

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ МИКРОКЛИМАТА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMEGA2560

Н. И. Лебедь¹, К. Е. Токарев², Д. Д. Нехорошев¹, М. П. Аксенов¹

*Кафедры: «Электроснабжение и энергетические системы» (1),
nik8872@yandex.ru; «Математическое моделирование и информатика» (2),
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»,
Волгоград, Россия*

Ключевые слова: автоматизация; биотехнология; искусственный микроклимат; микроклональное размножение; микроконтроллеры; растениеводство.

Аннотация: Предложены многосекционная климатическая камера для выращивания растений, позволяющая реализовывать внутри независимых секций различные сочетания микроклимата при соблюдении условий высокой биологической чистоты; система управления терморегуляции, увлажнения воздуха, вентиляции и поддержания биологической чистоты индивидуальной независимой секции на регуляторах закрытой логики. Подобраны исполнительные механизмы системы автоматизации. Разработан программно-аппаратный комплекс системы микроклимата на базе программируемого микроконтроллера ATmega2560. Проведено его моделирование в САПР Proteus 8.10 ISIS. Проведены подбор основных элементов системы управления и тестирование на различных режимах работы, подтвердившее работоспособность и эффективность.

Введение

На сегодняшний момент применение математического моделирования при оптимизации режимных параметров в сельскохозяйственном производстве путем многофакторного эксперимента позволяет, например, эффективно в короткие сроки подобрать значения показателей микроклимата для агро- и биотехнологических способов выращивания растений. Такой подход предусматривает проведение экспериментов в многократной повторности на различных вариантах опытов по нескольким выбранным факторам с тремя уровнями варьирования, что отвечает методикам плана Рехтшафнера, Бокса–Бенкина и др. При этом осуществление данного подхода сложно в исполнении из-за конструктивных особенностей большинства климатических камер, а именно реализации одинаковых условий на всем рабочем объеме, что вынуждает в современных методах исследований применять несколько климатических камер, увеличивая затраты на их приобретение и последующее неэффективное использование.

Осуществление данного подхода осложнено из-за отсутствия возможности создания микроклимата с разными параметрами в рамках одной климатической камеры, поэтому приходится применять параллельно несколько одинаковых модулей, что неминуемо приводит к увеличению как капитальных, так и эксплуата-

ционных затрат (в том числе и за счет вынужденного простоя в период перехода на другую продукцию) и, соответственно, повышению себестоимости конечного продукта. Как видно, заявленный недостаток, в целом затрудняет применение современных климатических камер в пределах структурного подразделения с несколькими разноплановыми направлениями исследований (микробиология, растениеводство, работа с животными и растительными клетками). Кроме этого, недостаток актуален и на производственных предприятиях различной мощности, например, получение экологически чистых растений для производства пищевой продукции при выращивании нескольких групп растений требует создание различных почвенно-климатических условий, что затруднительно с применением современных камер. Существующие зарубежные и отечественные климатические камеры нуждаются в глубокой модернизации и не лишены недостатков, что ограничивает их применение в исследовательских целях.

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований выбрана разработанная многосекционная климатическая камера для выращивания растений [1, 2]. Устройство включало две независимые друг от друга секции, в которых можно было реализовывать различные параметры микроклимата: тепло/холод, влажность воздуха, яркость и спектр освещения, параметры обеззараживания и вентилирования воздуха. В первом приближении для управления системой микроклимата использовались регуляторы с закрытой логикой (тепло/холод, влажность) и реле времени (вентиляция, обеззараживание воздуха).

На рисунке 1 представлена система управления терморегуляции, увлажнения воздуха, вентиляции и освещения климатической камеры, а также общая компоновка некоторых исполнительных устройств системы.

Указанное устройство обеспечивало проведение необходимых исследований в условиях регулируемого микроклимата при наличии гибкой настройки каждой управляемой зоны, что значительно снижало временные затраты на нахождение оптимальных микроклиматических условий для каждого конкретного образца [3].

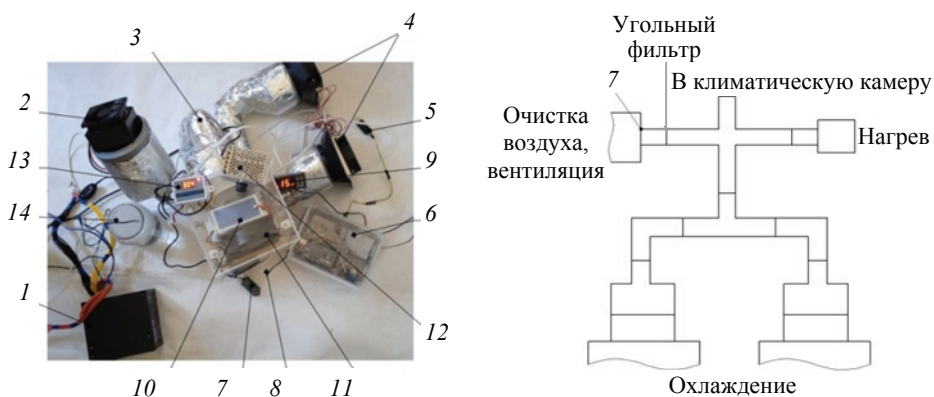


Рис. 1. Система управления терморегуляции, увлажнения воздуха, вентиляции и поддержания биологической чистоты:

1 – блок питания (AC/DC–преобразователь); 2, 4 – исполнительные устройства соответственно нагрева воздуха и его охлаждения; 3 – трубчатый корпус; 5 – интерфейс связи RS-485 (USB to RS-485 Converter); 6 – блок управления на базе микроконтроллера ATmega2560 (в схеме использовался для управления освещением); 7 – датчик влажности DHT11; 8 – датчик температуры NTC; 9 – дисплей + контроллер терморегуляции; 10 – блок создания и поддержания условий биологической чистоты; 11 – исполнительное устройство вентиляции; 12 – PWM-регулятор озонирования; 13 – дисплей + контроллер увлажнения воздуха; 14 – емкость для испарения жидкости

Обработка поступающего воздуха посредством модуля очистки воздуха в совокупности с полной изоляцией управляемых зон друг от друга и от внешней среды позволяет создать необходимые условия микроклимата в зоне выращивания растений и достичь высокого уровня биологической чистоты, а применение угольного фильтра и блока озонирования воздуха – преобразовать поступающий внутрь управляемых зон выращивания растений озон в обеззараженный от фитопатогенной микрофлоры кислород [4].

В качестве исполнительных устройств подобраны следующие: ТЭН ($P = 120$ Вт, $U = 12$ В), модуль охлаждения Пельтье ($P = 60$ Вт, $U = 12$ В, 2 шт. на секцию), ультразвуковой увлажнитель воздуха (производительность по увлажнению ≤ 380 мл/ч), светодиодная фитолента длиной 10 м (на две секции, светодиод SMD 5050, $P = 12$ Вт/м), генератор озона ($P = 100$ Вт). Исполнительные устройства подобраны с учетом производительности, а также стационарных и нестационарных режимов работы предлагаемой климатической камеры.

Однако данная система имела ряд недостатков – громоздкость, низкая функциональность и отсутствие гибкости, вызванные ограниченным функционалом регуляторов, а также невозможность в дальнейшем приема-передачи данных по последовательным линиям связи и интеграции со SCADA-системами и IoT [5].

Результаты исследований

Для разработки и моделирования алгоритма управления климатической камерой, использовалась система автоматизированного проектирования электронных устройств Proteus 8.10 ISIS, где производился подбор основных элементов системы управления и их подключение к выбранному микроконтроллеру ATmega2560. Разработка программного кода проекта проводилась в системе графического программирования FLProg на языке FBD, далее осуществлялась проверка кода, преобразование кода на язык C++ и последующая компиляция в Arduino IDE. Полученный файл преобразовывался в бинарный и загружался в среду Proteus 8.10 ISIS с предварительно созданной схемой системы автоматизированного управления для последующей проверки на работоспособность и моделирования [6].

На рисунке 2 представлена модель автоматизированной системы управления в момент симуляции при следующих условиях: $2T < U$ (температура воздуха во второй секции меньше температуры уставок, °C, $34 < 38$); $2H < HG$ (влажность воздуха во второй секции меньше уставок влажности, % ($37 < 44 - 59$)), текущее время 8:45:08 (исполнительные механизмы вентилирования и обеззараживания воздуха находятся в активном состоянии и дублируются световой индикацией).

Для управления мощной нагрузкой схемы автоматизации использованы соответствующие элементы: твердотельные и электромеханические реле, силовые ключи (транзисторы) и др. Предлагаемая релейно-транзисторная схема позволит управлять в автоматическом режиме как нагрузкой на включение/отключение исполнительных элементов (увлажнение воздуха, вентиляция, обеззараживание воздуха) (см. рис. 2, *г, е, ж*), так и в регуляции мощности силовыми ключами по типу коррекции ШИМ-сигнала (терморегуляция) (см. рис. 2, *д*).

Задание уставок для терморегуляции и регуляции влажности воздуха осуществлялись посредством записи нижних и верхних пороговых значений управляемых величин, а также для срабатывания по времени: вентиляция, обеззараживание воздуха по SR-триггеру на включение и отключение с помощью модуля часов реального времени DS1302 (см. рис. 2, *б*). Кроме этого, для вентиляции и обеззараживания воздуха реализовано принудительное включение вне зависимости от времени срабатывания.

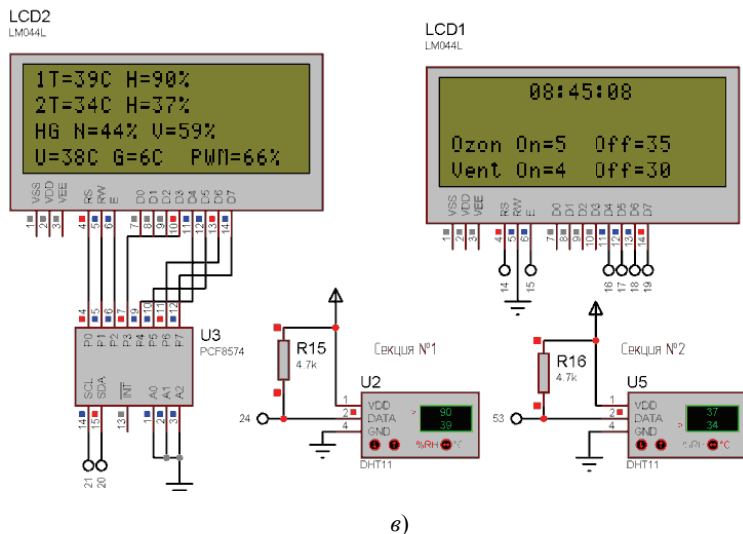
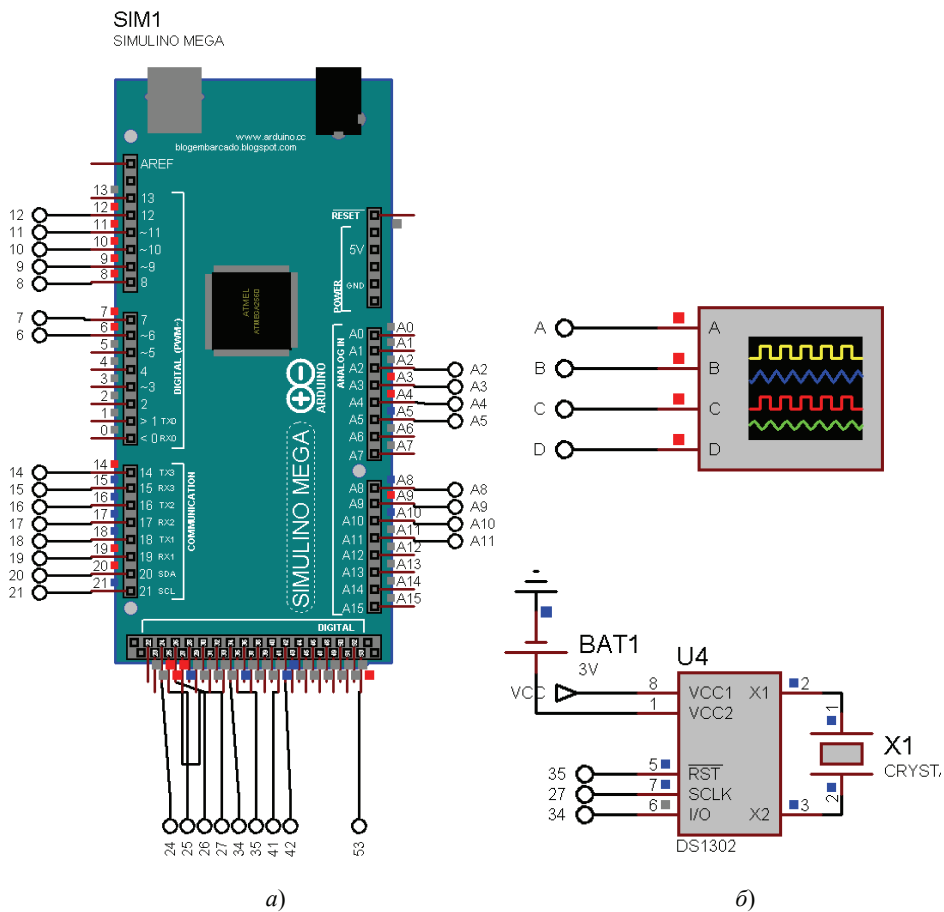
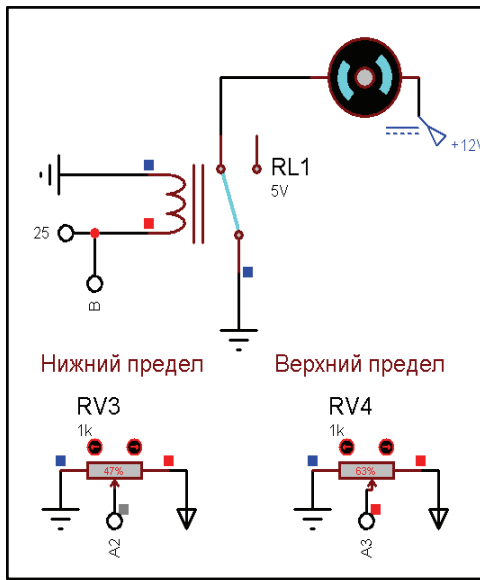
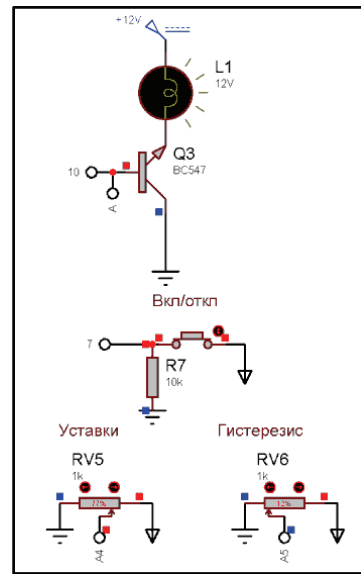


Рис. 2. Моделирование работы схемы при условиях: $2T < U$; $2H < HG$, текущее время 8:45:08 (начало):

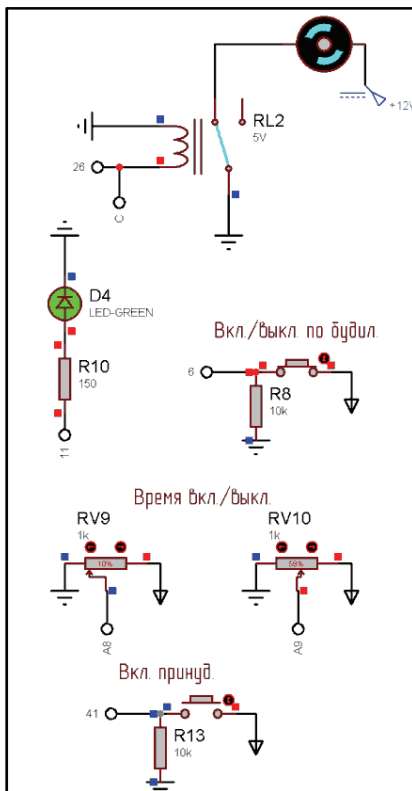
а – программируемый микроконтроллер; *б* – осциллограф и часы реального времени DS1302; *в* – дисплей LCD2004 и датчик температуры/влажности DHT11



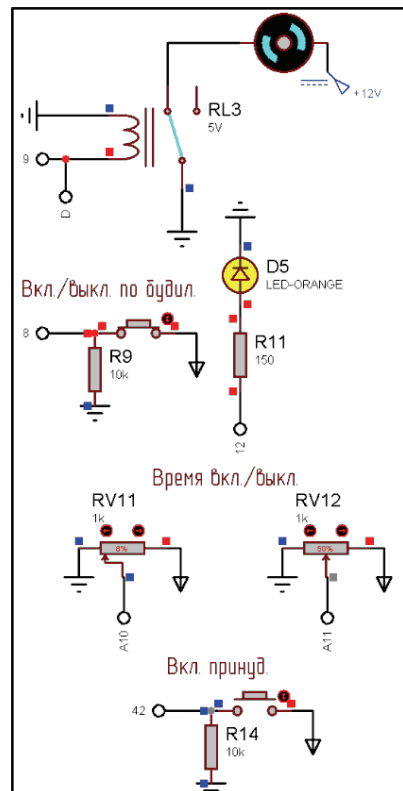
г)



д)



е)



ж)

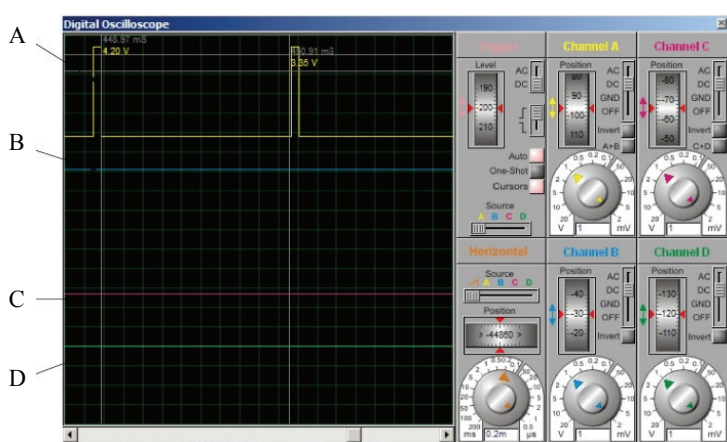
Рис. 2. Окончание:

г, д, е, ж – модули соответственно увлажнения, терморегуляции, обеззараживания воздуха, вентиляции воздуха

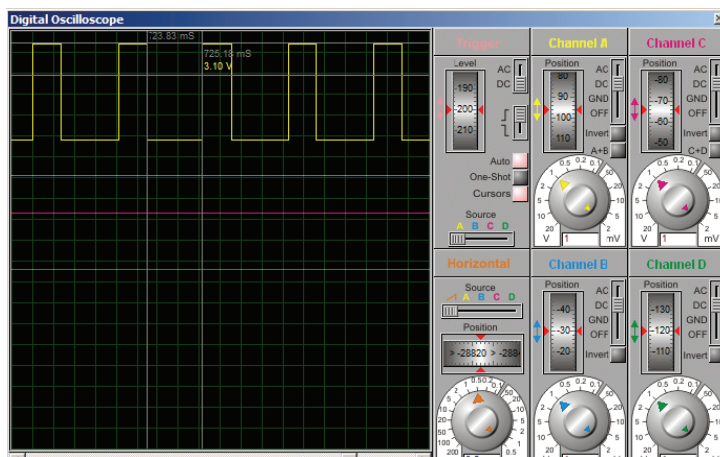
Считывание климатических параметров на каждой секции камеры проводилось посредством датчиков температуры и влажности DHT11. Передача данных от датчиков и индикация данных выводилась на два дисплея LCD2004 (см. рис. 2, в).

Второй дисплей отражает: на первой и второй строках – текущие значения температуры, влажности; третьей – установленные нижние и верхние пороговые значения влажности воздуха; четвертой – уставки температуры, гистерезиса и текущее значение ШИМ-сигнала ПИД-регулятора. Первый дисплей: на первой строке – текущее время, на последующих – установленное время срабатывания (в секундах) исполнительных устройств, обеззараживания и вентилирования воздуха.

На рисунке 3 представлена осциллограмма, полученная от Digital Oscilloscope (см. рис. 2, б) для четырех каналов: А, В, С, D – соответственно терморегуляции, увлажнения, обеззараживания и вентилирования воздуха.



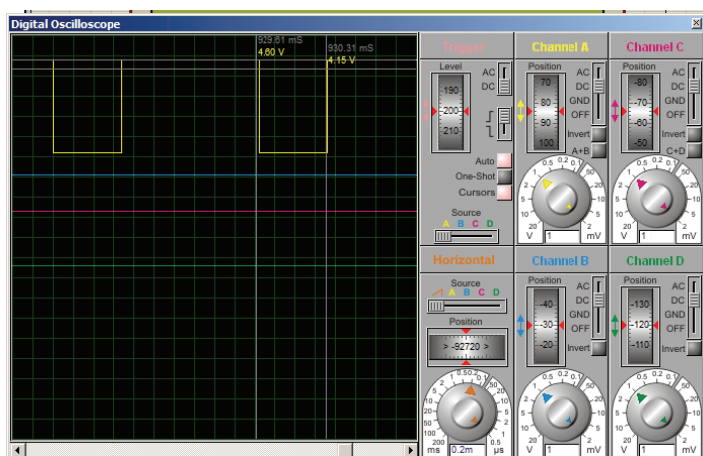
а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы, полученные при моделировании системы управления, каналов А, В, С, D на различных режимах работы системы микроклимата (В, С, D включены – режим «логическая единица») (начало):

а, б – коэффициенты заполнения ШИМ-сигнала А, %, соответственно 3 и 33



в)

Рис. 3. Окончание:

в – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала А – 66 %

Осциллограммам канала А соответствуют следующие значения текущих температур/уставок, °С: 39/38 (рис. 3, а); 36/38; 34/38. Как видно, канал А работает в ШИМ-режиме, что соответствует коэффициенту заполнения 3 % (период выключения 1,94 мс, см. рис. 3, а), 33 % (период выключения 1,35 мс, рис. 3, б), 66 % (период выключения 0,71 мс, рис. 3, в) от его максимального значения 255 (8 бит) при использовании функции ПИД-регулирования и транзисторного ключа для реализации терморегуляции. Каналы В, С, D работают в режиме «логический ноль или единица» от электромеханического реле.

Заключение

Применение предлагаемой многосекционной климатической камеры для выращивания растений позволяет реализовывать внутри себя одновременно несколько различных сочетаний климатических факторов (температуры, спектра и интенсивности освещения, уровней концентрации остаточного озона, фильтрации и инфильтрации воздуха и др.), что делает ее незаменимой при проведении моделирования биологических систем и на производстве, где за счет одной единицы оборудования возможно обеспечить одновременной выпуск разноплановой биологической продукции.

Предлагаемая секционная камера для выращивания растений обеспечивает широкий спектр климатических условий, а также их комбинаций внутри одного устройства, технологичности их реализации при произрастании сельскохозяйственных культур в климатической камере и может быть легко реализована в сельскохозяйственном производстве при селекции растений и для других целей.

Для обеспечения работы предлагаемого программно-аппаратного комплекса разработано программное обеспечение, скетч которого занимает 913 строк, использует 22 866 байт (9 %) памяти устройства, всего доступно 253 952 байт, глобальные переменные используют 706 байт (8 %) динамической памяти, оставляя 7486 байт для локальных переменных, максимум: 8192 байт [7]. Проведенное моделирование подтвердило работоспособность устройства с высокой эффективностью на различных режимах работы.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-21-20041.

Список литературы

1. Полезная модель 208958 Российская Федерация, МПК A01G 9/24, A01G 9/26 Секционная климатическая камера для выращивания растений / Н. И. Лебедь, И. В. Волков, А. М. Макаров, Я. В. Калинин, Н. Г. Шаронов, М. Б. Лебедь ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский технический университет». – № 2021111261 ; заявл. 21.04.2021 ; опубл. 24.01.2022, Бюл. № 3. – 9 с.
2. Полезная модель 196200 Российская Федерация, МПК A01G 9/24. Климатическая камера для выращивания растений / А. И. Беляев, Ю. Н. Плескачев, Н. И. Лебедь, С. В. Колмукиди, М. Б. Лебедь, Ю. В. Берестнева, А. С. Соломенцева, А. С. Межевова, И. В. Волков, А. М. Пугачева ; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук». – № 2019124638 ; заявл. 31.07.2019 ; опубл. 20.02.2020, Бюл. № 5. – 7 с.
3. Мультисекционная климатическая камера для ускоренного производства культурных растений в условиях регулируемых параметров / Н. И. Лебедь, И. В. Волков, М. Б. Лебедь, Я. В. Калинин // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. – 2021. – № 3 (250). – С. 66 – 68. doi: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-66-68
4. Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino / У. Соммер. – СПб. : БХВПетербург, 2012. – 256 с.
5. Борисов, И. И. Имитационное моделирование мехатронных систем : учеб.-метод. пособие / И. И. Борисов, С. А. Колюбин. – СПб. : Санкт-Петербургский нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики, 2020. – 103 с.
6. Елизаров, И. А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры : учеб.-метод. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2021. – 236 с.
7. Свид. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2022617977. Программный модуль компьютерного мониторинга признаков заражения посевов агрокультур при клональном микроразмножении / Н. И. Лебедь, К. Е. Токарев. М. Б. Лебедь (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 27.04.2022.

Research and Simulation of Operation Modes of Hardware-Software Complex of Microclimate System Based on Programmable Microcontroller ATmega2560

N. I. Lebed¹, K. E. Tokarev², D. D. Nekhoroshev¹, M. P. Aksenov¹

Department of power supply and energy systems (1), nik8872@yandex.ru;

Department of mathematical modeling and informatics (2),

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

Keywords: automation; biotechnology; artificial micro-climate; micropropagation; microcontrollers; crop production.

Abstract: A multi-sectional climatic chamber for growing plants is proposed; it enables to implement various combinations of microclimate within independent sections, subject to conditions of high biological purity; control system for thermoregulation, air humidification, ventilation and maintenance of biological purity of an individual independent section on closed logic controllers. Actuators of

the automation system are selected. A hardware-software complex of a microclimate system based on a programmable microcontroller ATmega2560 has been developed. Its modeling was carried out in CAD Proteus 8.10 ISIS. The selection of the main elements of the control system and testing in various operating modes, which confirmed the operability and efficiency were carried out.

References

1. Lebed' N.I., Volkov I.V., Makarov A.M., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G., Lebed' M.B. *Seksionnaya klimaticheskaya kamera dlya vyrashchivaniya rasteniy* [Sectional climatic chamber for growing plants], Russian Federation, 2022, Utility model 208958. (In Russ.)
2. Belyayev A.I., Pleskachev Yu.N., Lebed' N.I., Kolmukidi S.V., Lebed' M.B., Berestneva Yu.V., Solomentseva A.S., Mezhevoa A.S., Volkov I.V., Pugacheva A.M. *Klimaticheskaya kamera dlya vyrashchivaniya rasteniy* [Climatic chamber for growing plants], Russian Federation, 2020, Utility model 196200. (In Russ.)
3. Lebed' N.I., Volkov I.V., Lebed' M.B., Kalinin Ya.V. [Multisectional climate chamber for accelerated production of cultivated plants under conditions of controlled parameters], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of the Volgograd State Technical University], 2021, no. 3 (250), pp. 66-68, doi: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-66-68 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Sommer U. *Programmirovaniye mikrokontrollernykh plat Arduino/Freeduino* [Programming microcontroller boards Arduino/Freeduino], St. Petersburg: BKHVPeterburg, 2012, 256 p. (In Russ.)
5. Borisov I.I., Kolyubin S.A. *Imitatsionnoye modelirovaniye mekhatronnykh sistem: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Simulation modeling of mechatronic systems: teaching aid], St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2020, 103 p. (In Russ.)
6. Yelizarov I.A., Martem'yanov Yu.F., Skhirtladze A.G. *Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii. Programmno-tekhnicheskiye komplekсы i kontrolyery: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Technical means of automation. Software and hardware complexes and controllers: a teaching aid], Stary Oskol: OOO «Tonkiye naukoymekkiye tekhnologii», 2021, 236 p. (In Russ.)
7. Lebed' N.I., Tokarev K.Ye., Lebed' M.B. *Programmnyy modul' komp'yuternogo monitoringa priznakov zarazheniya posevov agrokul'tur pri klonal'nom mikrorazmnozhenii* [Program module for computer monitoring of signs of infection of agricultural crops during clonal micropropagation], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of computer programs No. 2022617977. (In Russ.)

Forschung und Modellierung der Betriebsmodi von Hardware- und Softwarekomplexen der Mikroklimate auf Basis des programmierbaren Mikrocontrollers ATmega2560

Zusammenfassung: Es sind eine mehrteilige Klimakammer für die Pflanzenzucht vorgeschlagen, die es ermöglicht, verschiedene Kombinationen von Mikroklimate innerhalb unabhängiger Sektionen unter Bedingungen hoher biologischer Reinheit zu realisieren; Steuersystem für Temperaturregelung, Luftbefeuchtung, Belüftung und Aufrechterhaltung der biologischen Reinheit eines einzelnen unabhängigen Abschnitts auf geschlossenen Logiksteuerungen. Die vollziehenden Mechanismen des Automatisierungssystems sind ausgewählt. Es ist ein Hardware-

Software-Komplex eines Mikroklimasystems basierend auf einem programmierbaren Mikrocontroller ATmega2560 entwickelt. Seine Simulation ist im CAD Proteus 8.10 ISIS durchgeführt. Es sind auch die Auswahl der Hauptelemente des Steuerungssystems und Tests in verschiedenen Betriebsarten durchgeführt, die die Effizienz und Effektivität des Systems bestätigen.

Étude et simulation des modes de fonctionnement du complexe logiciel et matériel du système de microclimat basé sur le microcontrôleur programmable ATmega2560

Résumé: Sont proposés une chambre climatique multi-sections pour la culture de plantes permettant de réaliser différentes combinaisons de microclimats à l'intérieur des sections indépendantes dans des conditions de la haute pureté biologique ainsi qu'un système de contrôle de la thermorégulation, de l'humidification, de la ventilation et du maintien de la pureté biologique d'une section indépendante individuelle sur des régulateurs de logique fermée. Sont proposés les mécanismes du système d'automatisation. Est élaboré le complexe logiciel et matériel du système de microclimat à la base du microcontrôleur programmable ATmega2560. Est réalisée sa modélisation en CAO Proteus 8.10 ISIS. Est effectué le choix des principaux éléments du système de contrôle et les tests sur les différents modes de fonctionnement ce qui a confirmé la capacité de travail et l'efficacité.

Авторы: *Лебедь Никита Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и энергетические системы»; *Токарев Кирилл Евгеньевич* – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Математическое моделирование и информатика»; *Нехорошев Дмитрий Дмитриевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и энергетические системы»; *Аксенов Михаил Петрович* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Электроснабжение и энергетические системы», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград, Россия.