

К. Д. Крестовников, мл. науч. сотр., k.krestovnikov@iias.spb.su,

А. А. Ерашов, мл. науч. сотр., erashov.a@iias.spb.su, А. Н. Быков, мл. науч. сотр., bykov.a@iias.spb.su,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов

С ростом населения становится актуальным вопрос продовольственного снабжения городов качественными сельскохозяйственными культурами. Возникающие при этом проблемы снабжения могут быть решены с применением промышленных тепличных комплексов с искусственным освещением и беспочвенными технологиями. Развитие этих комплексов делает актуальной задачу разработки системы управления, позволяющей автоматизировать процессы выращивания. Имеющиеся промышленные тепличные комплексы используют значительное число операций с непосредственным участием персонала, которые возможно автоматизировать: контроль микроклимата теплицы, освещение, полив и подготовка состава питательного раствора. В данной работе представлена архитектура распределенной системы управления для промышленных тепличных комплексов. Система построена по модульному принципу и разделена на три уровня. Разработанная архитектура базируется на использовании типовых модулей, что позволяет сделать систему управления гибкой и масштабируемой. В работе также приведены основные расчетные соотношения, с помощью которых можно определить необходимое число модулей для трех уровней предложенной архитектуры. Использование беспроводной передачи данных между модулями на основе технологии LoRa позволяет отказаться от прокладки информационной шины и при этом возвращать систему на больших площадях. Контроль системы и ее параметров возможен при непосредственном взаимодействии человека с интерфейсом модуля управления или при удаленном взаимодействии через облако. В состав архитектуры входят три вида исполнительных модулей, один комбинированный сенсорный модуль и модуль управления. Каждый из исполнительных модулей функционирует по заданному алгоритму, а его параметры контролирует модуль управления исходя из заданной программы выращивания и информации с датчиков. Данная особенность позволяет повысить надежность работы системы и продолжить работу в случае потери связи с облаком, а также исключить аварийные ситуации в случае потери связи между модулями. Разработанные решения позволяют адаптировать предложенную систему управления под тепличные комплексы различной конфигурации и для разных принципов выращивания.

Ключевые слова: автоматизация, беспроводные сенсорные сети, сельское хозяйство в контролируемой среде, интернет вещей, вертикальные фермы

Введение

Рост населения и тенденции урбанизации делают актуальным вопрос продовольственного снабжения городов сельскохозяйственными культурами. Географическое расположение, сезонность и численность населения города являются основополагающими факторами, влияющими на качество сельскохозяйственной продукции, доступной жителям. Значительные трудности в снабжении свежими овощами и зеленью испытывают малые города в труднодоступных и северных районах. Логистические проблемы влияют на сроки поставки продукции из других регионов, следовательно, и на ее

качество. Решение данной проблемы возможно за счет промышленных тепличных комплексов [1], позволяющих в больших объемах выращивать продукцию в любое время года благодаря использованию комбинированного освещения и беспочвенных технологий выращивания.

В настоящее время в промышленных тепличных комплексах значительное число операций, связанных с контролем микроклимата, полива, освещения и состава питательного раствора, возложены на обсуживающий персонал. Перечисленные задачи являются однообразными и повторяющимися, при этом в значительной мере влияют на производительность и качество продукции. Внедрение автоматизи-

рованных систем управления позволит с заданной точностью контролировать параметры тепличного комплекса и снизить вмешательство человека в данные процессы, что даст возможность исключить человеческий фактор, повысить надежность и снизить издержки.

Развитие тепличных комплексов рядом с крупными городами, а также в их черте, например, размещение в городской застройке вертикальных ферм [2], позволяет решить логистические проблемы и снизить расходы на транспортировку продукции. За счет своей многоуровневой структуры и применения искусственного освещения комплексы вертикальных ферм имеют значительные посадочные площади. Вертикальные фермы могут классифицироваться в зависимости от размеров и числа уровней. Однако каждая система построена на беспочвенной передаче необходимых питательных веществ для растений. Наиболее распространенным вариантом является гидропонная система, основанная на подаче питательного раствора к корням растений. Реже встречаются аэропонные системы и аквапонные системы. Современные тенденции в методах управления тепличными комплексами рассматриваются в работе [3]. В этом исследовании представлен обзор современных теплиц, сельского хозяйства с контролируемой окружающей средой и их производных, а также освещены некоторые достижения в области экологического мониторинга, контроля и оптимизации работы. Авторы подчеркивают, что для эффективной работы вертикальных ферм необходимо контролировать значительное число параметров среды. Для решения этой задачи, а также многих других, типичных для промышленных теплиц, возможно применять распределенные системы управления, широко используемые в промышленности и робототехнике [4]. Важным свойством таких систем является масштабируемость, определяющая возможности адаптации системы к различной площади комплекса и числу контролируемых параметров. Разработка таких систем является актуальной задачей, поскольку автоматизация процессов агропромышленных комплексов позволит повысить их производительность и качество продукции [5].

Обмен информацией между модулями распределенных систем управления тепличными комплексами может быть организован с использованием проводных или беспроводных

интерфейсов. Первый способ использован в работе [6], в которой представлена автоматическая система управления теплицей. Применение данной системы позволяет добиться снижения расхода воды при поливе растений. Система с помощью различных датчиков круглосуточно контролирует параметры микроклимата теплицы, включая влажность субстрата, и, в случае отклонения какого-либо параметра, микроконтроллер управляет работой исполнительных механизмов для приведения параметров в норму. Предложенная автоматическая система орошения, сочетающая в себе капельный полив и разбрызгиватели, позволила добиться экономии воды в 48...78 % в сравнении с ручным поливом.

Передача данных с использованием проводных технологий при большом числе исполнительных устройств и датчиков ухудшает масштабируемость системы управления и повышает стоимость ее развертывания. Значительные площади тепличного комплекса делают беспроводной способ организации связи между модулями распределенной системы предпочтительным. Беспроводные технологии дают преимущества в масштабируемости и делают систему более гибкой. Данными особенностями воспользовались авторы работы [7]. В исследовании разработан протокол маршрутизации на основе беспроводной технологии ZigBee, который был добавлен в приложение для отслеживания параметров, получаемых с датчиков. Разработанная система была протестирована в реальных условиях и показала стабильную работу. Недостатком данной системы является передача информации только от теплицы к конечному пользователю, что не позволяет пользователю корректировать параметры среды теплицы. Также технология ZigBee была использована в работах [8, 9]. В статье [8] представлена система управления микроклиматом вертикальных промышленных ферм. Преимуществом данной технологии является низкая стоимость и высокая энергоэффективность. На основе результатов тестирования системы было установлено, что эффективность работы такой системы без потери пакетов информации возможна при малом объеме помех между устройствами, расположенными на малых дистанциях относительно друг друга. Результаты тестирования в исследовании [9] оказались аналогичными и показали эффективность технологии ZigBee при работе только на малых площадях.

Комбинирование беспроводных технологий Wi-Fi и ZigBee для обмена информацией рассмотрено в работе [10]. Группа устройств передает информацию на управляющие модули с помощью технологии ZigBee, а управляющие модули используют технологию Wi-Fi для передачи информации между собой и на управляющий сервер. Однако проблема стабильной работы системы только при условии малой дистанции между устройствами остается актуальной.

Иной подход к организации беспроводной связи для передачи данных между устройствами и управляющим сервером использован в работе [11], в которой авторами была выбрана технология GSM-GPRS. В представленной системе датчики собирают информацию, а затем данные отправляются пользователю через SMS или в мобильное приложение через GPRS. Однако эффективная и стабильная работа системы возможна при наличии качественного соединения со станциями сотовой сети.

Результаты исследований [12] показывают, что использование сетей, построенных в соответствии с концепцией LPWAN (Low Power Wide Area Network), позволяет повысить энергоэффективность системы и увеличить радиус возможного расположения устройств. В процессе разработки системы мониторинга параметров для вертикальных ферм [13] авторы рассматривают использование различных технологий беспроводной передачи данных, таких как Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и LoRa. Перечисленные технологии, за исключением LoRa, имеют ряд ограничений по радиусу расположения устройств относительно друг друга. Использование модуляции LPWAN с использованием LoRa позволяет увеличить радиус расположения устройств в системе, обеспечить низкое электропотребление устройств и низкую стоимость реализации системы.

Системы, существующие на данный момент, имеют ряд недостатков, среди которых можно выделить низкую приспособленность к масштабируемости или отсутствие двусторонней связи между устройствами системы. Из рассмотренных решений лучшими возможностями к масштабированию обладают системы на основе беспроводных технологий передачи данных, применение которых с модульным принципом позволит создать гибкую систему управления тепличными комплексами. В данной работе предлагается масштабируемая архи-

тектура распределенной системы управления для автоматизации процессов функционирования промышленных тепличных комплексов, а также представлены разработанные структурные схемы модулей, входящих в ее состав.

Архитектура распределенной системы управления для промышленных вертикальных ферм

На основе проведенного анализа для формирования масштабируемой системы с возможностью реконфигурации в разрабатываемом архитектурном решении используется беспроводная передача данных по технологии "LoRa-WAN". Данная технология позволяет обеспечить энергоэффективность системы и уменьшить габаритные показатели устройств системы. Основываясь на данных, опубликованных в статьях [14, 15], можно сказать, что использование данной технологии позволяет развернуть систему в радиусе 3 км. Данная технология характеризуется низкой стоимостью радиомодулей, широким частотным диапазоном и высокой защищенностью протоколов каналов связи.

Предлагаемая архитектура системы управления, представленная на рис. 1, имеет три уровня. Передача информации между модулями различных уровней происходит по двуправленным каналам связи.

Доступ к первому уровню системы через облачный сервис [16, 17] имеет обслуживающий персонал и технологи тепличного комплекса, доступ с ограниченными правами могут иметь иные заинтересованные лица. Технологи производства имеют возможность изменения всех параметров системы и имеют доступ к статистическим данным и информации с датчиков. Сотрудники с соответствующими правами доступа могут контролировать параметры работы тепличного комплекса и участвовать в ручном управлении технологическими процессами.

Второй уровень системы представлен модулями управления. Число модулей управления рассчитывается по следующей формуле с округлением получившегося результата в большую сторону:

$$M_U = \frac{A_{T1} + A_{T2} + A_{T3} + A_{T4}}{64}, \quad (1)$$

где A_{T1} , A_{T2} , A_{T3} , A_{T4} — число модулей соответствующих типов.

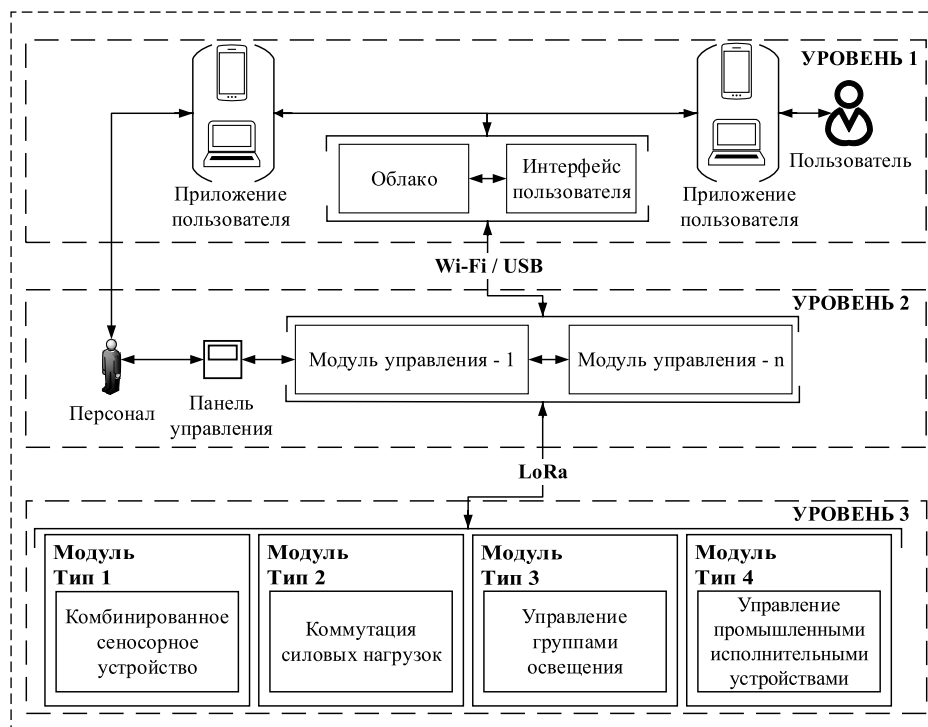


Рис. 1. Общая архитектура системы управления
Fig. 1. General architecture of the control system

Модули управления позволяют децентрализовать управление всей системой, а также изменять тип и число исполнительных модулей, адаптируя систему под особенности каждого тепличного комплекса. Максимальное число модулей, подключаемых к одному модулю управления, ограничено 64. Это обусловлено тем, что технология LoRa имеет низкую скорость передачи данных, что, в свою очередь, приводит к росту временных задержек в управлении при увеличении числа управляемых модулей. Модули управления имеют возможность автономной работы по заранее заложенной программе и корректируют работу модулей третьего уровня посредством отправки сообщений об изменении уставок или режима работы. Это позволяет повысить надежность системы и продолжить ее корректную работу при потере связи с облаком. Наличие кнопок и дисплея в разработанном модуле позволяет обслуживающему персоналу вручную управлять процессами, например, в случае необходимости оперативного вмешательства или для аварийного отключения отдельных модулей или всей системы.

Третий уровень архитектуры включает в себя модули четырех типов. Модули типа 1 используются для передачи информации о температуре, освещенности, концентрации углекислого газа и другой информации с дат-

чиков теплицы. Модули устанавливаются на тепличных стеллажах, ввиду чего возможен контакт человека с токопроводящими частями прибора. Поэтому в целях снижения рисков поражения персонала электрическим током предусмотрено питание модуля от низковольтной сети постоянного тока. Модули типа 2—4 управляют исполнительными устройствами и функционируют по заранее заданной программе, которая при необходимости корректируется модулями управления в автоматическом режиме, а также со стороны персонала через облако или панель управления.

Модули второго типа позволяют коммутировать высоковольтные нагрузки. Чис-

ло каналов коммутации и мощность подключаемой нагрузки зависит от схемотехнических решений модуля. Оптимальное число каналов коммутации выбирается исходя из особенностей применения модуля и допустимых размеров, а при необходимости коммутации большого числа нагрузок в одном месте возможно использование нескольких типовых модулей. Использование данных модулей актуально для коммутации клапанов сброса насосов высокого давления аэропной системы, дренажных насосов и приводов канальной вентиляции.

В современных теплицах используются светодиодные лампы с управляемыми источниками питания. Такие источники питания позволяют регулировать мощность для установки необходимой яркости каждой группы освещения в соответствии с требованиями для выращивания определенного вида сельскохозяйственной продукции. Помимо обеспечения требуемых условий выращивания управление яркостью позволяет снизить электропотребление элементов освещения. Предназначение модулей третьего типа заключается в управлении драйверами светодиодных ламп освещения.

Для поддержания корректных режимов работы тепличного комплекса необходимо управлять работой насосов высокого давления, циркуляционной вентиляцией и клима-

тической установкой. Как правило, промышленные решения основаны на асинхронных трехфазных двигателях, управляемых преобразователем частоты (ПЧ). Для управления ПЧ и другими промышленными исполнительными устройствами предусмотрены модули четвертого типа, в состав которых входит несколько групп беспотенциальных контактов и выход с аналоговым сигналом в диапазоне 0...10 В с низким уровнем пульсаций.

Программы выращивания культур являются набором параметров, хранящихся в облачном сервисе. Выбор программы выращивания осуществляет технолог производства, после этого структурированный набор данных отправляется на каждый из модулей управления. Модули второго уровня не зависят между собой и могут реализовывать одновременно различающиеся между собой программы выращивания. Набор данных, получаемых модулем управления, содержит параметры режимов освещения и полива, микроклимата и иные связанные с поддержанием корректной работы. Модуль управления обрабатывает данные параметры и формирует набор функциональных уставок для исполнительных модулей, которыми он управляет. Функциональные уставки являются значениями, которые без преобразований используются модулями третьего уровня. Например, для модулей освещения они будут представлять временные интервалы, в которые лампы должны работать, и интенсивность их свечения. Низкоуровневый алгоритм работы модулей третьего уровня остается всегда неизменным, а текущие уставки действуют до получения новых, что не требует постоянно поддерживать связь с модулями управления и повышает надежность системы. Обратную связь по контролируемым параметрам модули управления получают от комбинированных сенсорных модулей. При отклонениях значений обратной связи модули управления корректируют уставки исполнительных модулей. В случае, если коррекция параметров невозможна или не изменила контролируемый параметр, модуль управления отправляет уведомление об этом в облачный сервис. Далее облачный сервис уведомляет пользователей и обслуживающий персонал о нештатной ситуации, которая требует вмешательства.

Разделение специализации модулей позволяет легко адаптировать систему в соответствии с особенностями тепличного комплекса.

Также при необходимости возможна разработка и внедрение модулей с особым функционалом, при этом не потребуется изменять архитектуру системы, методы управления и другие модули. Разработанная архитектура системы предоставляет ряд преимуществ перед уже существующими вариантами систем управления промышленными тепличными комплексами: масштабируемость, децентрализованность, значительные площади покрытия без необходимости прокладки информационных линий.

Структура электронных модулей системы

Для реализации предложенной архитектуры необходимо разработать схемотехнические решения для каждого модуля системы. Принципиальная схема каждого модуля разрабатывается в соответствии с функциональными требованиями и структурой, представленной в данном разделе работы. Структура комбинированного сенсорного модуля, предназначенного для работы в сети LoRa, представлена на рис. 2. Модуль основан на микроконтроллере STM32F103 с 32-битной архитектурой. Выбор данного микроконтроллера обусловлен его техническими характеристиками, низким энергопотреблением, доступностью и низкой стоимостью.

Комбинированный сенсорный модуль оснащен датчиком освещенности TSL256, датчиком температуры и влажности воздуха BME280 и датчиком содержания CO₂ в воздухе. Все перечисленные датчики имеют возможность работы по шине I²C. В зависимости от требований к модулю и места его установки сенсоры могут применяться в различных комбинациях. Дат-

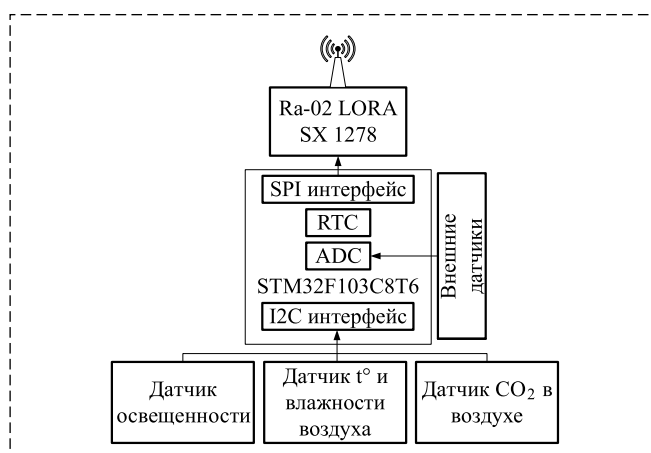


Рис. 2. Структура сенсорных модулей

Fig. 2. Sensor module structure

чики имеют компактные размеры, за счет чего возможность их установки в любой комбинации в сенсорный модуль не повлияет на его общие габаритные размеры. Также модуль имеет возможность внешнего подключения двух датчиков с аналоговым выходным сигналом. Данные по шине I²C поступают на соответствующий интерфейс микроконтроллера и преобразуются в пакет данных в соответствии со стандартом протокола LoRa-WAN. Далее по шине SPI пакет передается на модуль LORA RA-02 и отправляются на соответствующий модуль управления.

Структура модулей второго типа представлена на рис. 3. В качестве микроконтроллера для стандартизации модулей, как и в модулях первого типа, используется STM32F103.

В модулях данного типа предусмотрена работа внутренних часов реального времени, что

дает возможность задать режимы работы без синхронизации с модулем управления в течение длительного времени. Расчет необходимого числа модулей для коммутации высоковольтных нагрузок M_k выполняется в соответствии с формулой

$$M_k = \frac{N_{hl}}{n_{chk}}, \tag{2}$$

где N_{hl} — число единиц коммутируемой нагрузки; n_{chk} — число каналов коммутации каждого модуля.

Структурная схема модулей, предназначенных для коммутации слаботочных сигналов в цепях управления драйверов светодиодных ламп, представлена на рис. 4. Независимое управление различными группами освещения позволяет обеспечить необходимый уровень освещенности в зависимости от потребностей растений на различных стадиях роста.

Число необходимых модулей третьего типа в тепличном комплексе вычисляется по следующей формуле (полученный результат округляется до целого в большую сторону):

$$M_L = \frac{S_{dr}}{n_{chl} N_{dr}}, \tag{3}$$

где S_{dr} — число драйверов ламп освещения; N_{dr} — число драйверов в одной группе освещения; n_{chl} — число каналов управления модуля.

Модули четвертого типа, структурная схема которых представлена на рис. 5, предназначены для управления промышленными испол-

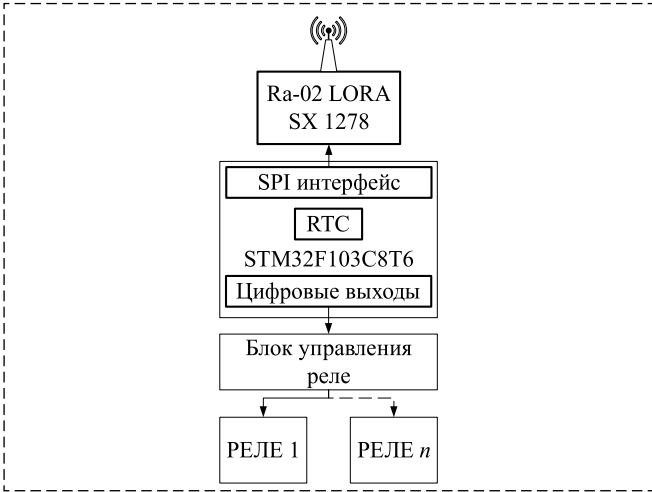


Рис. 3. Структура модуля коммутации высоковольтных нагрузок
Fig. 3. Structure of the switching module of high-voltage loads

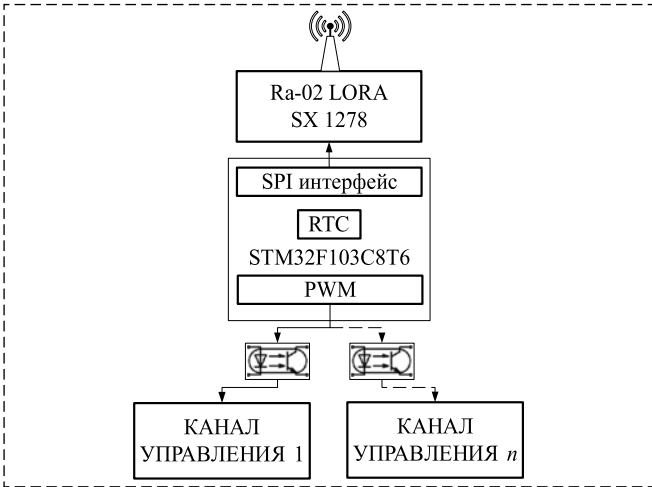


Рис. 4. Структура модуля управления драйверами светодиодных ламп
Fig. 4. Structure of the LED lamp driver control module

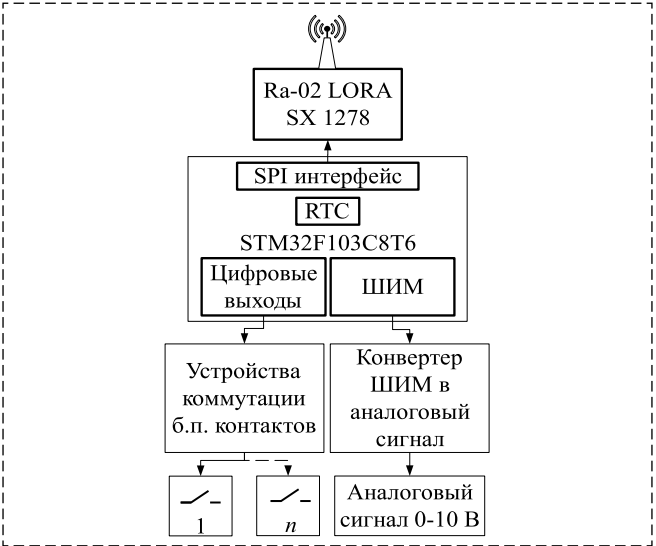


Рис. 5. Структура модуля управления исполнительными устройствами
Fig. 5. Structure of the actuator control module

нительными устройствами и преобразователями частоты асинхронных двигателей. В структуру модулей данного типа входят несколько отдельных групп беспотенциальных контактов и один выход, предназначенный для формирования аналогового сигнала в диапазоне 0...10 В.

Каждый модуль предназначен для управления одним промышленным исполнительным устройством или приводом. Число данных модулей зависит от конфигурации системы и размеров теплицы. В обязательном порядке данные модули должны применяться для управления насосами высокого давления в аэропонных теплицах, так как необходимо обеспечить им плавный пуск и различные режимы работы в ночное и дневное время.

Структура модуля управления, представленная на рис. 6, построена на базе микроконтроллера ESP32 со встроенным интерфейсом Wi-Fi.

Если в системе предусмотрен промежуточный сервер, то питание модуля и обмен информацией с облаком возможен через интерфейс USB. Дисплей модуля имеет разрешение 128×64 , клавиатура представляет собой энкодер и кнопки.

Представленные структурные решения модулей распределенной системы управления позволяют решать весь спектр задач, связанных с автоматизацией работы промышленных тепличных комплексов. Структура модулей третьего уровня представлена в общем виде и позволяет адаптировать каждый модуль под особенности объекта, в котором планируется их эксплуатация. Число каналов управления каждого модуля выбирается исходя из конфигурации применяемого оборудования.

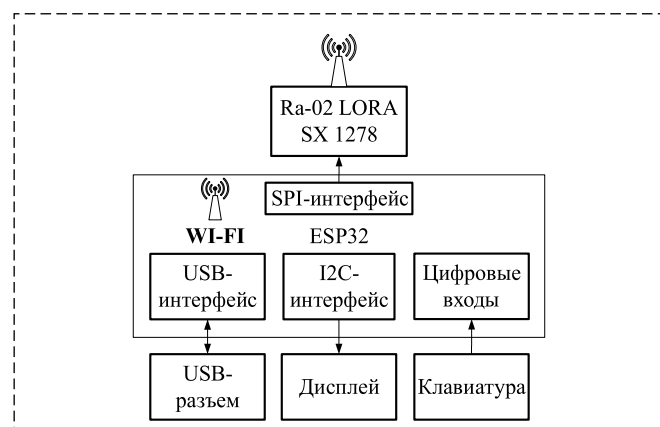


Рис. 6. Структура модуля управления группами модулей третьего уровня

Fig. 6. Structure of the module for controlling groups of third-level modules

Прикладные аспекты применения предложенных решений

В данном разделе мы рассмотрим применение разработанной архитектуры и структуры модулей для многоуровневого тепличного комплекса и проведем некоторые теоретические расчеты. На рис. 7 (см. третью сторону обложки) представлены виды внутри тепличного комплекса.

Трехуровневые стеллажи расположены в два ряда по 12 штук. Каждый уровень стеллажа имеет посадочную площадь 9 м^2 , что требует 4 светодиодные лампы мощностью 160 Вт. Таким образом, общее число светодиодных светильников составит 288 единиц. Тепличный комплекс разделен на 3 условные зоны для выращивания различных культур одновременно. Каждая из культур требует определенный режим полива, таким образом, необходимо управлять тремя насосами с асинхронными двигателями. Каждая зона полива требует собственного дренажного насоса для возврата питательного раствора в бак.

Представленный комплекс использует естественное освещение, вследствие чего внутри могут образовываться зоны локального перегрева. Для определения данных зон на каждой полке стеллажа установлен комбинированный сенсорный модуль, а для устранения перегрева используются циркуляционные вентиляторы. Циркуляционные вентиляторы разделены на шесть групп, в каждой из которых четыре стеллажа. Комбинированный сенсорный модуль также позволяет измерять интенсивность естественного освещения, а модуль управления на основе этих данных может корректировать мощность светодиодных ламп. Климатическая установка в своем составе имеет четыре управляемые заслонки, калорифер и холодильную установку. Управление холодильной установкой и калорифером требует аналоговый сигнал в диапазоне 0...10 В. Структурная схема данного тепличного комплекса представлена на рис. 8.

Для расчета числа модулей всех типов необходимо задаться числом каналов управления модулей света и модулей коммутации высоковольтных нагрузок. Оптимальным решением для модулей света будет вариант управления одним модулем светом на одном стеллаже. Это позволит использовать промышленный электротехнический шкаф, в который будут установлены 12 драйверов светодиодных ламп и модуль управления. Таким образом, число мо-

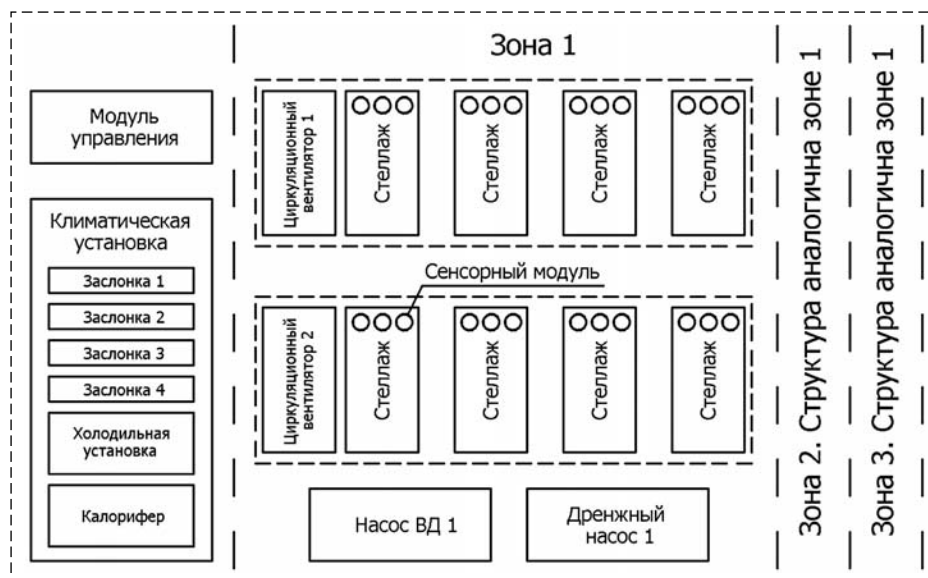


Рис. 8. Структурная схема многоуровневого тепличного комплекса
Fig. 8. Structure scheme of a multi-level greenhouse complex

дулей управления светом $M_L = 24$. Для управления дренажными насосами, расположенными в одном месте, оптимально использовать модуль коммутации высоковольтных нагрузок с $n_{chk} = 3$. Однако такой вариант не подходит для управления заслонками климатической установки, где оптимально иметь модуль с $n_{chk} = 4$. Экономически более выгодно устанавливать два модуля, в одном из которых будет не задействован один канал коммутации. Для управления насосами, циркуляционной вентиляцией, калорифером и холодильной установкой необходимо использовать модули управления промышленными исполнительными устройствами с аналоговым выходом 0...10 В, таким образом, их общее число в системе составит 11 единиц. Число комбинированных сенсорных устройств равно числу полок стеллажей и составляет 72. Общее число модулей третьего уровня 109, поэтому в соответствии с формулой (1) для всей системы необходимо два модуля управления. Полная длина комплекса не превышает 35 м, ввиду чего дополнительных модулей исходя из масштабов комплекса не требуется. Модули предложенной системы управления требуют только подключения питания и не нуждаются в информационной шине, так как используется беспроводная передача данных. В случае применения альтернативных систем управления, модули которых используют проводные интерфейсы для обмена данными, к каждому модулю потребовалось бы проложить информационные линии. Для того чтобы развернуть систему управления,

аналогичную рассмотренной в данной статье, но с проводной передачей информации, необходима прокладка минимум 390 м информационного кабеля и установка 220 разъемов на него для подключения модулей к шине. Суммарные затраты времени на данные операции могут превысить 120 рабочих часов. Предложенная архитектура позволяет развернуть распределенную систему управления комплексом с меньшими финансовыми и временными затратами, за счет использования беспроводной передачи данных.

Заключение

В работе представлена архитектура распределенной системы управления и структура электронных модулей для управления процессами промышленных тепличных комплексов. Предлагаемая архитектура состоит из трех уровней, включающих в себя модули, предназначенные для автоматического контроля климата теплицы, режима освещения и питания растений. В работе представлены основные расчетные соотношения для определения необходимого числа модулей каждого уровня архитектуры. Применение модульного принципа позволяет реализовать децентрализованную систему управления и адаптировать ее под особенности теплицы. В зависимости от требований к сенсорам и местам их установки предложенная структура сенсорных модулей позволяет устанавливать в них только необходимые датчики и подключать внешние с аналоговым выходным сигналом. Типовая структура модулей позволяет легко расширять функциональные возможности системы за счет разработки новых специализированных решений. Повышение надежности системы достигается за счет применения принципа автономной работы каждого исполнительного модуля по некоторому базовому алгоритму, параметры которого корректируются модулями управления. Таким образом, в случае потери связи с модулем управления исполнительный модуль продолжит свою работу. Технология LoRa, заложенная в основу обмена дан-

ными в разработанной архитектуре, позволяет развернуть систему с радиусом действия до 3 км, с использованием одного модуля управления. В работе представлен пример применения предложенной архитектуры в многоуровневом тепличном комплексе с посадочной площадью 648 м². Для развертывания системы необходимо 109 модулей третьего уровня и два модуля управления второго уровня.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритмов и программного обеспечения для системы управления с предложенной архитектурой.

Список литературы

1. Rodríguez F., Berenguel M., Guzmán J. L., Ramírez-Arias A. Modeling and control of greenhouse crop growth. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 250 p. DOI: 10.1007/978-3-319-11134-6.
2. Birkby J. Vertical farming. ATTRA Sustainable Agriculture. National Centre for Appropriate Technology, 2016.
3. Shamshiri R., Kalantari F., Ting K. C., Thorp K. R., Hameed I. A., Weltzien C., Shad Z. M. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. 2018. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210C.
4. Андреев В. П., Плетенев П. Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределенного управления в роботах с модульной архитектурой // Труды СПИИРАН. 2018. Т. 57, № 2. С. 134–160. DOI: 10.15622/sp.57.6.
5. D'Autilia R., D'Ambrosio I. Is there enough fertile soil to feed a planet of growing cities? // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. 2015. N. 419. P. 668–674. DOI: 10.1016/j.physa.2014.10.048.
6. Sivagami A., Hareeshware U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V. S. K. Automated irrigation system for greenhouse monitoring // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2018. Vol. 99, N. 2. P. 183–191. DOI: 10.1007/s40030-018-0264-0.
7. Akkas M. A., Sokullu R. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes // Procedia computer science. 2017. N. 113. P. 603–608. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.300.
8. Chen F., Qin L., Li X., Wu G., Shi C. Design and implementation of ZigBee wireless sensor and control network

system in greenhouse // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC) IEEE. 2017, July. P. 8982–8986. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8028786.

9. Li Z., Wang J., Higgs R., Zhou L., Yuan W. Design of an intelligent management system for agricultural greenhouses based on the internet of things // 2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). 2017, July. Vol. 2. P. 154–160. DOI: 10.1109/CSE-EUC.2017.212.

10. Xiao J., Li J. T. Design and implementation of intelligent temperature and humidity monitoring system based on ZigBee and WiFi // Procedia Computer Science. 2020. N. 166. P. 419–422. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.072.

11. Ullah M. W., Mortuza M. G., Kabir M. H., Ahmed Z. U., Supta S. K. D., Das P., Hossain S. M. D. Internet of Things Based Smart Greenhouse: Remote Monitoring and Automatic Control // DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences. 2018. DOI: 10.12783/dteees/iceee2018/27803.

12. Pop A. I., Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks? In GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. 2017, December. P. 1–6. IEEE. DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8254509.

13. Wu J., Tang X., Lei J. Design of wireless monitoring system for greenhouse based on LoRa. In Journal of Physics: Conference Series. 2020, October. Vol. 1650, N. 2. P. 022075. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1650/2/022075.

14. Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). 2015, December. P. 55–59. IEEE. DOI: 10.1109/ITST.2015.7377400.

15. Denisov A., Shabanova A., Sivchenko O. Data Exchange Method for Wireless UAV-Aided Communication in Sensor Systems and Robotic Devices. In International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2020, October. P. 45–54. DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3_5.

16. Давыдов Д. С., Кашевник А. М., Косицын Д. П., Шабаев А. И., Шабалина И. М. Разработка платформы планирования производства с использованием технологий "облачных вычислений" // Тр. СПИИРАН. 2012. Т. 23. С. 416–430. DOI: 10.15622/sp.23.23.

17. Левоневский Д. К., Ватаманюк И. В., Савельев А. И. Многомодальная информационно-навигационная облачная система МИНОС для корпоративного киберфизического интеллектуального пространства // Программная инженерия. 2017. Т. 8, № 3. С. 120–128.

Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Complexes

K. D. Krestovnikov, k.krestovnikov@iias.spb.su, A. A. Erashov, erashov.a@iias.spb.su,

A. N. Bykov, bykov.a@iias.spb.su,

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Krestovnikov Konstantin D., Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Accepted on July 05, 2021

Abstract

With the growth of the population, the issue of food supply of cities with high-quality agricultural crops becomes urgent. Supply problems arising from this can be solved with the use of industrial greenhouse complexes with artificial lighting and groundless technologies. The development of these complexes makes the task of developing a control system to automate the cultivation processes urgent. Real industrial greenhouse complexes have a significant number of operations with the direct participation of personnel, which can be automated: control of the greenhouse microclimate, lighting, watering and preparation of the nutrient solution composition. This paper presents the architecture of a distributed control system for industrial greenhouse complexes. The system is built on a modular basis and is divided into three levels. The developed architecture is based on the use of standard modules, which makes the control system flexible and scalable. The paper also presents the basic design ratios, with the help of which it is possible to determine the required number of modules for the three levels of the proposed architecture. The use of wireless data transmission between modules based on LoRa technology allows you to abandon the laying of an information bus and at the same time deploy the system over large areas. Control of the system and its parameters is possible through direct human interaction with the interface of the control module or through remote interaction through the cloud. The architecture includes 3 types of executive modules, one combined sensor module and a control module. Each of the executive modules functions according to a given algorithm, and its parameters are controlled by a control module, based on a given growing program and information from sensors. This feature allows you to increase the reliability of the system and continue working in the event of a loss of communication with the cloud, as well as to exclude emergencies in the event of a loss of communication between the modules. The developed solutions make it possible to adapt the proposed control system for greenhouse complexes of various configurations and growing principles.

Keywords: automation, wireless sensor networks, agriculture in a controlled environment, internet of things, vertical farms

For citation:

Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Bykov A. N. Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Complexes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 527–536.

DOI: 10.17587/mau.22.527-536

References

1. Rodríguez F., Berenguel M., Guzmán J. L., Ramírez-Arias A. Modeling and control of greenhouse crop growth, Switzerland, Springer International Publishing, 2015, 250 p. DOI: 10.1007/978-3-319-11134-6.
2. Birkby J. Vertical farming. ATTRA Sustainable Agriculture, National Centre for Appropriate Technology, 2016.
3. Shamshiri R., Kalantari F., Ting K. C., Thorp K. R., Hameed I. A., Weltzien C., Shad Z. M. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture, 2018, DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210C.
4. Andreev V. P., Pletenev P. F. Method of Information Interaction for Distributed Control Systems of Robots with Modular Architecture, *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 134–160 (in Russian), DOI: 10.15622/sp.57.6.
5. D'Autilia R., D'Ambrosi I. Is there enough fertile soil to feed a planet of growing cities? *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, vol. 419, pp. 668–674, DOI: 10.1016/j.physa.2014.10.048.
6. Sivagami A., Hareeshware U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V. S. K. Automated irrigation system for greenhouse monitoring, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 2018, vol. 99, no. 2, pp. 183–191, DOI: 10.1007/s40030-018-0264-0.
7. Akkaş M. A., Sokullu R. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes, *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 113, pp. 603–608, DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.300.
8. Chen F., Qin L., Li X., Wu G., Shi C. (2017, July). Design and implementation of ZigBee wireless sensor and control network system in greenhouse, *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 2017, pp. 8982–8986, DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8028786.
9. Li Z., Wang J., Higgs R., Zhou L., Yuan W. Design of an intelligent management system for agricultural greenhouses based on the internet of things, *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, 2017, July, vol. 2, pp. 154–160, DOI: 10.1109/CSE-EUC.2017.212.
10. Xiao J., Li J. T. Design and implementation of intelligent temperature and humidity monitoring system based on ZigBee and WiFi, *Procedia Computer Science*, 2020, vol.166, pp. 419–422, DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.072.
11. Ullah M. W., Mortuza M. G., Kabir M. H., Ahmed Z. U., Supta S. K. D., Das P., Hossain S. M. D. Internet of Things Based Smart Greenhouse: Remote Monitoring and Automatic Control, *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, 2018, DOI: 10.12783/dteees/iceee2018/27803.
12. Pop A. I., Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks? *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, December, pp. 1–6, DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8254509.
13. Wu J., Tang X., Lei J. Design of wireless monitoring system for greenhouse based on LoRa, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, October, vol. 1650, no. 2, p. 022075, IOP Publishing, DOI: 10.1088/1742-6596/1650/2/022075.
14. Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology, *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2015, December, pp. 55–59, DOI: 10.1109/ITST.2015.7377400.
15. Denisov A., Shabanova A., Sivchenko O. Data Exchange Method for Wireless UAV-Aided Communication in Sensor Systems and Robotic Devices, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2020, October, pp. 45–54, Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3_5.
16. Davydov D. S., Kashevnik A. M., Kosicin D. P., Sha-baev A. I., Shabalina I. M. Development of the Platform for Production Planning Using Cloud Computing Technology, *SPIIRAS Proceedings*, 2012, vol. 23, no.4, pp. 416–430 (in Russian), DOI: 10.15622/sp.23.23.
17. Levonevskiy D. K., Vatamaniuk I. V., Saveliev A. I. MINOS Multimodal Information and Navigation Cloud System for the Corporate Cyber-Physical Smart Space, *Programmnaya Ingeneria*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 120–128 (in Russian).