На правах рукописи

МИШИН БОРИС СЕРГЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭЛЕМЕНТА РАСТЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск-наукоград РФ – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГОБОУ ВО Мичуринский ГАУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гордеев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: **Башилов Алексей Михайлович,** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра "Прикладная математика, информационные технологии и электротехника", профессор

Юдаев Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», кафедра "Теплоэнергетика и информационно-управляющие системы", заместитель директора по научной работе

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева".

Защита диссертация состоится 14 мая 2020 года в 14 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 9-44-12, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте www.mgau.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан "___" _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Н.В. Михеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для современного этапа развития сельскохозяйственной техники характерно расширение технологических возможностей машин за счет применения цифровых и интеллектуальных технологий. В сельскохозяйственном производстве существует ряд операций, таких как обработка междурядий в садах, посадка и выкопка саженцев плодовых и ягодных растений, обрезка ветвей, сбор плодов, которые требуют позиционирования рабочих органов машин и оборудования относительно местоположения штамбов растений, корневой системы, ветвей и т.д. В связи с этим возникает задача определения координат местоположения как самого растения, так и рабочего органа, осуществляющего непосредственное воздействие на растение.

Рабочие органы сельскохозяйственных машин находятся под воздействием случайных параметров. Для их учета используются интеллектуальные, в том числе цифровые технологии управления рабочими органами сельскохозяйственных машин.

В этих условиях разработка и внедрение технологий в области цифровизации и интеллектуализации сельскохозяйственного производства является актуальной задачей.

Работа выполнена при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе "УМНИК", №12319ГУ2/2017 от 04.10.2017 («Разработка интеллектуальной следящей системы положения рабочего органа машины для отделения отводков»).

Степень разработанности. Общим проблемам инженерного обеспечения и промышленного садоводства в современных условиях посвящены работы Н.В. Краснощекова, И.Ф. Бородина, А.И. Завражнова, Я.П. Лобачевского. Большой вклад в развитие интеллектуальных систем управления рабочими органами сельскохозяйственных машин внесли ученые: Н.К. Армянов, В.Д. Шеповалов, В.И. Баев, А.М. Башилов, А.С. Гордеев, В.И. Загинайлов, И.Ф. Кудрявцев, И.И. Мартыненко, Л.Г. Прищеп, И.В. Юдаев, Ю.А. Судник, Ю.А. Юдаев, Н.В. Бышов и др. Работы указанных авторов внесли большой вклад в теорию создания интеллектуальных средств для АПК, методологии моделирования и расчета параметров рабочих органов и систем автоматического управления машинами и рабочими органами. Вместе с тем, проблемы разработки систем позиционирования и автоматического управления рабочими органами в трудоемких процессах остаются нерешенными.

Цель исследований – разработка системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения, находящегося в магнитном поле токонесущего проводника.

Задачи исследований:

– Проанализировать методы позиционирования объектов;

– Провести теоретические исследования и разработать математическую модель системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– Разработать имитационную модель системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– Разработать структурную схему системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– На основании теоретических исследований разработать устройство позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– Провести экспериментальные исследования устройства позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле и дать технико-экономическую оценку системы.

Объект исследований – электромагнитное поле, связанное с элементом растения.

Предмет исследований – зависимость между индукцией магнитного поля и координатами элемента растения.

Научная новизна работы:

– математическая модель системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– имитационная модель системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– теоретические и экспериментальные зависимости параметров системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле.

Теоретическую и практическую значимость работы представляют:

1. Разработанная система позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле.

2. Результаты теоретических исследований процесса позиционирования и регулирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле.

3. Материалы экспериментальных исследований, позволяющие выработать рекомендации по созданию системы позиционирования, обеспечивающей требуемую точность определения координат объекта управления.

Методы исследований. В ходе выполнения работы использовались положения теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, теории сельскохозяйственных машин, методы обработки информации: математической статистики в пакетах прикладных программ *Matlab, MathCAD, Excel*; регрессионного анализа на базе нейронных сетей в пакете *Matlab*.

Основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

– структура системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– математическая модель системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле;

– имитационная модель системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле.

Личный вклад автора. На основе проведенного анализа систем позиционирования рабочих органов сельскохозяйственных машин автором разработаны математическая и имитационная модели, структурная схема системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле. Проведены теоретические и экспериментальные исследования разработанного устройства позиционирования, результаты исследований опубликованы автором и прошли апробацию на конференциях разного уровня.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований приняты к внедрению в концерне "Созвездие" (АО "ТЗ"Ревтруд" г. Тамбов). Результаты исследований и разработанная техника используется в учебном процессе по подготовке бакалавров, магистров и аспирантов специальности «Агроинженения» и «Электрооборудование и электротехнологии».

Степень достоверности результатов работы. Достоверность подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными с применением современных методов измерений и приборов, испытанием в лабораторных и полевых условиях. При обработке экспериментальных данных были использованы методы математической статистики и регрессионного анализа, реализованного в нейронных сетях. Результаты теоретических исследований достаточно хорошо согласуются с лабораторными и полевыми данными.

Апробация работы. Основные положения работы доложены, обсуждены на международных, всероссийских и региональных научно-практических конференциях: научно практическая конференция студентов и аспирантов Мичуринского ГАУ (Мичуринск, 2014-2018 гг.), 3 этап конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Минсельхоза России в Ставропольском ГАУ (Ставрополь, 2015 г.), интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства (ВИМ, Москва, 2015 г.), 2 этап конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Минсельхоза России в Воронежском ГАУ (Воронеж, 2015-2018 гг.), 3 этап конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Минсельхоза России в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, 2016 г.).

Образцы разработанной система позиционирования рабочего органа с элементами адаптативного управления демонстрировались на всероссийской выставке «День садовода» (Мичуринск, 2016 г.); всероссийской выставке «Золотая осень» (Москва, 2016 г.), где были отмечены золотой медалью.

Публикации результатов работы. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 3 – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. Получен патент на изобретение №2685143 "Устройство для позиционирования рабочего органа при выкопке растений". Общий объем публикаций составляет 3,77 п.л., из них автору принадлежит 1,9 п.л.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационные исследования соответствуют паспорту специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве, в частности п. "Исследование и разработка электротехнологий и энергетических технологий в растениеводстве и животноводстве сельхозпредприятий", п. "Исследование и разработка систем и элементов электропривода, технологических машин и поточных линий в растениеводстве и животноводстве, процессах производства, хранения и переработки продуктов.".

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 153 страницах, включает 127 страниц основного текста, 73 рисунка, 9 таблиц и 8 приложений. Библиографический список включает в себя 90 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена краткая характеристика состояния вопроса, обоснована актуальность рассматриваемой темы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН» рассматриваются существующие направления, методы и устройства определения местоположения и координат рабочих органов сельскохозяйственных машин. Анализ существующих систем управления рабочими органами показывает, что для целей управления можно выделить несколько характерных направлений: управление положением рабочего органа, управление направлением движения, стабилизация загрузочных режимов.

Возможны следующие направления, на базе которых можно определять местоположение и координаты рабочих органов сельскохозяйственных машин: электромагнитное позиционирование объекта, глобальные системы позиционирования, сканирующие системы, радиолокация, механические системы обнаружения.

В условиях большой изменчивости параметров, характеризующих технологическую ситуацию в сельском хозяйстве целесообразно применять электромагнитное позиционирование.

Электромагнитное позиционирование позволяет определять расстояние до объекта методом триангуляции, основанном на пространственном разнесении приемников информационного сигнала и дальнейшей обработкой (решение, расчет треугольника по сторонам и углам), а также использованием ранее полученной зависимости конкретного параметра процесса или явления от расстояния. Суть позиционирования сводится к генерированию магнитного поля в зоне перемещения подвижных приемников, жестко связанных с рабочим органом сельскохозяйственной машины, а также вычисление его координат. В качестве устройства дистанционной передачи информации о распределении электромагнитного поля в произвольной точке пространства применяются антенны. Для осуществления этой передачи необходимы: передатчик, приемник и среда,

связывающая их. Передатчик – устройство, предназначенное для преобразования информационного сигнала, который зашифрован в параметрах физической величины, в электрические сигналы и возбуждения электромагнитного поля достаточной величины для работы приемника. Приемник – устройство, которое преобразует воздействие на него электромагнитного поля в сигналы.

Во второй главе «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНАОТНОСИТЕЛЬНО ЭЛЕМЕНТА РАСТЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ» рассмотрена математическая и имитационная модели позиционирования рабочего органа с помощью токонесущего проводника.

Предлагается способ определения местоположения растения, где в качестве генератора магнитного поля будет использоваться прямолинейный токонесущий проводник конечной длины, связанный, например, с корневой системой растений, кроной или штамбом дерева. Таким образом связывается местоположение элемента растения и токонесущего проводника.

Теоретической базой для расчета индукции магнитного поля является закон Био-Савара. По закону Био-Савара модуль вектора магнитной индукции в точке С (рис. 1) поля элемента dl прямолинейного проводника с током I равен

$$|dB| = \frac{\mu_0 I d\alpha}{4\pi \cdot r} \qquad (1)$$

где $r = r_0/sin(\alpha)$, r_0 – минимальное расстояние между точкой измерения и направлением элементарного тока в dl.

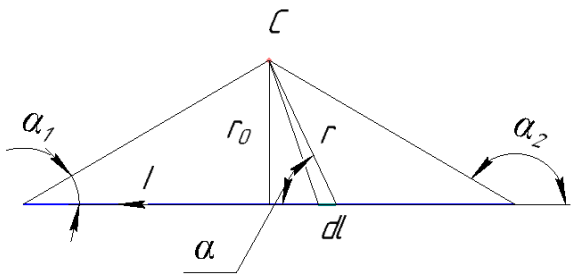


Рисунок 1. **Определение вектора магнитной индукции прямолинейного проводника с током:**
С – точка измерения; dl– элементарный участок проводника; r–расстояние от точки измерения до элементарного участка; r_0–минимальное расстояние между точкой измерения и направлением элементарного тока в dl; α – угол между расстоянием от точки измерения до элементарного участка и направлением движения

Для приема сигнала от токонесущего проводника можно использовать систему минимум трех приемных магнитных антенн, расположенных в одной плоскости и пространственно разделенных между собой.

Задача позиционирования сводится к измерению индукции магнитного поля по сигналам каждой приемной магнитной антенны и решению задачи триангуляции, т.е. нахождение координат генератора, связанного с элементом растения по величине индукции магнитного поля.

Для характеристики приемной магнитной антенны используется понятие величина наведенной в ней ЭДС:

$$e = -NS\frac{dH}{dt} \qquad (2)$$

где N – число витков антенны; S – площадь витка; $H = H_0 cos\varphi$ – нормальная к плоскости рамки напряженность магнитного поля; H_0 – напряженность магнитного поля; φ – угол, образованный нормалью плоскости антенны и вектором напряженности магнитного поля.

На рисунке 2 представлен вид приемной магнитной антенны. Приемные магнитные антенны могут располагаться относительно силовых магнитных линий горизонтально и вертикально. Горизонтальная антенна 3 дает максимальный сигнал 4, когда она расположена как можно ближе к токонесущему проводнику 1, излучающего сигнал, и установлена непосредственно над ней под прямым углом (рис. 3). Величина сигнала зависит от расположения магнитной антенны 3 относительно токонесущего проводника 1. Максимальный отклик 4 зависит не только от расстояния, но и от того, что ориентация антенны 3 совпадает с направлением силовых линий поля 2. В любых других положениях отклик будет меньше.

Рисунок 2. **Приемная магнитная антенна**

Вертикальная антенна дает нулевой отклик при ее расположении непосредственно над проводником, так как магнитный поток не пронизывает область внутри катушки антенны (рис. 3). Перемещение вертикальной магнитной антенны в любую сторону приводит к увеличению отклика.

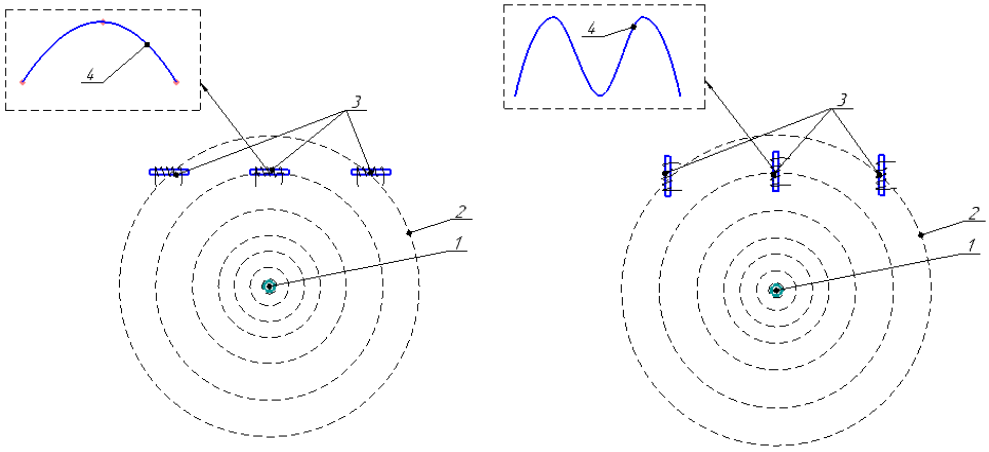


Рисунок 3. **Использование горизонтальной и вертикальной антенн**

Исходя из возможных способов определения положения генератора, можно исследованы несколько конструкций приемных магнитных антенн.

На рисунке 4 представлена геометрическая схема для построения математической модели определения координат элемента растения. Имеется три приемных антенны с центрами в O_1, O_2, O_3. Центр первой приемной антенны сов-

мещается с центром координат xOy. Две остальные антенны могут находиться в различных положениях. В точке пересечения трех окружностей находится источник сигнала, который связан с элементом растения М. Координаты этого элемента требуется найти.

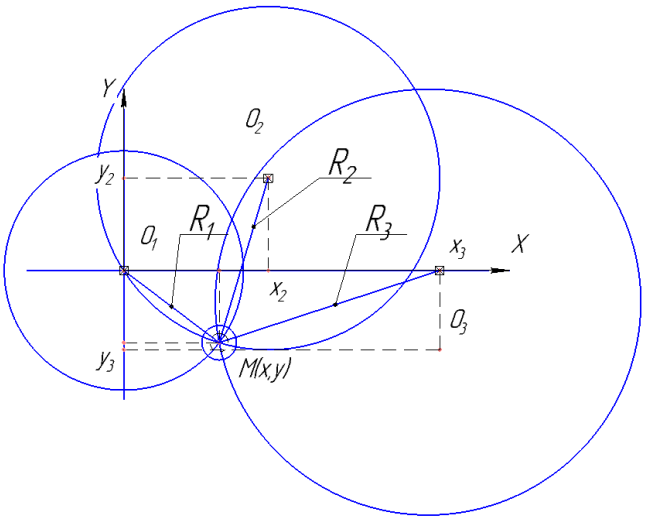


Рисунок 4. **Геометрическая схема для построения математической модели определения координат элемента растения**

Уравнения окружностей имеет вид:

$$\begin{aligned}(x-x_1)^2+(y-y_1)^2 &= R_1^2 - \textit{окружность}\mathrm{O}_1\\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2 &= R_2^2 - \textit{окружность}\mathrm{O}_2\\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2 &= R_3^2 - \textit{окружность}\mathrm{O}_3\end{aligned} \quad (3)$$

Для нахождения координат элемента растения по величине сигналов магнитных антенн решаются три системы уравнений:

$$\begin{cases}(x-x_1)^2+(y-y_1)^2 = R_1^2\\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2 = R_2^2\end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases}(x-x_2)^2+(y-y_2)^2 = R_2^2\\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2 = R_3^2\end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases}(x-x_1)^2+(y-y_1)^2 = R_1^2\\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2 = R_3^2\end{cases} \quad (6)$$

После решения этих систем получаем шесть точек пересечения. Далее путем перебора значений координат на предмет близости значений в заданном интервале определяем координаты элемента растения М.

Расстояние от приемной антенны до исследуемой точки проводника рассчитывается в соответствии с формулами 1-2:

$$R = \frac{0.7 \cdot I \cdot N \cdot S \cdot \nu \cdot \mu_0}{\varepsilon} \quad (7)$$

где I – ток в проводнике, А; ε –величина электродвижущей силы (ЭДС), возникающая в приемной антенне, В; N – число витков антенны; S – площадь витка, мм^2; ν – частота тока, Гц; μ_0 – магнитная постоянная среды.

В сельскохозяйственных условиях случайными параметрами в уравнении 7 являются ток в проводнике I и электродвижущая силаε, возникающая в приемной антенне.

На рисунке 6 представлена имитационная модель системы позиционирования рабочего органа на основе магнитного поля. Для обучения нейронной сети использовалась база данных, полученная в лабораторных условиях. База данных содержит информацию о формах токонесущего провода, координатах блока приемных антенн и сигналах приемных антенн. В среде Matlab предварительно была обучена нейронная сеть на базе данных и получены прогнозируемые координаты Модель состоит из следующих блоков. Блоки входных сигналов от приемных антенн U1…U6; блока обученной нейронной сети; сумматора, ПИД-регулятора; объекта регулирования, представленного передаточной функцией, блока задержки, осциллографа.

Алгоритм работы системы позиционирования следующий: после обучения нейронной сети в момент времени t0 после начала движения транспортного средства, сигналы от приемных антенн U1…U6 поступают на входы нейронной сети. Нейронная сеть рассчитывает прогнозное значение расстояния от приемных антенн до токонесущего проводника и отправляет это значение на ПИД-регулятор. ПИД-регулятор формирует управляющее воздействие на объект управления.

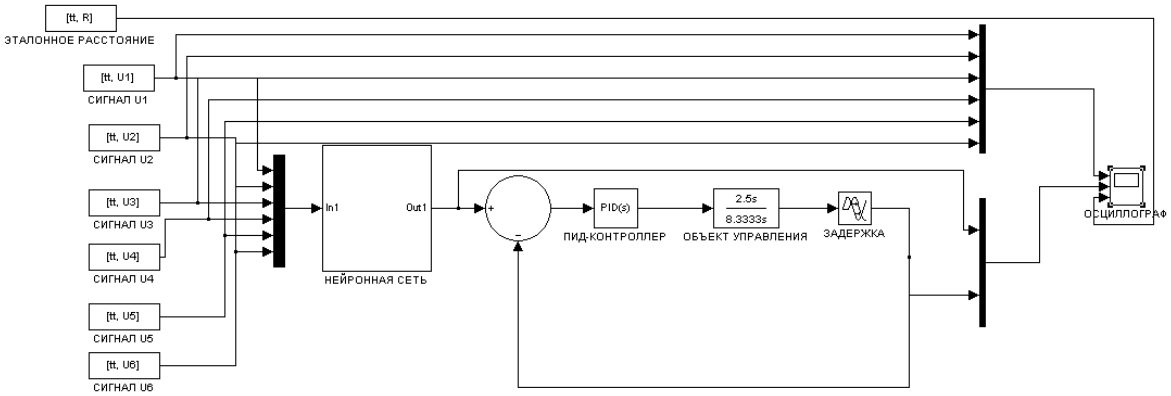


Рисунок 6. **имитационная модель системы позиционирования рабочего органа на основе магнитного поля**

Через временную задержку, обусловленную инерционностью системы, изменения состояния объекта управления влияет на расположение приемных антенн и их сигналы меняются. Это изменение сигналов приемных антенн при изменении расположения токонесущего проводника является обратной связью системы. В следующий момент времени алгоритм повторяется.

На рисунке 7 представлена структурная схема системы позиционирования рабочего органа.

Структурная схема состоит из следующих блоков: сумматор, нейронная сеть, база данных с весовыми коэффициентами, ПИД-регулятор, объект управления. База данных с весовыми коэффициентами формируется в лабораторных

и полевых условиях на множестве форм токонесущего проводника. Нейронная сеть обучается на этой базе данных. Далее в процессе работы сигналы от приемных антенн поступают на вход нейронной сети, которая выдает расположение рабочего органа относительно токонесущего проводника. Это расположение в виде расстояния подается на вход ПИД-регулятора, который формирует управляющее воздействие на объект управления. Объект управления представляет собой рабочий орган, перемещающийся в плоскости, и жестко соединенный с блоком приемных антенн так, что изменение положения рабочего органа отражается на сигналах приемных антенн. На рисунке это изменение отражено в обратной связи.

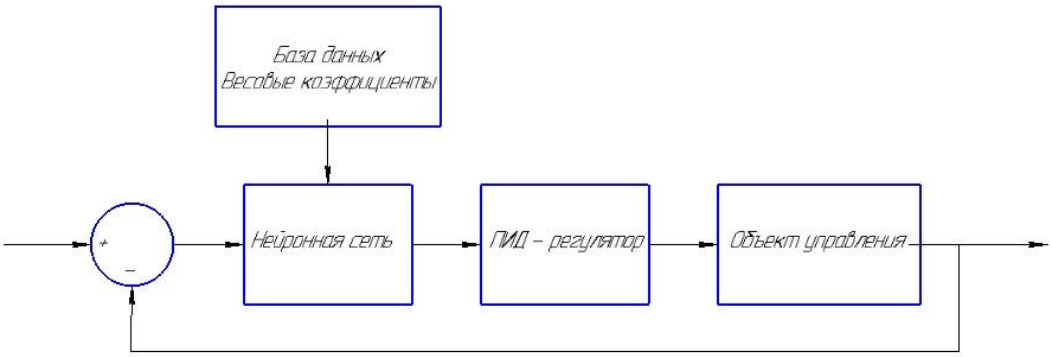


Рисунок 7. **Структурная схема системы позиционирования рабочего органа**

В третьей главе «МЕТОДИКА, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТРОЙСТВА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА» изложены программа и методики экспериментальных исследований.

Лабораторное исследование предусматривает исследование сигнала магнитной антенны на различных вариантах токонесущего проводника, характеристик магнитного поля, типа системы приемных антенн. Антенныустанавливались в специальный стенд, к токонесущему проводнику подключался генератор сигналов. Меняя значения частоты тока в проводнике измерялся сигнал с антенны. Так же антенна перемещалась в вертикальной и горизонтальной плоскостях. На рисунке 8 представлена схема стенда для исследования отклика магнитной антенны от различных параметров.

На стенде исследовались пять типов систем приемных магнитных антенн (рис.9): горизонтальная система антенн; вертикальная система антенн; комбинация горизонтальных и вертикальных антенн типа «I»; комбинация горизонтальных и вертикальных антенн типа «+»; система антенн "Куб". Протяженный токонесущий проводник может иметь случайную форму на любом из своих участков, в результате чего появляется нелинейность в связях между индукцией магнитного поля и расстоянием между источником и приемником. Нахождение и определение формы по сигналам приемных антенн является обратной задачей позиционирования. Сложность решения подобных задач во многом обусловлена нелинейностью и сложной связью между распределением магнитного поля и формой проводника. Изгибы проводника создают существенное перераспределение магнитного поля по отношению к распределению магнитного поля пря-

молинейного токонесущего проводника. Описание нелинейных дифференциальных уравнений сложно и нетривиально. Для решения этой системы уравнений используются методы множественной регрессии и искусственные нейронные сети.

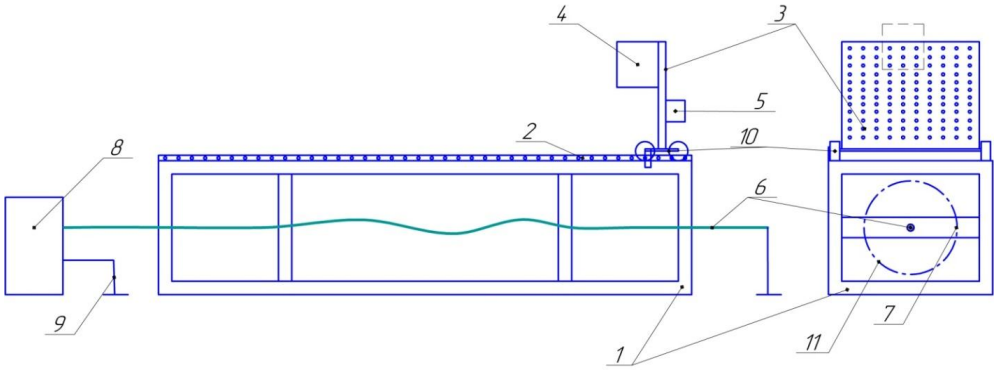
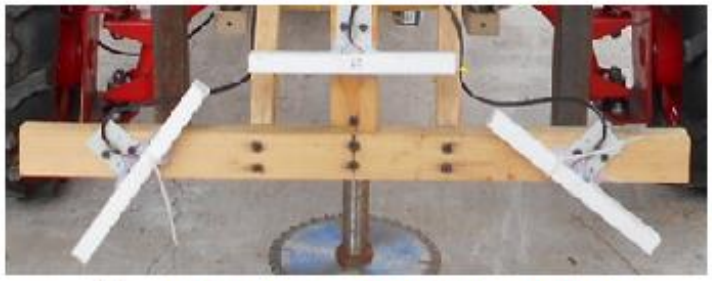


Рисунок 8. **Стенд исследований отклика магнитной антенны от различных параметров среды:**
1 – каркас, 2 – оптическая линейка, 3 – координатная панель, 4 – блок приемных магнитных антенн, 5 – опора антенн, 6 – токонесущий проводник, 7 – опора для токонесущего проводника, 8 – генератор сигналов, 9 – обратный провод, 10 – подвижная колесная опора

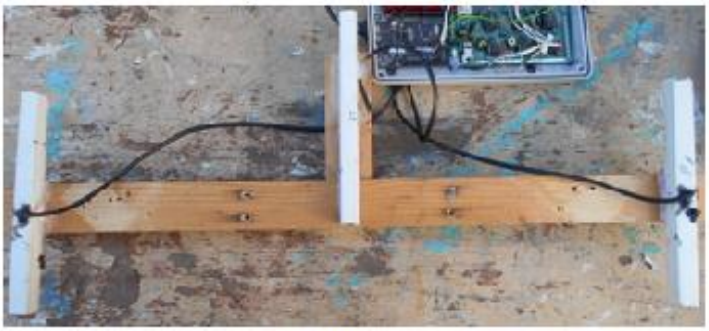
Система приемных антенн "+"

Система приемных антенн "I"



Система горизонтальных приемных антенн

Система приемных антенн "Куб"



Система вертикальных приемных антенн

Рисунок 9. **Системы приемных магнитных антенн**

Нами использовалась однонаправленная сеть, обучаемая с применением алгоритма обратного распространения с тремя слоями нейронов – первый входной слой имеет 6 нейронов, скрытый слой 12 нейронов, выходной слой 1 нейрон.

Входными данными являются сигналы с приемных магнитных антенн u1 u2 u3, на выходе имеем значение расстояния от системы приемных антенн до токонесущего проводника.

В четвертой главе «РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ» представлены результаты лабораторных и полевых исследований системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины в магнитном поле.

Основной задачей лабораторных и полевых исследований было определение возможности измерения расстояния по характеристикам электромагнитного поля; исследовании макетного образца системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины в магнитном поле.

Результатом измерений стали ряд 3D поверхностей распределения сигнала приемных магнитных антенн вокруг токонесущего проводника сложной геометрической формы.

Полученные данные обрабатывались с использованием двух математических методов – множественная регрессия и искусственные нейронные сети. Обработка проводилась для данных, полученных на прямолинейном проводнике и проводнике сложной геометрической формы.

Данные обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты обработки

Тип обработки данных	Множественная регрессия		Нейронная сеть, 2 скрытых слоя по 10 нейронов		Нейронная сеть, 2 скрытых слоя по 20 нейронов	
Название системы антенн	Средняя абсолютная ошибка, см	Средняя относительная ошибка, %	Средняя абсолютная ошибка, см	Средняя относительная ошибка, %	Средняя абсолютная ошибка, см	Средняя относительная ошибка, %
I - система	1,44	2,90	1,34	2,78	1,15	2,41
Куб	1,21	2,44	1,22	2,54	1,21	2,53
Горизонтальная система	1,11	2,42	1,59	2,58	1,54	2,57
Вертикальная система	2,15	2,45	2,17	2,60	1,54	2,57
"+"	0,54	2,41	1,54	2,58	1,54	2,57

По таблице можно видеть, что наилучший результат показывает система приемных антенн типа "+" при обработке данных обучающей выборке методом множественной регрессии. Однако полевые исследования показывают, что метод множественной регрессии на реальных данных не дает оптимального результата. Нейронная сеть позволяет регулировать положение рабочего органа относительно проводника. Средняя абсолютна ошибка определения координат с помощью нейронной сети составляет 1,54 см.

В пятой главе «РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНЫ ОТНОСИ-

ТЕЛЬНО ЭЛЕМЕНТА РАСТЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ» рассматриваются вопросы выбора подходящего транспортного средства для системы позиционирования, разработки принципиальной схемы системы позиционирования, результаты лабораторных исследований по определению точности позиционирования рабочего органа.

На рисунке 10 представлена принципиальная схема системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле. Устройство состоит: из координатора 1, содержащего ось 18, управляемого электродвигателями вертикального перемещения 2 и горизонтального перемещения 3, снизу которого крепится привод 4 рабочего органа 5; излучателя 6 и магнитных приемных антенн 7, 8, 9, соединенных с координатором 1; генератора электромагнитной энергии 10, усилителей 11, пиковых детекторов 12, устройства управления 13, усилителей приводов 14, 15, блока питания 16. Магнитная антенна 7 и излучатель 6 находятся на оси 18, а антенны 8, 9 – ниже и симметрично по бокам оси 18. Излучатель 6 соединен с выходом генератора электромагнитной энергии 10 с определенной частотой. Датчики 7, 8, 9 соединены со входами усилителей 11, выходы которых соединены со входами пиковых детекторов 12, соединенных в свою очередь со входами контроллера 13. Выходы контроллера соединены с усилителями 14, 15, 19, которые соединены соответственно своими выходами с приводами 2, 3, 4. Базовая метка 17 в виде металлического кольца крепится на каждое растение, например на маточную косичку, перед посадкой и постоянно находится на нем. В качестве проводника также может использоваться металлический провод, проложенный вдоль ряда растений. Рабочий орган 5 вращается приводом 4 и в процессе работы находится относительно проводника 17 на определенном расстоянии h. Координатор 1 перемещается вместе ось 18 и рабочий орган 5 в плоскости XY, обеспечивая тем самым перемещение последнего в этойплоскости в горизонтальном v_x (перпендикулярно оси движения вправо-влево) и вертикальном v_y (верх-низ) направлениях.

Перемещение v_y осуществляется приводом 2, а перемещение v_x – приводом 3. Блок питания 16 обеспечивает данное устройство энергией. Все устройство навешивается на трактор и перемещается вдоль ряда растений по оси Z.

Устройство позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле представлен на рисунке 11. Исследование точности определения координат элемента растения системой позиционирования рабочего органа показало, что математическое ожидание данных о высотах пеньков срезанных отводков без использования системы позиционирования относительно почвы 3.85, дисперсия – 1.6342, среднеквадратичное отклонение – 1.2784.

Математическое ожидание данных о высотах пенька срезанного отводка с использованием системы позиционирования относительно проводника 2.9700, дисперсия – 0.1054, среднеквадратичное отклонение – 0.3246. Дисперсия в механическом режиме превышает дисперсию в автоматическом режиме в 16 раз. Это превышение значения достаточно высокое, что указывает на высокую эффективность применение системы позиционирования рабочего органа сельско-

хозяйственной машины в сравнении с отделением без нее. Интервалы, в которых должна меняться высота пеньков срезанных отводков составляет от 1 до 3 см. Вероятность вхождения в этот интервал для механического отделения без системы позиционирования 35 %. Вероятность вхождения в этот интервал отделения с использованием системы позиционирования составляет 85 %.

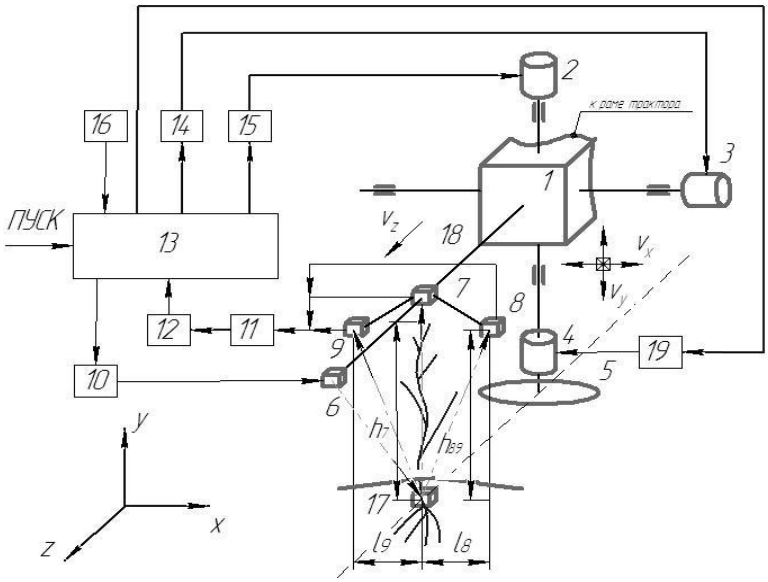


Рисунок 10. **Принципиальная схема системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле:**
h_{89} – расстояние от антенн 8, 9 по оси Y от проводника 17, h_7 - расстояние антенны 7 по оси Y от проводника17, l_9 – расстояние от антенны 9 до проводника17 по оси X, l_8 – расстояние от антенны 8 до проводника17 по оси X, h_{890} – оптимальное расстояние от датчиков 8,9 по оси Y до проводника17, h_{70} - оптимальное расстояние от антенны 7 по оси Y до проводника 17

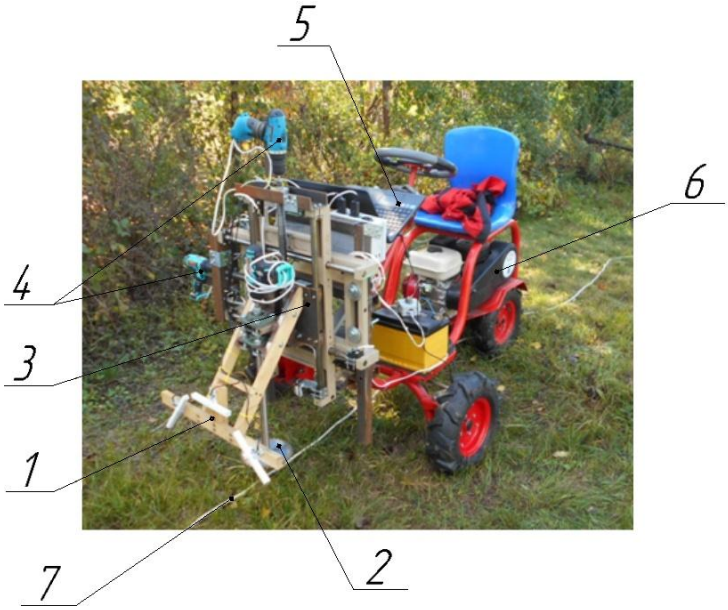


Рисунок 11. **Устройство позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины в магнитном поле:**
1 – система приемных магнитных антенн; 2 – рабочий орган; 3 – система перемещения рабочего органа в плоскости; 4 – электродвигатели вертикального и горизонтального перемещения; 5 – компьютер; 6 – сельскохозяйственная машина; 7 – токонесущий проводник

Внедрение системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле в производство дает прибыль 20240 руб. при сроке окупаемости 3,45 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализированы существующих методов позиционирования объектов. Наиболее целесообразным методом определения координат элемента растения является электромагнитный способ, когда элемент растения сопряжен с источником электромагнитного поля. В частности для технологической операции отделение отводков яблони и других растений в качестве источника информации о расположении элемента растения можно использовать магнитное поле токонесущего проводника, который закладывается в корневую систему растения или связывается с кроной или штамбом дерева.

2. Для получения информации о местоположении элемента растения по величине индукции магнитного поля разработана математическая модель. Основным алгоритмом расчета координат элемента растения по величине индукции магнитном поле является алгоритм нахождения общей точки пересечения трех окружностей, описывающих величину индукции вокруг элемента растения (связанного с ним источника магнитного поля). Для определения величины индукции магнитного поля целесообразно использовать систему приемных магнитных антенн, состоящую, по крайней мере, из трех приемных магнитных антенн, разнесенных в пространстве, позволяющих определять по закону Био-Савара расстояние от каждой антенны до элемента растения. Модель позволяет учитывать множество случайных параметров, таких как влияние влажности почвы; влияние внешних электромагнитных помех (линий электропередач, блуждающих токов в земле, электрических генераторов и двигателей, отраженного электромагнитного излучение от металлических конструкций сельскохозяйственных машин).

3. Имитационная модель системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины в магнитном поле реализует нахождение координат элемента растения по сигналам с приемных антенн и формирует управляющего воздействия на исполнительные механизмы. Имитационная модель реализована в пакете Matlab.

4. Разработана структурная схема системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле, состоящая из системы приемных магнитных антенн, жестко связанных с рабочим органом; блока обработки и управления; системы перемещения рабочего органа; электроприводов вертикального и горизонтального перемещения рабочего органа; токонесущего проводника, сопряженного с элементом растения; генератора сигналов.

5. Исследованы пять типов систем приемных магнитных антенн: №1 – горизонтальная система антенн; №2 – вертикальная система антенн; №3 – комбинация горизонтальных и вертикальных антенн типа «I»; №4 – комбинация горизонтальных и вертикальных антенн типа «+»; №5 – система антенн "Куб". По результатам исследований систем антенн с использованием множественной регрессии и искусственных нейронных сетей – выявлено, что на пря-

молинейном проводнике наименьшая средняя абсолютная ошибка определения расстояния от элемента растения до центра системы антенн типа №4 составляет 2.5 % при использовании нейронной сети, 2,31% – для множественной регрессии. При использовании множественной регрессии на прямолинейном проводнике наименьшая средняя абсолютная ошибка определения расстояния составляет 0.54 см для системы приемных антенн типа №4. На не прямолинейной (сложной) форме проводника наименьшая средняя абсолютная ошибка определения расстояния составляет 4 см для систем антенн №3 и №5.

Предложено и разработано устройство позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле на основе полученных теоретических и экспериментальных данных (патент на изобретение №2685143 "Устройство для позиционирования рабочего органа при выкопке растений"). Рабочий орган может перемещаться в плоскости по высоте от 0 до 60 см., по ширине от 0 до 20 см. Скорость по каждой их осей 26 мм/сек. В результате исследований зависимости сигнала приемной магнитной антенны от частоты генератора, расстояния до элемента растения, от типа подключения к генератору сигналов (через обратный проводник, через почву) выявлено, что наибольший отклик антенны проявляется в диапазоне частот от 10кГц – 100 кГц. Выбрана частота 50 кГц на том основании, что амплитуда сигнала достаточна для усиления и фильтрации в измерительной аппаратуре, а также не относится к высокочастотному диапазону, что упрощает проектирование электронной схемы и позволяет отфильтровать внешние электромагнитные помехи.

6. Исследование точности определения координат элемента растения системой позиционирования рабочего органа показало, что математическое ожидание данных о высотах пеньков срезанных отводков без использования системы позиционирования относительно почвы 3.85, дисперсия – 1.6342, среднеквадратичное отклонение – 1.2784. Математическое ожидание данных о высотах пенька срезанного отводка с использованием системы позиционирования относительно проводника 2.9700, дисперсия – 0.1054, среднеквадратичное отклонение – 0.3246. Дисперсия в механическом режиме превышает дисперсию в автоматическом режиме в 16 раз. Это превышение значения достаточно высокое, что указывает на высокую эффективность применение системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины в сравнении с отделением без нее. Интервалы, в которых должна меняться высота пеньков срезанных отводков составляет от 1 до 3 см. Вероятность вхождения в этот интервал для механического отделения без системы позиционирования 35%. Вероятность вхождения в этот интервал отделения с использованием системы позиционирования составляет 85%.

Внедрение системы позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле в производство может принести прибыль 20240 руб. при сроке окупаемости 3,45 года.

Рекомендации производству

Разработанное устройство позиционирования рабочего органа сельскохозяйственной машины относительно элемента растения в магнитном поле рекомендуется использовать для создании устройств контурной обрезки крон плодовых и декоративных растений, совершенствовании чаесборочных машин.

Перспективы дальнейшего использования

С целью дальнейшего совершенствования целесообразно продолжить исследования по замене металлического проводника дискретной металлической меткой, которая будет крепиться на растении с использованием внешнего генератора сигналов. Целесообразно искать способы снижения влияния электромагнитных шумов на эффективность работы разработанной системы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России

1. **Мишин, Б.С.** Математическая модель определения местоположения корневой системы плодовых растений / Мишин Б.С. // Вестник Мичуринского ГАУ. – 2017. – №4. – с.121-126.

2. **Мишин, Б.С.** Имитационная модель определения местоположения корневой системы плодовых растений / Мишин Б.С., Гордеев А.С. // Вестник тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Том 24. – с.58-65.

3. **Мишин, Б.С.** Алгоритм автоматической ориентации рабочего органа сельскохозяйственной машины/ Мишин Б.С. // Вестник Мичуринского ГАУ. – 2018. – №1. – с.134-140.

Патенты

1. **Мишин Б.С.**, Гордеев А.С. Патент на изобретение №2685143 «Устройство для позиционирования рабочего органа при выкопке растений».

Публикации в журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций

1. **Мишин, Б.С.** Интеллектуальная система управления рабочим органом машины для отделения отводков на базе электромагнитного антенны / Мишин Б.С., Гордеев А.С., Завражнов А.А., Ланцев В.Ю. // «Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства». Материалы международной научно-практической конференции. 15-16 сентября ВИМ Москва: ФГБНУ ВИМ, 2015. – 24 см. Ч. 2. – 2015. – 299 с.: ил., табл.; ISBN 978-5-94600-020-8.

2. **Мишин, Б.С.** Следящая система для управления рабочим органом агрегата для работы в маточниках плодовых культур / Мишин Б.С., Гордеев А.С., Завражнов А.А., Ланцев В.Ю. // ГНУ ВИЭСХ «Инновации в механизации и в технологии и средствах технического обслуживания в сельском хозяйстве» По итогам 5-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Инновации в сельском хозяйстве». – 2014. – 5(10). – с. 168-172.

3. **Мишин, Б.С.** Электромагнитные способы и средства обнаружения базовых меток корней и стволов растений / Мишин Б.С., Гордеев А.С., Завражнов А.А., Ланцев В.Ю.// XII Всероссийская выставка «День садовода-2017». Материалы научно-практической конференции в секции «Механизация и роботизация технических систем производства, переработки и хранения продукции садоводства». – 2017.

4. **Мишин, Б.С.** Система автоматического позиционирования рабочего органа для отделения отводков / Мишин Б.С., Гордеев А.С., Завражнов А.А.,

Ланцев В.Ю. // Интеллектуальные технологии и техника в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 18-20 октября 2016 года. – Мичуринск: ООО «БИС», 2016. – с. 382-389.

5. **Мишин, Б.С.** Результаты исследований электромагнитных датчиков для определения местоположения корневой системы растений / Мишин Б.С. // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: материалы Международной научно-практической конференции 25-27 октября 2017 года: сб. науч. тр. / под общ. ред. В.А. Солопова. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ, 2017. – с. 253-256.

6. **Мишин, Б.С.** Системы управления машинами и агрегатами в маточниках и питомниках на основе следящего рабочего органа / Мишин Б.С., Гордеев А.С., Ланцев В.Ю. // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: Материалы Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. –Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета,2014. – с. 104-109.

7. **Мишин, Б.С.** Следящая система рабочего органа для подрезки растений / Мишин Б.С., Гордеев А.С. // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: Материалы Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. – с. 225-229.

8. **Мишин, Б.С.** Интеллектуальная система управления положением рабочего органа для отделения отводков / Мишин Б.С., Гордеев А.С., Завражнов А.А., Ланцев В.Ю. // Материалы 67-й научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (II раздел): сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Солопова, В.П. Николашина и др. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ, 2015. – 289 с.

9. **Мишин, Б.С.** Моделирование процесса регулировки рабочего органа на основе индукционного измерительного преобразователя / Мишин Б.С., Гордеев А.С., Завражнов А.А., Ланцев В.Ю. // Моделирование энергоинформационных процессов. сб. научн. тр, I Международная науч. практ. интернет. конф. 10 – 15 декабря 2013 г: Изд-во,. – г. Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2013. С. 159-160.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ
Подписано в печать 10.03.2020. Формат 60x84 $^{1}/_{16}$,
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,1. Тираж 100 экз. Ризограф.
Заказ № 20468

Издательско-полиграфический центр
Мичуринского государственного аграрного университета
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101,
тел. +7 (47545) 9-44-45