

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АРХИТЕКТУРЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫРАЩИВАНИЯ КУЛЬТУР В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ФЕРМАХ

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. Необходимо следить за микроклиматическими условиями в теплицах, так как даже кратковременное нарушение этих условий может привести к негативным последствиям, вплоть до гибели растений, что нанесёт 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 (Качанова, 2021). Напротив, автоматизация и интеллектуализация процессов мониторинга и управления выращиванием позволяют более точно управлять технологическими процессами и сделать их экономнее (Li, 2021).

Таким образом, 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 централизованный контроль и высокоуровневое управление технологическим процессом. В состав оборудования уровня входят рабочие места производственных операторов (АРМ) и серверы.

Также 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 результате исследования предложена модель технологического процесса и 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

Существует ряд систем автоматизированного управления микроклиматом в закрытых тепличных комплексах. Например, в работе (Sivagami, 2018) представлена автоматическая система управления теплицей для снижения расхода воды при поливе 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.

Предложенная в (Cosman, 2019) система включает 3 датчика: освещенности, влажности и температуры. Такие системы используются в теплицах, где выращивают разные виды растений. С учётом 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 (Weldeslasie, 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.

В статье (Nicolosi, 2017) авторы 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.

Для передачи данных между контроллером и сервером в (Ullah, 2018) использовалась технология GSM-GPRS, отличающаяся надежностью и скоростью. Для удаленного мониторинга и анализа данных с датчиков, установленных в теплице, в предлагаемой системе используется концепция Интернета вещей (IoT), которая, по мнению ее авторов, является наиболее перспективной технологией подключения полевых устройств к беспроводному Интернету или к устройствам с дистанционным управлением (Tangarife, 2017, Diaz, 2019). Микроконтроллер ATmega328 управляет системой и контролирует работу 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 контроля параметров 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 (Saha, 2017) также контролируется с помощью микроконтроллера 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.

Авторы (Raj, 2019) описывают автоматизированную систему контроля и мониторинга теплиц, 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. Авторы (Shah, 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.

В статье (Ko, 2014) представлена архитектура системы автоматического контроля и управления температурой, влажностью воздуха и уровнями освещенности в теплице с помощью программируемого логического контроллера. Параметры контролируются с помощью реле, используются беспроводные интерфейсы связи. Однако предлагаемая система не обеспечивает контроль всех параметров, влияющих на процесс.

В (Gonzalez Perez, 2009) авторы описывают систему автоматизации контроля климата (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.

Таким образом, проблемы автоматизации технологических процессов в сельском хозяйстве и, в частности, в вертикальных тепличных комплексах, являются предметом исследования многих научных коллективов, но многие решения носят частичный характер, т.е. обычно охватывают отдельные технологические параметры, либо позволяют осуществлять мониторинг, но не контролировать процессы. При этом отсутствует открытый, целостный и комплексный подход к построению архитектуры АСУ ТП теплиц, в рамках которого:

- можно отслеживать и контролировать весь технологический процесс в теплице;
- архитектура является модульной, и возможно интегрировать существующие модули для контроля и 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.

Модель и архитектура

Технологический процесс выращивания той или иной культуры предусматривает обеспечение требуемых для успешного выращивания микроклиматических условий. В наиболее общем виде модель предметной области показана на рисунке 1.

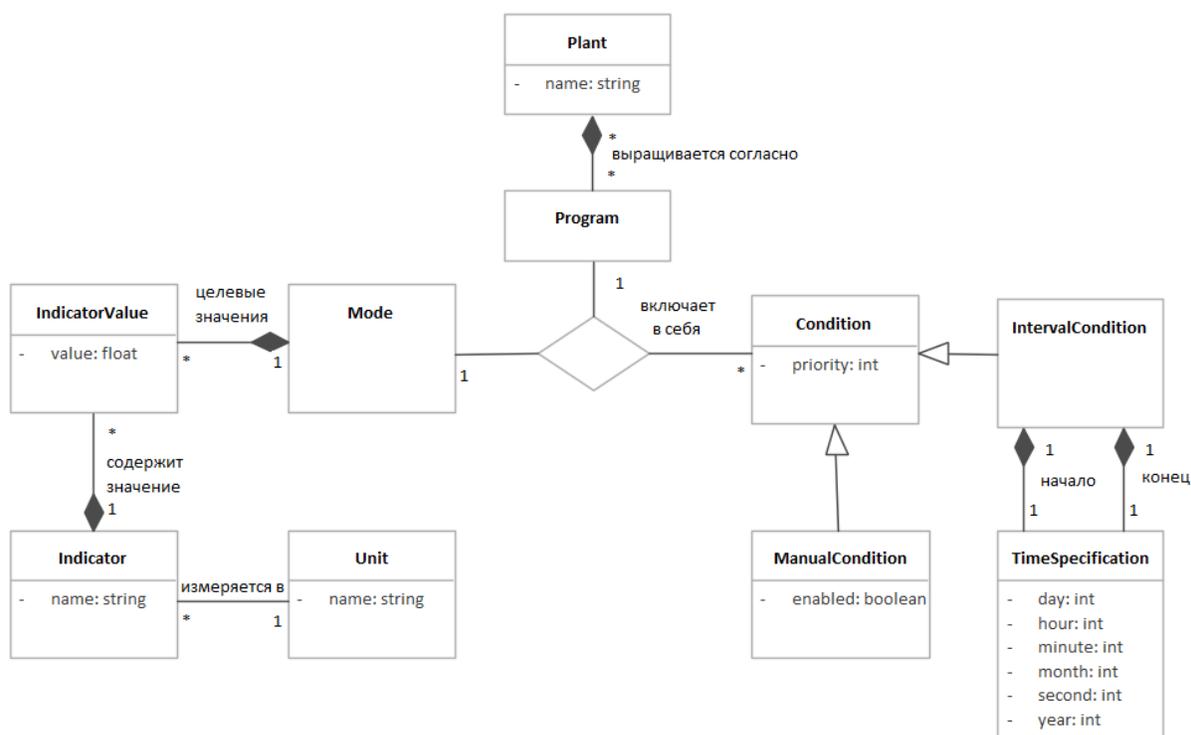


Рисунок 1 – Модель технологического процесса, описанная в форме диаграммы классов

Растение (Plant) выращивается согласно программе (Program), которая содержит набор режимов (Mode), активизирующихся при определённых условиях (Condition). Наиболее распространённым условием является условие времени (IntervalCondition), которое задаёт временной интервал, в течение которого необходимо обеспечить режим, который задаётся набором значений индикаторов (Indicator).

Для реализации подобных технологических процессов предлагается разработать архитектуру системы автоматизации технологических процессов в тепличных комплексах, определяемую как

$$A = (M, L, I),$$

где M – набор модулей, L – набор уровней архитектуры (групп модулей) и I – набор интерфейсов, соединяющих модули, отвечающие следующим условиям:

- набор M должен обеспечивать масштабируемость, расширяемость и

модульность всей системы, позволяя устанавливать, удалять и заменять отдельные модули без влияния на процессы, не зависящие от этих модулей;

- набор L должен обеспечивать логическое разделение и минимизировать количество соединений между модулями, реализующими физические процессы, высокоуровневое управление и обработку потоков данных;
- набор I должен 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:

- система досветки с помощью светодиодных фитоламп переменной яркости, обеспечивающая наряду с естественным освещением оптимальный уровень инсоляции для растений;
- система принудительной вентиляции, представляющая из себя набор приточных и вытяжных вентиляторов, заслонок с электроприводами;
- климатическая установка, представляющая из себя изолированный контур подачи подготовленного воздуха, охладитель воздуха, нагреватель воздуха, увлажнитель воздуха, одну или несколько заслонок с электроприводами;
- 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;
- система полива, представляющая из себя насосы низкого давления, подключенные к поливному контуру, и обеспечивающая подачу питательного раствора;
- 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 автоматический контроль 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).

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 4-20мА и 0-10В, однако есть датчики, использующие в качестве интерфейса шину I2C или SPI), в архитектуру включены модули ввода и вывода в роли промежуточного 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.

Блок-схема предлагаемой архитектуры представлена на рисунке 2. Далее приводится описание каждого элемента.

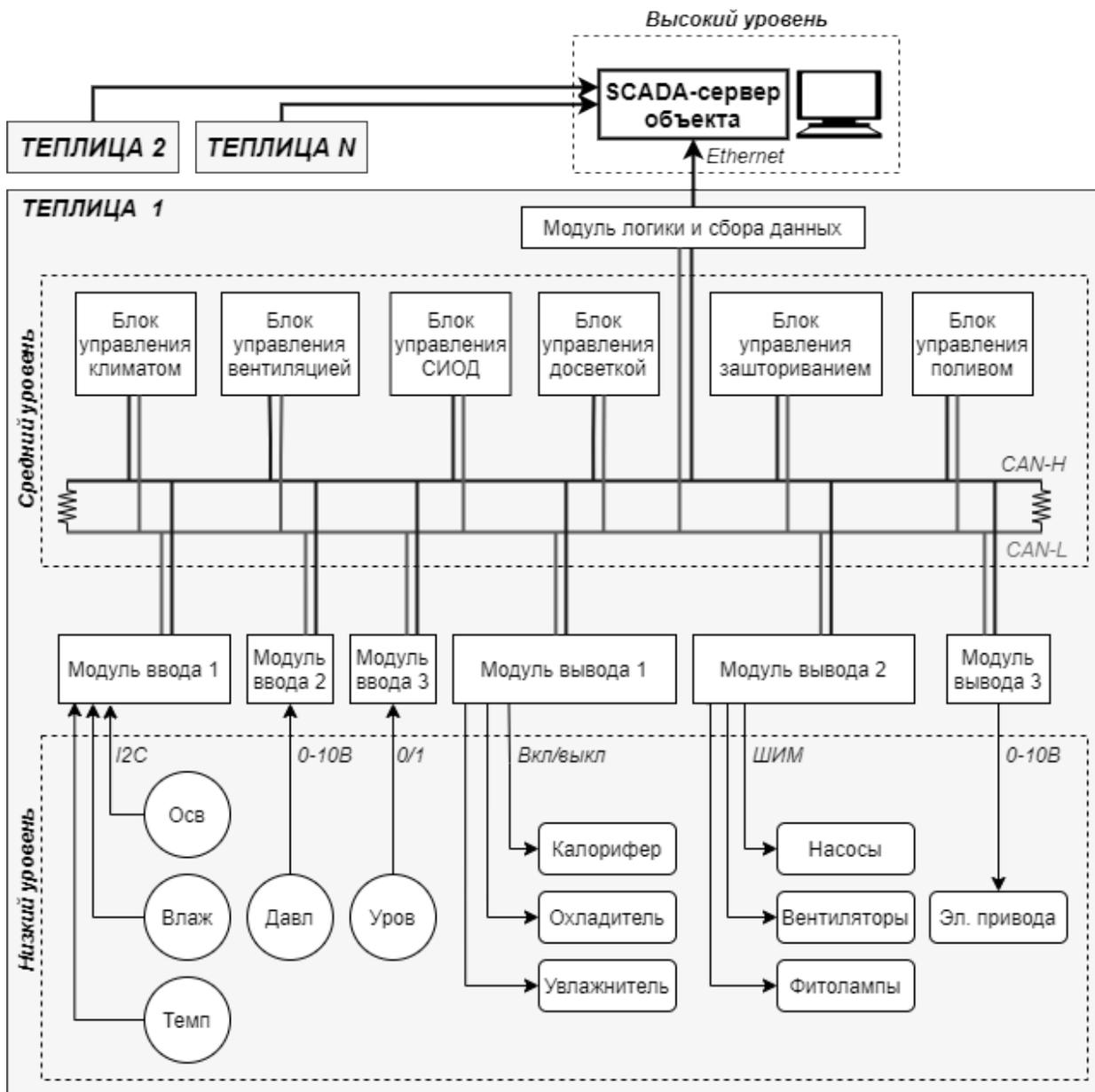


Рисунок 2 – Архитектура системы управления технологическими процессами

Низкий уровень содержит датчики, исполнительные механизмы, конечные аналоговые интерфейсы. Для реализации технологического процесса 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 0-10В или 4-20мА (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.

Средний уровень содержит модули ввода и вывода, сбора данных, блоки управления. Этот 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 контроля. 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 контроль воздухообмена теплицы. Отправляет команды на включение/выключение/изменение скорости приточного и вытяжного вентиляторов, изменение степени открытия заслонок вентиляции.
4. Блок управления СИОД. Отвечает за контроль НВД СИОД, поддержание безопасности в системе (контроль давления 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 контроль освещенности досветкой лампами и /или зашториванием 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 контроль системы зашторивания. Обменивается информацией с блоками управления климатом и управления досветкой. Отправляет команды на изменение степени открытия приводов штор.
7. Блок управления поливом. Отвечает за контроль системы 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 представляет собой 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 техпроцессом.

Реализация

Рассмотрим для начала разработанную компактную установку для выращивания культур (далее – мини-теплица), после чего построим модели её функционирования и контроля технологических процессов. Внешний вид разработанной мини-теплицы приведён на рисунке 3. Она позволяет производить циклическое выращивание путём периодического подтопления (орошения) питательным раствором, который очищается через биофильтр. Установка занимает предполагаемую площадь 600*400*600 мм. Питание приборов входного напряжения 220V конвертируется блоком питания в 12V и 5V соответственно подобранным узлам и агрегатам. В установке используется контроллер и модули управления различными приборами (насос, аэратор, УФ-стерилизатор, светильник, вентилятор, увлажнитель) при помощи фиксации показаний датчиков климатических условий и закрывающегося герметичного бокса – камеры выращивания. На рисунке 4 приведена взрыв-схема мини-теплицы, на которой отмечены её основные компоненты.



Рисунок 3 – Общий вид мини-теплицы

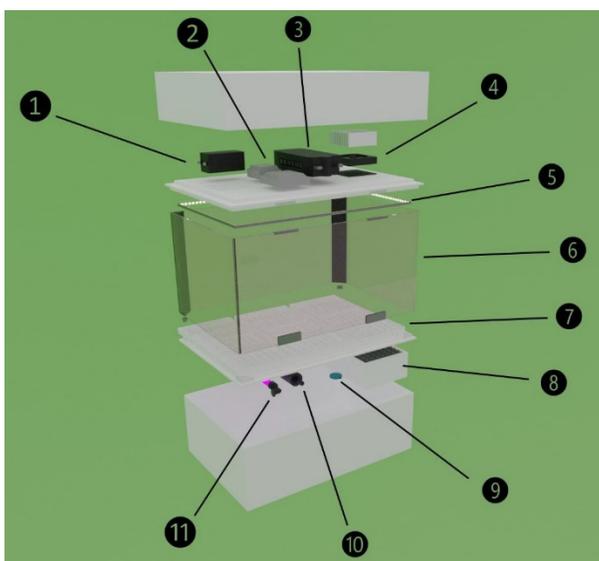


Рисунок 4 – Взрыв-схема мини-теплицы

На схеме изображены основные компоненты автоматизированного тепличного комплекса, к которым относятся:

1. Аэратор (компрессор).
2. Блок управления (контроллер).
3. Блок питания.
4. Вентилятор (кулер), над которым расположен радиатор; в крышке около аэратора также имеются вентиляционные прорези для пассивной вытяжки воздуха измещением из бокса.
5. Фитосветильник с усиленным синим и красным спектром.
6. Стекло (обычное, 6-8 мм, триплекс, акрил, поликарбонат монолитный или оргстекло).
7. Многоцветные сменные кассеты для гидропоники.
8. Биологический фильтр (многослойный, многокомпонентный: вулканическая лава, пемза, керамика, нейлон, органическая губка, мраморная крошка).
9. Аэрирующий камень для вывода воздуха из компрессора.
10. Насос (помпа) с собственным фильтром механической очистки.
11. Ультрафиолетовая лампа погружная для дезинфекции воды или раствора.

Кроме этого, тепличный комплекс содержит и другие компоненты – увлажнитель воздуха, датчики, шланги, трубки, емкости, индикаторы, преобразователи.

Для моделирования поведения мини-теплицы использованы диаграммы состояний в нотации UML. Поскольку система представляет из себя конечный автомат, она наиболее лаконично описывается именно таким типом диаграммы. Общая диаграмма состояний мини-теплицы приведена на рисунке 5.

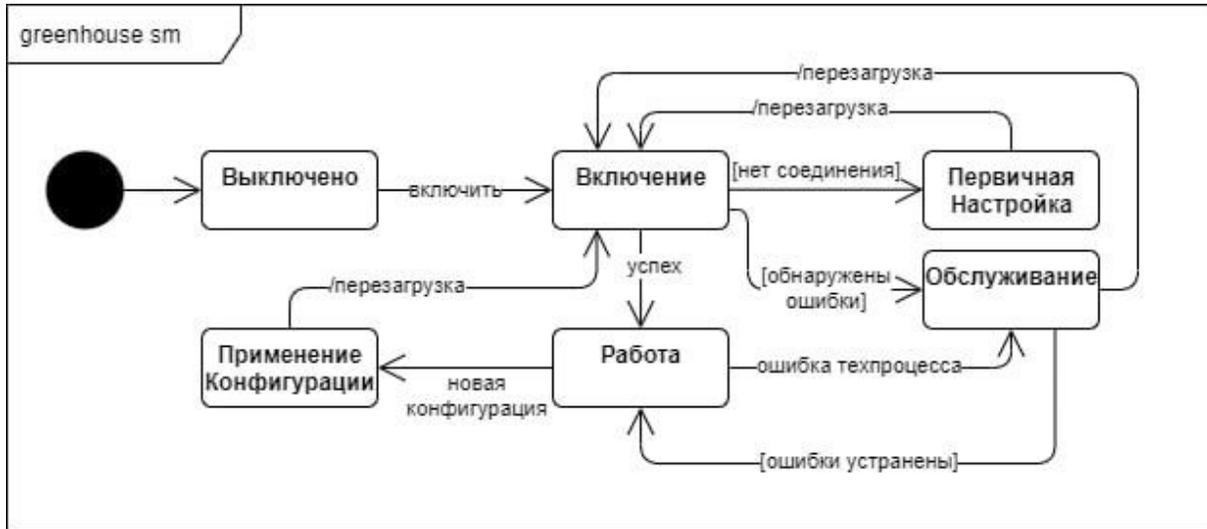


Рисунок 5 – Общая диаграмма состояний мини-теплицы

Рассмотрим более подробно описание каждого состояния.

1. «Выключено» – начальное состояние. При подаче питания происходит переход в состояние «Включение».
2. «Включение». В этом состоянии система производит попытку подключиться к сети Wi-Fi или к устройству Bluetooth (в случае неудачи – переход в состояние «Первичная Настройка»), а затем проводит проверку всех подсистем на наличие ошибок (в случае наличия ошибок – переход в состояние «Обслуживание»). В случае успеха происходит переход в состояние «Работа».
3. «Работа». Основное состояние системы, в котором производятся все необходимые измерения и операции, связанные с технологическим процессом: переключение режимов работы устройств, контроль параметров, отправка данных на сервер. В ходе контроля параметров в том числе отслеживается поступление команд от сервера на изменение конфигурации, при котором происходит переход в состояние «Применение Конфигурации». Также производится постоянный мониторинг наличия неполадок и/или отклонений от технологического процесса и контроль критически важных параметров (например, уровня воды в ёмкости). При

обнаружении ошибок технологического процесса происходит переход в режим «Обслуживание».

4. «Обслуживание». В этом состоянии система отправляет на сервер отчёт об обнаруженных неполадках и ожидает исправления этих неполадок путем непрерывного мониторинга параметров.
5. «Первичная Настройка». В этом состоянии система создает хот-спот Wi-Fi и простейший веб-интерфейс для настройки соединения к Wi-Fi сети и первичной настройки параметров работы. Также в этом состоянии производится поиск Bluetooth-соединений. После ввода данных пользователем система перезагружается (переход в состояние «Включение»).
6. «Применение конфигурации». В этом состоянии система производит изменение внутренних переменных и параметров для соответствия новой полученной конфигурации (новому технологическому процессу), после чего перезагружается (переход в состояние «Включение»).

Ключевыми состояниями являются «Включение» и «Работа». Эти состояния являются сложными, и установка, находящаяся в этих состояниях, выполняет ряд действий. Поэтому указанные состояния описываются диаграммами активности. На рисунке 6 представлена диаграмма для состояния «Включение», на рисунке 7 – для состояния «Работа».

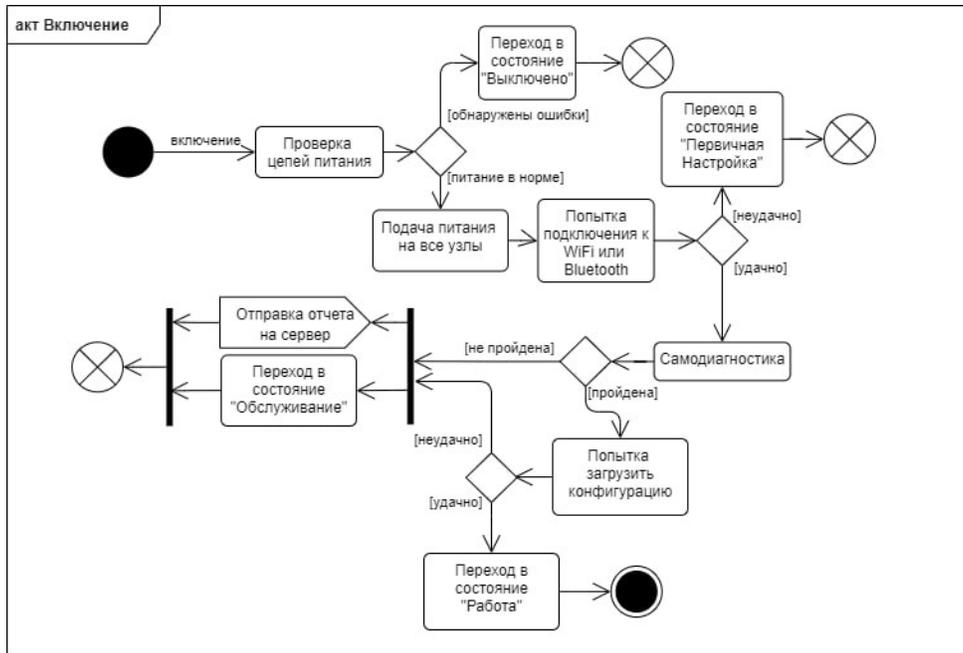


Рисунок 6 – Диаграмма активности для состояния «Включение»

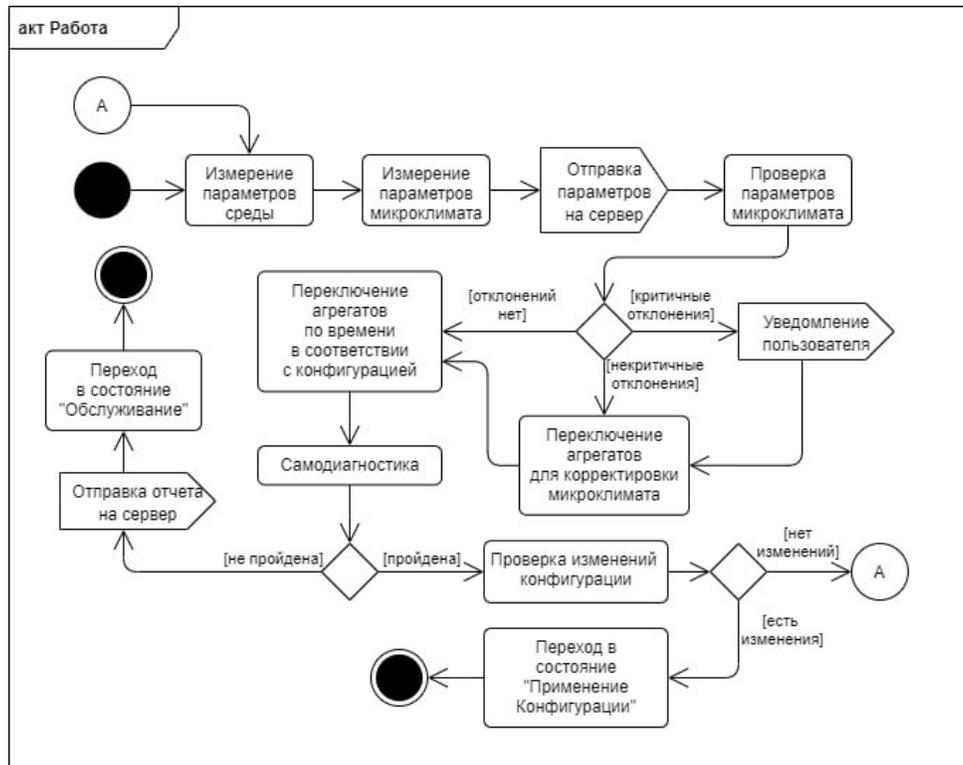


Рисунок 7 – Диаграмма активности для состояния «Работа»

Имеется возможность оценивать работоспособность подобных модулей и фиксировать нарушения технологических процессов, используя собранные данные и инструменты их анализа. В качестве исходных данных использован существующий набор данных «Vertical farming»¹. Содержащиеся в нём данные относятся к секциям, которые используются для выращивания культур в вертикальных теплицах закрытого типа, аналогичным мини- теплице, предложенной выше. Секции имеют два вертикальных слоя, в которых реализуются технологические процессы (А и В).

Обсуждение и эксперименты

Для 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

¹ Vertical farming. Cubes which are used for advanced vertical farming. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/midouazerty/work-for-parmavir>

уровне машин и установок.² 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:

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

² What is the maximum cable length for a CANopen network? URL: <https://www.se.com/ww/en/faqs/FA339840/>

³ Response Times: The 3 Important Limits. URL:

Приведём гистограммы температуры и влажности в тепличном комплексе соответственно на рисунках 8 и 9.

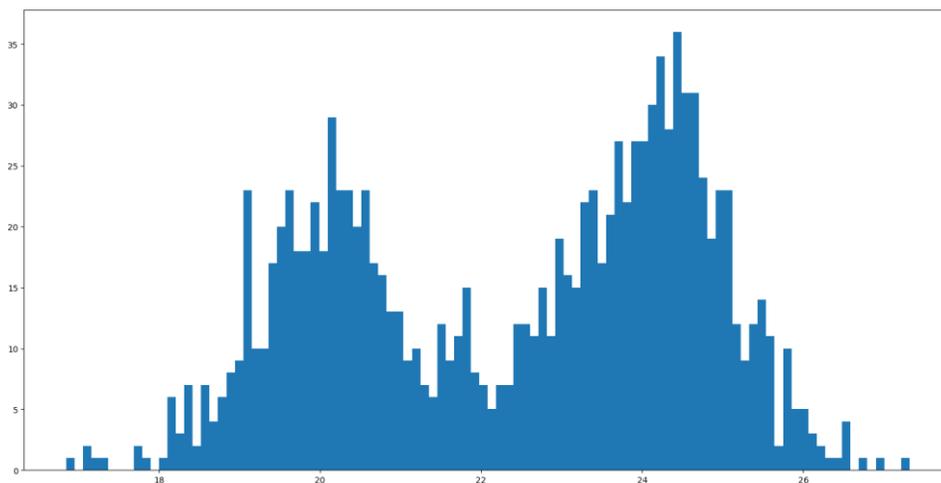


Рисунок 8 – Гистограмма температуры секции 0, слой А

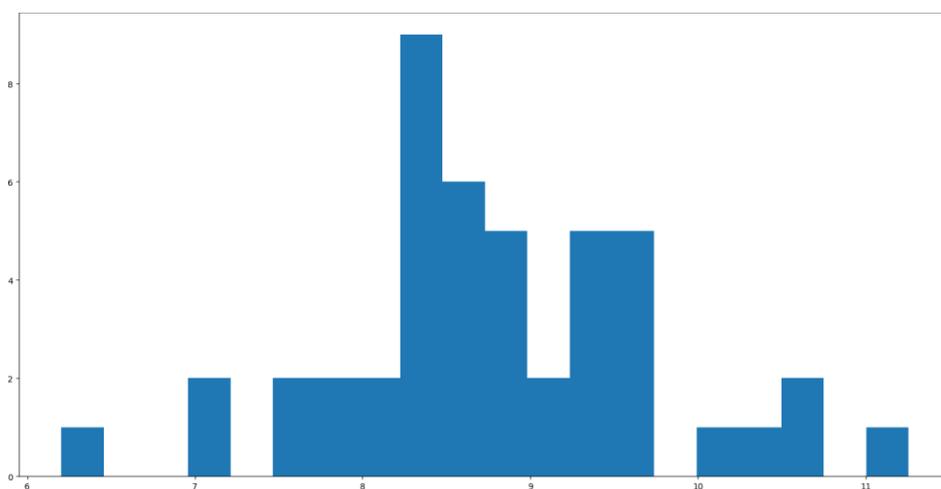


Рисунок 9 – Гистограмма влажности секции 0, слой А

На гистограмме температуры видны две моды, которые соответствуют дневной и ночной температуре. Для влажности используем среднее значение. Рассмотрим изменение температуры относительно времени. Для наглядности возьмем интервал в 7 суток (рисунок 10).

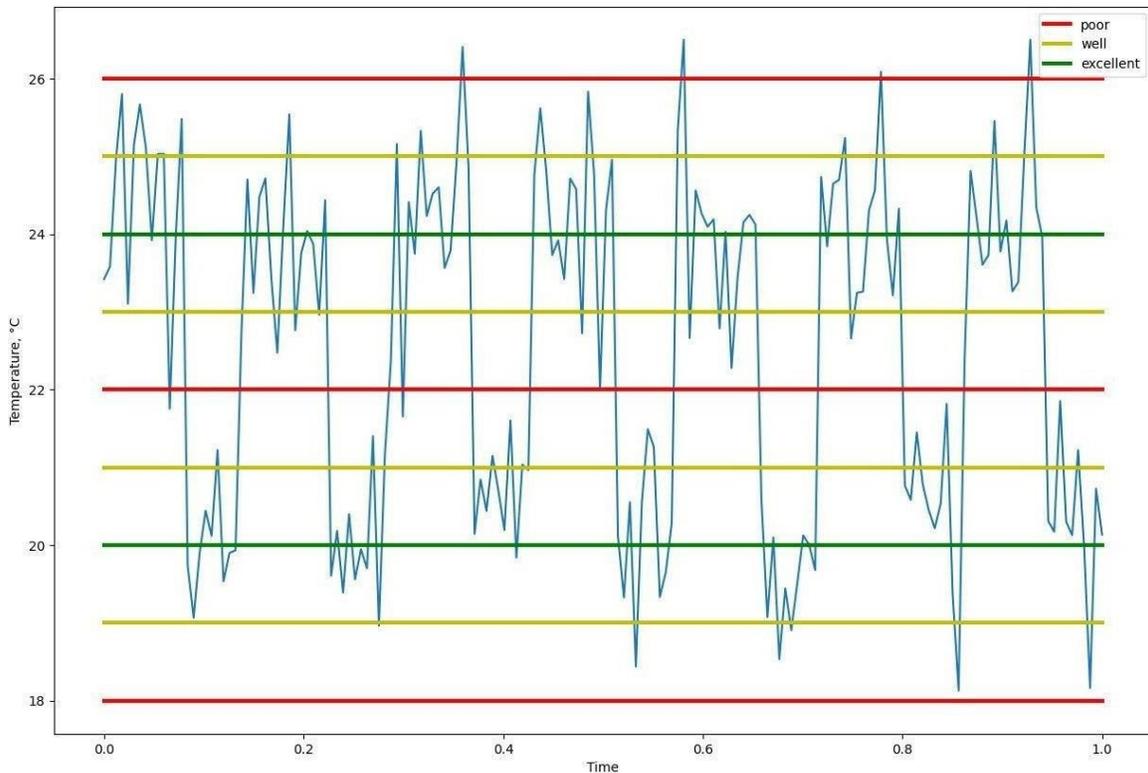


Рисунок 10 – График изменения температуры, 7 суток

Из графика видно, что можно описать стабильность работы секции по температуре относительно времени. Если температура выходит за заданные рамки (мода $\pm 2^{\circ}\text{C}$), то можно заключить, что в секции имеется нарушение технологического процесса.

Рассмотрим поведение влажности. Для неё также наблюдается периодичность. Для наглядности на рисунке 11 представлена сглаженная функция по значениям относительной влажности в течение 50 суток.

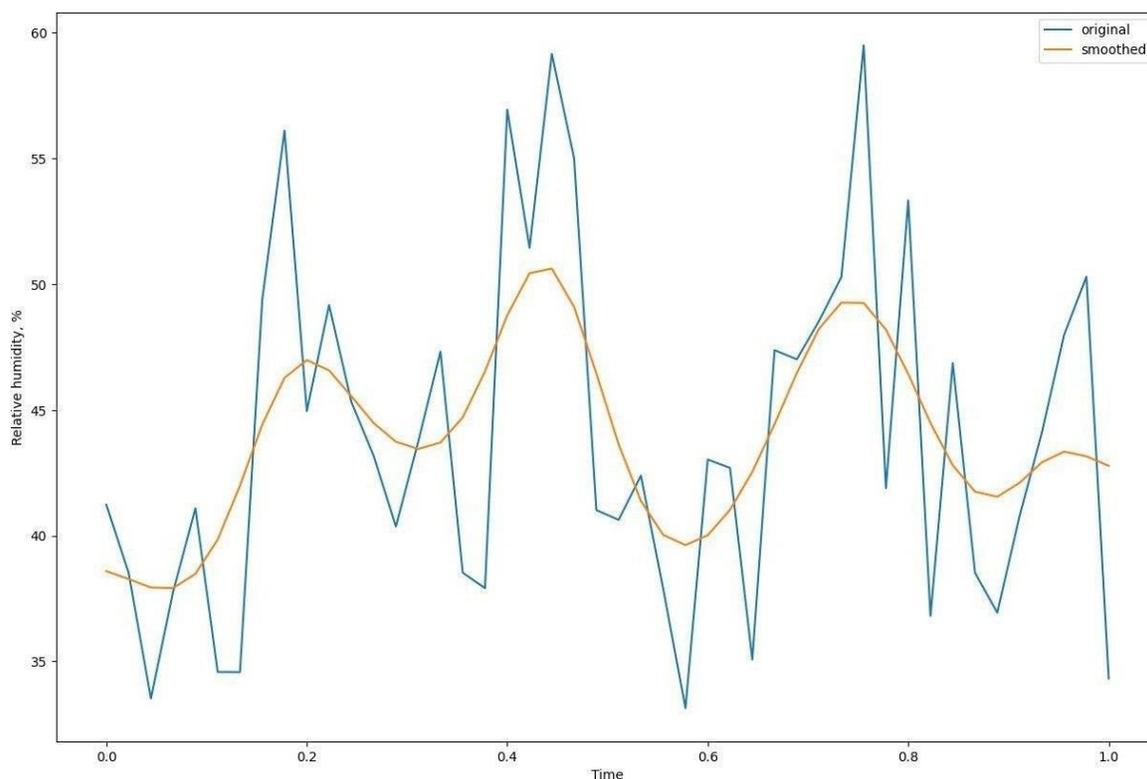


Рисунок 11 – График изменения относительной влажности, 50 суток

К контролю по температуре можно добавить пороги для относительной влажности (среднее значение $\pm 10\%$). Недостатком такого подхода является редкая и нестабильная частота вывода о соблюдении технологического процесса в данный период времени, так как вывод делается по факту предоставления влажности и ближайшему значению температуры от времени предоставления влажности. При наличии значений температуры без влажности можно лишь ограниченно судить только о соблюдении технологических процессов или работоспособности установки (значения температуры вышли за установленные рамки).

Решением является более тщательная подготовка или предобработка выборки. Реализация предложенного тепличного комплекса, в котором выполняется систематический сбор данных обо всех параметрах технологического процесса, позволит решить эту проблему.

Кроме того, возможно контролировать процесс выращивания проактивно, выполняя прогнозирование параметров климата на основе собранных данных. В

данной работе использованы проекты Environment for knowledge analysis – WEKA⁴ и AutoML – AutoWEKA⁵ для подготовки данных, выбора алгоритмов и выполнения машинного обучения. К примеру, таблица 2 иллюстрирует точность классификаторов для прогнозирования влажности в слое В.

Таблица 2 – Наиболее точные классификаторы для прогнозирования влажности

№	Параметры	Время	RMSE	RRSE,	Количество	Лучший
	(время, выделенная память, потоки)	обучения		%	конфигураций	классификатор
1	15 мин, 1024МВ,	5.1 с	1.2305	51	29	AttributeSelected
2	30 мин, 1536МВ,	4.5 с	1.1324	47	60	REPTree
3	45 мин, 2048МВ,	28.2 с	0.5080	21	126	RandomForest

Наибольшей точности прогнозирования, как правило, можно добиться с использованием метода случайного леса (RandomForest), в данном случае среднеквадратичная ошибка (RMSE) составляет 0,5 (21% в относительном выражении). Таким образом можно, выполнив обучение для заданного технологического процесса, с достаточной точностью предсказать его возможные нарушения.

Заключение

В ходе исследований выполнен аналитический обзор возможностей и методов автоматизации технологических процессов выращивания культур в вертикальных фермах. Построена модель технологических процессов в

⁴ Weka 3: Machine Learning Software in Java. URL: <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

⁵ AutoWeka. URL: <https://github.com/automl/autoweka>

вертикальных фермах. Предложена программно-аппаратная архитектура фермы, проведены эксперименты.

Разработанная архитектура автоматизированной системы управления технологическими процессами предназначена для реализации в тепличных комплексах вертикальных гидропонных и аэропонных ферм. Она включает датчики и исполнительные устройства на нижнем уровне, модули ввода-вывода, управления и сбора данных на промежуточном уровне, локальный сервер мониторинга на верхнем уровне. За счет использования функциональных модулей предлагаемая архитектура обеспечивает возможность мониторинга, контроля и управления всеми технологическими параметрами, такими как: микроклимат теплицы, полив, освещение, экранирование, вентиляция. Шина CAN используется в качестве основного коммуникационного интерфейса. За счет многоуровневости и модульности архитектура соответствует современным отраслевым 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.

Разработка архитектуры является важным этапом в развитии современных систем автоматизации. Дальнейшая работа заключается в следующем: 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 перейти к промышленному внедрению предложенных решений.

Список литературы

1. Cosman, S. I., Bilatiu, C. A., & Marțiș, C. S. (2019). Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse. In 2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), 1-4.
2. 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://dx.doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8988049>
3. 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, pp. 1-6. <https://dx.doi.org/10.1109/ICMECH.2009.4957160>
4. Harivardhagini, S. (2017). LabVIEW based Greenhouse Automation. CVR Journal of Science and Technology 13, 79-82.
5. 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), 231, 910-921. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-90321-3_76
6. Ko, C. C., & Mon. S. S. (2014). Microcontroller based greenhouse automatic control system. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 3(5), 0865-0870.
7. Li, H. et al. (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, 106558. <https://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
8. Nicolosi, G., Volpe, R., & Messineo, A. (2017). An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse. Energies 10(5), p.

722. <https://dx.doi.org/10.3390/en10050722>
9. Raj. J. S., & Ananthi. J. V. (2019). Automation using IoT in greenhouse environment. *Journal of Information Technology* 1(01), 38-47. <https://dx.doi.org/10.36548/jitdw.2019.1.005>
 10. Saha, T., et al. (2017). Construction and Development of an Automated Greenhouse System Using Arduino Uno. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business* 3(9), p. 1. <https://dx.doi.org/10.5815/ijieeb.2017.03.01>
 11. Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Currency.
 12. 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://dx.doi.org/10.26483/ijarcs.v8i9.4981>
 13. Sivagami, A., et al. (2018). Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 99(2), 183-191. <https://dx.doi.org/10.1007/S40030-018-0264-0>
 14. 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)*, 1-6. <https://dx.doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276478>
 15. Ullah, M. W., et al. (2018). Internet of Things Based Smart Greenhouse: Remote Monitoring and Automatic Control. In *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*. <https://dx.doi.org/10.12783/dteees/iceee2018/27803>
 16. Weldeiasie, D. T. et al (2021). Automated Climate Monitoring System: the Case of Greenhouse Industries in Ethiopia. *Internet of Things*, 15, 100426. <https://dx.doi.org/10.1016/j.iot.2021.100426>
 17. Шишов, О. (2021). Современные средства АСУ ТП. Инфра-Инженерия.