



МИР робототехники и мехатроники

Новые механизмы
робототехнических
и измерительных систем

под редакцией
В.А. Глазунова, С.В. Хейло

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2022

УДК 681.5+007.52

ББК 32.816

Н74

***Рецензенты:** Алешин Н.П. – академик РАН, д.т.н., профессор*

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

***Ерохин М.Н.** – академик РАН, д.т.н., профессор (РГАУ-МСХА)*

Н74 Новые механизмы робототехнических и измерительных систем

Под редакцией В.А. Глазунова, С.В. Хейло

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 244 стр. ISBN 978-5-94836-647-0

Книга содержит новые результаты, связанные с синтезом и анализом механизмов, применяемых для перспективных робототехнических и измерительных систем. Рассматриваются вопросы, связанные с характеристиками и функциональными возможностями новых механизмов, применяемых в сельскохозяйственной и сварочной технике, а также в измерительных и диагностических системах.

Круг авторов данной монографии представляет разные организации: ИМАШ РАН, ФНАЦ ВИМ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГАУ-МСХА, Университет ИТМО, РГУ им. А.Н. Косыгина, ЮЗГУ, научно-производственную компанию «Шторм», НТЦ «Эталон».

Издание предназначено для широкого круга читателей – студентов, аспирантов, инженеров и научных работников, занимающихся вопросами синтеза и анализа механизмов, применяемых в робототехнических системах.

УДК 681.5+007.52

ББК 32.816

© Алешин А.К., Бузорина Д.С., Гаврюшин С.С., Ганыш С.М., Гебель Е.С., Глазунов В.А., Гришин А.А., Губин М.С., Давыдова С.А., Дорохов А.С., Ефимов С.В., Загоруйко М.Г., Катаев Ю.В., Князев С.И., Павкин Д.Ю., Прохорович В.Е., Сергеев Д.С., Скворцов П.А., Скворцов С.А., Терехова А.Н., Хейло С.В., Царьков А.В., Чернецов Р.А., Чилингарян Н.О., Шалюхин К.А., Шолохов М.А., Яцун А.С., Яцун С.Ф., 2022

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2022

ISBN 978-5-94836-647-0

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	8
Глава 1. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ.	9
<i>Дорохов А.С., Загоруйко М.Г., Давыдова С.А., Павкин Д.Ю., Чилингарян Н.О., Гришин А.А., Катаев Ю.В.</i>	
1.1. Классификация робототехнических систем и процессов сельскохозяйственного производства	9
1.2. Робототехнические средства в садоводстве	14
1.3. Роботизированные средства для обработки сельскохозяйственных культур	19
1.4. Роботизация выращивания овощей в защищенном грунте	22
1.5. Роботизация процессов в животноводстве	26
1.6. Надежность роботизированных систем	40
<i>Список литературы</i>	46
Глава 2. РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОСТОЯНСТВО ТОЧКИ ВВОДА ИНСТРУМЕНТА В РАБОЧУЮ ЗОНУ.	48
<i>Алешин А.К., Чернецов Р.А., Терехова А.Н., Глазунов В.А., Шалюхин К.А., Скворцов С.А.</i>	
2.1. Постановка задачи	48
2.2. Механизмы, являющиеся основой обеспечения постоянства точки ввода инструмента в рабочую зону	49
2.3. Краткий обзор публикаций, имеющих отношение к механизмам с постоянной точкой ввода инструмента	53
2.4. Определение числа степеней свободы механизмов с постоянной точкой ввода выходного звена	55
2.5. Кинематический анализ механизмов с постоянной точкой ввода инструмента	61
2.6. Динамический анализ механизма с постоянной точкой ввода выходного звена	67

2.7. Разработка действующей модели механизма, обеспечивающего постоянство точки ввода инструмента в рабочую зону	70
<i>Список литературы</i>	79
Глава 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЮККЕРОВЫХ КООРДИНАТ ДЛЯ АНАЛИЗА ОСОБЫХ ПОЛОЖЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ	82
<i>Гебель Е.С., Глазунов В.А.</i>	
3.1. Введение	82
3.2. Разработка методологии применения плюккеровых координат для определения винта-градиента и взаимного винта при разных положениях точек крепления приводов	83
3.3. Определение винтов-градиентов, а также взаимных винтов, выводящих механизмы параллельной структуры с линейными двигателями из особых положений при различных точках крепления приводов	102
3.4. Построение зон сингулярности для механизма параллельной структуры с линейными двигателями с использованием плюккеровых координат	109
<i>Список литературы</i>	120
Глава 4. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ	122
<i>Прохорович В.Е., Сергеев Д.С., Губин М.С.</i>	
4.1. Робототехнический комплекс ультразвукового контроля сложнопрофильных изделий	124
4.2. Робототехнический комплекс для неразрушающего контроля толщины серебряного покрытия	127
4.3. Робототехнический комплекс ультразвукового контроля дефектов пайки сложнопрофильных тел вращения	130
4.4. Робототехнический комплекс неразрушающего контроля толщины покрытия	134
<i>Список литературы</i>	137
Глава 5. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СВАРКИ	138
<i>Шолохов М.А., Бузорина Д.С., Хейло С.В., Царьков А.В.</i>	
5.1. Общие сведения о робототехнических системах в сварочном производстве	138

5.2. Комплекс для роботизированной сварки элементов электровозов	140
5.3. Роботизированный комплекс для сварки элементов нефтегазовой аппаратуры	147
5.4. Тела вращения с одним или несколькими кольцевыми швами диаметром до 500 мм, длиной 6000 мм	151
Установка для сварки малогабаритных изделий	151
Установка для сварки крупногабаритных изделий	151
Список литературы	155

Глава 6. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ИЗ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Гаврюшин С.С., Ганьш С.М.

6.1. Введение	156
6.2. Моделирование поведения исполнительных элементов, выполненных из сплавов с памятью формы	161
6.2.1. Физические соотношения	161
6.2.2. Дополнительные внутренние силовые факторы	163
6.2.3. Математическая модель для анализа больших прогибов при плоском изгибе модели плоской пружины	164
6.2.4. Математические модели винтовой цилиндрической пружины	166
6.3. Алгоритмы численного определения дополнительных внутренних силовых факторов	168
6.3.1. Алгоритм построения зависимостей момента и усилия памяти формы в плоских пружинах	168
6.3.2. Алгоритм построения зависимостей момента и усилия памяти формы в винтовых цилиндрических пружинах	170
6.3.3. Алгоритмы численного моделирования задач о прямом и обратном мартенситном превращениях при термоциклировании	173
6.3.4. Особенности решения задачи о расчете плоской пружины методом конечных элементов	174
6.4. Результаты численного моделирования упругих элементов, выполненных из сплавов с памятью формы	175
6.4.1. Винтовая цилиндрическая пружина сжатия	175
6.4.2. Трехточечный изгиб плоской пружины в геометрически линейной постановке	178

6.4.3. Изгиб консольно-закрепленной плоской пружины в геометрически нелинейной постановке	179
Список литературы	181
Глава 7. МЕХАНИЗМЫ СТЕНДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН	183
<i>Алешин А.К.</i>	
7.1. Метод балансировки	184
7.2. Метод определения массы и координат центра масс детали.	192
7.3. Метод определения осевых, центробежных моментов инерции, массы и трех координат центра масс детали	198
7.4. Выводы.	205
Список литературы	206
Глава 8. РОБОТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОСФЕРЫ.	207
<i>Ефимов С.В., Яцул С.Ф., Яцул А.С., Князев С.И.</i>	
8.1. Введение.	207
8.2. Автономные подводные аппараты.	208
8.3. Структура систем мониторинга водоемов роботизированного типа (СМВРТ).	209
8.4. Структура МБПК	209
8.5. Алгоритм планирования движения МБПК	210
8.6. Структура человеко-машинного интерфейса (ЧМИ)	211
8.7. Математические модели рулей глубины и направления и уравнения управляющих электроприводов поворота винтов	217
8.8. Управляющие силы	217
8.9. Планирование траектории движения	218
8.10. Моделирование движения МБПК по поверхности	220
8.11. Структура системы управления МБПК	221
8.12. Результаты моделирования	224
8.13. Экспериментальная оценка показателей качества мониторинга водоемов для трех способов мониторинга	226
8.14. Выводы	229
Список литературы	229

Глава 9. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	231
<i>Гаврюшин С.С., Скворцов П.А.</i>	
9.1. Введение	231
9.2. Конструкция полупроводниковых тензопреобразователей на КНС	233
9.3. Экспериментальное исследование структуры КНС.....	234
9.4. Численное моделирование упругого элемента полупроводникового тензодатчика.....	236
9.4.1. Физические свойства материалов.....	237
9.5. Методика многокритериального проектирования.....	239
<i>Список литературы</i>	<i>242</i>

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная монография является третьей в серии, посвященной новым механизмам, предназначенным для перспективных робототехнических и измерительных систем.

Первая книга была посвящена 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) и содержала работы исследователей, связанных с институтом. Во второй монографии были представлены труды авторов, работающих в различных учебных, научных и промышленных организациях. Обе монографии показывали механизмы, которые могут быть применены в различных робототехнических системах: технологических, медицинских, обучающих (тренажеры). Часть результатов носила исследовательский характер, другая часть была посвящена обзору существующих механизмов, используемых, в частности, в космосе, в сварочном производстве, экзоскелетах и др.

Третья монография содержит более расширенный круг вопросов. Она включает не только результаты, связанные с синтезом и анализом новых механизмов (в частности, речь идет о кинематических свойствах, сингулярностях), а также обзор существующих механизмов, применяемых в различных отраслях техники (в частности, речь идет о сельскохозяйственной робототехнике). Данная монография посвящена также различным устройствам, применяемым в качестве датчиков и других измерительных систем.

Задачи цифровизации требуют создания цифровых двойников изделий, разработки систем встроенной диагностики. Эти вопросы напрямую связаны с созданием новых робототехнических систем. В указанном смысле круг вопросов, рассматриваемых в данной монографии, расширен по сравнению с предыдущими изданиями. Представленные решения позволят сократить и автоматизировать процессы разработки и последующей эксплуатации технических устройств и оборудования с целью перехода предприятий к работе в условиях цифровой среды.

Монография предназначена для широкого круга читателей — студентов, аспирантов, инженеров и научных работников, занимающихся вопросами синтеза и анализа механизмов, применяемых в робототехнических системах.

ГЛАВА 1

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

*Дорохов А.С., Загоруйко М.Г., Давыдова С.А.,
Павкин Д.Ю., Чилингарян Н.О., Гришин А.А., Катаев Ю.В.*

Характерной особенностью современного развития техники является широкое внедрение методов и средств автоматизации, телемеханики и робототехники, вызванное переходом на автоматизированное и роботизированное управление различными производственными и технологическими процессами в машиностроении и сельскохозяйственном производстве, создание гибких производственных модулей, систем, комплексов и т.п. На сегодняшний день повсеместное применение роботизированной техники приобрело роль ключевого научно-технологического направления.

В данной главе рассмотрены робототехнические средства, используемые в сельском хозяйстве.

Уровень российской роботизации в настоящее время остается низок: ежегодные поставки составляют около 600 роботов, плотность роботизации — примерно 5 роботов на 10 тыс. работников (при этом средняя плотность роботизации в мире составляет около 100 роботов на 10 тыс. работников) [1].

Однако робототехника является одной из базовых технологий интеллектуализации сельского хозяйства, и интерес научного сообщества к исследованиям роботизированных систем сельскохозяйственного назначения ежегодно растет. За последние 5 лет наблюдается резкий рост числа публикаций, посвященных данной тематике (число публикуемых научных статей в 2020 г. увеличилось более чем в 3 раза по сравнению с 2015 г.). При этом основная масса исследований посвящена разработке и совершенствованию систем машинного зрения; описанию конструкции разработанных роботов и результатам их испытаний; разработке систем автономного управления роботизированными платформами; систем навигации и связи.

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Традиционно сельскохозяйственную робототехнику классифицируют по отраслям применения и видам выполняемых работ [2–4].

Классификация сельскохозяйственных робототехнических средств по отраслям следующая: применяемые в животноводстве; применяемые в растениеводстве; применяемые во вспомогательных производствах.

Наиболее роботизированной отраслью в сельском хозяйстве является отрасль животноводства, робототехнику в этой отрасли классифицируют по видам выполняемых работ: доение животных (коров, коз и т.д.); уборка навоза; подравнивание кормов; раздача кормов; стрижка овец.

Классификация робототехники в растениеводстве по видам выполняемых работ: посев сельскохозяйственных культур; опрыскивание растений ядохимикатами и удобрениями; удаление, прополка сорняков; контроль всхожести посевов; кошение кормовых культур; сбор фруктов; уход за виноградниками и садовыми деревьями; транспортировка рассады в теплицах; полив растений в теплицах; механизированные работы по подготовке почвы, выполняемые беспилотным (автономным) трактором.

Робототехнические средства, выполняющие работы во вспомогательных производствах организаций сельского хозяйства, можно разделить по следующим видам работ: мониторинг сельскохозяйственных угодий; сортировка сельскохозяйственной продукции; упаковка сельскохозяйственной продукции.

Классификация робототехники в сельском хозяйстве по характеру перемещения: стационарная; мобильная; беспилотные летательные аппараты.

По уровню специализации робототехнические средства в сельском хозяйстве можно классифицировать на специальные (выполнение одной технологической операции или обслуживания конкретного технологического оборудования); специализированные (выполнение технологических операций одного вида); универсальные (выполнение различных основных и вспомогательных операций).

Анализ научных работ показывает, что разрабатываемые в настоящее время сельскохозяйственные робототехнические системы подразделяются на многоцелевые (выполняющие несколько операций), специальные и специализированные, предназначенные для выполнения следующих основных операций: прополка, посев, обнаружение вредителей и болезней, мониторинг растений и фенотипирование, опрыскивание, сбор урожая. При разработке сельскохозяйственных роботов наибольшее предпочтение отдается специальным роботам, доля которых среди всех рассмотренных роботов составляет 44%, многофункциональные занимают 32% общего объема, а специализированные — 24%. Наибольшее предпочтение разработчиками уделяется роботам для работы с пропашными (50%) и тепличными (24%) культурами, наименьшее — с садовыми культурами (10%) и виноградниками (17%).

По типу управления робототехнику в сельском хозяйстве можно классифицировать: управляемая оператором; полуавтоматическая; автономная.

В основе разработки систем автоматики лежит производственный процесс, который представляет собой совокупность технологических процессов, направленных на создание конечного продукта. Например, в полеводстве — это возделывание и уборка зерновых; в животноводстве — откормочное содержание животных; в растениеводстве защищенного грунта — выращивание овощей на гидропонике в естественной среде и т.д.

Сельскохозяйственный производственный процесс разделяют на технологические процессы, которые, в свою очередь, делятся на рабочие операции.

Под технологическим процессом в сельскохозяйственном производстве понимают совокупность целесообразно направленных явлений, возникающих в объекте выращивания или обработки путем воздействия на него инструментов,

рабочих органов машин и орудий или других физических, химических или биологических агентов (например, нагретого воздуха, удобрений и др.). Говоря иначе, технологический процесс служит для перевода материала или продукта из исходного (начального) в требуемое (конечное) состояние или в некоторое промежуточное, которое приближает обрабатываемый материал или объект к необходимому конечному состоянию. При обработке материал лишь изменяет свое состояние, которое соответствует его свойствам, но остается самим собой (например, культивация, сушка зерна). В случае переработки материал превращается или входит в состав конечного продукта (например, кормоприготовление). Каждый технологический процесс характеризуется совокупностью функциональных связей, описываемых следующей системой уравнений в неявной форме

$$\begin{cases} Y_1 = W_1(p)X_1 + F_1(t); \\ Y_2 = W_2(p)X_2 + F_2(t); \\ \dots \\ Y_n = W_n(p)X_n + F_n(t). \end{cases} \quad (1.1)$$

где $X_1, X_2 \dots X_n, Y_1, Y_2 \dots Y_n$ — входные и выходные координаты технологического процесса; $W_1(p), W_2(p) \dots W_n(p)$ — передаточные функции элементарных технологических процессов (механических, тепловых, диффузионных и др.); $F_1(t), F_2(t) \dots F_n(t)$ — возмущающие действия.

Технологические процессы могут происходить параллельно или последовательно во времени. Каждый технологический процесс можно охарактеризовать режимами функционирования:

- установочным — подготовка объектов обработки и машин к рабочему режиму (например установка рабочих органов в положение, при котором технологический процесс протекает в заданных пределах и с заданным качеством);
- рабочим — взаимодействие объекта или машины с материалом или рабочей средой;
- биологическим (физико-химическим) — специфический сельскохозяйственный режим, связанный с длительным естественным процессом накопления внутри объекта растительной или животноводческой продукции;
- транспортным — перемещение машин, рабочих органов, животных или материала;
- режимом обслуживания (например, технический уход за машиной, зоотехническое обслуживание животных и агротехнические обеспечения жизнедеятельности растений).

В сельскохозяйственном производстве наиболее специфическими являются биологические режимы, для которых характерна непрерывность физиологических процессов образования продукции и цикличность ее получения. Такой процесс можно прервать и практически невозможно наверстать упущенное путем интенсификации следующего периода. Несмотря на специфичность и разнообразие биологических режимов, задача автоматизации их в сельском хозяйстве остается неизменной: обеспечить ход физиологических процессов таким образом, чтобы

в кратчайшие сроки при минимальных затратах труда получить наибольшее количество продукции лучшего качества.

Каждый режим состоит из технологических операций. Технологической операцией следует называть совокупность организационных и технологических действий, способствующих нормальному протеканию режима функционирования. Операция является основным этапом любого режима функционирования, от проведения которого зависят все его составляющие. В понятие операции входят трансформация энергии, а также весь комплекс отдельных механических, физических, биологических и других явлений, которые протекают в объекте или материале.

Разделение технологического процесса на технологические операции позволяет выявить продолжительность операции, очередность ее проведения, цикличность, то есть составить алгоритм технологического процесса.

Контроль и управление режимами и операциями осуществляются по информационным параметрам, измеряемым первичными преобразователями различных датчиков. Операции выполняются одновременно (параллельно или последовательно). Контроль выполнения всех операций не обязателен, контролируются только основные операции и режимы, которые характеризуют в целом, качественно и количественно, выполнение производственного процесса.

Таким образом, классификация объектов при расширении работ по автоматизации сельскохозяйственных технологических процессов и операций облегчает определение объема и очередности автоматизации, разработку типовых решений в области технологии автоматизированного поточного производства и создания технических средств автоматики. Поэтому в классификацию должны входить не только существующие процессы и объекты автоматизации, но и те, которые могут быть предложены в дальнейшем. Классификация позволяет более точно сформулировать требования к техническим средствам, выбрать рациональные принципы построения систем автоматизации сельскохозяйственных объектов и разработать общие показатели и методы определения технико-экономической эффективности автоматизации. Без научной классификации сельскохозяйственных объектов и процессов в них невозможны широкие теоретические обобщения, технико-экономические сравнения и практические оценки.

Кроме того, исходя из задач проектирования систем автоматизации и создания средств автоматики, целесообразно классифицировать сельскохозяйственные объекты по пяти существенным признакам: типу технологических процессов; взаимосвязи технологического и транспортного движения; видам технологического цикла; динамическим свойствам объекта; агрегатному состоянию обрабатываемого материала.

Классификация по типу технологических процессов (механические, тепловые, электрические, биологические, химические и гидравлические) дает возможность разработать общий подход к решению задачи автоматизации всего класса, несмотря на технологическую специфику.

По взаимосвязи технологического и транспортного движений объекты делятся на три класса: с несочетаемыми, соединенными и независимыми движениями. В объектах с несочетаемыми движениями одни установки предназначены только для транспортировки материала без его обработки, а другие осуществляют его технологическую обработку. Данные объекты относятся к низшему классу с точки зрения экономической эффективности автоматизации. К более высокому классу

относятся объекты, в которых транспортное и технологическое движение соединены и находятся в тесной взаимосвязи, например, обработка или переработка материалов происходит во время их транспортировки. Для этого класса установок автоматизация позволяет существенно повысить их производительность и обеспечить оптимальный режим работы. Объекты высшего класса имеют независимое движение. Транспортное движение может быть сделано ими во время обработки, а технологическое движение — во время транспортировки. Автоматизация этого класса объектов обеспечивает непрерывность производственного процесса и наибольшую производительность.

На выбор исполнительных и первичных преобразователей систем автоматики влияет агрегатное состояние обрабатываемого материала. При разработке технических средств автоматики сельскохозяйственного назначения учитывается тот факт, что агрегатное состояние материала на входе в объект может коренным образом отличаться от состояния на выходе с объекта.

По мере развития уровня сельскохозяйственного производства число технологических процессов и операций, а также средств контроля и управления неуклонно растет. Поэтому необходимо постоянно совершенствовать и расширять классификацию сельскохозяйственных объектов с учетом особенностей и требований автоматизации, которая должна способствовать выработке общих требований к техническим средствам, выбору рациональных принципов построения систем и средств автоматики, разработке общих показателей и методов определения технико-экономической эффективности автоматизации, а следовательно, и роботизации сельскохозяйственных процессов.

1.2. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА В САДОВОДСТВЕ

В настоящее время процесс цифровизации сельскохозяйственного производства, являющийся логическим продолжением процесса автоматизации, выступает драйвером отрасли, для качественного развития которой необходимо не только разрабатывать и внедрять, но и постоянно совершенствовать новые технические и технологические решения, в том числе связанные с управлением отдельными системами, процессами и объектами.

На современном этапе развития науки и техники различные технологические процессы производятся при помощи технических средств или их групп, управляемых при помощи автоматизированных систем управления, с участием человека, либо с использованием систем автоматического управления, без участия оператора.

Разработка таких систем, принципов их работы и модернизация существующих решений, морально и технически устаревших, является важной научной и прикладной задачей, позволяющей в конечном итоге обеспечить качественный и количественный рост основных индикаторных и экономических показателей как отрасли в целом, так и отдельных хозяйствующих субъектов в частности.

Продукционные процессы в сельскохозяйственном производстве, результирующим выходным параметром которых является совокупность объема товарных садовых культур, в частности плодов яблони, являются сложной

многокритериальной системой, улучшение качественного выхода различных показателей которой требует разработки принципиально новых методов и форм организации управления имеющимися и разрабатываемыми технико-технологическими средствами. В частности, автоматизация сбора плодов яблони садовой позволит добиться как повышения урожайности, так и рентабельности производства.

Для оптимизации уровня использования технологических возможностей сельскохозяйственных агрегатов необходимы широкая автоматизация производственных процессов и развитые системы компьютерного управления.

На базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработан манипулятор для сбора урожая плодов яблони с системой интеллектуального управления (рис. 1.1). Манипулятор имеет 3 степени свободы, перемещение звеньев возможно как в горизонтальной, так и вертикальной плоскости. Это достигается следующими типами движения: движение вертикальной стойки манипулятора вокруг своей оси в прямом и обратном направлении, подъем и опускание стрелы устройства с помощью тросового привода, выдвижение вперед и назад подвижной части стрелы манипулятора с установленным плодовым захватом. Захват при этом обладает демпфирующими свойствами, позволяющими осуществлять схватывание объекта без применения дополнительных приводов. Характеристики манипулятора: вылет руки без учета захвата — 1400 мм, с учетом захвата — 1490 мм, максимальная грузоподъемность — 500 г, скорость движения — 25° в секунду, поворот по оси 270° [5].

Система интеллектуального управления манипулятором для сбора плодов разделена на несколько блоков. К ним относятся узел стереопар, являющийся основной частью, направленной на взаимодействие с внешней средой, электронный блок управления, включающий два отдельных контура управления, обусловленных программными и аппаратными особенностями, блок управления положением вертикальной оси (стойки) роботизированного устройства, блок управления положением подъемника (стрелы) роботизированного устройства, блок управления положением захвата.

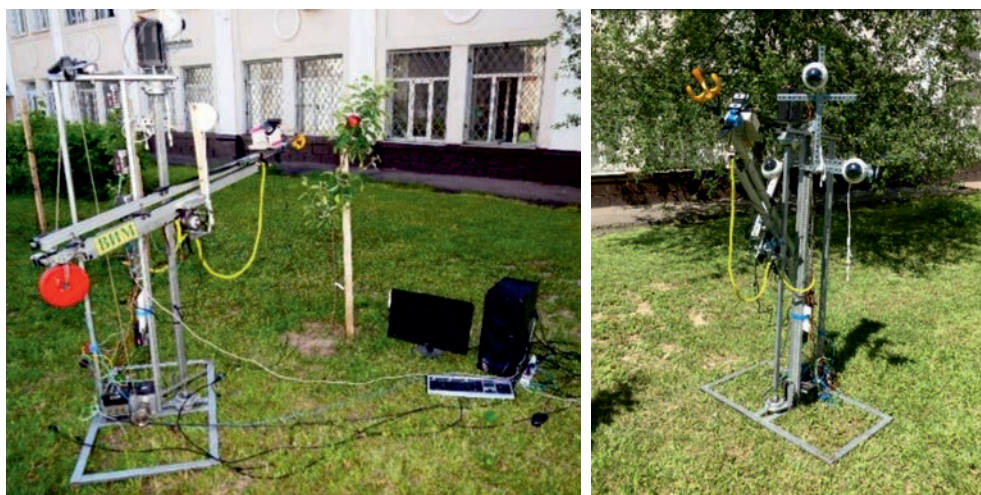


Рис. 1.1. Манипулятор для сбора плодов

Различные сенсорные устройства, в частности датчики обратной связи и видеокамеры, передают собираемую информацию в общую память манипулятора. Электронный блок управления использует полученную информацию при формировании команд на передачу управляющих воздействий исполнительным механизмам. Полученные данные используются блоком выбора при определении последовательности сбора распознанных плодов и формировании соответствующих управляющих воздействий. Наиболее приоритетным считается объект, имеющий больший процент распознавания, т.е. имеющий наибольшую вероятность быть отнесенным к искомому классу или группе классов объектов.

Для сбора, сортировки и упаковки урожая земляники садовой с системой интеллектуального управления разработан дельта-робот с применением технического зрения, позволяющий увеличить скорость и обеспечить высокую точность выполнения операций (рис. 1.2) [6].



Рис. 1.2. Дельта-робот для сбора, сортировки и упаковки урожая земляники садовой с системой интеллектуального управления

В связи с тем что привод находится в основании робота, а рычаги сделаны из легких композитных материалов, движущиеся части дельта-робота имеют очень малую инерцию. Это позволяет достичь значительных ускорений — до 30g и скоростей до 10 м/с.

Дельта-робот состоит из трех рычагов, прикрепленных посредством карданных шарниров к основанию. Ключевой особенностью является использование параллелограммов в конструкции манипулятора, что позволяет сохранять пространственную ориентацию исполнительного устройства робота.

Дельта-робот является параллельным роботом, что означает наличие более одной кинематической цепи от основания к исполнительному устройству робота. Робота можно рассматривать как пространственное обобщение пантографа. Он имеет три поступательных и одну вращательную степень свободы. Параллелограммы ограничивают движения конечной платформы для четкой отработки перемещения (перемещение только по осям X , Y и Z). Основание робота монтируется над рабочей зоной. Все силовые приводы смонтированы в этом основании. Из этого основания выходят три рычага с шарнирами посередине. Рычаги сделаны из легких композитных материалов. Концы рычагов прикреплены к небольшому треугольному основанию. Приведение в движение входных связей перемещает треугольную платформу в направлении X , Y или Z . Привод может быть осуществлен линейным или вращающим двигателем.

Для выполнения технологических операций в садоводстве и овощеводстве разработана универсальная роботизированная платформа для садоводства и овощеводства [7]. Платформа осуществляет: мониторинг насаждений, опрыскивание насаждений, обработку почвы, роботизированный сбор и транспортировку урожая. Новизна разработки заключается в оптимальных конструктивных параметрах и комплексированной системе управления, обеспечивающих ее универсальность, многофункциональность при выполнении технологических операций в беспилотном режиме.

Универсальная роботизированная платформа конструктивно состоит из рамы со стойками, энергетической установки, электротрансмиссии, блоков электронной системы управления. В движение универсальную роботизированную платформу приводят 2 мотор-редуктора, установленные на задних колесах. Питание мотор-редукторов осуществляется за счет бензогенератора и силовой батареи, что позволяет работать платформе при полной нагрузке не менее 8 часов непрерывной работы и обеспечивает восстановление заряда АКБ не более чем за два часа. Система рулевого управления представляет собой рулевой редуктор червячного типа с шаговым двигателем и контроллером питания шагового двигателя.



Рис. 1.3. Универсальная роботизированная платформа

Электронная система управления состоит из блока управления ходовыми двигателями, блока рулевого управления с шаговым двигателем, блока управления электронным дифференциалом, блока управления автоматическим включением

и выключением энергетической установки (бензогенератора) и балансирования зарядки аккумуляторных батарей. Система управления движением, энергоустановкой и электротрансмиссией, позволяют осуществлять работу платформы в трех режимах: дистанционное управление, автономный режим по электронным картам местности с использованием сигналов GPS, а также в беспилотном режиме с помощью модулей машинного зрения. Система управления размещается внутри корпуса платформы.

Для проведения технологической операции мониторинга и транспортировки собранного урожая в междурядьях садовых насаждений разработана роботизированная платформа для транспортировки урожая с системой технического зрения и нейронной сетью с реализацией сценария следования за человеком [8].

На разработанную платформу установлена web-камера для определения положения человека в пространстве и расчета смещения человека относительно центра кадра. Распознавание человека в кадре, полученном с web-камеры, происходит с помощью нейронной сети, обученной на распознавание фигуры человека. После распознавания человека в кадре по полученным координатам алгоритм рассчитывает смещение человека относительно центра кадра и передает управляющий сигнал на драйвер двигателей (рис. 1.4). Web-интерфейс реализован с использованием языка разметки гипертекста (HTML), каскадной таблицы стилей (CSS), языка программирования Python3 и фреймворка Flask.

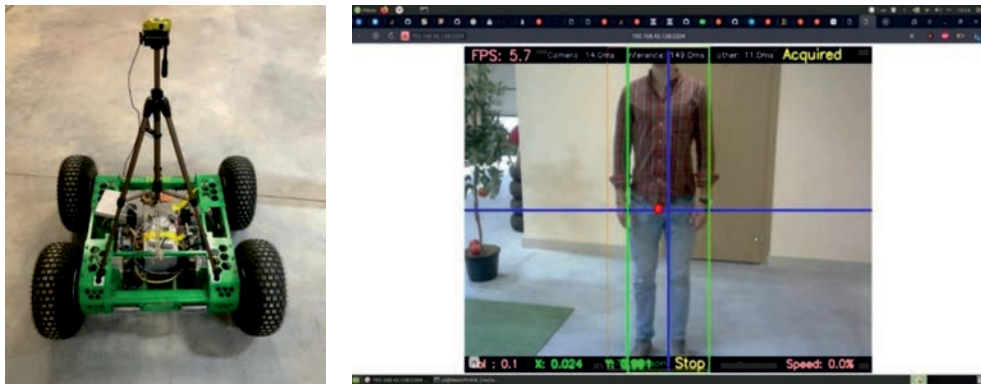


Рис. 1.4. Внешний вид платформы и web-интерфейса системы управления

Согласно реализованному алгоритму, считается, что платформа достигла цели (доехала до человека), если человек находится в зоне, выделенной зеленым квадратом и центр распознанной фигуры находится в диапазоне $[0; 15]$ px по оси Y относительно центра кадра. В случае если человек не находится в «зеленой зоне», платформа переходит в режим следования. Нейронная сеть обучена на датасете из 4000 изображений, содержащих фотографии людей. Для разметки датасета был использован web-сервис Labelbox. Нейронная сеть на вход принимает изображение с размером 416×416 пикселей. Изображение с камеры робототехнического устройства передается на ноутбук, посредством топики ROS, на котором происходит распознавание с помощью нейронной сети, затем определяются координаты

человека на изображении, которые обратно отправляются на контроллер роботизированной платформы.

Другой разработкой для реализации транспортных и вспомогательных работ в развитой и ограниченной инфраструктуре сельскохозяйственных предприятий, включая объекты городского сельского хозяйства и агрохолдинги, является универсальное малогабаритное роботизированное транспортно-технологическое средство с экологически безопасной энергоустановкой в виде автоматизированного электропривода и гусеничной ходовой системой (рис. 1.5) [9].



Рис. 1.5. Общий вид роботизированного транспортно-технологического средства с автоматизированным электроприводом

Основные элементы роботизированного транспортно-технологического средства с автоматизированным электроприводом: электродвигатель-редукторы постоянного тока; механические передачи привода; аккумуляторные батареи питания двигателей и бортовой электроники; зарядное устройство; блоки управления двигателями; приемник Wi-Fi-сигнала.

Назначение — автономное выполнение транспортно-технологических операций в сельскохозяйственном производстве за счет автоматизации и с обеспечением экологической безопасности. Роботизированное транспортно-технологическое средство работает в режиме дистанционного управления в зоне радиосигнала Wi-Fi с помощью мобильного приложения или персонального компьютера в полевых условиях и закрытых помещениях тепличных, подсобных хозяйств, ферм, хранилищ.

Новизна заключается в техническом решении автоматизированного электропривода гусеничного шасси и электронной системы управления движением посредством радиосигнала Wi-Fi и с применением радиочастотных меток; в алгоритме и программном обеспечении системы управления движением. При этом роботизированное транспортно-технологическое средство с автоматизированным электроприводом позволяет сократить время транспортировки груза на 10–15% за счет движения по оптимальной траектории, заложенной программой;

возможность агрегатирования с машинами и орудиями в рамках класса 0,2; возможность работы в условиях переувлажненных и слабонесущих почв за счет повышенной проходимости и давления на почву менее 50 кПа; производительность работ по культивации — 1,8 га за 4 часа непрерывной работы до разряда батарей; максимальная масса перевозимого груза 500 кг.

1.3. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Для ухода за овощными посадками на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ спроектировано роботизированное устройство, позволяющее качественно вносить средства защиты за счет повышенной точности наведения рабочего органа с помощью системы компьютерного зрения (рис. 1.6). Модульность конструкции роботизированного гусеничного опрыскивателя для обработки сельскохозяйственных культур позволяет увеличивать или уменьшать рабочую область робота в зависимости от агротехнических задач.

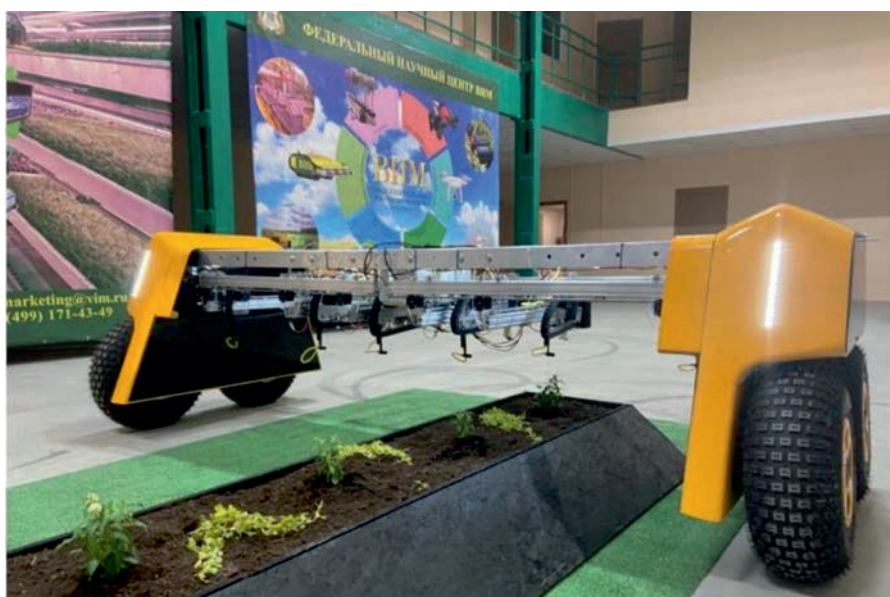


Рис. 1.6. Автономное роботизированное устройство дифференцированного внесения средств защиты на сельскохозяйственные культуры

Рабочий орган устройства (рис. 1.7) представляет из себя многофункциональный инструмент, оснащенный необходимыми для работы датчиками и устройствами, и находится на подвижной каретке, что обеспечивает точную регулировку в пространстве [8]. Привод кареток осуществляется шаговым двигателем через зубчато-реечную передачу. Конструкция фланцев для рабочих органов позволяет установить различные форм-факторы рабочих органов для внесения химических веществ.

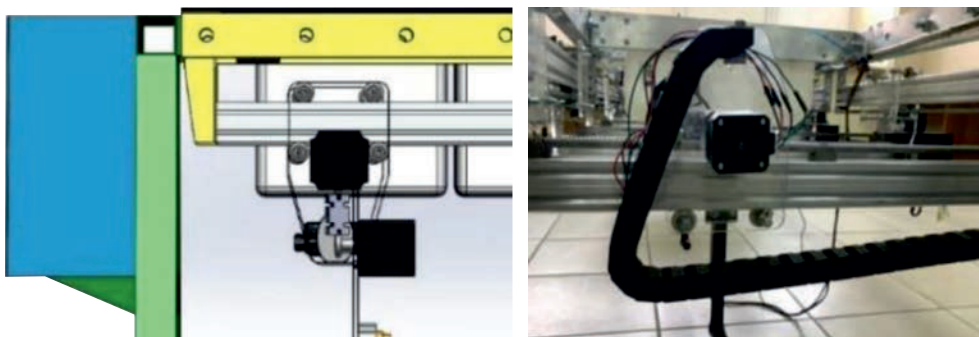


Рис. 1.7. Рабочий орган системы впрыска химических веществ автономного полевого робота

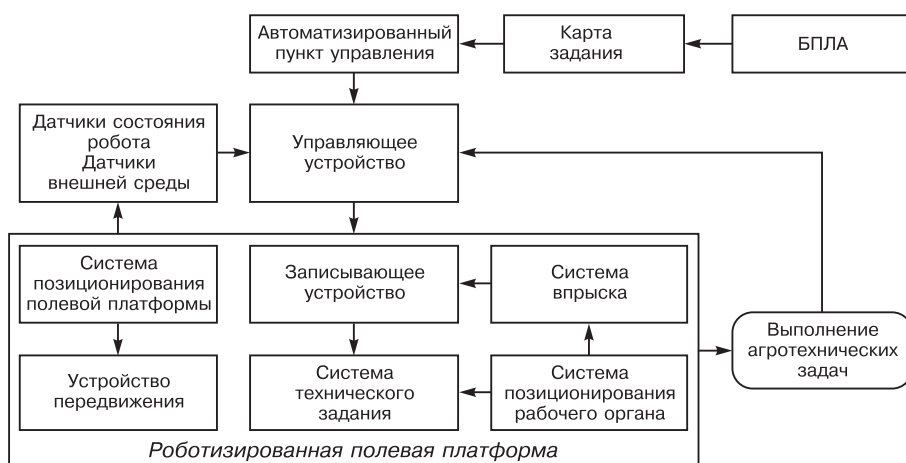


Рис. 1.8. Схема системы управления автономного полевого робота дифференцированного внесения агрохимических средств

Схема системы управления автономного полевого робота дифференцированного внесения агрохимических средств представлена на рис. 1.8. Верхний уровень рассчитывает траекторию движения робота, определяет местоположение робота на карте задания. Для определения позиции робота на карте используются ВТ маяки и два GNSS RTK приемника. Один из приемников используется в режиме «базовая станция», второй устанавливается на роботизированную платформу для наиболее точного определения местоположения. Передаваемые данные — это измерения фазовой коррекции в реальном времени для приемника GNSS, установленного на платформу. Когда одна пара приемников находится на одной высоте, то высока вероятность того, что атмосферные помехи будут одинаковы для обоих. Основываясь на измеренных координатах, базовая станция вычисляет поправки к координатам и передает их в систему управления.

Управляющее устройство получает данные с датчиков, обрабатывает их и рассчитывает местоположение робота, а также траекторию его движения. Команды на движение робота или выполнение агротехнической задачи передаются на нижний уровень системы управления. Нижний уровень состоит из устройства передвижения с контроллером моторов, системы позиционирования рабочего органа. Контроллер устройства передвижения принимает скорость робота в м/с с помощью UART, переводит скорость в ШИМ сигнал для подачи на моторы. Расчет позиции растения происходит с помощью системы технического зрения. На рабочий орган установлено записывающее устройство (камера). После вычисления позиции растения рабочий орган «зависает» над растением, включается система впрыска. Во время работы системы впрыска робот движется с постоянной скоростью.

Другим роботизированным средством для обработки сельскохозяйственных культур является самоходный гусеничный опрыскиватель (рис. 1.9) [10]. Роботизированный гусеничный опрыскиватель для обработки сельскохозяйственных культур включает самоходное гусеничное шасси с электроприводом и многофункциональный четырехсекционный опрыскиватель, что в совокупности позволяет получить автономное средство малой механизации, призванное исключить воздействие вредных химических веществ и вибраций на организм человека. Используется в садоводстве, селекции, на малоконтурных полях площадью не более 2 га.



Рис. 1.9. Роботизированный гусеничный опрыскиватель для обработки сельскохозяйственных культур

Устройство включает в себя: раму, два независимых гусеничных движителя, выполненных с возможностью регулирования колеи, снабженных мотор-редукторами, систему управления, систему питания, систему опрыскивания, содержащую емкость для рабочего раствора, и штанги, выполненные с возможностью регулировки высоты и расположения четырех распыливающих узлов в зависимости

от вида обрабатываемых растений, при этом каждый узел выполнен в виде купола, содержащего три форсунки. Бортовая электронная система управления также содержит приемник-передатчик Wi-Fi-сигнала для осуществления дистанционного управления. Привод роботизированного гусеничного опрыскивателя полностью электрический с применением свинцово-кислотных аккумуляторов в качестве источника энергии и набором необходимой преобразовательной техники.

Устройство осуществляет проведение в полуавтоматическом или ручном дистанционном режиме химической обработки от вредителей и сорняков и подкормки растений жидкими минеральными удобрениями.

Новизна заключается в объединении в одной технологической машине комплекса логических и исполнительных компонентов, необходимых и достаточных для автоматизации, а впоследствии и роботизации отдельной технологической операции в сфере сельскохозяйственного производства, а именно распределения химически активных веществ, находящихся в виде раствора или жидкой фракции в требуемой зоне с необходимой периодичностью и контролем количества.

Назначение устройства состоит в опрыскивании растений при работе в междурядьях в полуавтоматическом режиме при отсутствии оператора в зоне обработки и исключения его взаимодействия с вредными веществами; снижении трудоемкости работ; снижении уплотняющего воздействия на почву в 1,5–2 раза; переходе к возобновляемым источникам энергии с исключением контакта растений с продуктами сгорания топлива; повышении скорости выполнения работ в 1,3–1,5 раза.

1.4. РОБОТИЗАЦИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ОВОЩЕЙ В ЗАЩИЩЕННОМ ГРУНТЕ

В северных, а также более умеренных широтах существует большой разрыв между распределением светового потока и количеством тепла. Световые условия дают возможность производить овощи в течение 9–10 мес., в то время как температурные ограничивают срок возделывания холодостойких овощей до 5–6 мес., а более требовательных к повышенным температурам — до 3–4 мес.

Уменьшение разрыва между тепловыми и световыми периодами служит одной из основных задач защищенного грунта. Кроме того, он позволяет увеличить период вегетации как путем выращивания рассады теплолюбивых растений, так и путем возделывания всей культуры в защищенном грунте.

Тепло в защищенном грунте служит не только фактором, необходимым для роста растений, но и представляет собой форму энергии с точки зрения его использования для выгонки растений. Применение искусственного тепла является характерной особенностью защищенного грунта.

Роботизация процессов выращивания в защищенном грунте заключается в автоматизации процессов обогрева воздуха, почвы и т.д.

В настоящее время для всех сооружений защищенного грунта используют три способа обогрева — биологический, солнечный и технический.

Рассматривая сооружения защищенного грунта, можно предположить, что наиболее сложным объектом для автоматизации является регулирование теплового режима приземного слоя утепленного грунта вследствие излучения почвой

тепла в воздух. Однако многолетние опыты опровергают сказанное. Это объясняется тем, что излучение нагретой почвы встречает противоизлучение приземного «сетчатого» облака, образованного испарением почвенной влаги или специально распыленной теплой воды. Управлять тепловым балансом поверхности почвы в этом случае можно путем усиления мощности приземного «сетчатого» облака и его температуры. В условиях ветрозащитных заграждений при скорости ветра, близкой к конвективной (0,1–0,7 м/с), один литр распыленной воды с диаметром капель 0,1 мм создает поверхность «сетчатого» приземного облака, равную 60 м².

Автоматизация (роботизация) выращивания растений на нейтральных средах (гидропоника) заключается в следующем.

Сегодня в тепличном хозяйстве применяются подвижные автоматические системы, а также роботы-конвейеры, которые выполняют большой объем работ. Спектр деятельности роботов обширен: их можно использовать для приготовления субстрата, посева семян, предварительного опрыскивания растений удобрениями, обеззараживания растений, сбора готовой продукции, для сортировки, укладки и упаковки. Также роботы могут взвешивать и транспортировать товар, фиксировать его количество.

Предпосылками к внедрению робототехники в сельском хозяйстве являются: необходимость повышения производительности труда на сельскохозяйственном производстве; ужесточение требований по безопасности на сельскохозяйственном производстве; необходимость повышения качества сельскохозяйственной продукции; необходимость повышения содержательности труда в сельском хозяйстве; снижение издержек на оплату труда [11].

Роботизация, внедряемая и применяемая на сегодняшний день в сельском хозяйстве, заключается в работе с живыми организмами и обеспечении безопасности для выращиваемой продукции.

В тепличных комплексах основными ячейками общего процесса, в которых можно применять автоматизацию и роботизацию, являются самые трудоемкие ниши, такие как: операции по подготовке почвы (субстрата), семян (ростков), посев, уход за выращиваемой продукцией, сортировка, калибровка, упаковка и хранение. Однотипная работа с плодовыми и овощными культурами осуществляется вручную и требует высокой степени концентрации.

Сегодня возможна частичная или полная автоматизация не только в процессе выращивания растений, но и в зонах сортировки и упаковки, работа в которых является для людей довольно трудозатратной [2].

Традиционные способы посева сопряжены со значительными трудозатратами и перерасходом посевного материала. Решить все эти проблемы можно за счет использования систем так называемого автономного точного посева. Для автоматизации процесса посева в условиях защищенного грунта применяются автоматические линии для посева семян (рис. 1.10) [12].

К преимуществам данного типа линий относятся: возможность корректировать количество грунта с тем, чтобы получить на выходе заполнение низкой, средней или высокой плотности; наличие системы очистки лотков от избыточного грунта, который полностью перерабатывается без каких-либо потерь; посевная система разработана с целью обеспечения высокой точности при работе с семенами малого и большого размера; второй барабан для одновременного посева или дозированной добавки химических гранул.



Рис. 1.10. Линия для посева семян Alfa

Применение точного посева на автоматических линиях позволяет исключить трудоемкую операцию по прореживанию всходов, которая требует привлечения большого количества работников.

В питомниках закрытого грунта, где из семян выращивают овощные и цветочные культуры для последующей пересадки в открытый грунт или другие теплицы, выполняется большое количество монотонных операций, с которым отлично справляются роботы.

Одна из таких операций — прививка растений, которая стала менее трудозатратной с появлением на рынке робота для прививания растений EMP-300 испанской фирмы Conic System S.L. (рис. 1.11) [13].



Рис. 1.11. Робот для прививания растений EMP-300 Conic System S.L.

Производительность данного робота составляет от 400 до 600 трансплантатов в час. Точная конструкция с простой механикой позволяет обеспечить максимальную точность и надежность каждого трансплантата.

Не менее затратной операцией для защищенного грунта является удаление сорняков. Французский стартап, базирующийся в Тулузе, занимается разработкой роботов для прополки. Все они призваны снять физическую нагрузку с людей и уменьшить зависимость от химических гербицидов (рис. 1.12) [14].

На сбор урожая уходит примерно одна пятая всего времени, затрачиваемого на работу в теплицах. Разработчики агроботов Root AI из Бостона представили агробота Virgo (рис. 1.13), который может собирать как клубнику и другие ягоды, так и огурцы с помидорами [15].



Рис. 1.12. Помощник по сельскому хозяйству для трудоемких и трудных задач Oz



Рис. 1.13. Агробот Virgo от Root AI

В отличие от людей, субъективно оценивающих спелость плода, машина собирает только тот урожай, который отвечает необходимым требованиям.

Итоговый результат применения таких роботов — уменьшение численности персонала, сокращение издержек производства, повышение производительности.

В роботизации по выращиванию растений (защищенный грунт и гидропоника) достигнуты определенные успехи, особенно в регулировании температуры, влажности, освещенности и частичного газового состава в помещениях.

В гидропонике разрабатывают и внедряют системы комплексного контроля, управления и регулирования климатических условий выращивания растений. Это регулирование станет оптимальным только тогда, когда роботизация достигнет такого уровня, при котором само растение будет изменять условия внешней среды.

1.5. РОБОТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Повышение эффективности использования капитальных вложений является ключевым вопросом развития современных агротехнологий, при этом молочное животноводство не является исключением. Опыт европейских стран с развитым молочным скотоводством и ряда регионов России показал, что применение систем роботизации позволяет существенно (в 2–3 раза) повысить производительность труда и качество обслуживания животных. Сегодня спектр роботизированных машин для животноводства, предлагаемый мировыми производителями технологического оборудования (Gea Farm Technologies, Lely Group, Delaval и др.), представлен не только доильными роботами, но и машинами, осуществляющими процессы приготовления и раздачи кормов, уборку навоза, работу вентиляционных, нагревательных и отопительных установок, а также машины для обслуживания кормового стола.

На животноводческих фермах затраты труда на подготовку и раздачу кормов составляют около 40% от общих затрат, связанных с уходом за животными. Автоматизация процессов приготовления кормовой смеси, подразумевающая выполнение операций по дозированию и смешиванию компонентов кормовой смеси, может сокращать трудозатраты механизированного труда до 3 раз и полностью исключить влияние человеческого фактора.

С точки зрения разработки систем роботизации робот-кормораздатчик и робот для обслуживания кормового стола относятся к категории мобильных роботов, которые представляют собой колесную роботизированную платформу с необходимым технологическим оборудованием, перемещающуюся по заданному маршруту. Тензодатчики осуществляют измерение массы попадаемых компонентов кормовой смеси в бункере (для робота-кормораздатчика); контроллер управляет процессом загрузки и смешивания кормов; система позиционирования осуществляет контроль соблюдения траектории перемещения робота; центральная плата управления обеспечивает связь между всеми элементами системы.

Автономность робота-кормораздатчика обеспечивается роботизированной кормовой кухней, представляющей комплекс машин и оборудования, обеспечивающий загрузку компонентов корма в кормораздатчик.

Для обеспечения автономного позиционирования разрабатываемого робота была разработана траектория его движения вдоль кормового стола (рис. 1.14).

Движение робота начинается с точки (*S*) (см. рис. 1.14) — этот участок является местом зарядки аккумуляторной батареи робота и местом наполнения бункера дозатора кормовыми добавками.

Участок (*A*) — робот движется по прямой, в этот момент привод шнека-толкателя и дозатора отключен, привод правого и левого колеса вращается с постоянной скоростью.

Участок (*B*) — робот движется по прямой вдоль кормового стола с незначительными отклонениями в зависимости от степени разброса корма животными. В процессе движения по участку (*B*) шнек-толкатель вращается с частотой оборотов от 80 до 120 об/мин, а также осуществляется процесс дозирования кормовых добавок из бункера дозатора. Привод ведущих колес вращается с одинаковой частотой вращения.