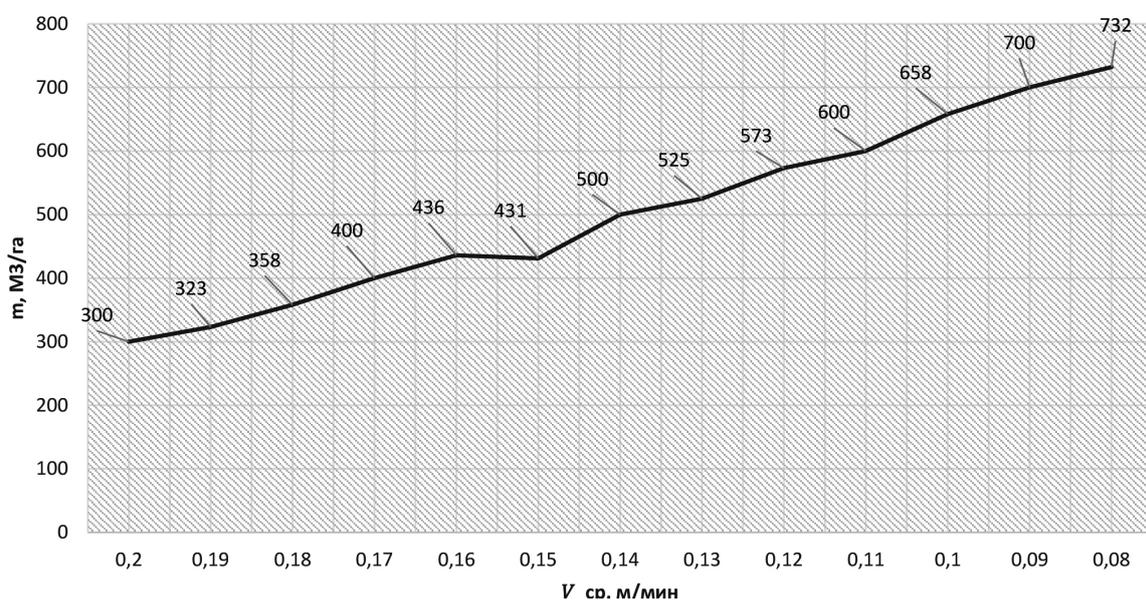


Рис. 4. Выборка данных полевых исследований.

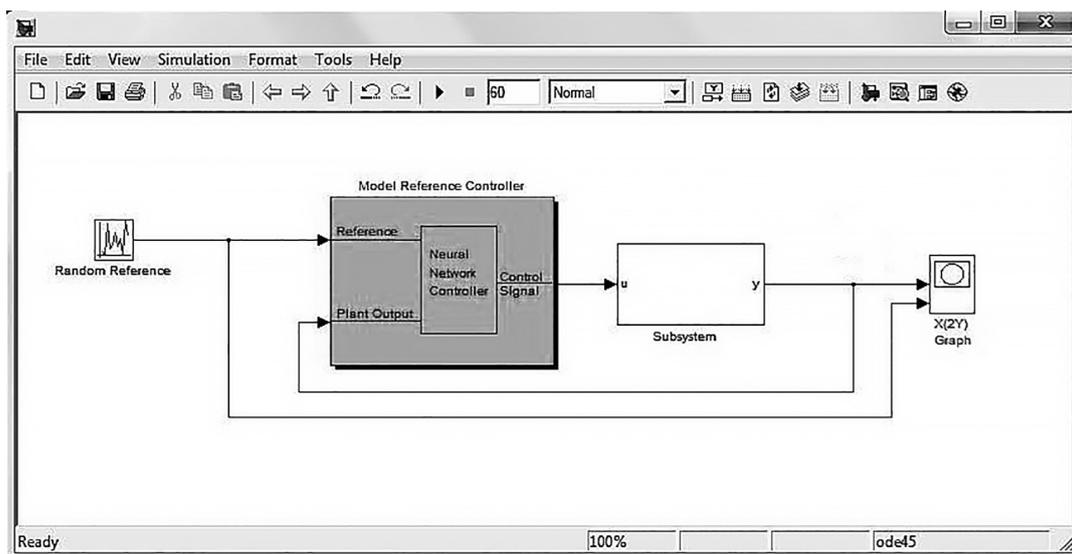


Рис. 5. Принципиальная схема моделирования в обозначениях системы Matlab/Simulink.

сетей, параметров обучения. Должна быть получена нейронная сеть, представляющая модель контроллера, правильно вырабатывающая выходной сигнал на обучающем множестве.

Для проверки адекватности модели формируют выходной сигнал системы на тестовом множестве. Исходя из результатов, можно заключить, что нейромодель вырабатывает выходной сигнал, соответствующий ожидаемому, при этом ошибка (разница между требуемой и фактической величиной поливной нормы) – минимальная. Нейронная сеть должна быть способна передать динамику процесса.

Принципиальная схема моделирования в программной среде Matlab/Simulink изображена на рисунке 5.

Нейронная сеть обучается на основе этих данных с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта. Алгоритм показывает лучшие результаты по сравнению с другими, хотя и требует большего объема памяти. Была выбрана структура нейронной сети, позволяющая наиболее точно описать динамику системы: два слоя (первый содержит шесть нейронов, второй – один), функция активации – гиперболический тангенс, функция качества об-

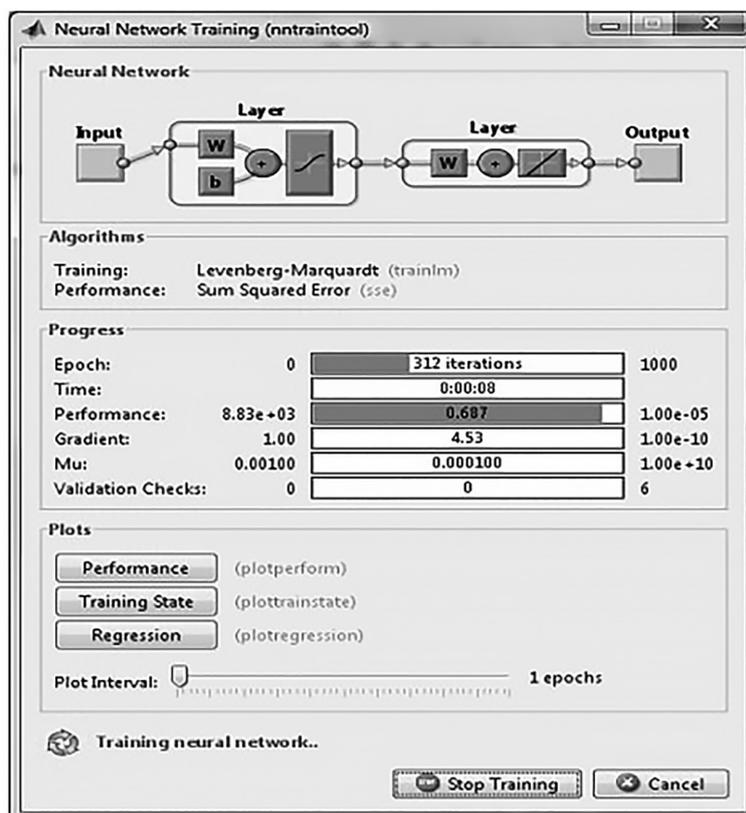


Рис. 6. Обучение нейросети в Matlab.

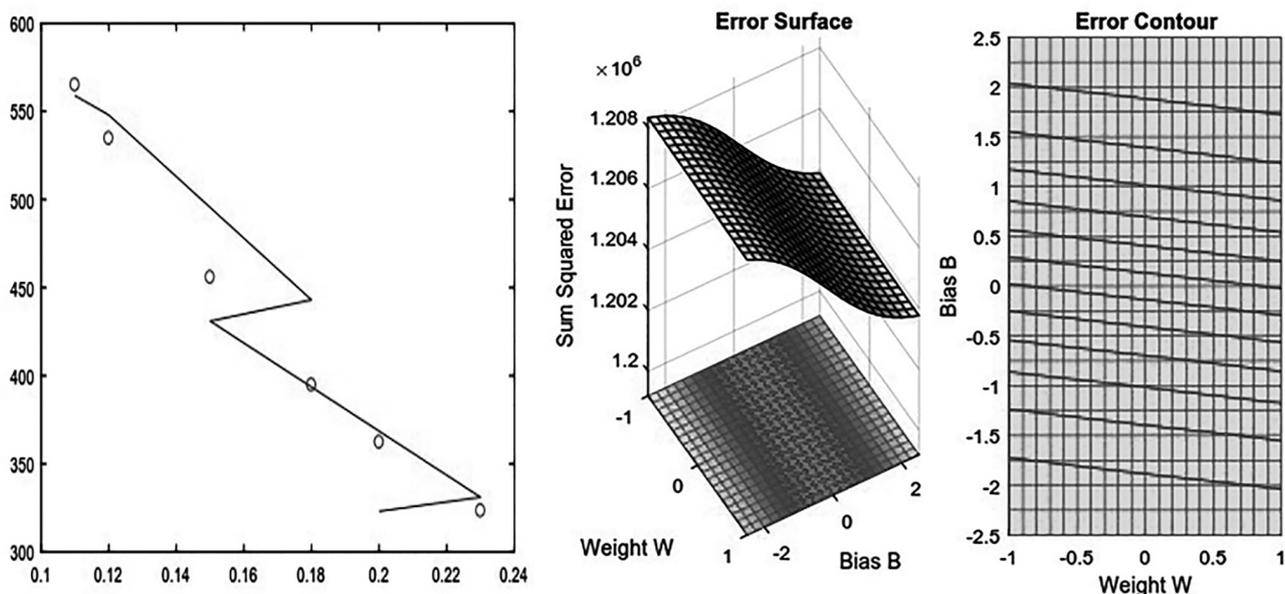


Рис. 7. Работа сети (слева) и поверхность ошибки нейрона (справа).

учения – среднеквадратическая ошибка. Процесс обучения приведен на рисунке 6.

Матрицы весовых коэффициентов первого и второго слоев (W_1 и W_2), а также векторы смещений (b_1 и b_2) имеют значения:

$$W_1 = \begin{bmatrix} -8.5276 \\ 8.4022 \\ -8.3422 \\ 8.4009 \\ -8.406 \\ 8.3973 \end{bmatrix}, \quad b_1 = \begin{bmatrix} 8.2727 \\ -5.0357 \\ 2.0904 \\ 1.6856 \\ -5.0327 \\ 8.4032 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = [-0.69215 \quad 0.06806 \quad 1.6576 \quad 0.6581 \quad 1.0787 \quad 0.14988],$$

$$b_2 = [0.064735].$$

Графическая иллюстрация работы сети приведена на рисунке 7 (элементы обучающей выборки отображены точками, сплошная линия – выход сети).

Проведенное исследование ошибок и линий уровня для нейрона в зависимости от весов W и смещений b иллюстрирует адекватные параметры обучения. Лучший вес и значение порога – это самые низкие точки на поверхности ошибки. Затем данная сеть подключается к регулятору. Весовые коэффициенты сети считаются постоянными, а настраиваются лишь веса сети-регулятора, минимизируя расхождение отклика эталонной модели и заданных нейронных сетей на одинаковый входной сигнал. После обучения регулятор используется в контуре управления.

Выводы. Разработана конструктивная схема автоматизированного комбайна для уборки картофеля с цифровой системой идентификации почвенных комков в среде Matlab/Simulink и их отделения от товарной продукции, выполнена выборка данных полевых исследований показателей качества работы сепарирующей системы, представлены показатели нейронной сети и поверхность ошибки нейрона по идентификации почвенных комков при движении по сепарирующей поверхности уборочной машины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бышов Н.В., Сорокин А.А., Успенский И.А. и др. Принципы и методы расчета и проектирования рабочих органов картофелеуборочных машин: Учеб. пособие. Рязань: Изд-во РГСХА, 2005. 282 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002859051>
2. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирёв А.В. и др. Теоретические предпосылки повышения сепарирующей системы машины для уборки корнеплодов тепловой энергией системы отработавших газов // Вестник Казанского ГАУ. 2021. № 1 (61). С. 71–77. URL: http://www.vestnik-kazgau.com/stranitsi/vestnik-kazanskogo-gau-1-60-2021_ru
3. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки Agritechnika 2019. Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 28–40. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/66556>
4. Камалетдинов Р.Р. Объектно-ориентированное имитационное моделирование в среде теории информации (информационное моделирование) // Известия Международной академии аграрного образования. 2012. Т. 1. № 14. С. 186–194. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17693760>
5. Костенко М.Ю., Костенко Н.А. Вероятностная оценка сепарирующей способности элеватора картофелеуборочной машины // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. № 12. С. 4. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13022951>
6. Патент № 2799653 Россия, МПК A01 D 17/22 Машина для уборки корнеплодов, картофеля и лука / А.С. Дорохов, А.В. Сибирёв, А.Г. Аксенов и др. № 2023101961, Заяв. 17.02.2023; Опубл. 07.07.2023, Бюл. № 19. <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=fe83b8b7880f1706dedbf75772fbb9ca>
7. Протасов А.А. Функциональный подход к созданию лукоуборочной машины // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2011. № 2 (47). С. 37–43. URL:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/funktionalnoy-podhod-k-sozdaniyu-lukouborochnoy-mashiny>
8. Рейнгарт Э.С., Сорокин А.А., Пономарев А.Г. Унифицированные картофелеуборочные машины нового поколения // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 10. С. 3–5. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2006/200610.htm>
 9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2023620546. Динамическое и статическое воздействие по разрушению комков почвы при уборке картофеля и корнеплодов / А.С. Дорохов, А.В. Сибирев, А.Г. Аксенов и др. Опубл. 13.02.2023. 1 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
 10. Сорокин А.А. Теория и расчет картофелеуборочных машин (монография). М.: ВИМ. 2006. 159 с. URL: <http://vniiesh.ru/results/katalog/2342/16135.html>
 11. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines // INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. № 2 (58). С. 63–75. URL: http://www.inmateh.eu/INMATEH_2_2019/INMATEH-Agricultural_Engineering_58_2019.pdf
 12. Dorokhov A., Didmanidze O., Aksenov A. et al. The Results of Experimental Studies of the Physical and Mechanical Properties of an Elastic-Plastic Material for Tribological Properties during Separation. Agriculture. 2023. 13. 1735. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091735>
- REFERENCES**
1. Byshov N.V., Sorokin A.A., Uspenskij I.A. i dr. Principy i metody rascheta i proektirovaniya rabochih organov kartofeleuborochnyh mashin: Ucheb. posobie. Ryazan': Izdvo RGSKHA, 2005. 282 s. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002859051>
 2. Dorohov A.S., Aksenov A.G., Sibiryov A.V. I dr. Teoreticheskie predposylki povysheniya separiruyushchej sistemy mashiny dlya uborki korneplodov teplovoj energiej sistemy otrabotavshih gazov // Vestnik Kazanskogo GAU. 2021. № 1 (61). С. 71–77. URL: http://www.vestnik-kazgau.com/stranitsi/vestnik-kazanskogo-gau-1-60-2021_ru
 3. Izmajlov A.Yu., Lobachevskij Ya.P., Dorohov A.S. i dr. Sovremennye tekhnologii i tekhnika dlya sel'skogo hozyajstva – tendencii vystavki Agritechnika 2019. Traktory i sel'hoz mashiny. 2020. № 6. С. 28–40. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/66556>
 4. Kamaletdinov R.R. Ob'ektno-orientirovannoe imitacionnoe modelirovanie v srede teorii informacii (informacionnoe modelirovanie) // Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya. 2012. Т. 1. № 14. С. 186–194. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17693760>
 5. Kostenko M.Yu., Kostenko N.A. Veroyatnostnaya ocenka separiruyushchej sposobnosti elevatora kartofeleuborochnoj mashiny // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva. 2009. № 12. С. 4. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13022951>
 6. Patent № 2799653 Rossiya, МПК А01 D 17/00 Mashina dlya uborki korneplodov, kartofelya i luka / A.S. Dorohov, A.V. Sibiryov, A.G. Aksenov i dr. № 2023101961, Zayav. 17.02.2023; Opubl. 07.07.2023, Byul. № 19. <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=fe83b8b7880f1706dedbf75772fbb9ca>
 7. Protasov A.A. Funkcional'noj podhod k sozdaniyu lukouborochnoj mashiny // Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet im. V.P. Goryachkina. 2011. № 2 (47). С. 37–43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/funktionalnoy-podhod-k-sozdaniyu-lukouborochnoy-mashiny>
 8. Rejngart E.S., Sorokin A.A., Ponomarev A.G. Unificirovannye kartofeleuborochnye mashiny novogo pokoleniya // Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny. 2006. № 10. С. 3–5. URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2006/200610.htm>
 9. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM RU № 2023620546. Dinamicheskoe i staticheskoe vozdejstvie po razrusheniyu komkov pochvy pri uborke kartofelya i korneplodov / A.S. Dorohov, A.V. Sibiryov, A.G. Aksenov i dr. Opubl. 13.02.2023. 1 s. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
 10. Sorokin A.A. Teoriya i raschet kartofeleuborochnyh mashin (monografiya). М.: ВИМ. 2006. 159 s. URL: <http://vniiesh.ru/results/katalog/2342/16135.html>
 11. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G. Dynamic systems modeling using artificial neural networks for agricultural machines // INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. № 2 (58). С. 63–75. URL: http://www.inmateh.eu/INMATEH_2_2019/INMATEH-Agricultural_Engineering_58_2019.pdf
 12. Dorokhov A., Didmanidze O., Aksenov A. et al. The Results of Experimental Studies of the Physical and Mechanical Properties of an Elastic-Plastic Material for Tribological Properties during Separation. Agriculture. 2023. 13. 1735. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091735>

Поступила в редакцию 16.07.2023

Принята к публикации 30.07.2023