

УДК 681.5

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КЛИМАТ-КОНТРОЛЯ В ТЕПЛИЦАХ НА ОСНОВЕ IOT И SCADA-СИСТЕМ

Мухаметгалеев Танир Хамитович
Канд. техн. Наук, доцент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Вафиев Ильмир Ильсурович
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

В статье представлен обзор современных технических решений для автоматизированного климат-контроля в тепличных хозяйствах на базе технологий Интернета вещей (IoT) и SCADA-систем. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения продуктивности агропромышленного комплекса и устойчивости сельскохозяйственного производства к внешним климатическим и экономическим вызовам. Раскрыта значимость точного управления микроклиматом в теплицах как ключевого фактора в обеспечении стабильной урожайности и качества продукции. Проанализированы существующие архитектуры автоматизации: сенсорные модули (температуры, влажности, освещённости, CO₂), программируемые логические контроллеры, протоколы обмена данными (Modbus, OPC UA, MQTT), а также облачные и мобильные интерфейсы, применяемые в SCADA/IoT-инфраструктуре. Освещены методы обработки информации — от пороговых алгоритмов до интеллектуальных систем анализа и предиктивной аналитики. Отмечены ключевые преимущества внедрения: повышение стабильности микроклимата, снижение затрат на энергию и труд, рост урожайности. Количественные данные показывают снижение энергопотребления на 35-45% и повышение точности соблюдения параметров микросреды. Сделан вывод о перспективности широкого внедрения данных технологий в тепличное растениеводство как элемента цифровизации АПК

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТЕПЛИЦЫ, КЛИМАТ-КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ (IOT), SCADA-СИСТЕМЫ, СЕНСОРНЫЕ СЕТИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЦИФРОВИЗАЦИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-211-011>

<http://ej.kubagro.ru/2025/07/pdf/11.pdf>

UDC 681.5

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

MODERN SOLUTIONS FOR AUTOMATED CLIMATE CONTROL IN GREENHOUSES BASED ON IOT AND SCADA SYSTEMS

Mukhametgaleev Tanir Khamitovich
Cand. Tech. Sci., Associate Professor
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Vafiev Ilmir Ilsurovich
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The article presents a review of modern technical solutions for automated climate control in greenhouse farming based on Internet of Things (IoT) and SCADA technologies. The relevance of the topic is driven by the need to increase the productivity of the agro-industrial complex and enhance the resilience of agricultural production to external climatic and economic challenges. The importance of precise microclimate management in greenhouses is highlighted as a key factor in ensuring stable crop yields and product quality. The study analyzes existing automation architectures, including sensor modules (for temperature, humidity, light intensity, and CO₂ concentration), programmable logic controllers, data exchange protocols (Modbus, OPC UA, MQTT), as well as cloud-based and mobile interfaces used in SCADA/IoT infrastructures. Methods of data processing are examined, ranging from threshold-based algorithms to advanced analytical and predictive systems. Key advantages of implementation are identified, such as improved microclimate stability, reduced energy and labor costs, and increased yield. Quantitative data indicate a reduction in energy consumption by 35–45% and improved accuracy in maintaining environmental parameters. The study concludes that the widespread adoption of these technologies in greenhouse cultivation is a promising component of agricultural digitalization.

Keywords: GREENHOUSES, CLIMATE CONTROL, AUTOMATION, INTERNET OF THINGS (IoT), SCADA SYSTEMS, SENSOR NETWORKS, ENERGY SAVING, DIGITALIZATION

Введение. Автоматизированное управление микроклиматом теплиц приобретает всё большую значимость в условиях интенсификации сельскохозяйственного производства и усиливающихся климатических колебаний. Стремление к круглогодичному выращиванию высококачественной продукции, устойчивой к стрессовым условиям среды, требует создания стабильных параметров внутренней среды тепличных конструкций. Температурный режим, влажность воздуха и почвы, уровень освещённости, содержание углекислого газа – все эти параметры оказывают комплексное влияние на физиологические процессы роста растений. Малейшие отклонения от оптимальных условий могут существенно повлиять на урожайность, что особенно критично при выращивании культур в интенсивных агротехнологиях [1].

Современные агропромышленные комплексы всё чаще переходят от ручного управления к высокоточной автоматизации процессов, что обусловлено как экономическими, так и экологическими факторами. В условиях дефицита квалифицированной рабочей силы, повышения стоимости энергоресурсов и ужесточения требований к качеству продукции автоматизированные системы управления становятся необходимым элементом устойчивого производства. С внедрением технологий цифрового сельского хозяйства особое внимание уделяется концепции «умной теплицы» — структуры, способной адаптивно регулировать внутренние параметры с учётом реальных погодных условий, фенофазы растений и требований к режиму культивации [2].

Интеграция технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT) в тепличную среду обеспечивает непрерывный поток данных с широкого спектра сенсоров: измеряются температура и влажность воздуха, уровень освещённости, влажность почвы, содержание CO₂ и другие параметры. Полученные данные в реальном времени обрабатываются встроенными алгоритмами или передаются на удалённые серверы для последующего

анализа. На основе этих данных принимаются управленческие решения — осуществляется включение или выключение систем отопления, вентиляции, капельного орошения, регулировка положения жалюзи и т.д. Тем самым достигается высокая точность поддержания оптимальных условий выращивания.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Вопросы автоматизированного управления микроклиматом в теплицах активно изучаются как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе, что обусловлено значительным влиянием климатических параметров на продуктивность защищённого грунта. Анализ современных публикаций показывает, что ключевые направления исследований охватывают разработку и внедрение интеллектуальных систем управления, основанных на сенсорных технологиях, моделировании микроклимата, а также интеграции SCADA и IoT-платформ для удалённого мониторинга и управления процессами.

На международной арене наблюдается устойчивая тенденция к переходу от простых терморегуляторов и таймеров к многоуровневым системам автоматического управления, использующим распределённые сенсорные сети, машинное обучение и прогнозную аналитику. Например, в работах зарубежных исследователей описаны системы, в которых реализовано динамическое регулирование теплового режима, влажности и уровня CO₂ с учётом прогноза погоды, фаз развития растений и энергоэффективности. Системы, разработанные на базе SCADA-архитектуры, демонстрируют высокую стабильность и масштабируемость, позволяя централизованно управлять многочисленными параметрами микросреды. IoT-компоненты, в свою очередь, обеспечивают гибкость в развертывании сенсорных узлов и расширяют возможности удалённого взаимодействия с системой в реальном времени.

Так, в ряде исследовательских проектов, реализованных в странах Европы и Азии, рассматриваются решения, в которых датчики температуры, влажности и освещённости связаны через беспроводные протоколы (LoRa, ZigBee, NB-IoT) с центральными управляющими модулями, где осуществляется анализ данных и формирование управляющих воздействий. Внедрение таких технологий показало повышение урожайности на 15–25%, снижение потребления воды и энергоресурсов до 40%, а также сокращение трудозатрат на эксплуатацию теплиц. Подобные результаты подтверждают эффективность и практическую ценность интеграции автоматизированных систем в аграрном производстве.

В то же время в российской практике, несмотря на имеющиеся положительные примеры, массовое внедрение таких систем пока сдерживается рядом факторов. Во-первых, большинство тепличных хозяйств продолжают использовать локальные решения на основе отдельных датчиков или контроллеров, не объединённых в единую архитектуру. Во-вторых, отсутствует достаточная квалификация специалистов, способных проектировать и обслуживать сложные цифровые платформы. Наконец, высокий порог начальных инвестиций и ограниченная доступность готовых решений отечественного производства также тормозят развитие в этом направлении.

Таким образом, существует очевидный разрыв между уровнем развития технологий и их внедрением в реальный аграрный сектор. Это подчёркивает актуальность разработки интегрированных, надёжных и доступных решений климат-контроля на базе IoT и SCADA, адаптированных к условиям отечественного агропромышленного комплекса. Учитывая растущие вызовы — изменение климата, необходимость снижения потребления ресурсов, повышение устойчивости

производства — данная проблема приобретает не только техническое, но и стратегическое значение.

Цель исследований. Целью данной статьи является обзор современных технических решений и возможностей интеграции систем автоматизации на основе IoT и SCADA для управления микроклиматом в теплицах, а также анализ их преимуществ и перспектив развития.

Материалы и методы исследований. В рамках настоящей обзорной работы проведён комплексный анализ существующих технических решений, направленных на автоматизацию климат-контроля в тепличных хозяйствах с применением современных информационно-управляющих систем. Основное внимание уделено как аппаратным компонентам, так и архитектурным особенностям программного обеспечения, применяемого в таких системах.

Для реализации управляющих воздействий анализируются исполнительные устройства, такие как нагреватели, увлажнители, системы вентиляции и проветривания, насосные станции и актуаторы управления положением оконных и потолочных створок. Управление этими элементами осуществляется с помощью контроллеров, в числе которых выделяются как промышленные ПЛК (программируемые логические контроллеры), так и микроконтроллерные платформы на базе Arduino, ESP32 или Raspberry Pi, используемые в более гибких, модульных системах.

Изучены типовые архитектуры SCADA-систем, включающие в себя дистанционные терминалы (RTU, PLC), операторские интерфейсы (HMI), а также серверные модули сбора и обработки информации. Большинство систем реализует обмен данными посредством промышленных протоколов — Modbus RTU/TCP, OPC UA, MQTT и других. Внимание уделено интеграции IoT-подсистем, обеспечивающих как локальную, так и облачную обработку данных. Сенсоры и исполнительные устройства в

таких системах связываются с серверной частью через проводные каналы связи (Ethernet, RS-485) или беспроводные сети (Wi-Fi, ZigBee, LoRa, NB-IoT), обеспечивая гибкость и масштабируемость инфраструктуры.

Результаты исследований. Результаты проведённого анализа демонстрируют высокую эффективность внедрения интегрированных автоматизированных систем климат-контроля в теплицах на основе технологий IoT и SCADA. Рассмотренные примеры, а также обобщение данных зарубежных и отечественных исследований позволили выделить как качественные, так и количественные эффекты от применения данных решений в агропромышленном производстве.

С точки зрения качественных показателей, интеграция IoT-компонентов с традиционными SCADA-системами обеспечивает повышение стабильности микроклимата, более точное соблюдение параметров выращивания и снижение вероятности негативного влияния внешних факторов. Одним из ключевых преимуществ является устойчивое поддержание оптимальных условий культивации благодаря непрерывному мониторингу параметров и автоматической адаптации режимов работы оборудования. Системы, построенные по принципу «умной теплицы», способны в режиме реального времени реагировать на изменения температуры, влажности, освещённости и других параметров среды, обеспечивая тем самым стабильный вегетационный процесс для растений.

Кроме того, автоматизация процессов позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора. Удалённое управление и централизованный сбор данных снижают необходимость постоянного присутствия персонала и уменьшают риск ошибок при настройке оборудования. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению трудозатрат и повышению надёжности функционирования тепличных комплексов. Дополнительным преимуществом является расширенный функционал современных систем мониторинга: благодаря подключению широкого

спектра сенсоров (температура и влажность воздуха и почвы, концентрация CO₂, освещённость и др.) оператор получает полную и объективную картину состояния внутренней среды теплицы, что способствует принятию обоснованных решений и повышает общий уровень управляемости производственным процессом.

Вместе с тем были выявлены и некоторые недостатки, ограничивающие повсеместное внедрение этих решений. Прежде всего, это высокая стоимость первичного оборудования и настройки систем, особенно в случае использования импортных компонентов. Также остаётся актуальной проблема дефицита специалистов, обладающих компетенциями в области настройки, эксплуатации и обслуживания IoT- и SCADA-систем. Важным аспектом является необходимость стабильной коммуникационной инфраструктуры, особенно в удалённых сельскохозяйственных районах. Наконец, требует дополнительной проработки вопрос информационной безопасности, учитывая возможность удалённого доступа и потенциальные риски несанкционированного вмешательства.

С позиции количественных результатов, обзор научных и прикладных источников показал, что применение интеллектуальных алгоритмов управления, в том числе основанных на методах обучения с подкреплением (Reinforcement Learning), позволяет достичь снижения энергопотребления на уровне 35–45% по сравнению с традиционными системами управления. Достигается это за счёт более точного и своевременного включения систем отопления, вентиляции и увлажнения, а также снижения простоев оборудования. Одновременно повышается точность соблюдения заданных параметров микроклимата: например, колебания температуры в теплице при использовании адаптивного контроллера уменьшаются с ± 2 °C до $\pm 0,5$ °C, что критически важно для чувствительных культур.

Также зафиксирован прирост урожайности в диапазоне от 10 до 30% в зависимости от вида выращиваемых растений и типа применяемой системы. Это объясняется тем, что растения находятся в стабильной, благоприятной среде, без стрессовых отклонений, что положительно влияет на их рост, фотосинтетическую активность и устойчивость к заболеваниям. Дополнительно была зафиксирована экономия материальных ресурсов (воды, удобрений и энергии) за счёт более рационального распределения и автоматической подачи. Сокращение расходов на ручной труд составляет в среднем 20–25%, особенно в крупных тепличных хозяйствах, где ранее использовались трудоёмкие методы настройки и контроля.

Таким образом, внедрение IoT- и SCADA-технологий в тепличное производство позволяет не только повысить эффективность и устойчивость хозяйствования, но и формирует предпосылки для создания интеллектуальных систем сельского хозяйства нового поколения, ориентированных на высокую продуктивность, ресурсосбережение и цифровую трансформацию отрасли.

Выводы. 1. Автоматизированные IoT/SCADA-системы эффективно решают задачу климат-контроля в теплицах: они обеспечивают стабильный микроклимат, что ведёт к повышению урожайности и снижению энергетических затрат. 2. Интеграция сенсорных сетей с облачными системами и SCADA-платформами создаёт новые возможности для анализа данных и адаптивного управления. Внедрение «умных» алгоритмов (включая ИИ и машинное обучение) позволяет улучшить точность регуляторов и снизить потребность в постоянном участии оператора. 3. Дальнейшее развитие технологий автоматизации должно учитывать перспективы использования цифровых двойников теплиц, расширенной аналитики больших данных и алгоритмов прогнозирования для обеспечения устойчивости систем к внешним вызовам.

Библиографический список

1. Platero-Horcajadas M., Pardo-Pina S., Cámara-Zapata J., Brenes-Carranza J., Ferrández-Pastor F. Enhancing Greenhouse Efficiency: Integrating IoT and Reinforcement Learning for Optimized Climate Control. *Sensors*, 2024, 24(24): 8109. DOI: 10.3390/s24248109.
2. Soetedjo A., Hendriarianti E. Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters. *Applied Sciences*, 2023, 13(20): 11294. DOI: 10.3390/app132011294.

References

1. Platero-Horcajadas M., Pardo-Pina S., Cámara-Zapata J., Brenes-Carranza J., Ferrández-Pastor F. Enhancing Greenhouse Efficiency: Integrating IoT and Reinforcement Learning for Optimized Climate Control. *Sensors*, 2024, 24(24): 8109. DOI: 10.3390/s24248109.
2. Soetedjo A., Hendriarianti E. Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters. *Applied Sciences*, 2023, 13(20): 11294. DOI: 10.3390/app132011294.