

УДК 681.5:631.544.45:631.589.2

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ФИТОТРОНОМ СО СВЕТОКУЛЬТУРОЙ И ГИДРОПОННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

<sup>1</sup>Трепуз С.В., <sup>1</sup>Долгих П.П., <sup>2</sup>Барсуков В.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск,  
e-mail: dpp10@yandex.ru;

<sup>2</sup>КГБПОУ «Красноярский аграрный техникум», Красноярск, e-mail: strepuz@mhd.center

Рассмотрены вопросы, направленные на повышение производительности труда и улучшение качества продовольственной растениеводческой продукции при выращивании растений в контролируемых и регулируемых условиях. Затрагиваются два технологических процесса, происходящих в фитотроне: облучение растений облучателями разноспектрального состава и питание растений по активной гидропонной технологии периодического затопления. В работе представлена разработанная авторами технологическая схема фитотрона со светокulturой и гидропонной технологией периодического затопления, в которой путем конструктивных решений уменьшаются габаритные размеры и повышается эффективность работы гидропонного оборудования. Составлен алгоритм функций, выполняемых микроконтроллером управления. Представленная в работе автоматизированная система управления технологическими процессами в фитотроне со светокulturой и гидропонной технологией периодического затопления позволяет решать задачи по настройке, регулировке и фиксации режимов работы оборудования с применением современных цифровых технологий. Схема реализована на базе платформы Arduino Nano. В качестве моста использовали модуль ESP-01 с преобразователем уровней. Управление контроллером осуществляется через беспроводной Wi-Fi-модуль посредством HMI на платформе Android с приложением KaScada через протокол Wi-Fi Modbus TCP. Для управления облучателем с регулируемым спектром применен конвертер сигнала ШИМ из 0...5 В в 0...10 В. Для учета хронометрических данных установлены RTC. В состав схемы входит блок коммутации с пятью реле для управления, три из которых предназначены для управления облучателями, одно реле – для коммутации насоса, одно реле – для управления электромагнитным клапаном.

**Ключевые слова:** управляемое выращивание растений, алгоритм управления, фитотрон, гидропонные технологии, светокultura, контроллер управления, человеко-машинный интерфейс, Wi-Fi-модуль

## AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR A PHYTOTRON WITH ARTIFICIAL LIGHTING AND HYDROPONIC TECHNOLOGY

<sup>1</sup>Trepuz S.V., <sup>1</sup>Dolgikh P.P., <sup>2</sup>Barsukov V.A.

<sup>1</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, e-mail: dpp10@yandex.ru;

<sup>2</sup>Krasnoyarsk Agricultural College, Krasnoyarsk, e-mail: strepuz@mhd.center

Issues aimed at increasing labor productivity and improving the quality of food crop production, when growing plants in controlled and regulated conditions, are considered. Two technological processes occurring in the phytotron are touched upon: irradiation of plants with irradiators of different spectral composition and plant nutrition using active hydroponic technology of periodic flooding. The paper presents, developed by the authors, a technological scheme of a phytotron with light culture and hydroponic technology of periodic flooding, in which, through design solutions, overall dimensions are reduced and the efficiency of hydroponic equipment is increased. An algorithm of functions performed by the control microcontroller has been compiled. The automated process control system presented in the work in a phytotron with artificial lighting and hydroponic technology of periodic flooding allows solving problems of setting up, adjusting and fixing equipment operating modes using modern digital technologies. The circuit is based on the Arduino Nano platform. An ESP-01 module with a level converter was used as a bridge. The controller is controlled via a wireless Wi-Fi module via HMI on the Android platform with the KaScada application via the Wi-Fi Modbus TCP protocol. A PWM signal converter from 0...5 V to 0...10 V is used to control the irradiator with an adjustable spectrum. To account for chronometric data, RTCs are installed. The circuit includes a switching unit with 5 relays for control, three of which are designed to control the irradiators, one relay for switching the pump, one relay for controlling the solenoid valve.

**Keywords:** controlled plant growing, control algorithm, phytotron, hydroponic technologies, light culture, control controller, human-machine interface, Wi-Fi module

Во всем мире растет интерес к интеллектуальным исследованиям и разработкам в области фабрик со светокulturой, которые, как ожидается, будут играть важную роль в городском сельском хозяйстве в ближайшие десятилетия. Также ожидается, что они будут способствовать решению трилеммы питания, окружающей среды и природных ресурсов с увеличением городского

населения, уменьшением сельского населения и площади пахотных земель [1, с. 27-28]. Взамен существующих в недавнем прошлом технологий [2-4] разрабатываются и совершенствуются тактики оптимизации по критериям эффективности альтернативной сельскохозяйственной среды, позволяющей выращивать продовольственные культуры в контролируемых условиях [5, с. 3-5].

До недавнего времени большинство источников излучения для светокультуры были представлены разрядными лампами низкого давления и разрядными лампами высокого давления. С развитием технологии светодиодного облучения акцент менялся в сторону управления интенсивностью и качеством излучения для повышения продуктивности биомассы и повышения концентрации биоактивных вторичных метаболитов в листовых культурах и овощах в светокультуре. Однако не существует единого светового решения, подходящего для всех сценариев. Оптимальное излучение в окружающей среде варьируется в зависимости от вида и даже сорта, стадии роста растений, конкретных вторичных метаболитов, и других условий окружающей среды, таких как температура, питательные вещества и концентрация  $\text{CO}_2$ . Дальнейший прогресс в области облучения и полупроводниковых технологий – светодиодные источники с возможностью настройки как по интенсивности света, так и по качеству, доступные для исследователей и коммерческих фабрик для выращивания со светокультурой [6].

Важным инструментом для выращивания растений в закрытых помещениях, таких как фабрики со светокультурой, являются гидропонные системы. Среди различных гидропонных систем, пригодных для выращивания растений в закрытых пространствах, наибольшее коммерческое

распространение получили системы активной гидропонии, в частности технология периодического затопления (Ebb&Flow) [7, с. 40], метод питательного слоя (NFT) [7, с. 45], системы капельного орошения (Drip systems) [7, с. 48] и системы аэро-гидропонии (AHS) [7, с. 51-56]. Для фитотрона оптимальным вариантом является технология Ebb&Flow, однако эффективность ее применения будет определяться правильно подобранным циклом орошения и рациональным расположением отдельных элементов и частей.

Цель исследования – разработать рациональную автоматизированную систему управления технологическими процессами в фитотроне со светокультурой и гидропонной технологией периодического затопления.

### Материал и методы исследования

Объектом разработки автоматизированной системы управления технологическими процессами был принят фитотрон, схема которого изображена на рисунке 1, предназначенный для исследования влияния различных спектров и интенсивности излучения на рост, развитие и урожайность растений.

Фитотрон работает следующим образом. При включении с щита управления 20 подается питание на облучатель с солнечным спектром 9, облучатель с биколорным спектром 10 и облучатель с регулируемым спектром 11, характеристики которого регулируются в процессе работы.

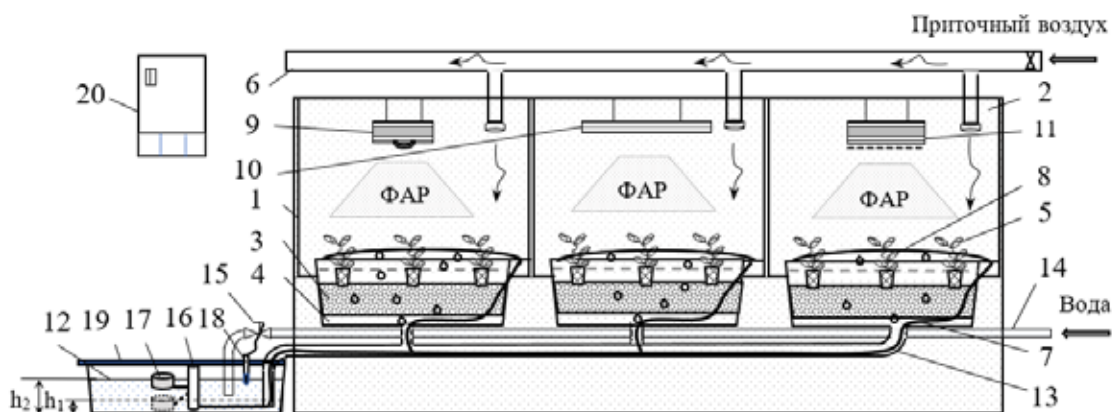


Рис. 1. Фитотрон со светокультурой и гидропонной технологией периодического затопления:

- 1 – каркас; 2 – рабочие камеры; 3 – стеллаж для лотков с субстратом;
- 4 – поддон для слива питательного раствора; 5 – растения в горшках; 6 – воздуховод;
- 7 – подающий трубопровод; 8 – поливочный шланг с перфорацией; 9 – облучатель с солнечным спектром; 10 – облучатель с биколорным спектром; 11 – облучатель с регулируемым спектром;
- 12 – емкость для питательного раствора; 13 – сливной трубопровод; 14 – доливочный трубопровод;
- 15 – электромагнитный клапан; 16 – погружной насос; 17 – подвижный поплавковый датчик уровня;
- 18 – неподвижный датчик доливки воды; 19 – съемная крышка; 20 – щит управления

Энергия в виде потока фотосинтетически активной радиации (ФАР) поступает к растениям в горшках 5. В этот же период в рабочие камеры 2 по воздуховоду 6 осуществляется приток воздуха. Происходит процесс фотосинтеза. Одновременно с этим по программе, настроенной в щите управления 20 на определенный цикл работы и паузы, включается в работу погружной насос 16, при этом подвижный поплавковый датчик уровня 17 находится в верхнем положении  $h_2$ , и питательный раствор из емкости 12 поступает по подающему трубопроводу 7, расположенному внутри сливного трубопровода 13, через поливочный шланг с перфорацией 8 к растениям в горшках 5. Происходит полив. После этого подвижный поплавковый датчик уровня 17 достигает нижнего уровня  $h_1$  и подает сигнал на отключение погружного насоса 16. Далее питательный раствор самотеком сливается через стеллаж для лотков с субстратом 3 в поддон для слива питательного раствора 4, насыщая корни растений питательными веществами и кислородом. Затем по сливному трубопроводу 13 питательный раствор сливается в емкость для питательного раствора 12, наполняя ее до верхнего уровня  $h_2$ , фиксируемого неподвижным датчиком долировки воды 18 и подвижным поплавковым датчиком уровня 17.

За определенный период времени часть питательного раствора усваивается растениями в горшках 5 и испаряется, снижаясь ниже верхнего уровня  $h_2$ , что приводит к срабатыванию неподвижного датчика долировки воды 18, подающего сигнал на открытие электромагнитного клапана 15, и вода из доливочного трубопровода 14 дополняет емкость для питательного раствора 12 до верхнего уровня  $h_2$ , после чего долировка воды прекращается. Весь цикл рабо-

ты оборудования контролируется и регулируется с щита управления 20.

Для ускорения проведения научно-исследовательских работ во всех рабочих камерах для выращивания растений вегетационной установки поддерживают одинаковые параметры микроклимата и режим полива растений, но разные режимы облучения (например, спектральный состав, продолжительность и интенсивность облучения).

### Результаты исследования и их обсуждение

Конструктивные элементы фитотрона со светокультурой и гидропонной технологией периодического затопления, изготовленного по представленному выше описанию, представлены на рисунке 2.

Фитотрон содержит три рабочие камеры размерами  $800 \times 800 \times 1200$  мм, разделенные непрозрачными перегородками (рис. 2а). В каждой камере установлены светодиодные облучатели соизмеримой мощности, порядка 100 Вт при обеспечении облученности  $PPFD=150 \pm 10\%$  мкмоль/( $m^2 \cdot c$ ). В двух камерах облучатели имеют постоянный спектр (в одной – облучатель с солнечным спектром, в другой – облучатель с биколорным спектром) и работают по режиму: 16 часов – день, 8 часов – ночь. В третьей камере установлен облучатель с переменным спектром по трем каналам управления для трех групп светодиодов: красных (к), белых (б), синих (с). Он должен работать по сценарию: 0 (к)-60 (б)-80 (с) – «рассвет», продолжительность 2 часа; 80 (к)-0 (б)-50 (с) – «день», 13 часов; 140 (к)-0 (б)-0 (с) – «закат», продолжительность 1 час. Режимы и сценарий могут меняться в зависимости от выращиваемой культуры и требований технологического процесса.

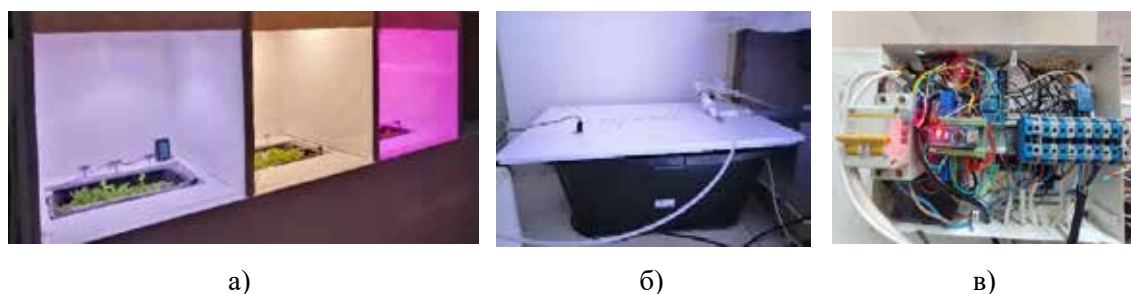


Рис. 2. Конструктивные элементы фитотрона со светокультурой и гидропонной технологией периодического затопления:  
а) рабочие камеры со стеллажами для лотков с субстратом, поддонами для слива питательного раствора, растениями в горшках и воздуховодами; б) емкость для питательного раствора с системой долировки воды и системой регулирования подачи питательного раствора; в) щит управления

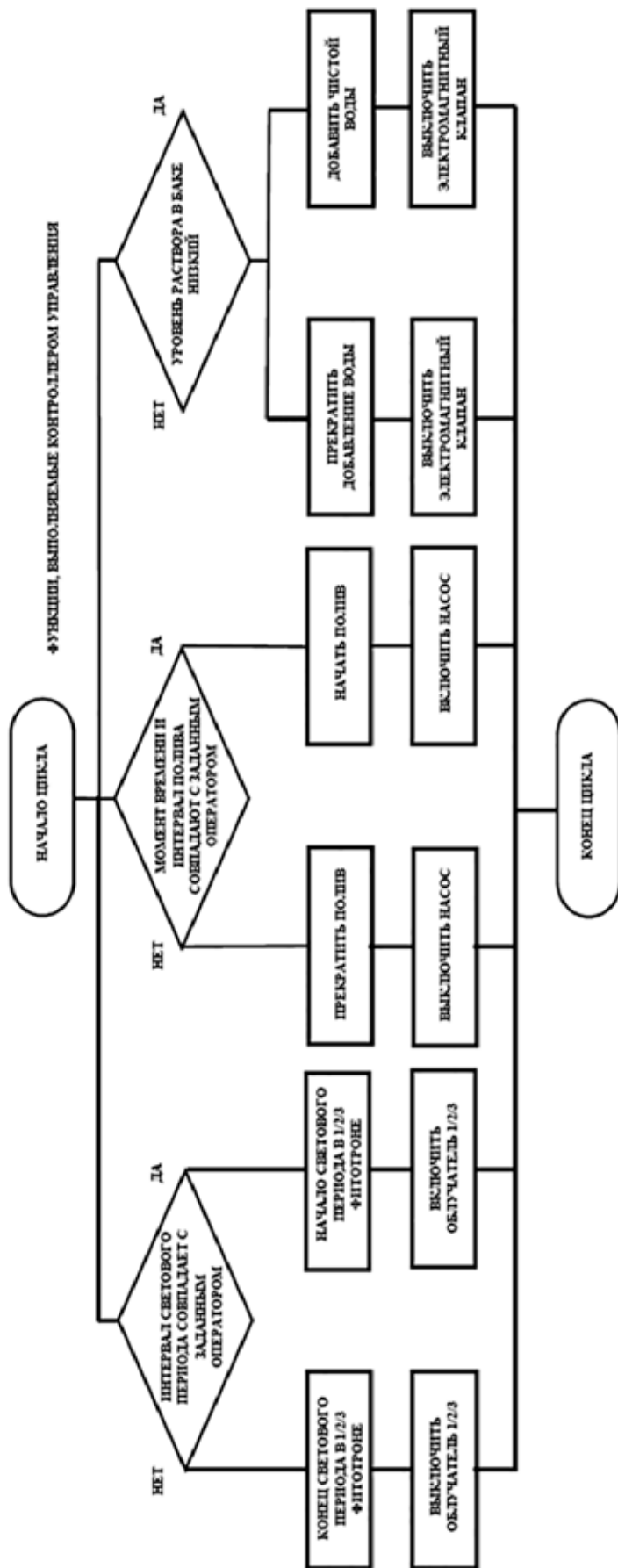


Рис. 3. Алгоритм функций, выполняемых микроконтроллером управления

Каждая рабочая камера содержит поддон для слива питательного раствора по 65 литров каждый, сверху которого установлен стеллаж для лотков с субстратом на 45 литров. В качестве субстрата применяется пеностекло крупной фракции, которое сверху засыпается цеолитом для фиксации растений, подлежащих исследованию. Те, в свою очередь, помещаются в торфяной субстрат в рассадных горшках, в количестве, соответствующем норме высева для каждой культуры. Для подачи питательного раствора применяется погружной дренажный насос LEO XKS-1000 SW, установленный в емкость для питательного раствора объемом 95 литров (рис. 2б). В системе доливки воды на доливочном трубопроводе установлен электромагнитный клапан SMART SP61353, в емкость для питательного раствора – датчик доливки воды S5-A250. Автоматизированное управление осуществляется через щит управления (рис. 2в).

Функциональные возможности, которые должна обеспечивать система автоматизации: контроль и регулирование продолжительности светового дня для трех облучателей, регулирование спектра трехканального облучателя, регулирование периодичности полива, регулирование уровня питательного раствора в емкости для питательного раствора, отображение статуса через дисплеи. Для настройки данных функций был составлен алгоритм управления микроконтроллером, представленный на рисунке 3.

Интерфейс для дисплея управления был разработан в программе Nox App Player – эмуляторе для Windows и импортирован в цифровое устройство с операционной системой Android 10 с установленным приложением KaScada (рис. 4а). На рисунке видны три рабочие камеры фитотрона с возможностью визуализации происходящих в них процессов. Путем нажатия в определенную область экрана (изображенную

соответствующим элементом системы) можно управлять включением и выключением облучателей в каждой рабочей камере, электромагнитным клапаном, погружным насосом.

Для первого экрана в программе Sketch-Up была разработана 3D-модель фитотрона, обработанная через VR-рендеринг. Далее в графическом редакторе Adobe Photoshop каждый элемент был разобран на слои, после чего слои были собраны в приложении KaScada, и на каждый слой была назначена либо «Индикация», либо «Кнопка» с возможностью скрывать кнопки при работе. Также для обмена данными по Modbus RTU были установлены три шлюза: два на отправку и один на прием данных.

На втором экране (рис. 4б), предназначенном для управления системой полива, предусмотрен режим настройки для записи параметров в энергонезависимую память и имеется функция установки и отображения текущего времени. Функция «Настройка полива» включает в себя ручное включение и выключение насоса, а также автоматическое включение насоса по таймеру с установкой длительности/паузы полива, мин. Функция «Настройка авто уровня воды» включает в себя управление электромагнитным клапаном для подачи чистой воды в ручном режиме и по датчику уровня в автоматическом режиме.

На третьем экране (рис. 4в), предназначенном для управления работой облучателей в рабочих камерах, отображается информация в виде функции «Фитотрон 1,2,3». Предусмотрена настройка «Начало дня», «Начало ночи». Для каждого облучателя можно выставить определенный временной интервал работы. Кроме того, для облучателя в третьей рабочей камере предусмотрена регулировка спектра излучения по трем каналам: красный (R), синий (B), белый (W).



а)



б)



в)

Рис. 4. Интерфейс управляющего устройства: а) модель фитотрона; б) экран для управления системой полива; в) экран для управления работой облучателей в рабочих камерах

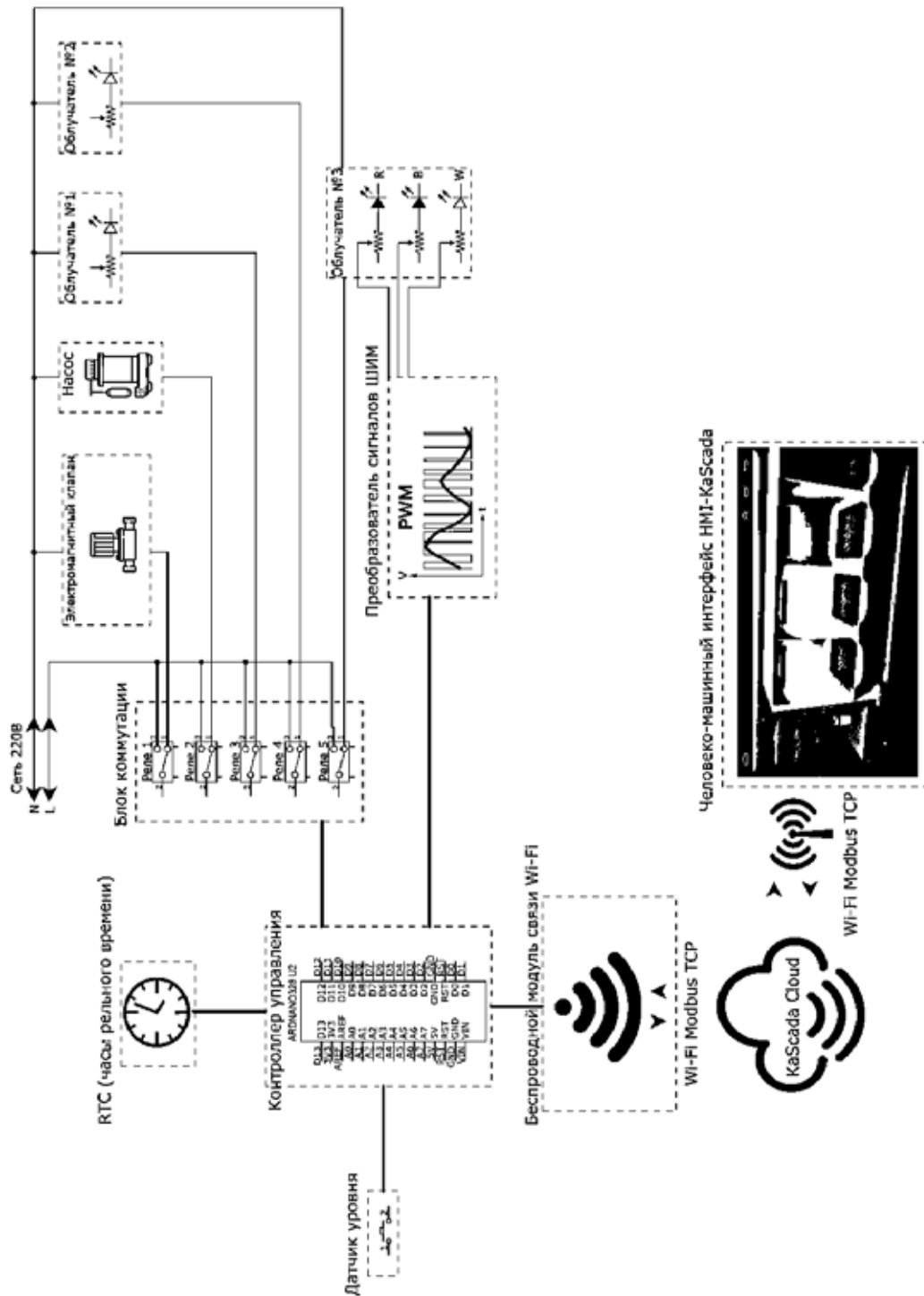


Рис. 5. Схема автоматизации фитотрона со светокulturой и гидропонной технологией периодического затопления

Результатом исследований явилась схема автоматизации фитотрона со светокультурой и гидропонной технологией периодического затопления, изображенная на рисунке 5. Схема реализована на базе платформы Arduino Nano с 8-битным микроконтроллером ATmega328P с тактовой частотой 16 МГц. Микроконтроллер предоставляет 32 Кб Flash-памяти для хранения прошивки, 2 Кб оперативной памяти SRAM и 1 Кб энергонезависимой памяти EEPROM для хранения данных.

В качестве моста использовали модуль ESP-01 с преобразователем уровней. Управление контроллером осуществляется через беспроводной Wi-Fi-модуль посредством НМІ (человеко-машинный интерфейс) на платформе Android с приложением KaScada через протокол Wi-Fi Modbus TCP. Для управления облучателем с регулируемым спектром применен конвертер сигнала ШИМ из 0...5 В в 0...10 В. Для учета хронометрических данных установлены часы реального времени (RTC). В состав схемы входит блок коммутации с пятью реле для управления, три из которых предназначены для управления облучателями, одно реле – для коммутации насоса, одно реле – для управления электромагнитным клапаном.

### Заключение

Разработана оригинальная технологическая схема фитотрона со светокультурой и гидропонной технологией периодического затопления, в которой путем конструктивных решений уменьшаются габаритные размеры и повышается эффективность работы гидропонного оборудования.

Составлен алгоритм функций, выполняемых микроконтроллером управления

и реализуемых через приложения FLprog и KaScada с помощью цифрового устройства с операционной системой Android 10.

Предложенная автоматизированная система управления технологическими процессами в фитотроне со светокультурой и гидропонной технологией периодического затопления позволяет решать задачи по настройке, регулировке и фиксации режимов работы оборудования с применением современных цифровых технологий. Система проста по конструкции, надежна в эксплуатации, легка в применении и может быть рекомендована к реализации в сельском хозяйстве, при управляемом культивировании растений в искусственных контролируемых и регулируемых условиях среды.

### Список литературы

1. Kozai T. Sustainable plant factory: closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce. *Acta Hort.* 2013. V. 1004. P. 27-40.
2. ГОСТ Р 57671-2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. 10 с.
3. РД-АПК 1.10.09.01-14. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 109 с.
4. Долгих П.П., Самойлов М.В. Вегетационная камера // Патент РФ №2298911. Патентообладатель Федеральное образовательное учреждение высшего профессионального образования Красноярский государственный аграрный университет. 2007. Бюл. № 14.
5. Kozai T., Niu G., Takagaki M. *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production – 2nd Edition.* Academic Press, 2020. 476 p.
6. Professional lighting DH Licht 2021. Каталог 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dhlight.de/en/dh-licht-catalog> (дата обращения: 07.01.2022).
7. Тексье У. *Гидропоника для всех. Все о садоводстве на дому.* М.: HydroScope, 2013. 296 с.