

УДК 007.52:631.171

Автоматизация управления процессами выращивания культур в тепличных комплексах вертикального типа

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Левоневский Дмитрий Константинович
E-mail: levonevskij.d@iias.spb.su

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Рябинов, А.В., Виноградов, М.С., Левоневский, Д.К., & Лоскутов, С.И. (2023). Автоматизация управления процессами выращивания культур в тепличных комплексах вертикального типа. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 201-213. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.381>

ПОСТУПИЛА: 15.11.2022

ПРИНЯТА: 02.07.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.07.2023

КОНФИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента № МК-5056.2022.1.6.



А. В. Рябинов, М. С. Виноградов, Д. К. Левоневский, С. И. Лоскутов

АННОТАЦИЯ

Введение: Современные методы и средства автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве и, в частности, в тепличных комплексах, являются предметом исследования многих научных коллективов, но многие решения носят частичный характер, т.е. обычно охватывают отдельные технологические параметры, либо позволяют осуществлять сбор данных о технологическом процессе (выполнять мониторинг), но не управлять процессами производства. Нередко решения рассчитаны в значительной мере на использование в ручном режиме или не предусматривают адаптивное управление параметрами теплицы. Такие решения не в полной мере удовлетворяют требованиям практики. Таким образом, необходимо повысить уровень автоматизации технологических процессов в вертикальных фермах за счет разработки методов, моделей и архитектуры адаптивного управления этими процессами.

Цель данной статьи — представить трехуровневую модульную архитектуру АСУ ТП современного тепличного комплекса, использующую в качестве интерфейса CAN-шину и характеризующуюся масштабируемостью, модульностью и возможностью охвата всех технологических процессов автоматического выращивания культур в теплицах.

Материалы и методы: В качестве объекта автоматизации рассмотрена теплица для вертикального выращивания микрозелени по технологии аэропоники низкого давления, оборудованная рядом инженерных систем. На основе исходных материалов и требований к такой системе разрабатывается трёхуровневая архитектура автоматизации. Оценивается реализуемость технологических процессов с использованием предложенных проектных и технических решений. В данной работе для этого используется критерий максимально допустимого времени реализации технологического процесса.

Результаты: Нижний уровень содержит датчики и исполнительные механизмы. Средний уровень содержит модули ввода и вывода, сбора данных, блоки управления. Верхний уровень представляет собой SCADA-систему, персональный компьютер, на котором развернут сервер, принимающий и агрегирующий информацию от модулей логики и сбора данных и предоставляющий пользователю графический интерфейс для управления процессами. Моделирование показывает способность системы на основе такой архитектуры соответствовать временным критериям, установленным для технологических процессов и взаимодействия с пользователями.

Выводы: Дальнейшая работа заключается в разработке спецификации на описываемые модули, формулировании требований к ним, выполнении проектирования, разработки, изготовления и испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

автоматизация сельского хозяйства, автоматизированные теплицы, автоматизированные системы управления технологическими процессами, киберфизические системы, умное производство

Automation of crop growing processes in vertical greenhouse complexes

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), Russian Federation

Artem V. Ryabinov, Mikhail S. Vinogradov, Dmitry K. Levonevskiy, Svetoslav I. Loskutov

CORRESPONDENCE:

Levonevskiy Dmitry K.
E-mail: levonevskij.d@iias.spb.su

FOR CITATIONS:

Ryabinov, A.V., Vinogradov, M.S., Levonevskiy, D.K., & Loskutov, S.I. Automation of crop growing processes in vertical greenhouse complexes. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 201-213. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.381>

RECEIVED: 15.11.2022

ACCEPTED: 02.07.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The study was supported by Presidential Grant No. MK-5056.2022.1.6.



ABSTRACT

Background: Modern methods and means of automating technological processes in agriculture and, in particular, in greenhouse complexes, are the subject of research by many scientific teams, but many solutions are partial, i.e. usually cover individual technological parameters, or allow the collection of data about the technological process (monitoring), but not the management of production processes. Often solutions are designed largely for manual use or do not provide for adaptive control of greenhouse parameters. Such solutions do not fully satisfy the requirements of practice. Thus, it is necessary to increase the level of automation of technological processes in vertical farms through the development of methods, models and architecture for adaptive control of these processes.

Purpose: To present a three-level modular architecture of a process control system of a modern greenhouse complex, using a CAN bus as an interface and characterized by scalability, modularity and the ability to cover all technological processes of automatic crop cultivation in greenhouses.

Materials and Methods: A greenhouse for vertical cultivation of microgreens using low-pressure aeroponics technology, equipped with a number of engineering systems, is considered as an automation object. Based on the source materials and requirements for such a system, a three-level automation architecture is developed. The feasibility of technological processes using the proposed design and technical solutions is assessed. In this work, for this purpose, the criterion of the maximum permissible time for the implementation of the technological process is used.

Results: The lower level contains sensors and actuators. The middle level contains input and output modules, data acquisition, and control units. The top level is a SCADA system, a personal computer on which a server is deployed that receives and aggregates information from logic and data acquisition modules and provides the user with a graphical interface for managing processes. Simulation shows the ability of a system based on such an architecture to meet the timing criteria established for technological processes and interaction with users.

Conclusion: Further work consists of developing specifications for the described modules, formulating requirements for them, performing design, development, manufacturing and testing.

KEYWORDS

agricultural automation, automated greenhouses, automated process control systems, cyber-physical systems, smart manufacturing

ВВЕДЕНИЕ

Процесс выращивания культур в тепличных комплексах в том числе вертикальных фермах, требует поддерживать необходимые для этих культур микроклиматические условия — проветривание, температурный режим, освещение, полив и т.д. Требуется следить за микроклиматическими условиями в теплицах, так как даже кратковременное нарушение этих условий может привести к негативным последствиям, вплоть до гибели растений, что нанесет значительный ущерб предприятию. Операции, которые необходимо выполнять для поддержания микроклимата в теплице, определяются технологией выращивания той или иной культуры. Многие операции, такие как регулировка освещения, температуры, должны выполняться в соответствии с временным графиком, состоянием окружающей среды. Их ручное выполнение сопряжено с риском совершения ошибок из-за человеческого фактора (Kachanova & Levonevskiy, 2021). Напротив, автоматизация и интеллектуализация процессов сбора данных и управления выращиванием позволяют более точно управлять технологическими процессами и сделать их экономнее (Li et al., 2021; Cosman et al., 2019b). Это, в свою очередь, необходимое условие создания автоматизированных теплиц нового поколения (Гиш & Карпенко, 2016).

Перспективным направлением исследований и разработок является автоматизация управления технологическими процессами в теплицах. Это соответствует тренду Индустрии 4.0 (Schwab, 2017) и позволит создавать «умные теплицы» по аналогии с умными домами и производствами, способными не только автоматизировать технологические процессы, но и прогнозировать изменение внутренних параметров, адаптивно управлять автоматикой теплицы с использованием данных прогноза.

Современные системы автоматизации должны соответствовать определенным требованиям и отраслевым стандартам (Шишов, 2021). Архитектуры современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) разделяются на три уровня: нижний — уровень поля; средний — уровень базовой автоматизации производственных процессов (контроллеры управления); верхний — уровень управления технологиями (SCADA-системы).

Нижний уровень содержит полевое оборудование: сенсоры, исполнительные устройства и их вспомогательные устройства, пульта управления. К задачам оборудования этого уровня относится измерение физических параметров и преобразование их в типовые виды электрических сигналов, получение управляющих сигналов от оборудования среднего уровня (контроллеров) и непосредственное управление технологическим процессом в соответствии с этими сигналами. Средний (управляющий) уровень формируется с помощью высокопроизводительных программируемых логических контроллеров с распределенной системой ввода-вывода. На верхнем уровне осуществляется централизованное управление и высокоуровневое управление технологическим процессом. В состав оборудования уровня входят рабочие места производственных операторов (АРМ) и серверы.

Важным требованием к АСУ ТП является модульность, при которой на среднем уровне происходит разделение управления на функциональные блоки (модули), каждый из которых отвечает за управление отдельным элементом процесса и соответствующим набором исполнительных механизмов. Более того, при проектировании систем автоматизации значительную роль играют интерфейсы, посредством которых модули соединяются друг с другом. При всем обилии проводных и беспроводных интерфейсов современные АСУ ТП в основном используют так называемые шинные интерфейсы (CAN, PROFIBUS), обеспечивающие таким системам масштабируемость и облегчающие обслуживание.

В данной работе предлагается трехуровневая модульная архитектура АСУ ТП современного тепличного комплекса, использующая в качестве интерфейса CAN-шину. Архитектура характеризуется масштабируемостью, модульностью и охватом всех технологических процессов выращивания культур в теплицах.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Системы и архитектуры

Существует ряд систем автоматизированного управления микроклиматом в закрытых тепличных комплексах. Например, Sivagami et al. (2018) представил автоматическую систему управления теплицей для снижения расхода воды при поли-

ве растений. Система круглосуточно отслеживает параметры микроклимата теплицы, в том числе влажность почвы, и в случае отклонения какого-либо параметра микроконтроллер управляет работой исполнительных механизмов для нормализации микроклимата. Предлагаемая система автоматического полива сочетает в себе капельный полив и распылитель, что позволило добиться экономии воды 48,78 % по сравнению с ручным поливом. Позже Sadek et al. (2023) представили интеллектуальную гидропонную и аэропонную систему для автоматизированных теплиц на основе технологии Интернета вещей (IoT), позволяющая повысить эффективность использования воды и энергии по сравнению с другими решениями. Известен и ряд других подходов, связанных с применением IoT в задаче управления теплицами (Maraveas et al., 2022).

Предложенная в Cosman et al. (2019a) система включает 3 датчика: освещенности, влажности и температуры. Такие системы используются в теплицах, где выращивают разные виды растений. С учетом этого авторы сформулировали правила, в соответствии с которыми на различных датчиках устанавливаются необходимые пороговые значения для поддержания здорового роста растений. Проведенные эксперименты доказали эффективность использования нечеткой логики для автоматизации системы орошения за счет снижения уровня водопотребления. С помощью разработанной системы удалось обеспечить поддержание температуры в теплице в пределах нормы. Для тех же показателей в Weldeasie et al. (2021) предложена система мониторинга и управления микроклимата в теплице, предусматривающая реакцию на недопустимые значения тех же показателей.

Система, представленная в Harivardhagini (2017), отличается от рассмотренной выше тем, что в нее дополнительно включена техническая возможность автоматического управления дверью с помощью инфракрасного датчика. Это дополнение позволяет предотвратить нарушения температурного режима внутри теплицы. Nicolosi et al. (2017) предложили адаптивную систему управления микроклиматом теплицы, которая одновременно использует нейронную сеть для прогнозирования состояния климата теплицы, а также подход нечеткой логики для управления скоростью воздушных потоков и температурой теплицы. Система реализована на базе инструментов Matlab. Его авторы пришли к выводу,

что согласованное управление скоростью воздушных потоков и температурой теплицы позволяет более эффективно использовать энергоресурсы.

Raj & Ananthi (2019) описывают автоматизированную систему сбора данных в теплице, использующую датчики температуры, влажности, влажности почвы и освещенности для отслеживания изменений параметров. Мониторинг осуществляется с помощью Google Cloud, а также с помощью СМС-информирования. Решение, предложенное в этой статье, не является надежным или расширяемым из-за используемых интерфейсов и протоколов. Нет возможности управлять параметрами, система выполняет только их мониторинг. Shah & Bhatt (2017) также предлагают систему мониторинга температуры, влажности воздуха и влажности почвы в теплице с использованием Arduino и Raspberry Pi, а также описывают программную архитектуру на основе облачных технологий. Akkaş & Sokullu (2017) рассматривают подход к мониторингу автоматизированных теплиц с использованием беспроводных сенсорных сетей.

Имеются также различные подходы к управлению технологическими процессами. Известны подходы к комплексному управлению освещением в автоматизированных теплицах (Chen et al., 2023), архитектуру системы автоматического управления температурой, влажностью воздуха и уровнями освещенности в теплице с помощью программируемого логического контроллера (Ko & Mon, 2014). Параметры регулируются с помощью реле, используются беспроводные интерфейсы связи. Однако предлагаемые системы не обеспечивают управление всеми параметрами, влияющими на процесс, в комплексе.

Технические решения

Gonzalez Perez & Calderon Godoy (2009) описывают систему автоматизации управления климатом (параметров температуры и влажности) теплицы. Реализована распределенная система управления на базе программируемого логического контроллера, подключенного к группе датчиков и исполнительных устройств по полевой шине PROFIBUS и децентрализованным периферийным станциям ET 200S. Несмотря на то, что используются решения промышленного уровня, а архитектура построена по трехуровневому принципу, данная система

охватывает лишь часть технологических процессов в теплице. Вопросы удалённого мониторинга рассматривают Aytekin & Levent (2016), рассматривая связку из микроконтроллера MSP430 с беспроводным сенсорным модулем Ez430-RF2500 для передачи сообщений с датчиков температуры и влажности.

Для передачи данных между контроллером и сервером в исследовании Ullah et al. (2018) использовалась технология GSM-GPRS, отличающаяся надёжностью и скоростью. Для удаленного мониторинга и анализа данных с датчиков, установленных в теплице, в предлагаемой системе используется концепция IoT, которая, по мнению ее авторов, является наиболее перспективной технологией подключения полевых устройств к беспроводному Интернету или к устройствам с дистанционным управлением (Tangarife & Díaz, 2017; Díaz & Carrera, 2019). Микроконтроллер ATmega328 управляет работой нагревателей, охладителей, диффузоров, ламп и водяных насосов для поддержания необходимого микроклимата для роста растений. Система была протестирована на небольшой вертикальной теплице. Проведенные эксперименты показали эффективность решения. Однако при тестировании системы точность управления параметрами окружающей среды оказалась невысокой из-за сложности оптимального позиционирования сенсорных элементов в пределах вертикальных тепличных комплексов. Этот эффект объясняется тем, что конструктивные особенности такого решения приводят к значительным отклонениям параметров микроклимата в различных точках теплиц.

Аналогичный набор параметров в исследовании Saha et al. (2017) также управляется микроконтроллером Atmega328. Основным отличием этой системы от рассмотренных выше является использование проводной инфраструктуры, что усложняет использование таких систем в тепличных комплексах. Подобные трудности характерны и для больших теплиц, несмотря на несомненные преимущества в скорости и стабильности связи между датчиками и модулями управления.

Таким образом, проблемы автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве и, в частности, в тепличных комплексах, являются предметом исследования многих научных коллективов, но многие решения носят частичный характер, т.е. обычно охватывают отдельные технологические

параметры, либо позволяют выполнять сбор данных, но не управлять процессами производства. При этом отсутствует открытый, целостный и комплексный подход к построению архитектуры АСУ ТП теплиц, в рамках которого: можно управлять всем технологическим процессом в теплице; архитектура является модульной, и возможно интегрировать существующие модули для управления отдельными параметрами и процессами; используются надежные коммуникационные интерфейсы и протоколы.

Существующие решения, рассчитанные в значительной мере на использование в ручном режиме или не предусматривающие адаптивный климат-контроль, не в полной мере удовлетворяют требованиям практики. Таким образом, необходимо повысить уровень автоматизации технологических процессов в вертикальных фермах за счет разработки методов, моделей и архитектуры адаптивного управления этими процессами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для достижения указанной цели предлагается разработать архитектуру системы автоматизации технологических процессов в тепличных комплексах, удовлетворяющую следующим условиям:

- (1) используемые модули должны обеспечивать масштабируемость, расширяемость и модульность всей системы, позволяя устанавливать, удалять и заменять отдельные модули без влияния на процессы, не зависящие от них;
- (2) уровни архитектуры должны обеспечивать логическое разделение и минимизировать количество соединений между модулями, реализующими физические процессы, высокоуровневое управление и обработку потоков данных;
- (3) интерфейсы соединения должны обеспечивать быструю и надежную передачу данных, соответствующую требованиям технологических процессов в тепличных комплексах.

В качестве объекта автоматизации рассмотрим теплицу для вертикального выращивания микрозелени по технологии аэропоники низкого давления. Подобный объект должен быть оборудован следующими инженерными системами:

- (1) система досветки с помощью светодиодных фитоламп переменной яркости, обеспечивающая наряду с естественным освещением оптимальный уровень инсоляции для растений;
- (2) система принудительной вентиляции, представляющая из себя набор приточных и вытяжных вентиляторов, заслонок с электроприводами;
- (3) климатическая установка, представляющая из себя изолированный контур подачи подогретого воздуха, охладитель воздуха, нагреватель воздуха, увлажнитель воздуха, одну или несколько заслонок с электроприводами;
- (4) система испарительного охлаждения и доувлажнения (далее — СИОД), представляющая из себя насос высокого давления (далее — НВД), подключенный к водоснабжению и обеспечивающий подачу воды под высоким давлением на магистраль с набором туманообразующих форсунок;
- (5) система полива, представляющая из себя насосы низкого давления, подключенные к поливному контуру, и обеспечивающая подачу питательного раствора;
- (6) система зашторивания, представляющая из себя набор приводов для управления степенью зашторивания для ограничения поступающего естественного освещения.

Сформулируем требования к системе автоматизации такого объекта, исходя из которых будет проектироваться архитектура АСУ ТП. Система автоматизации, разработанная для такого объекта, должна:

1. Обеспечить оперативный мониторинг и автоматическое управление для следующих технологических параметров:
 - температура воздуха;
 - влажность воздуха;
 - уровень освещенности;
2. Система должна обеспечить возможность автоматического и ручного управления следующими инженерными системами и включенными в них полевыми устройствами, а также мониторинг состояния этих систем и устройств:
 - 2.1. Климатическая установка:
 - охладитель воздуха (вкл/выкл, наличие воды в контуре);
 - увлажнитель воздуха (вкл/выкл, наличие воды в контуре);

- вентилятор климатического контура (вкл/выкл, скорость вращения);
- электроприводы заслонок климатической установки (% открытия).

2.2. Система принудительной вентиляции:

- приточные вентиляторы (вкл/выкл, скорость вращения);
- вытяжные вентиляторы (вкл/выкл, скорость вращения);
- электроприводы заслонок системы принудительной вентиляции (% открытия).

2.3. СИОД

- насос высокого давления (вкл/выкл, скорость вращения двигателя, давление в системе, работа по циклам).

2.4. Система досветки

- фитолампы досветки (вкл/выкл, степень яркости, работа по циклам).

2.5. Система полива

- насос низкого давления (вкл/выкл, скорость вращения двигателя, работа по циклам).

2.6. Система зашторивания

- электропривод системы зашторивания (% открытия).

Методы и инструменты

Исходя из требований к системе автоматизации, было принято решение о разработке модульной трехуровневой архитектуры. Датчики (температуры, влажности, освещенности, уровня, давления) и исполнительные устройства (реле, задатчики аналоговых сигналов) размещены на нижнем уровне. Модульность заключается в том, что на промежуточном уровне предполагается разделение функциональности системы по принципу управления отдельными технологическими процессами (например, поливом, освещением), за каждый из которых будет отвечать отдельное обособленное устройство (модуль).

Чтобы не ограничивать систему используемыми низкоуровневыми интерфейсами (наиболее распространены для датчиков интерфейсы 4–20 мА и 0–10 В, однако есть датчики, использующие в качестве интерфейса шину I2C или SPI), в архитектуру вклю-

ченны модули ввода и вывода в роли промежуточно-го интерфейса. Они считывают показания датчиков и передают их через интерфейс среднего уровня.

Поскольку многие технические процессы связаны с пересекающимися множествами показаний датчиков, используемых как входные данные, в качестве промежуточного интерфейса был выбран интерфейс CAN-шины. Использование этой шины позволяет значительно сократить количество кабельных соединений и надежно обеспечить связь каждого функционального модуля с каждым требуемым модулем ввода или вывода.

Процедура

Исследование строится следующим образом. На основе исходных материалов и требований к системе

автоматизации технологических процессов разрабатывается трёхуровневая система автоматизации. Модули системы распределяются по уровням, определяется состав и характер связи между ними. Затем оценивается реализуемость технологических процессов с использованием предложенных проектных и технических решений. В данной работе для этого используется критерий максимально допустимого времени реализации технологического процесса.

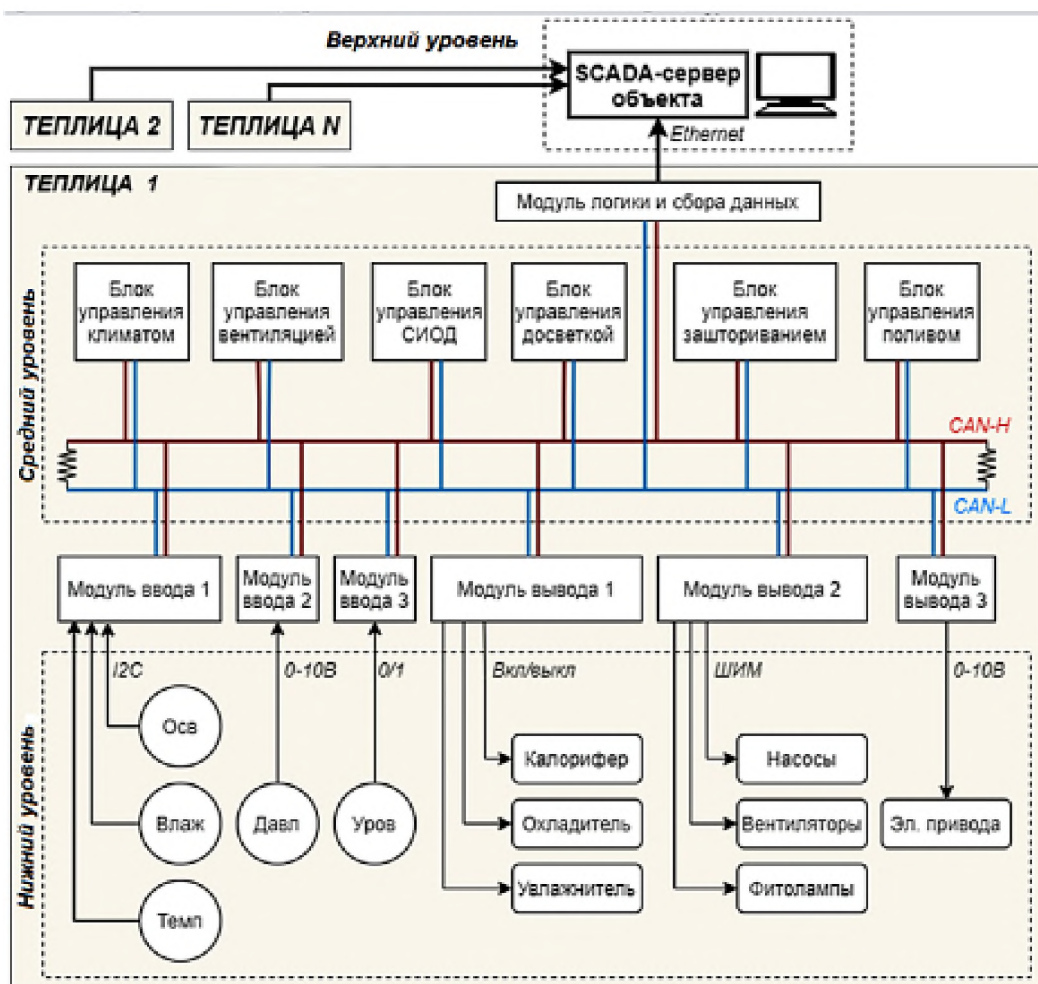
РЕЗУЛЬТАТЫ

Общее описание архитектуры

Блок-схема предлагаемой архитектуры представлена на Рисунке 1. Она разделяется на три уровня. Нижний уровень содержит датчики, исполнитель-

Рисунок 1

Архитектура системы управления технологическими процессами



ные механизмы, конечные аналоговые интерфейсы. Средний уровень включает в себя модули ввода и вывода, сбора данных, блоки управления. Верхний уровень предназначен для управления тепличными комплексами. Ниже приведём описание каждого уровня подробнее.

Нижний уровень

Для реализации технологического процесса на нижнем уровне необходимо оснастить систему следующими компонентами: датчики температуры воздуха; датчики влажности воздуха; датчики освещенности; датчики давления воды; датчик потока жидкости; датчики уровня; электромагнитные реле (для коммутации полевых устройств, подразумевающих двухпозиционный контроль, таких как калорифер); задатчики аналогового сигнала 0–10 В или 4–20 мА (для коммутации полевых устройств, подразумевающих аналоговый контроль, таких как заслонки); задатчики сигнала методом широтно-импульсной модуляции (далее — ШИМ) для управления полевыми устройствами, подразумевающими ШИМ-контроль, такими как лампы, насосы, вентиляторы. Возможность управления электроприводами с помощью аналогового сигнала 0–10 В обеспечивается тем, что электроприводы заслонок и штор оснащены соответствующей аппаратной обвязкой. Существуют готовые решения для теплиц и других индустрий, позволяющие принимать на вход как 0–5 В, 0–10 В, так и, к примеру, 4–20 мА.

Управлять двигателями переменного тока с помощью ШИМ невозможно напрямую. Однако общепринятой и широко распространенной практикой является использование при подключении электродвигателей частотных преобразователей с ШИМ-управлением. Такие преобразователи выполняют преобразование ШИМ-сигнала в частоту вращения двигателя, будь то электродвигатель насоса, вентилятора или любой другой трехфазный двигатель переменного тока. Поскольку такие преобразователи являются зачастую обязательными при установке электродвигателей (даже без ШИМ-контроля), на схеме они не указываются.

Средний уровень

Средний уровень необходим для обеспечения базовой автономной автоматизации (например, включения/выключения агрегатов по циклам и/или в зависимости от показаний датчиков), а также для подключения всех датчиков и исполнительных устройств к централизованной системе по CAN-шине. Предлагается архитектурное разделение системы на следующие управляющие модули (блоки) и спецификации соответствующих подсистем:

- (1) Модули аналогового и цифрового ввода-вывода. Представляют из себя переходные устройства-преобразователи для связи между нижним и средним уровнем. Предназначены для: i). обработки сигналов одного или нескольких подключенных к данному модулю датчиков и отправку полученных с этих датчиков данных по CAN-шине (модуль ввода), или наоборот ii). для обработки полученного по CAN-шине сообщения и преобразования его в соответствующий выходной сигнал (модуль вывода).
- (2) Блок управления климатом. Отвечает за контроль заданной температуры и влажности. В программу входит изменение уставки и гистерезиса, алгоритм управления. Получает информацию с датчиков температуры и влажности, уровня, потока жидкости; отправляет команды на включение/выключение охладителя, увлажнителя, изменение скорости вращения вентилятора климатического контура, открытие/закрытие заслонки климатического контура. Отвечает за безопасность работы данных устройств путем контроля наличия воды в их контурах при необходимости. Также обменивается информацией с блоком управления СИОД для изменения его циклов работы в случае необходимости.
- (3) Блок управления вентиляцией. Отвечает за управление воздухообменом теплицы. Отправляет команды на включение/выключение/изменение скорости приточного и вытяжного вентиляторов, изменение степени открытия заслонок вентиляции.
- (4) Блок управления СИОД. Отвечает за управление НВД СИОД, поддержание безопасности в системе (управление давлением в контуре), частоту работы СИОД. Получает информацию от датчика давления в магистрали НВД, отправляет команды на включение/выключение НВД, на изменение скорости вращения двигателя (ШИМ).

- (5) Блок управления досветкой. Отвечает за лампы досветки и/или зашторивание в тех или иных точках. В программу входит изменение уставки и гистерезиса, программы (день/ночь, имитация рассветов/закатов) работы фитоламп. Получает информацию от датчиков освещенности, отправляет команды на изменение яркости той или иной группы ламп (ШИМ). Также обменивается информацией с блоком управления зашториванием для изменения в случае необходимости степени зашторивания.
- (6) Блок управления системой зашторивания. Отвечает за управление системой зашторивания. Обменивается информацией с блоками управления климатом и управления досветкой. Отправляет команды на изменение степени открытия приводов штор.
- (7) Блок управления поливом. Отвечает за управление системой полива. В программу входит полив по циклам, изменение степени полива. Отправляет команды на включение/выключение поливных насосов, изменение скорости вращения двигателя (ШИМ).
- (8) Модуль логики и сбора данных. Является переходным устройством-мостом между средним и верхним уровнем. Получает и обрабатывает все данные со всех устройств CAN-шины, формирует и отправляет сообщения на верхний уровень по TCP/IP и в обратном направлении, производит логирование данных, хранит информацию о программах работы блоков управления, отправляет команды на изменение этих программ, осуществляет автоматическую диагностику системы, предоставляет отдельный сервисный пользовательский интерфейс для доступа к ручной диагностике и отладке устройств среднего и нижнего уровня.

Верхний уровень

В отличие от модуля логики и сбора данных, который является промежуточным устройством, обеспечивающим техническую возможность коммуникации между устройствами и уровнями системы, развёрнутая здесь система реализует высокоуровневое управление технологическими процессами и предназначена для взаимодействия с конечным пользователем. Верхний уровень включает в себя

персональный компьютер, на котором развернут сервер, получающий и агрегирующий информацию от модулей логики и сбора данных и предоставляющий пользователю графический интерфейс для мониторинга и управления технологическим процессом.

В рамках предложенного подхода возможно реализовать адаптивное управление производственным процессом, так как создаются условия для оперативного сбора данных и управления процессами в теплице, при котором используемые алгоритмы могут адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования системы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенная архитектура автоматизированной системы управления технологическими процессами для реализации в тепличных комплексах вертикальных гидропонных и аэропонных ферм включает датчики и исполнительные устройства на нижнем уровне, модули ввода-вывода, управления и сбора данных на промежуточном уровне, локальный сервер мониторинга на верхнем уровне. В отличие от ряда работ (Ko, 2014; Gonzalez Perez & Calderon Godoy, 2009), в предложенном решении обеспечивается управление полным набором параметров технологического процесса. Кроме того, этот набор параметров является расширяемым в силу модульности предложенной архитектуры и разделения её на логические уровни, что не в полной мере реализовано во многих разработках (Sivagami, 2018). Указанное разделение позволяет использовать облачные системы для полностью дистанционного управления производством, которое не поддерживается в некоторых решениях. За счёт многоуровневости архитектуры и использования шины CAN снижается количество связей между компонентами системы, что упрощает и удешевляет её по сравнению с решениями, подобными описанным у Saha & Bhatt (2017). В целом указанные преимущества обосновываются гибкостью использованных архитектурных решений, модульностью, используемыми технологиями связи.

Для количественной оценки полученных результатов необходимо проверить соответствие скорости выполнения процессов требованиям технологических процессов в тепличных комплексах. Для

выполнения моделирования учтём, что скорость передачи данных по протоколу CANopen с использованием CAN в качестве физического и канального уровня в OSI зависит от длины кабеля, как показано в Таблице 1.

Таблица 1

Скорость передачи данных в CAN

Скорость, кбит/с	Длина кабеля, м
1000	20
800	40
500	100
250	250
125	500
50	1000

Согласно сетевой стратегии Schneider Electric скорости 1 Мбит/с, 800 кбит/с, 500 кбит/с, 250 кбит/с и 125 кбит/с рекомендуются для решений по автоматизации на уровне машин и установок.¹ Длина CAN-шины в тепличных комплексах не превышает 250 м. Таким образом, при использовании выбранных технологий может быть обеспечена скорость не менее 250 кбит/с. В качестве примера рассмотрим аварийную ситуацию, когда необходимо срочно остановить насос в подсистеме СИОД из-за превышения давления. Соответствующий технологический процесс состоит из следующих этапов:

- (1) пакет с данными о давлении из модуля ввода поступает в модуль СИОД и модуль сбора данных;
- (2) модуль сбора данных отправляет указанный выше пакет на интерфейс;
- (3) модуль СИОД принимает решение об остановке насоса;
- (4) пакет аварийной остановки отправляется в модуль вывода и модуль сбора данных;
- (5) насос физически останавливается;
- (6) модуль сбора данных отправляет пакет подтверждения на указанный выше интерфейс.

С учетом скорости и размера CAN-пакета (10 байт), время передачи данных можно оценить как 0,00096

секунды. Процесс физической остановки насоса длится 0,5 секунды. Технологический процесс требует, чтобы все шаги выполнялись в течение 1 секунды. Таким образом, технологический лимит времени может быть соблюден при условии, что производительность программного обеспечения способна обрабатывать данные и принимать решения в течение необходимого интервала времени. Скорость передачи данных в пользовательский интерфейс также соответствует критерию 1 секунды, что обеспечивает администратору системы достаточный уровень управляемости².

ВЫВОДЫ

Данное исследование ставит целью повысить уровень автоматизации технологических процессов в вертикальных фермах. Эта цель достигается за счёт того, что разработанная архитектура позволяет управлять технологическим процессом, дистанционно выполнять его мониторинг, подключать и отключать модули, реализующие те или иные компоненты технологического процесса. Показано, что требования по времени к реализации процесса соблюдаются. Также предложенные решения позволяют использовать адаптивные и проактивные алгоритмы управления выращиванием культур (Zhang et al., 2023; Левоневский с соавт., 2023).

Областью применения полученных результатов является сельское хозяйство и, в частности, автоматизированные системы выращивания культур в тепличных комплексах. Ограничения при применении результатов состоят в первую очередь в протяжённости тепличных комплексов: при длине шины, превышающей 250 м, используемые технологии могут не обеспечить достаточную скорость передачи данных для соблюдения технологических процессов. За счёт использования функциональных модулей предлагаемая архитектура обеспечивает возможность сбора данных и управления всеми технологическими параметрами, такими как: микроклимат теплицы, полив, освещение, экранирование, вентиляция. Шина CAN используется в качестве основного коммуникационного интерфейса. За счёт многоуровневости и модульности архитектуры соответствует современным от-

¹ What is the maximum cable length for a CANopen network? <https://www.se.com/ww/en/faqs/FA339840/>

² Response Times: The 3 Important Limits. <https://www.nngroup.com/articles/response-times-3-important-limits/>

раслевым требованиям к АСУ ТП, а за счет используемых интерфейсов надежна, легко расширяема и интегрируется в более сложные системы, такие как облачные системы мониторинга и управления. Модульность позволяет интегрировать сторонние решения в АСУ ТП.

Дальнейшие направления исследований заключаются в моделировании технологических процессов выращивания различных культур и экспериментальной оценке эффективности предложенных решений. Кроме того, для применения полученных результатов необходимо реализовать ряд практических задач. Во-первых, необходимо разработать спецификацию для описанных выше модулей, описать их функциональные характеристики и сформулировать функциональные и пользовательские требования к ним. Во-вторых, на основе этих требований предполагается выполнить проектирование, разработку и изготовление этих модулей. В-третьих, необходимо выполнить тестирование этих модулей и всей системы в лаборатории (например, в небольшой камерной теплице). Это позволит пе-

рейти к промышленному внедрению предложенных решений.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Рябинов Артём Валерьевич: концептуализация, разработка методологии исследования, проведение исследования, работа с программным обеспечением.

Виноградов Михаил Сергеевич: проведение исследования, подготовка черновика рукописи.

Левоневский Дмитрий Константинович: подготовка черновика рукописи, визуализация, проведение исследования, создание рукописи и её редактирование

Лоскутов Святослав Игоревич: проведение исследования, валидация данных, подготовка черновика рукописи, создание рукописи и её редактирование

ЛИТЕРАТУРА

- Гиш, Р. А., & Карпенко, Е. Н. (2016). Модернизация и совершенствование управления параметрами микроклимата — основа теплиц V поколения. *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, (9), Статья 129, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-123-129>
- Левоневский, Д. К., Рябинов, А. В., Жукова, Н. А., & Ковалевский, В. Э. (2023). Автоматизация выращивания агрокультур в стационарном компактном тепличном комплексе с контролируемым микроклиматом на базе гидропонной системы. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 11(1), Статья 029. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.029>
- Шишов, О. (2021). *Современные средства АСУ ТП*. М.: Инфра-Инженерия.
- Akkaş M. A., & Sokullu R. (2017). An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 113, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.300>
- Aytekin, S. A., & Levent, M. L. (2016). Greenhouse Automation using Wireless System. *International journal of engineering and computing*, 6, Article 2247850.
- Chen, X., Jiang, Z., Yang, J., Ren, J., Rao, Y., & Zhang, W. (2023). Data-driven decision support scheme for multi-area light environment control in greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, Article 108033, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108033>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marțiș, C. S. (2019a). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). Oradea, Romania. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marțiș, C. S. (2019b). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Diaz, P., & Carrera, R. (2019). IoT components for floriculture automation. In *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988049>
- Gonzalez Perez, I., & Calderon Godoy, A. J. (2009). Greenhouse automation with programmable controller and decentralized periphery via field bus. In *2009 IEEE International Conference on Mechatronics* (Article 19353704). IEEE <https://dx.doi.org/10.1109/ICMECH.2009.4957160>
- Harivardhagini, S. (2017). LabVIEW based greenhouse automation. *CVR Journal of Science and Technology*, 13, 79–82.
- Kachanova, O., & Levonevskiy, D. (2021). Cloud-based architecture and algorithms for monitoring and control of an automated greenhouse complex. In *CoMeSySo 2021: Data*

- Science and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS)* (vol. 231, pp. 910–921). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_76
- Ko, C. C., & Mon. S. S. (2014). Microcontroller based greenhouse automatic control system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 3(5), 865–870.
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, Article 106558. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- Maraveas, C., Piromalis, D., Arvanitis, K. G., Bartzanas, T., & Loukatos, D. (2022). Applications of IoT for optimized greenhouse environment and resources management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, Article 106993. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106993>
- Nicolosi, G., Volpe, R., & Messineo, A. (2017). An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse. *Energies* 10(5), Article 722. <https://doi.org/10.3390/en10050722>
- Raj, J. S., & Ananthi, J. V. (2019). Automation using IoT in greenhouse environment. *Journal of Information Technology*, 1, 38–47. <https://doi.org/10.36548/jitdw.2019.1.005>
- Sadek, N., Kamal, N., & Shehata, D. (In Press). Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 102341. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>
- Saha, T., Jewel, M. K. H., Mostakim, M. N., Bhuiyan, N. H., Ali, M. S., Rahman, M. K., Ghosh, H. K., Khalid Hossain, M. (2017). Construction and Development of an Automated Greenhouse System Using Arduino Uno. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, 9(3), 1–8. <https://doi.org/10.5815/ijeeb.2017.03.01>
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Currency.
- Shah. N. P., & Bhatt. P. (2017): Greenhouse automation and monitoring system design and implementation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(9), 468–471. <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i9.4981>
- Sivagami, A., Hareeshvare, U., Maheshwar, S., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2018). Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers*, 99(2), 183–191. <https://dx.doi.org/10.1007/S40030-018-0264-0>
- Tangarife, H. I., & Díaz, A. E. (2017). Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review. In *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)* (Article 17559075). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276478>
- Ullah, M. W., Mortuza, M. G., Humayun Kabir, M., & Ahmed, Z. U. (2018). Internet of things based smart greenhouse: Remote monitoring and automatic control. In *DEStech transactions on environment, energy and earth sciences*. (Article 27803). IEEE. <https://dx.doi.org/10.12783/dteees/iceee2018/27803>
- Weldeslasie, D. T., Assres, G., Gronli, T.-M., & Ghinea, G. (2021). Automated Climate Monitoring System: the Case of Greenhouse Industries in Ethiopia. *Internet of Things*, 15, Article 100426. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100426>
- Zhang, G., Zhang, L., Li, X., Gong, Z., & Dong, Y. (2023). An adaptive control method for the covers on the south roof of Chinese solar greenhouses: A case study of insulation blankets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, Article 107861. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107861>

REFERENCES

- Gish, R. A., & Karpenko, E. N. (2016). Modernizatsiya i sovershenstvovanie upravleniya parametrami mikroklimata — osnova teplits V pokoleniya [Modernization and improvement of microclimate parameters management is the basis of greenhouses of the 5th generation]. *Nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], (9), Article 129, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-123-129>
- Levonevskii, D. K., Ryabinov, A. V., Zhukova, N. A., & Kovalevskii, V. E. (2023). Avtomatizatsiya vyrashchivaniya agrokul'tur v statsionarnom kompaktnom teplichnom komplekse s kontroliruемым mikroklimatom na baze gidroponnoi sistemy [Automation of cultivation of agricultural crops in a stationary compact greenhouse complex with a controlled microclimate based on a hydroponic system]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 11(1), Article 029. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.029>
- Shishov, O. (2021). *Sovremennye sredstva ASU TP* [Modern automated process control systems]. Moscow: Infra-Inzheneriya.
- Akkaş M. A., & Sokullu R. (2017). An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 113, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.08.300>
- Aytekin, S. A., & Levent, M. L. (2016). Greenhouse Automation using Wireless System. *International journal of engineering and computing*, 6, Article 2247850.
- Chen, X., Jiang, Z., Yang, J., Ren, J., Rao, Y., & Zhang, W. (2023). Data-driven decision support scheme for multi-area light environment control in greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, Article 108033, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108033>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marţiş, C. S. (2019a). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). Oradea, Romania. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marţiş, C. S. (2019b). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In *2019 15th International*

- Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)* (Article 18922639). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMES.2019.8795186>
- Diaz, P., & Carrera, R. (2019). IoT components for floriculture automation. In *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988049>
- Gonzalez Perez, I., & Calderon Godoy, A. J. (2009). Greenhouse automation with programmable controller and decentralized periphery via field bus. In *2009 IEEE International Conference on Mechatronics* (Article 19353704). IEEE <https://dx.doi.org/10.1109/ICMECH.2009.4957160>
- Harivardhagini, S. (2017). LabVIEW based greenhouse automation. *CVR Journal of Science and Technology*, 13, 79–82.
- Kachanova, O., & Levonevskiy, D. (2021). Cloud-based architecture and algorithms for monitoring and control of an automated greenhouse complex. In *CoMeSySo 2021: Data Science and Intelligent Systems, Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS)* (vol. 231, pp. 910–921). https://doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_76
- Ko, C. C., & Mon, S. S. (2014). Microcontroller based greenhouse automatic control system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 3(5), 865–870.
- Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*, 191, Article 106558. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- Maraveas, C., Piromalis, D., Arvanitis, K. G., Bartzanas, T., & Loukatos, D. (2022). Applications of IoT for optimized greenhouse environment and resources management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, Article 106993. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106993>
- Nicolosi, G., Volpe, R., & Messineo, A. (2017). An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse. *Energies* 10(5), Article 722. <https://doi.org/10.3390/en10050722>
- Raj, J. S., & Ananthi, J. V. (2019). Automation using IoT in greenhouse environment. *Journal of Information Technology*, 1, 38–47. <https://doi.org/10.36548/jitdw.2019.1.005>
- Sadek, N., Kamal, N., & Shehata, D. (In Press). Internet of Things based smart automated indoor hydroponics and aeroponics greenhouse in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 102341. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102341>
- Saha, T., Jewel, M. K. H., Mostakim, M. N., Bhuiyan, N. H., Ali, M. S., Rahman, M. K., Ghosh, H. K., Khalid Hossain, M. (2017). Construction and Development of an Automated Greenhouse System Using Arduino Uno. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, 9(3), 1–8. <https://doi.org/10.5815/ijieeb.2017.03.01>
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Currency.
- Shah, N. P., & Bhatt, P. (2017): Greenhouse automation and monitoring system design and implementation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(9), 468–471. <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v8i9.4981>
- Sivagami, A., Hareeshvare, U., Maheshwar, S., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2018). Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers*, 99(2), 183–191. <https://dx.doi.org/10.1007/S40030-018-0264-0>
- Tangarife, H. I., & Díaz, A. E. (2017). Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review. In *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)* (Article 17559075). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276478>
- Ullah, M. W., Mortuza, M. G., Humayun Kabir, M., & Ahmed, Z. U. (2018). Internet of things based smart greenhouse: Remote monitoring and automatic control. In *DEStech transactions on environment, energy and earth sciences*. (Article 27803). IEEE. <https://dx.doi.org/10.12783/dteees/iceee2018/27803>
- Weldeslasie, D. T., Assres, G., Gronli, T.-M., & Ghinea, G. (2021). Automated Climate Monitoring System: the Case of Greenhouse Industries in Ethiopia. *Internet of Things*, 15, Article 100426. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100426>
- Zhang, G., Zhang, L., Li, X., Gong, Z., & Dong, Y. (2023). An adaptive control method for the covers on the south roof of Chinese solar greenhouses: A case study of insulation blankets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, Article 107861. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107861>