УДК 631.52:62

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ТЕПЛИЦЫ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

Самадов А.Р.

Старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление» НГГТУ, PhD (0000-0002-2069-4375)

Муродуллаева Ш.Ш

Докторант кафедры «Автоматизация и управление» НГГТУ,(0009-0001-3386-5305)

Annotatsiya. Maqolada modul arxitekturaga asoslangan issiqxona mikroiqlimining intellektual mehatronik boshqaruv tizimini ishlab chiqish ko‘rib chiqilgan. Mavjud mexanik, elektron va intellektual boshqaruv tizimlari tahlil qilinib, ularning boshqaruv aniqligi, moslashuvchanligi va energiya samaradorligi nuqtai nazaridan afzalliklari va cheklovlari aniqlangan. Modul tizim konsepsiyasi taklif qilinib, unga sensor modullari, ijro etuvchi mexanizmlar, kommunikatsiya tugunlari va noaniq mantiq, prediktiv boshqaruv va neyron tarmoqlari modellarini amalga oshiruvchi intellektual yadro kiritilgan. Mehatronik integratsiyaning barcha tizim komponentlarining uyg‘un ishlashini, moslashuvchanlikni, kengaytirilish imkoniyatini va yangi texnologiyalarni joriy etish imkoniyatini ta’minlashdagi roli ko‘rsatildi. Ishlab chiqilgan yondashuv mikroiqlimni adaptiv, energiya tejovchi va yuqori aniqlik bilan boshqarishni ta’minlaydi, bu esa issiqxona xo‘jaligining samaradorligini oshiradi.

Kalit so‘zlar: issiqxona, mikroiqlim, intellektual tizim, modul arxitektura, mehatronik integratsiya, noaniq mantiq, prediktiv boshqaruv.

Аннотация. В статье рассматривается разработка интеллектуальной мехатронной системы управления микроклиматом теплицы на основе модульной архитектуры. Проведен анализ существующих механических, электронных и интеллектуальных систем управления, выявлены их преимущества и ограничения с точки зрения точности регулирования, адаптивности и энергоэффективности. Предложена концепция модульной системы, включающей сенсорные модули, исполнительные механизмы, коммуникационные узлы и интеллектуальное ядро, реализующее алгоритмы нечеткой логики, предиктивного управления и нейросетевых моделей. Показана роль мехатронной интеграции в обеспечении согласованной работы всех компонентов системы, гибкости, масштабируемости и возможности внедрения новых технологий. Разработанный подход обеспечивает адаптивное, энергосберегающее и высокоточное управление микроклиматом, повышая эффективность тепличного хозяйства.

ISSN 3030-3907

Ключевые слова: теплица, микроклимат, интеллектуальная система, модульная архитектура, мехатронная интеграция, нечеткая логика, предиктивное управление.

Annotation. The article discusses the development of an intelligent mechatronic system for controlling the greenhouse microclimate based on a modular architecture. An analysis of existing mechanical, electronic, and intelligent control systems was conducted, identifying their advantages and limitations in terms of control accuracy, adaptability, and energy efficiency. A concept of a modular system is proposed, including sensor modules, actuators, communication nodes, and an intelligent core implementing fuzzy logic algorithms, predictive control, and neural network models. The role of mechatronic integration in ensuring coordinated operation of all system components, flexibility, scalability, and the possibility of implementing new technologies is demonstrated. The proposed approach provides adaptive, energy-efficient, and highly accurate microclimate control, enhancing the efficiency of greenhouse farming.

Keywords: greenhouse, microclimate, intelligent system, modular architecture, mechatronic integration, fuzzy logic, predictive control

Введение.

Тепличное хозяйство является одной из наиболее ресурс затратных отраслей агропромышленного комплекса, поскольку поддержание оптимальных условий выращивания растений требует постоянного контроля и регулирования температуры, влажности, уровня освещённости, концентрации CO_2 и других параметров. В условиях глобального изменения климата, роста цен на энергоресурсы и увеличения требований к качеству и стабильности сельскохозяйственной продукции роль автоматизации тепличных процессов значительно возрастает [1,2].

Современные тепличные комплексы сталкиваются с рядом проблем: высокой вариативностью внешних климатических условий, трудоёмкостью ручного мониторинга, необходимостью точного соблюдения технологических режимов и минимизации человеческого фактора [3,4]. Ручное управление микроклиматом зачастую приводит к колебаниям параметров, что негативно влияет на урожайность, замедляет рост растений и повышает риск возникновения болезней.

Автоматизация позволяет обеспечить непрерывный и точный контроль ключевых агротехнических параметров, снизить энергозатраты за счёт оптимизации работы систем отопления, вентиляции и освещения, а также значительно повысить стабильность и предсказуемость производственного процесса [5,6,7]. Интеллектуальные системы управления с элементами машинного обучения и предиктивного анализа способны адаптироваться к

ISSN 3030-3907

внешним изменениям, предсказывать поведение микроклимата и выбирать наиболее эффективные режимы регулирования.

В условиях активного внедрения технологий «умного сельского хозяйства» (Smart Farming) автоматизированные и мехатронные системы становятся ключевым инструментом повышения конкурентоспособности тепличных хозяйств. Их использование позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению, обеспечивая устойчивость, экономичность и высокое качество продукции. Всё это определяет высокую актуальность разработки интеллектуальных мехатронных систем управления микроклиматом теплиц.

Современные тепличные комплексы требуют высокой гибкости, точности и адаптивности систем управления микроклиматом. Однако большинство традиционных решений основываются на монолитных или слабо структурированных архитектурах, в которых функциональные компоненты — сенсорные подсистемы, исполнительные механизмы, контроллеры и коммуникационные узлы — жестко связаны между собой. Такая организация затрудняет модернизацию, масштабирование и интеграцию новых технологий, что ограничивает потенциал повышения эффективности тепличного хозяйства.

Создание модульной мехатронной архитектуры является необходимым условием для повышения универсальности и расширяемости систем климат-контроля. Модульный подход позволяет разделить систему на автономные функциональные блоки, каждый из которых выполняет строго определённые задачи: измерение параметров микроклимата, обработка данных, управление приводами, обмен информацией или выполнение интеллектуальных алгоритмов. Это не только упрощает обслуживание и замену отдельных элементов, но и обеспечивает возможность внедрения новых модулей без необходимости полной переработки существующей системы.

Кроме того, модульная архитектура позволяет адаптировать систему под разные типы теплиц, технологические процессы и виды выращиваемых культур. В зависимости от агротехнических требований можно использовать различные типы сенсоров, актуаторов, алгоритмов регулирования и коммуникационных протоколов. Такая конфигурируемость делает мехатронную систему универсальной платформой, способной функционировать как в малых фермерских хозяйствах, так и в крупных промышленных тепличных комплексах.

Также важным аргументом в пользу модульности является возможность интеграции интеллектуальных методов управления и технологий Интернета вещей. Добавление новых функций — предиктивного

ISSN 3030-3907

анализа, нейросетевых прогнозов, цифровых двойников — требует расширения вычислительных возможностей системы, что в монолитных структурах зачастую невозможно или экономически нецелесообразно. Модульная архитектура позволяет плавно наращивать интеллектуальный потенциал за счёт подключения дополнительных вычислительных или аналитических модулей.

Таким образом, переход к модульной мехатронной архитектуре является ключевым этапом в развитии современных систем управления микроклиматом теплиц. Он обеспечивает гибкость, масштабируемость, экономическую эффективность и готовность к дальнейшему внедрению технологий «умного земледелия», что определяет необходимость разработки таких систем.

Материалы и методы.

Системы управления микроклиматом в теплицах прошли длительный путь развития — от простейших механических устройств до современных интеллектуальных комплексов, использующих прогнозные модели и машинное обучение. Анализ существующих решений позволяет выявить их преимущества и недостатки, а также определить направления совершенствования мехатронных архитектур.

Механические системы являются наиболее простыми и исторически первыми средствами регулирования микроклимата. К ним относятся термостатические устройства с биметаллическими пластинами, автоматические форточки с газовыми расширителями, механические регуляторы вентиляции, гравитационные и упрощённые приводные механизмы. Механические решения подходят для небольших теплиц, однако они не отвечают требованиям современных высокотехнологичных хозяйств.

Электронные системы автоматически регулируют работу вентиляции, отопления, освещения и полива на основе данных, получаемых от датчиков. В их состав входят электронные контроллеры (ПЛК, микроконтроллеры), цифровые и аналоговые датчики температуры, влажности, CO_2, приводные механизмы с электрическим управлением, интерфейсы передачи данных. Электронные системы являются наиболее распространёнными и надёжными, однако они требуют совершенствования с точки зрения интеллектуального анализа данных.

Интеллектуальные системы представляют собой следующий этап эволюции климат-контроля, опирающийся на методы искусственного интеллекта, нечеткую логику, экспертные системы, нейросетевые прогнозы и IoT-инфраструктуру. К ключевым компонентам таких систем относятся распределённые сети сенсоров и исполнительных устройств,

ISSN 3030-3907

вычислительные модули с алгоритмами самообучения, модели предиктивного управления, системы удалённого мониторинга и аналитики, цифровые двойники тепличных процессов. Интеллектуальные системы позволяют достигать максимальной продуктивности тепличных комплексов и являются основой концепции «умного земледелия».

Современная тенденция заключается в переходе от традиционных электронных систем к интеллектуальным, обладающим адаптивностью, прогностическими возможностями и способностью к самообучению. Анализ существующих решений показывает необходимость разработки модульной мехатронной архитектуры, которая позволит объединить надёжность электронной автоматизации и преимущества интеллектуальных технологий.

Каждый модуль выполняет свою задачу, используя стандартизированные интерфейсы для обмена данными и взаимодействия с другими элементами системы. Это обеспечивает независимость разработки и обслуживания отдельных подсистем. Количество модулей и их функциональность могут увеличиваться без изменения базовой структуры системы. Дополнение новыми датчиками, исполнительными механизмами или аналитическими компонентами требует лишь подключения новых модулей.

Использование стандартизированных протоколов обмена данными (Modbus, MQTT, CAN, RS-485, ZigBee) обеспечивает совместимость модулей разных производителей и облегчает интеграцию внешнего оборудования. Конкретная комбинация модулей может адаптироваться под тип теплицы, климатическую зону, выращиваемые культуры и технологические требования. Модуль сенсорики предназначен для непрерывного мониторинга параметров микроклимата температура воздуха и почвы, влажность воздуха и почвы, концентрация CO_2, освещённость, скорость воздушного потока.

Сенсорный модуль осуществляет первичную фильтрацию данных и передаёт их в центральный модуль или распределённое вычислительное устройство. Модуль исполнительных механизмов управляет системами вентиляции (форточки, вентиляторы), отопления, охлаждения, увлажнения и капельного орошения, искусственного освещения.

Модуль включает драйверы, приводы и блоки силовой электроники, обеспечивая точную реализацию управляющих сигналов. Коммуникационный модуль обеспечивает обмен информацией между сенсорами, приводами и управляющим ядром системы. Может использовать проводные протоколы (CAN, RS-485, Ethernet), беспроводные технологии (Wi-Fi, LoRaWAN, ZigBee).

ISSN 3030-3907

В зависимости от структуры теплицы возможно создание многоуровневой сетевой архитектуры. Модуль интеллектуального управления является вычислительным ядром системы и включает, алгоритмы адаптивного и предиктивного управления, модели нечеткой логики, нейросетевые прогнозы изменения параметров, анализ данных в реальном времени. Модуль вырабатывает управляющие воздействия в соответствии с текущими и прогнозируемыми условиями. Модуль пользовательского интерфейса обеспечивает взаимодействие оператора с системой визуализация параметров, удалённый контроль, настройка режимов, ведение журналов и аналитики.

Может быть реализован в виде локального дисплея, веб-интерфейса или мобильного приложения. Система легко адаптируется к изменениям в технологическом процессе, параметрам выращивания и появлению новых технических решений. Отказ одного модуля не приводит к остановке всей системы. Возможна организация резервирования ключевых элементов. Для внедрения новых алгоритмов или датчиков достаточно заменить или добавить соответствующий модуль [8,9]. Модульная структура снижает затраты на обслуживание и продлевает жизненный цикл системы за счёт постепенной модернизации. Рабочие нагрузки по анализу данных могут быть распределены между несколькими вычислительными узлами. Общая схема взаимодействия модулей сенсорный модуль измеряет параметры среды и передает данные в интеллектуальный модуль, алгоритм обработки данных выполняет анализ, прогнозирование и выработку управляющего сигнала, коммуникационный модуль передает команду исполнительным устройствам, исполнительные механизмы корректируют параметры микроклимата, система получает обратную связь и адаптируется в реальном времени.

Концепция модульной архитектуры мехатронной системы обеспечивает структурную гибкость, расширяемость и интеллектуальность управления микроклиматом теплицы. Такой подход позволяет эффективно интегрировать современные технологии автоматизации и искусственного интеллекта, повышая производительность и устойчивость тепличного хозяйства.

Алгоритмы интеллектуального управления играют ключевую роль в обеспечении адаптивной и энергосберегающей работы мехатронной системы регулирования микроклимата теплицы [10]. В отличие от традиционных регуляторов, основанных на фиксированных правилах и статических уставках, интеллектуальные методы позволяют учитывать нелинейность процессов, изменчивость внешних условий и биологические требования растений, а также прогнозировать динамику параметров микроклимата.

ISSN 3030-3907

Результаты

Теплица — это решение для защиты растительности от болезней и непогоды, представляющее собой сложную систему. Основной функцией управления теплицей является поддержание микроклимата, на которую влияют такие факторы как, солнечное излучение, скорость ветра и т.д [11]. Микроклиматом теплицы можно управлять, моделированием различных регуляторов, в том числе и регулятора нечеткой логики.

Так как теплица гарантирует подходящие микроклиматические условия для постоянного выращивания, для управления теплицей создано модель, которая способна предвидеть изменения во внутренней среде - параметры, которые основаны на нескольких граничных условиях. Модель теплицы, разработанная на основе нечеткой логики, которая держится на четырех основных слоях: техническая конструкция теплицы, воздух внутри теплицы, растения и почва. Значимость любого покрова состоит в последующем: теплица сохраняет тепло (покрытие обычно изготавливается из пластиковой пленки или стекла); воздух в помещении - это микроклимат в помещении, который регулируется температурой и влажностью; почва характеризуется поглощением и диффузией теплового излучения [12]. Система была протестирована в среде Matlab в пакете Fuzzy Logic Designer с использованием реальных измерений. Моделирование температуры и влажности в теплице проводилось с использованием дифференциальных уравнений, экспериментальные внешние значения измерялись с помощью датчиков. (рис.1).

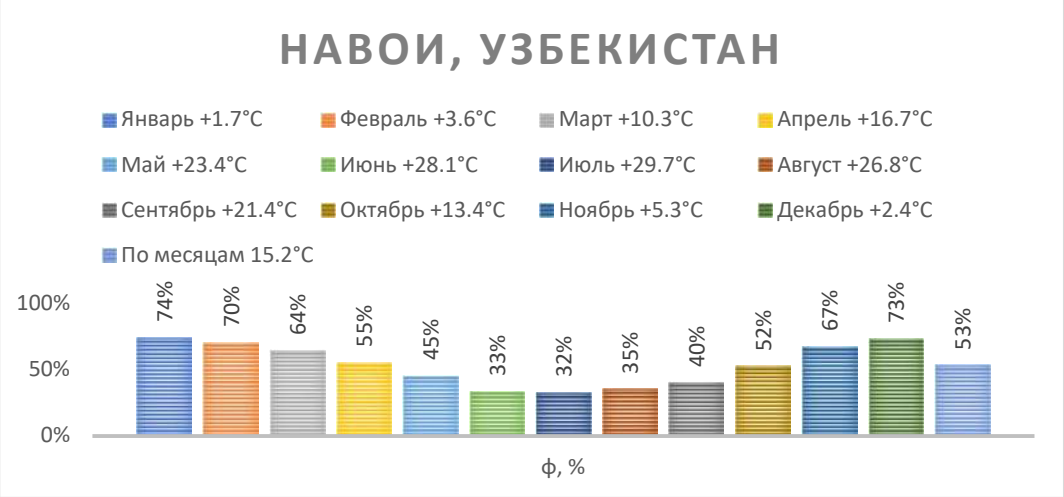


Рис.1. Данные о солнечной радиации представлены на основе данных средней статистики по городу Навоий, Узбекисан

После фаззификации параметров микроклимата теплицы для каждого параметра взятой лингвистической переменной находим диапазон значений, который наилучше характеризует данные параметры. После определение параметров микроклимата теплицы согласно положениям теории нечетких

ISSN 3030-3907

множеств, для значения температуры воздуха в диапазоне -10°C и +50°C, для значения относительного влажности воздуха в диапазоне 0-100 % и для значения влажности почвы 0-45 кг/кг поставлено в соответствие от нуля до единицы, которое определяет степень принадлежности микроклиматических значений теплицы.

После определение, промежуточных значений, для температуры воздуха выбраны a, b, c, d, e функции, для относительной влажности воздуха выбраны a, b, c функции, для влажности почвы выбраны a, b, c, d функции из функции принадлежностей

Исходя из нечеткого алгоритма Мамдани следует, что выходные функции принадлежности будут также нечеткими множествами. После процесса агрегирования для каждой выходной переменной создается нечеткий набор для дефаззификации. При этом для некоторых случаев гораздо эффективнее использовать один пик в качестве выходной функции принадлежности, а не распределенное нечеткое множество, что называется функцией принадлежности к одноэлементному выходу. Моделирование скорости вентиляции, скорости нагрева, увлажнения и осушения воздуха в теплице продемонстрировано на рис.2-3.

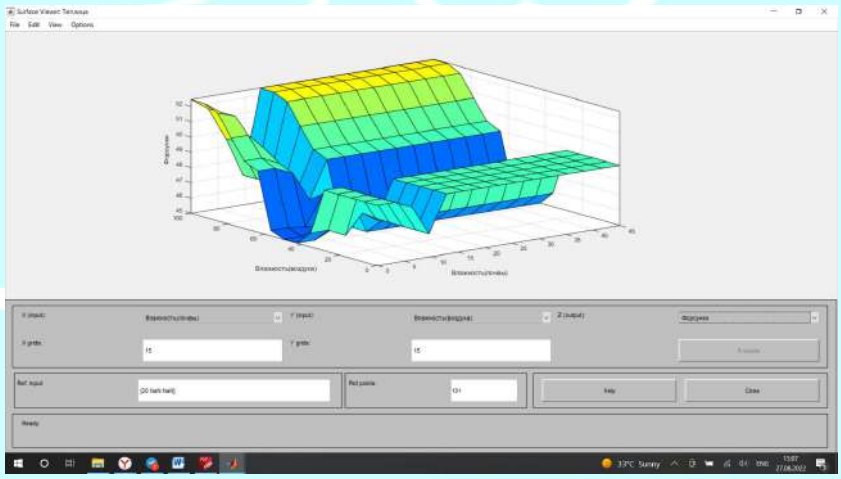


Рис.2. Зависимости влажности почвы и влажности воздуха на роботы форсунок

ISSN 3030-3907

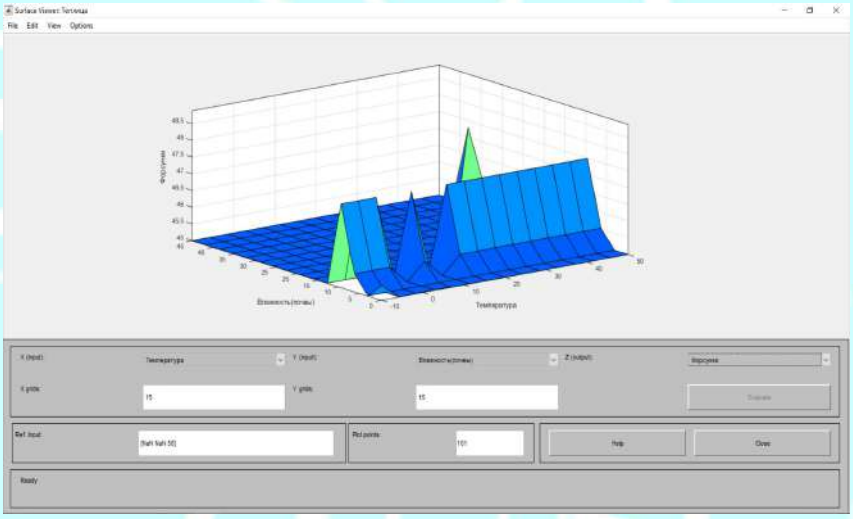


Рис.3.Зависимости температуры и влажности почвы на работу форсунок

Обсуждение

Интеллектуальное управление сочетает анализ данных, машинное обучение, нечеткие модели и предиктивную оптимизацию, что обеспечивает высокую точность регулирования и эффективное использование ресурсов.

Нечеткие регуляторы широко применяются в тепличных системах как эффективный инструмент работы с неопределённостью и нелинейностью процессов. Принцип работы основан на использовании экспертных правил вида «если–то», описывающих реакции системы на изменения микроклиматических параметров.

Нечеткая логика (Fuzzy Logic) является одним из наиболее эффективных инструментов интеллектуального управления в условиях неполной информации, неопределённости и нелинейности технологических процессов. Тепличный микроклимат характеризуется высокой динамичностью, зависимостью от внешних климатических воздействий и сложными взаимосвязями между параметрами, такими как температура, влажность воздуха, освещённость, концентрация CO_2 и скорость воздухообмена. Классические методы регулирования (например, PID-регуляторы) часто оказываются недостаточно гибкими, в то время как нечеткая логика обеспечивает адаптивность и устойчивость управления. Нечеткая логика является эффективным инструментом интеллектуального управления микроклиматом теплицы благодаря способности работать с неточной и динамически меняющейся информацией. Она обеспечивает гибкое, плавное и адаптивное регулирование параметров и легко интегрируется в модульные мехатронные системы нового поколения.

Мехатронная интеграция системы управления микроклиматом теплицы представляет собой комплексный процесс объединения механических, электронных, сенсорных и интеллектуальных компонентов в

ISSN 3030-3907

единое функциональное целое. Целью такой интеграции является обеспечение согласованной работы всех модулей системы, что позволяет достичь высокой точности регулирования, надёжности и эффективности функционирования тепличного комплекса. В основе мехатронного подхода лежит тесная взаимосвязь между аппаратной частью, программным обеспечением и алгоритмами управления. Мехатронная интеграция ориентирована на одновременное проектирование и оптимизацию механических, электронных и интеллектуальных модулей системы. Такой подход отличается от традиционного, где компоненты разрабатываются по отдельности, а их согласование выполняется на завершающих этапах. Мехатронная интеграция системы управления микроклиматом теплицы обеспечивает согласованную работу сенсоров, приводов, интеллектуальных алгоритмов и коммуникационных модулей. Благодаря тесной связи аппаратных и программных компонентов достигаются высокая точность регулирования, адаптивность, энергоэффективность и надёжность системы. Интеграционный подход позволяет создавать гибкие, масштабируемые и интеллектуальные тепличные комплексы нового поколения.

Заключение

Разработка интеллектуальных систем управления микроклиматом теплиц является важным направлением современного сельского хозяйства, поскольку позволяет повышать урожайность, качество продукции и энергоэффективность тепличных комплексов, снижая зависимость от ручного труда и влияния человеческого фактора. Модульная архитектура обеспечивает гибкость, масштабируемость и возможность интеграции новых технологий. Разделение системы на функциональные блоки — сенсорные модули, исполнительные механизмы, коммуникационные узлы и интеллектуальное ядро — позволяет легко модернизировать систему, добавлять новые функции и адаптировать её под разные типы теплиц и культуры. Анализ существующих решений показал, что механические и традиционные электронные системы ограничены по точности, адаптивности и энергоэффективности. Интеллектуальные системы с элементами машинного обучения, предиктивного управления и нечеткой логики обеспечивают высокую точность регулирования, прогнозирование изменений микроклимата и автономную адаптацию к внешним условиям. Применение нечеткой логики, нейросетевых моделей, предиктивного управления и гибридных алгоритмов позволяет реализовать адаптивное регулирование температуры, влажности, освещенности и концентрации CO_2. Интеллектуальные алгоритмы обеспечивают плавность управляющих воздействий, устойчивость к возмущениям и оптимизацию

ISSN 3030-3907

энергопотребления. Комплексная интеграция сенсорных, исполнительных, коммуникационных и интеллектуальных модулей обеспечивает согласованную работу всей системы. Программно-аппаратная интеграция, стандартизированные интерфейсы и распределённая архитектура повышают надёжность, масштабируемость и возможность дистанционного управления. Дальнейшее совершенствование системы возможно через внедрение расширенных моделей прогнозирования, алгоритмов самообучения, интеллектуальной оптимизации энергопотребления и адаптивного взаимодействия с облачными платформами для анализа больших данных и дистанционного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кадиров, Ёркин; Самадов, Абдухалил;, Разработка дистанционного управления токарно-винторезного станка,ТЕСНика,,2,12-14,2020,ООО «re-health».
2. Yusupbekov, Nodirbek; Mukhitdinov, Djalolitdin; Kadirov, Yorkin; Sattarov, Olim; Samadov, Abdukhalil;, Control of non-standard dynamic objects with the method of adaptation according to the misalignment based on neural networks,International Journal,8,9,,2020.
3. Kadirov, Yo B; Boybutayev, SB; Samadov, AR; ,Mathematical modeling of a ball mill in gmz-2 ngmk based on the diffusion model,"Chemical technology, control and management",2020,5,46-53,2020.
4. Кадиров, Ёркин Баходирович;, РАЗРАБОТКА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЕ ФРЕЗЕРНЫМ СТАНКОМ С ЧПУ,Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве,,,415-416,2020.
5. Kadirov, Y; Samadov, A; Rahimova, M;, Monitoring of dynamic characteristics of the control system in greenhouses,EurasianUnionScientists,,,7-9,2021.
6. Jumaev, OA; Sayfulin, RR; Samadov, AR; Arziyev, EI; Jumaboyev, EO;, Methods for the Synthesis of Digital Controllers for an Asynchronous Brushless Motor,New Visions in Science and Technology Vol. 9,,,45-53,2021,BP International.
7. Jumaev, OA; Sayfulin, RR; Samadov, AR; Arziyev, EI; Jumaboyev, EO; ,Digital control systems for asynchronous electrical drives with vector control principle IOP Conf,,,,,2020.
8. Yusupbekov, NR; Mukhitdinov, DP; Kadyrov, Yo B; Sattarov, OU; Samadov, AR; ,Modern systems of control of complex dynamic technological processes (by the example of nitric acid production),AIP Conference Proceedings,2612,1,050008,2023,AIP Publishing LLC .

ISSN 3030-3907

9. Kadirov, Yorkin; Samadov, Abdukhalil; Goziev, Olmos, Equation of dynamics of greenhouse microclimate parameters, E3S Web of Conferences,390,,04019,2023,EDP Sciences .
10. Amankulova, Nurgul; Sydykova, Symbat; Medralieva, Bubusara; Samadov, Abdukhalil; ,The role of artificial intelligence in the automation and intellectualization of modern information systems,E3S Web of Conferences,627,,04015,2025,EDP Sciences.
11. Самадов, АР, Моделирование процесса функционирования микроклимата теплицы на основе нечеткой логики в условиях неопределенностей,Евразийский Союз Ученых,,4,97,2022.
12. Кадиров, ЁБ; Самадов, АР, РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛИЦАМИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ,International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences,5,1,19-24,2024,Общество с ограниченной ответственностью «Science Algorithm».

ISSN 3030-3907