

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

Введение

Для успешного выращивания культур в тепличных комплексах, в том числе вертикальных фермах, необходимо поддерживать оптимальные микроклиматические условия, такие как вентиляция, температурный режим, освещение, влажность, полив.

Операции по поддержанию требуемых условий определяются технологией выращивания конкретной культуры. В больших вертикальных фермах ручное выполнение всех необходимых операций сопряжено с риском ошибок из-за человеческого фактора. Автоматизация управления вертикальными фермами представляет собой перспективное направление, но существующие решения не всегда соответствуют требованиям практики, не обеспечивают адаптивное управление микроклиматом и не предоставляют гибких архитектурных решений для построения масштабируемых вертикальных ферм. Поэтому необходимо разработать методы, модели и архитектуру для повышения уровня автоматизации технологических процессов в вертикальных фермах.

В результате выполнения проекта были получены следующие результаты:

1. Аналитический обзор возможностей и методов автоматизации технологических процессов выращивания растений в вертикальных фермах.
2. Модель технологических процессов в вертикальных фермах с использованием аппарата онтологий.
3. Метод прогнозирования показателей состояния вертикальной фермы на базе машинного обучения.

4. Метод адаптивного управления технологическими процессами в вертикальных фермах.

5. Программно-аппаратная архитектура автоматизированного вертикальной фермы.

Аналитический обзор, предложенные модели и методы в значительной мере рассмотрены в отчёте за первый год выполнения проекта. В данном отчёте рассматриваются преимущественно полученные практические результаты, предложенные архитектурные решения и эксперименты, подтверждающие применимость полученных результатов.

Архитектурные решения

Чтобы обеспечить масштабирование и удобство обслуживания конструкций автоматических вертикальных ферм, было принято решение организовать дистанционное считывание информации с датчиков и управление исполнительными устройствами. Из модулей радиопередачи предпочтение было отдано устройствам, работающим по протоколу LoRa. Данный протокол предоставляет возможность энергоэффективной передачи меньших объёмов данных на большие расстояния, по сравнению с протоколом ZigBee. Поэтому с целью уменьшения объёма передаваемой информации осуществлена децентрализация управления. В такой конфигурации работа исполнительных устройств лишь корректируется со стороны модуля управляющего всей теплицей.

Для управления сенсорными и исполнительными узлами была разработана архитектура программно-аппаратного комплекса, представленная на рисунке 1, которая позволяет конфигурировать параметры и настраивать рабочие циклы узлов, а также хранить и обрабатывать собираемые данные. Данная архитектура обладает следующими технологическими достоинствами: подключение и отключение узлов без нарушения логики работы всей системы, быстрое развёртывание системы, масштабирование системы и многоуровневый доступ в систему для различных групп пользователей, упрощение подключения узлов за счет

беспроводной передачи данных. Рассмотрим подробнее предлагаемое решение.

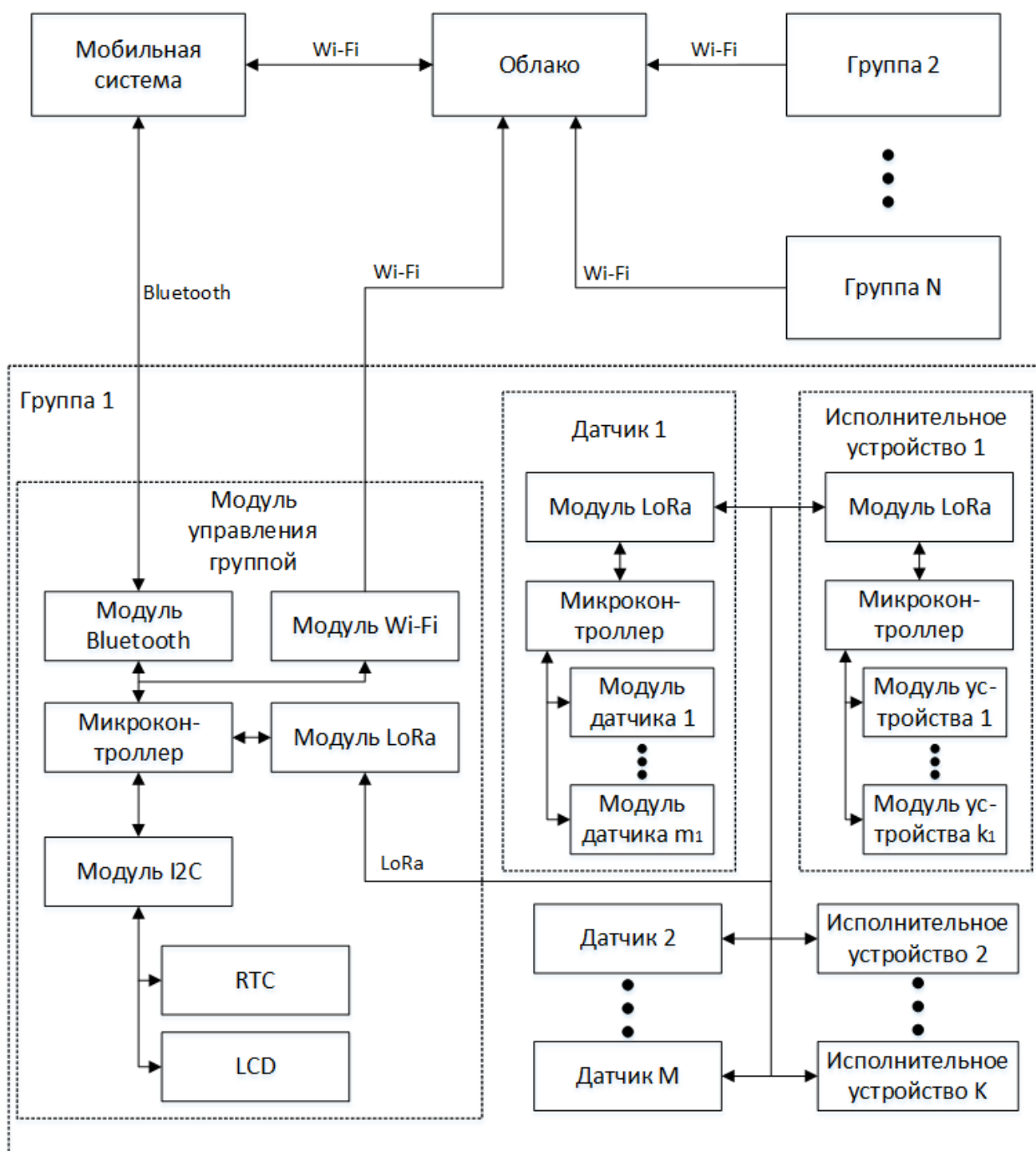


Рисунок 1 — архитектура нижнего уровня теплицы

Из представленной блок-схемы видно, что конечные узлы каждой группы, датчики и управляющие устройства, устроены схожим образом. Они состоят из компонентов трёх видов. В каждом узле в единичном экземпляре представлены компоненты двух из трех этих видов: 1) модуль LoRa и 2) микроконтроллер. Модуль LoRa служит для обмена информацией между

узлом и модулем управления группой, а микроконтроллер осуществляет контроль над самим узлом. Третьим видом компонентов являются модули датчиков или модули устройств, в зависимости от типа узла. У датчиков подобные модули служат для получения информации об окружающей среде, а у устройств для оперативных взаимодействий с окружающей средой.

Алгоритм работы каждого узла в большей степени зависит от типа узла, чем от его комплектации. Специфика программного обеспечения каждого узла заключается в том, каким образом должны обрабатываться сигналы или управляться операции датчиков и устройств соответственно. Остальная часть кода унифицирована. Для подобного управления реализована система конфигурирования узла, состоящая из двух частей.

Первая часть системы закладывается на этапе создания модуля. В ней содержится информация о комплектации и типе узла. На основании этой же информации модуль получает уникальный ID, присваиваемый сервером. ID состоит из 12 байт и не может совпадать у двух любых модулей ни при каких условиях.

Вторую часть конфигурационной информации микроконтроллер получает на этапе начала работы в системе, когда модуль управления группой, принимает сведения о составе конкретного узла и принимает решение о том, добавлять ли данный узел в группу. Эта часть конфигурации содержит информацию о режимах работы каждого модуля, а также о том, как часто и когда именно микроконтроллер должен выходить на связь с модулем управления группой.

Сам модуль управления группой состоит из микроконтроллера, осуществляющего контроль уже над всей группой; модулей связи с внешними компонентами системы по каналам Bluetooth, Wi-Fi и LoRa; модуля часов реального времени, повышающего точность работы группы; и LCD экрана, входящего в состав пользовательского интерфейса.

Настройки данного модуля также формируются из двух составляющих. Первая часть информации, записываемая в модуль при прошивке, включает

только ID, назначенный сервером. Позже, на этапе завершения регистрации, ID всех узлов передаются на сервер для установления связи между компонентами группы в базе данных сервера, с целью дальнейшей обработки и отображения этих данных. Это также позволяет быстро подтянуть в систему новый модуль управления группой на место имеющегося, если имеющийся выйдет из строя. Новый модуль по ID получает все данные и настройки, имевшиеся у старого модуля, и продолжает работу, прерванную из-за отказа имевшегося модуля.

Вторая часть конфигурационных данных заносится в модуль через мобильную систему, связь с которой осуществляется по протоколу Bluetooth, в процессе настройки группы. В этот пакет данных входит вся информация об узлах группы, а также о взаимосвязи узлов. Данная информация описывает, какие существуют датчики и устройства, какие модули входят в их состав, количество этих модулей, все настройки времени для каждого узла, описание причинно-следственных взаимосвязей, действующих при работе узлов. Эти взаимодействия накладывают требования на расположение узлов, в виде физической связи влияния устройства на датчик, от которого зависит. Но в остальном, расположение модулей свободное, на него оказывает влияние только дальность радиопередачи в направлении узла и целесообразность и эффективность его нахождения в определённом месте.

Исходя из этих настроек модуль управляет группой и осуществляет контроль системы, а в случае отсутствия тех или иных ожидаемых откликов конечных узлов передает об этом уведомление на сервер. Для дальнейшей обработки состояния системы уже самим оператором, с целью решения возникших проблем, в том числе и замену неисправных узлов.

Для контроля времени микроконтроллер использует модуль RTC. Этот модуль как определяет хронометраж действий микроконтроллера, так и корректирует время действия конечных узлов.

Обо всех событиях, происходящих во время работы системы, в соответствии с конфигурацией, и обо всех ошибках, возникающих в процессе

работы, модуль управления группой сообщает на сервер. Эта связь осуществляется по протоколу Wi-Fi.

Для создания конфигурации, рассчитанной на каждый модуль управления группой, оператор тепличного комплекса определяет и формирует набор датчиков и исполнительных устройств, которые будут управляться конкретным модулем. Выбираются типы сенсоров и устройств и их количество, а также параметры для их работы, такие как частота опроса датчиков, частота и длительность срабатывания исполнительных устройств, в частности насосов, ламп, вентиляторов т.д. После этого, в соответствии со сформированным набором требований, генерируется конфигурационный файл. Блок-схема процесса подготовки конфигурации представлена на рисунке 2.

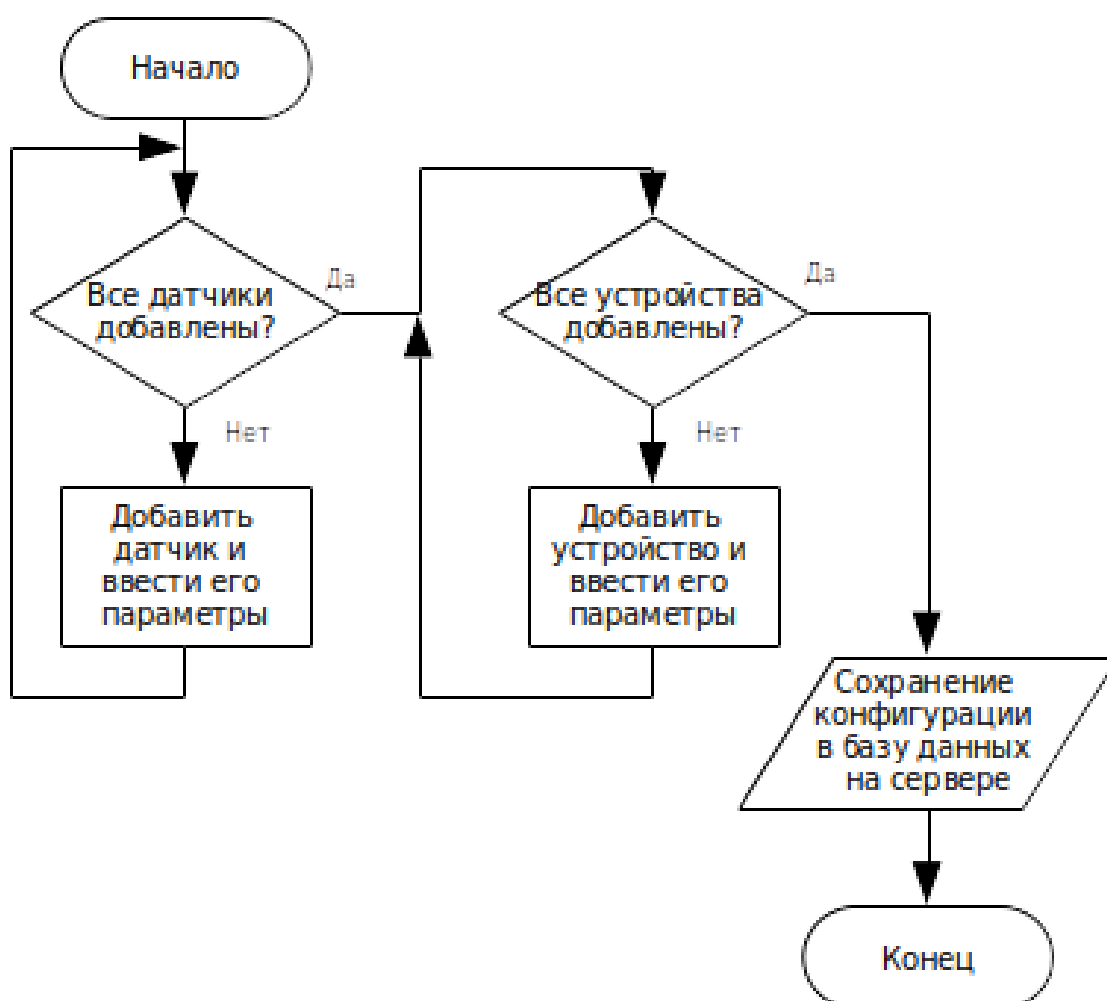


Рисунок 2 — блок-схема процесса создания конфигурации тепличного комплекса

Для удобства контроля и настройки формируемых групп разработано мобильное приложение, связывающимся с модулем управления группой по протоколу Bluetooth. Это приложение получает с сервера те или иные конфигурации и отображает их оператору, что позволяет выбрать конфигурацию, необходимую для данной системы. После этого оператор формирует группу из дочерних модулей, в соответствии с составом, определенным в конфигурации. В процессе регистрации пользователь выбирает конкретный узел из текущей конфигурации, который собирается зарегистрировать, и приложение показывает ему только те узлы, которые соответствуют данному типу и комплектации. Приложение автоматически выделяет модули, готовые к регистрации, по выбранному оператором типу и комплектации узла из конфигурации, чем препятствует возникновению несоответствий между фактическим содержимым системы и ее составом в соответствии с настройками. Сами списки, сформированные таким образом, содержат ID задействованных модулей, что позволяет однозначно идентифицировать эти модули. В случае возникновения ошибок при регистрации модулей микроконтроллер сообщит об этом в мобильное приложение, после чего появится возможность повторной попытки регистрации данного модуля. Данный процесс представлен на рисунках 3 и 4.

Во время работы системы оператор получает данные о текущем состоянии тех или иных узлов, на момент последнего считывания их ID.

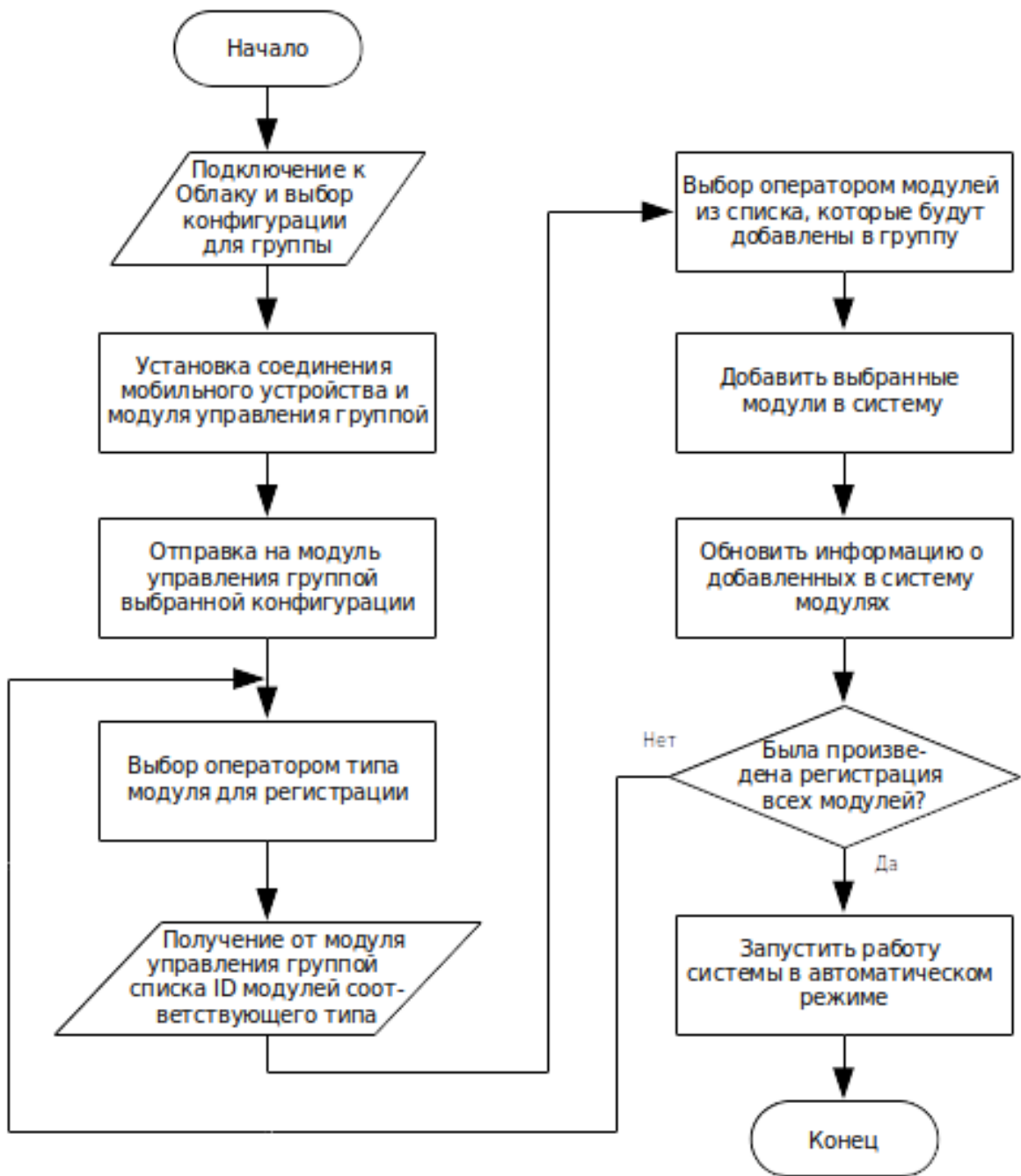


Рисунок 3 — блок-схема процесса обмена конфигурацией между мобильной системой и модулем управления группой

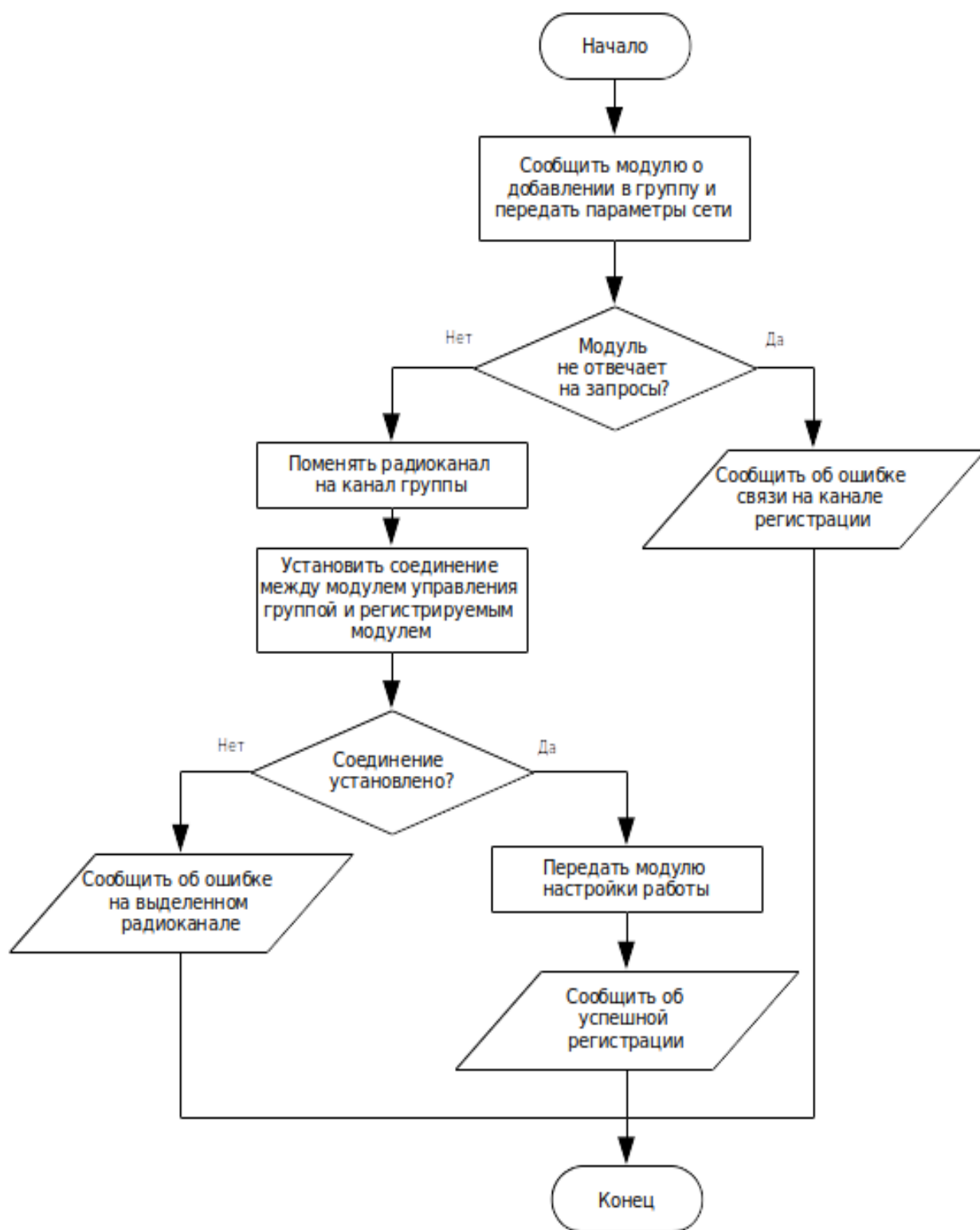


Рисунок 4 — блок-схема подпроцесса добавления модуля в систему

Сенсорные модули после запуска в основной цикл работы снимают информацию с датчиков, а модули исполнительных устройств контролируют оборудование, с периодичностью и параметрами, заданными конфигурацией. Поддерживаемые значения при управлении оборудованием корректируется

модулем управления группой в зависимости от считанных показателей датчиков. А в случае отсутствия связи между ними из-за неполадок в передаче значения возвращаются к заданным в конфигурации. Также по протоколу LoRa происходит периодический опрос узлов модулем управления группой, с последующей передачей показаний датчиков и данных о статусе исполнительных устройств в облако.

В связи с тем, что протокол LoRa покрывает только физический и канальный уровни передачи, для организации обмена информацией был разработан специальный протокол, воплощающий четыре уровня модели OSI: сетевой, транспортный, сеансовый и уровень представления.

Малая пропускная способность LoRa при передаче данных обуславливает необходимость ужесточить контроль над обменом данными в сети. Для этого была внедрена модель взаимодействия «ведущий-ведомый», где ведущим является модуль управления группой, а ведомыми все дочерние узлы. Это позволяет ведущему модулю контролировать всю группу и производить опрос в нужный момент. Чтобы обеспечить независимость групп друг от друга и минимизировать коллизии между ними, смежные группы должны обмениваться данными в разных радиоканалах.

В ходе регистрации компонентов по специальному каналу на конечные устройства передается следующая информация: адрес, канал работы группы и конфигурация. Передаваемый адрес состоит из двух частей. Первая часть информации содержит адрес, общий для всех узлов в группе (адрес группы). Ни у каких двух групп адреса не совпадают. Это позволяет избежать ошибок даже при работе разных групп на одних и тех же радиоканалах. Вторая часть информации содержит уникальный адрес. У модуля управления группой он равен 0, а у остальных модулей совпадает с их положением в конфигурации. Это упрощает восстановление системы в случае выхода из строя какого-либо узла.

Покрытие протоколом уровня представления позволяет повысить эффективность передачи, снизив объём передаваемых данных, что, однако, ограничивает возможность использования предлагаемого решения.

Оценка передачи данных

Организация централизованного контроля радиопередачи группы позволяет избежать коллизий внутри только одной группы, а не всей системы в целом. Для решения этого вопроса во время разработки тепличных комплексов были проведены исследования с целью выявления влияния LoRa модулей друг на друга при разных настройках передатчиков.

В технической документации к модулю приведены следующие параметры, отвечающие за занимаемое пространство передачи: 1) частота работы (F_{RF}), 2) коэффициент расширения (SF) и 3) ширина полосы модуляции (BW).

Частота работы модуля и ширина полосы модуляции являются частотными характеристиками и измеряются в Гц. Допустимые для свободного использования на территории РФ частоты, поддерживаемые модулем, находятся в диапазоне от 433,25МГц до 434,75МГц с шагом не меньше 25КГц.

Допустимые значения параметра ширины полосы модуляции BW: 7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.25, 41.7, 62.5, 125, 250 и 500 КГц.

Поскольку LoRa передача основывается на принципе расширения спектра и линейной частотной модуляции, сигнал постоянно меняет свою частоту. Он распространяется с отклонением от заданного значения параметра F_{RF} , что уменьшает допустимый к использованию диапазон. Само отклонение равно $1/2$ параметра BW, в обе стороны.

Также в передатчик встроена защита от неточностей работы кварцевого опорного генератора: модуль LoRa будет реагировать на сигнал со смещением параметра F_{RF} на $\pm 25\%$ от значения BW.

Таким образом, при одинаковых прочих характеристиках двух передатчиков, минимальная разница между их частотами будет вычисляться при помощи следующей формулы:

$$\Delta F_{RF} = \frac{BW_1 + BW_2}{2} + \frac{\max(BW_1, BW_2)}{4},$$

округленное до ближайшего большего числа кратного 25КГц.

Исследования показало, что во время работы двух модулей с $BW_1 = 41.5$ КГц и $BW_2 = 500$ КГц на одной и той же чистоте, отклонении логарифмов значений SF более чем на 2 единицы уменьшало влияние радиопередатчиков друг на друга настолько, что модули могли синхронно производить общение. Это расширяет возможности для конфигурирования радиоканалов групп теплиц, находящихся рядом.

Одновременно с этим регулирование данных параметров влияет на дальность и скорость передачи информации. Минимальная скорость достигается при настройке передатчика $BW = 7.8$ КГц и $SF = 4096$ и остальными настройками в стандартных состояниях, номинальная скорость такой передачи падает до 18 б/с. Это вносит ограничения на настройки в зависимости от количества модулей, необходимой скорости опроса компонентов группы и расстояниями радиопередачи между ними и модулем управления группой.

В реализованном прототипе системы, проходящем долгосрочное тестирование LoRa-модуль был настроен на $BW = 250$ КГц и $SF = 256$. Такая настройка позволила приёмнику передавать со скоростью примерно 2.15 кб/с полезной информации. Время передачи серии пакетов, осуществляющих опрос одного датчика с четырьмя компонентами, составляло 198мс. При этом вся серия состоит из шести пакетов, пять из которых отвечают за конкретизацию и проверку отправляемых данных, а один за содержательную часть, считанные датчиком значения. При единичном повреждении пакета с данными время возросло до 265мс.

Если отталкиваться от скорости опроса в 0.35 с, подобная система сможет поддерживать ежеминутный контакт управляющего модуля с 171 модулем, состоящим из четырёх компонентов.

Исходя из этих данных можно сделать вывод о том, что решение удовлетворяет поставленным требованиям, но вносит ограничение на количество находящихся рядом тепличных модулей. По крайней мере, добавляет требование оператору по нахождению баланса между количеством групп, количеством модулей в группе и временем опроса этих модулей. Также видно, что находящиеся рядом модули следует объединять в один, для уменьшения суммарного времени обмена информацией этих модулей и модуля управления группой.

Оценка работоспособности комплексов

Рассмотрим задачу оценки выполнения технологических процессов в автоматизированных теплицах на основе кластеризации блоков теплиц (кубов) по признаку пригодности.

Дана выборка из 100 кубов, каждый куб состоит из двух слоев (табл. 1). Для каждого куба зафиксирована температура и влажность в слоях на протяжении 50 суток, где фиксация температуры происходила раз в 1 час, а влажности - раз в 24 часа.

Таблица 1. Выборка температуры и влажности двух слоев у кубов

№	ID куба	Метка времени	Температура, слой А	Температура, слой В	Заслонка	Влажность, слой А	Влажность, слой В
0	49	1451606401	NaN	NaN	0.0	NaN	NaN
1	95	1451606402	NaN	25.71189867 1792053 °C	NaN	NaN	NaN
2	48	1451606402	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
3	55	1451606401	NaN	NaN	NaN	NaN	8.594411 333817883 г/м ³
...
400284	6	1455929825	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
400285	36	1455929967	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
400286	0	1455929993	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Приведем признаки температуры и влажности от строковых литералов к численным значениям с плавающей точкой, сдвинем признак времени к началу отсчета.

Таблица 2. Минимально предобработанная выборка

№	ID куба	Метка времени	Температура, слой А	Температура, слой В	Заслонка	Влажность, слой А	Влажность, слой В
0	49	0	NaN	NaN	0.0	NaN	NaN
1	95	1	NaN	25.71189 86717920 53	NaN	NaN	NaN
2	48	1	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
3	55	1	NaN	NaN	NaN	NaN	8.59441133 3817883
...
400284	6	4323424	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
400285	36	4323566	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
400286	0	4323592	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Рассмотрим гистограммы одного из кубов, например, самый первый, а также один из слоев для определения поведения (рис. 5, 6).

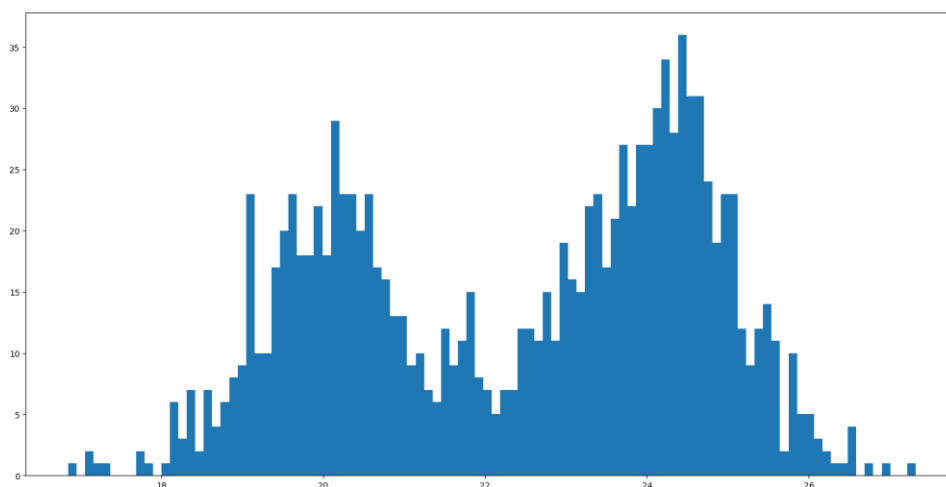


Рисунок 5 — Гистограмма температуры куба 0, слой А

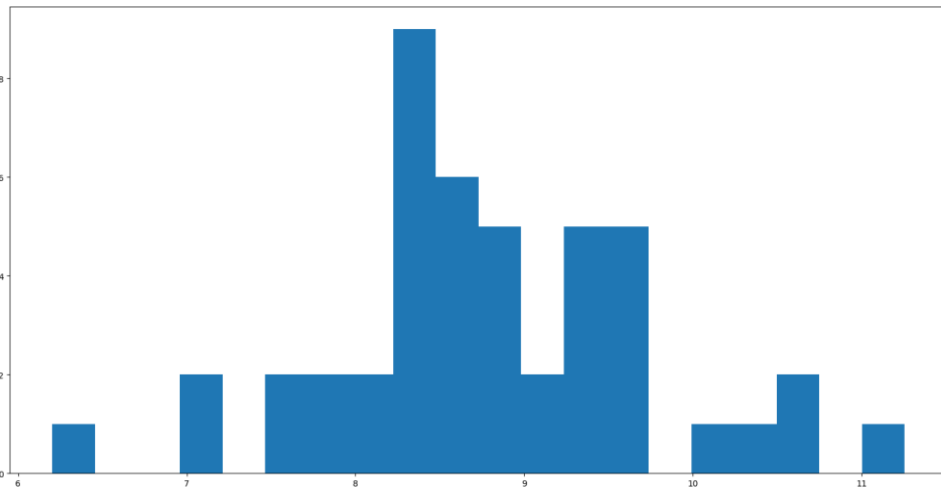


Рисунок 6 — Гистограмма влажности куба 0, слой А

На гистограмме температуры видны две моды - температура днем и ночью. Для влажности возьмем среднее значение. Рассмотрим изменение температуры относительно времени (рис. 7).

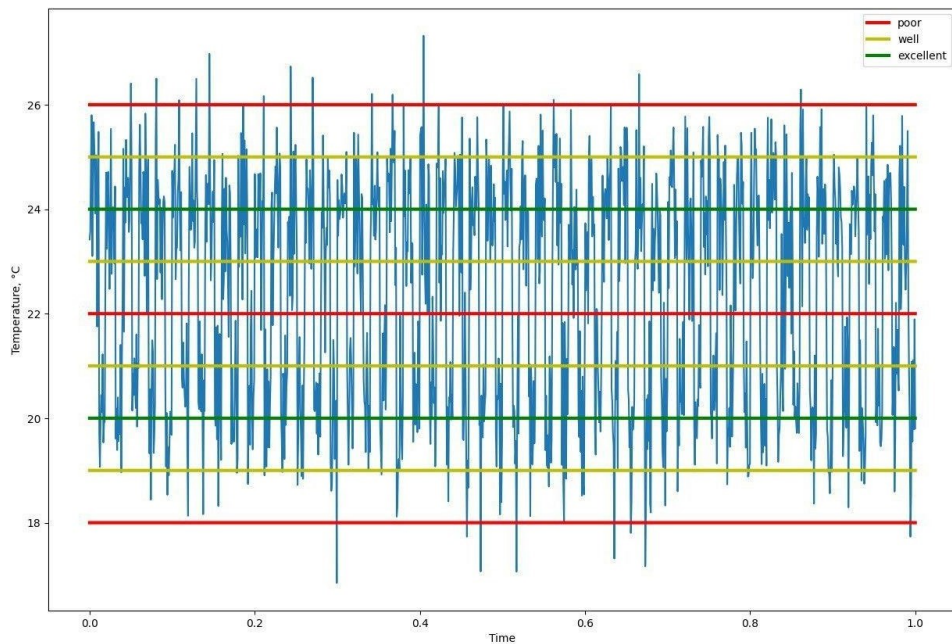


Рисунок 7 — График изменения температуры, 50 суток

Для наглядности возьмем также период времени в 1 неделю (рис. 8).

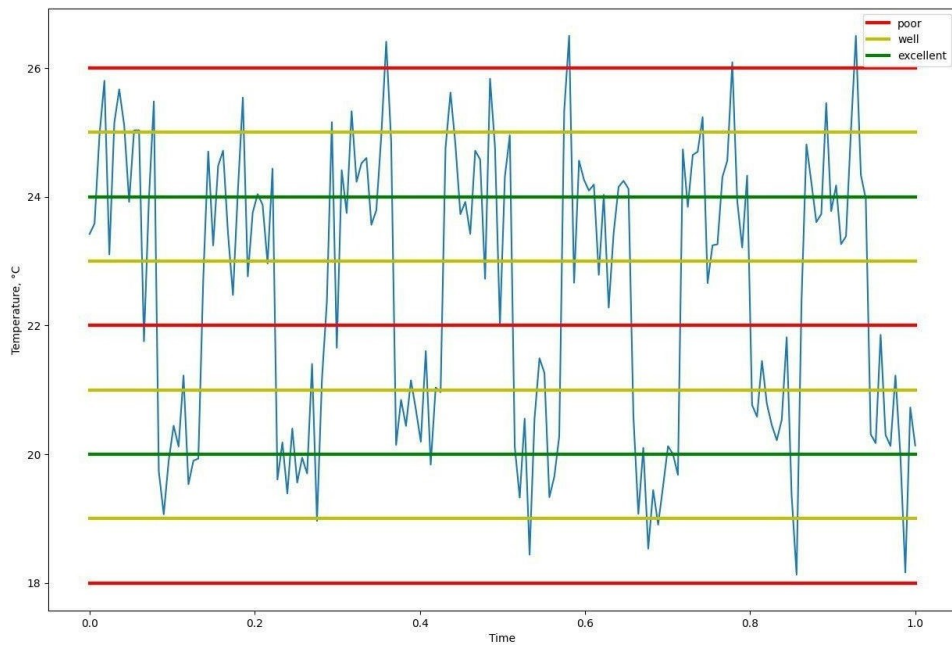


Рисунок 8 — График изменения температуры, 7 суток

Из графика видно, что можно описать стабильность работы куба по температуре относительно времени. Если температура выходит за заданные рамки (мода $\pm 2^{\circ}\text{C}$), то охарактеризуем данный куб для заданного времени как неработоспособный.

Рассмотрим поведение влажности (рис. 9).

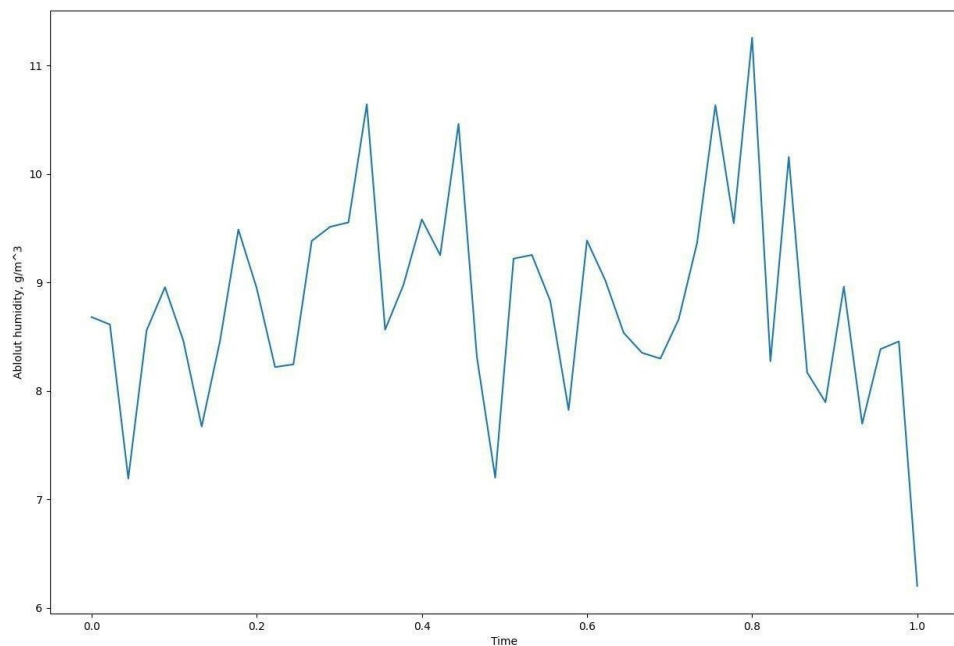


Рисунок 9 — График изменения абсолютной влажности, 50 суток

Критической проблемой такого подхода является редкий вердикт работоспособности куба в данный период времени - вывод делается по факту предоставления влажности и ближайшему значению температуры от времени предоставления влажности. Зная значения температуры без влажности, можно судить только о неправильной работоспособности куба (значения температуры вышли за установленные рамки).

Решением является более тщательное формирование выборки, либо её предобработка: избавление от выбросов; удаление строк, где не дана информация ни о температуре, ни о влажности; заполнение пустых значений.

Результаты классификации средствами AutoWEKA приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты классификации

Параметр	Слой А	Слой В
Оптимальный классификатор	RandomForest	RandomForest
Частота ошибок	0.1556	0.1561
Время обучения, с	4.048	3.947
Корреляция	0.9522	0.9566
Средняя абсолютная ошибка	0.0897	0.0829
Среднеквадратическая ошибка	0.1563	0.1496
Относительная абсолютная ошибка	18.9414%	17.258%
Относительная среднеквадратическая ошибка	32.1155%	30.5247%

Далее введём новый атрибут Target (работоспособность), который может принимать одно из следующих значений:

0 – оба слоя не соблюдают технологический процесс;

А – соблюдает технологический процесс только слой А;

В – соблюдает технологический процесс только слой В;

АВ – оба слоя соблюдают технологический процесс.

После добавления нового атрибута и присвоении ему значений, с помощью оценки значений параметров технологического процесса, получившийся набор данных был подан на вход системе AutoWEKA, с параметрами работы 15 мин, 1024Мб, 1 поток. Были получены следующие результаты классификации по свойству работоспособности (всего проверено 19 конфигураций).

Таблица 5. Результаты классификации по новому атрибуту

Оптимальный классификатор	weka.classifiers.trees.RandomForest
Аргументы	[-I, 10, -K, 0, -depth, 0]
Метрика	errorRate (частота ошибки)
Оценка частоты ошибок	0,0015049286413002583
Время обучения	22,922 с
Всего образцов	239214
Верно классифицированных образцов	238216 (99,5828%)
Неверно классифицированных образцов	998 (0,4172%)
Каппа-статистика	0,9933
Средняя абсолютная ошибка	0,0311
Среднеквадратическая ошибка	0,0809
Относительная абсолютная ошибка	10,0108%
Относительная среднеквадратическая ошибка	20,5357%

Проактивный подход в использовании прогнозирования для предварительного выявления отклонений в технологическом процессе выращивания растений в тепличных комплексах, в частности, на вертикальных фермах. Процесс основывается на данных, полученных в результате обучения по измеренным климатическим параметрам. Путем анализа этих данных возможно прогнозировать будущий ход технологического процесса внутри теплицы и сравнивать его с заранее установленной технологической схемой, которая представляет собой идеальный ход процесса.

Такой подход позволяет не только выявлять фактические отклонения от заданного процесса, но и предсказывать возможные отклонения, которые могут возникнуть в будущем. Это дает возможность оперативно реагировать на изменения, вносить коррективы в конфигурацию теплицы или предпринимать меры по устранению неисправностей еще до того, как они станут критическими. Такое предварительное обнаружение отклонений и реагирование на них способствует оптимизации процесса выращивания растений, повышению урожайности и снижению риска потерь.

В качестве прогнозируемых используются значения таких параметров процесса как температура, влажность, освещенность и т.д. Эта работа включает в себя численный эксперимент, заключающийся в прогнозировании влажности и температуры для набора входных данных, описанного выше.

Одновременно решается задача выбора оптимального алгоритма и его гиперпараметров.

Например, таблица 6 иллюстрирует точность классификаторов для прогнозирования влажности на одном из уровней теплицы.

Таблица 6. Наиболее точные классификаторы для прогнозирования влажности.

Память	Число потоков	Время обучения	RMSE	RRSE, %	Количество конфигураций	Оптимальный классификатор
1024MB	1	9.4 с	0.66	51	29	AttributeSelected
1536MB	2	10.2 с	1.13	47	60	REPTree
2048MB	4	9.6 с	0.51	21	126	RandomForest

Расчеты влажности и температуры показали, что наилучшая точность прогнозирования может быть достигнута с использованием метода RandomForest, дающего относительную стандартную ошибку, равную 21%.

Алгоритм проактивного управления технологическим процессом состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Сбор данных. Выполняется непрерывный мониторинг текущих параметров технологического процесса в автоматизированной теплице. Эти параметры могут включать в себя температуру, влажность, уровень освещенности, а также другие факторы, влияющие на рост.

Шаг 2: Обработка данных. Производится анализ текущих данных с целью определения текущего состояния технологического процесса. Это включает в себя выявление любых отклонений от установленных нормативов и оценку, насколько они могут повлиять на процесс выращивания растений.

Шаг 3: Прогнозирование. На основе имеющихся данных применяются методы прогнозирования для предсказания будущего состояния технологического процесса. Это позволяет выявить потенциальные отклонения, которые могут возникнуть в будущем, и предпринять меры по их предотвращению.

Шаг 4: Сравнение с идеальным процессом. Спрогнозированные данные сравниваются с идеальным технологическим процессом, определенным

заранее. Это позволяет выявить потенциальные отклонения, которые могут возникнуть в будущем.

Шаг 5: Принятие решений. На основе анализа текущих и прогнозируемых данных принимаются решения по коррекции параметров теплицы и технологического процесса. Эти решения могут включать в себя изменение настроек системы вентиляции, подачи света, полива и других параметров.

Шаг 6: Применение изменений. Система автоматически вносит предложенные изменения в работу тепличной системы. Это может включать в себя регулировку параметров, активацию дополнительных устройств или изменение программы полива.

Шаг 7: Если работа не завершена, повторение цикла (переход к шагу 1). Процесс мониторинга, анализа, прогнозирования и коррекции постоянно повторяется в цикле, обеспечивая постоянное и прогнозируемое управление технологическим процессом в автоматизированной теплице.

Заключение

Решения в области автоматизации сельского хозяйства могут сократить время и расходы на выращивание сельскохозяйственных культур и модерировать влияние человеческого фактора. В данном исследовании предложены схема и модель тепличного комплекса с управляемым микроклиматом. Методы машинного обучения используются для оценки и прогнозирования параметров климата в мини-теплице. Использование этих методов позволяет осуществлять упреждающий контроль технологических процессов, обеспечивает соблюдение нормативов выращивания и приводит к экономии ресурсов.

Система предоставляет широкий спектр возможностей, включая сбор и анализ информации о микроклимате, адаптивное и проактивное управление технологическими процессами, а также предоставление уведомлений в случае внештатных ситуаций или сбоев в работе датчиков. Данные,

полученные от датчиков и управляющих устройств, включая информацию о их состоянии и событиях, передаются на локальный сервер теплицы, а затем передаются в облачный сервис. Эффективное аппаратное управление обеспечивается с использованием беспроводных узлов.

Результаты данного исследования наиболее широко применимы в области сельского хозяйства. Разработанная система демонстрирует свою возможность эффективно функционировать в различных типах ферм, включая гидропонные вертикальные и закрытые грунтовые структуры. Это обусловлено тем, что как получение информации о процессах внутри теплицы, так и ее управление мало зависят от ее общей площади. В случае сильного увеличения масштаба системы в ограниченном пространстве необходимо обратить внимание на такие настройки передатчика, как частота работы, коэффициент расширения и ширина полосы модуляции.

Кроме того, разработка имеет определённую значимость для проведения дальнейших научных исследований, к примеру, для изучения влияния различных условий на рост и развитие растений. Автоматизация сбора данных и управления технологическими процессами позволяет сократить трудозатраты, необходимые для проведения экспериментов и получения экспериментальных данных. Автоматизированные теплицы могут быть развёрнуты в экспериментальных учебных центрах для обучения студентов и аспирантов и развития новых методов в области сельского хозяйства.

Применение разрабатываемой архитектуры также выходит за пределы сельского хозяйства, предоставляя возможность адаптации системы для управления различными объектами без изменения ее общей архитектуры. Эти результаты могут быть использованы в сфере автоматизации технологических процессов на различных предприятиях, а также в системах интернета вещей, таких как умный дом, умная медицинская палата, умная система парковки и т.п.