

ЛАКТИОНОВ І. С.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0000-0001-7857-6382

e-mail: ivan.laktionov@donntu.edu.ua

ВОВНА О. В.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0000-0003-4433-7097

e-mail: oleksandr.vovna@donntu.edu.ua

БОРИЧЕВСЬКИЙ В. В.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0000-0001-5363-5665

e-mail: vladyslav.borychevskiy.kita@donntu.edu.ua

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ І ТЕСТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРУВАННЯ ШТУЧНИМ ДООСВІТЛЕННЯМ ТЕПЛИЦЬ

Задля підвищення врожайності культур актуалізується питання розробки і впровадження технологій автоматизації та цифровізації виробничих процесів вирощування сільськогосподарських рослин у промислових теплицях. Цей факт, у свою чергу, позитивно впливає на переоснащення програмно-технічної бази вітчизняних аграрних виробництв захищеного ґрунту, що стимулює підвищення показників інвестиційної привабливості та довгострокової стійкості українських сільськогосподарських підприємств. Основна мета статті полягає в розробці наукових підходів до створення й тестування комп'ютерно-інтегрованої технології керування штучним доосвітленням в умовах аграрних виробництв захищеного ґрунту. Під час досліджень було обґрунтовано компонентну базу та розроблено структурну схему апаратно-програмних засобів технології керування доосвітленням. У результаті було синтезовано й протестовано комп'ютерну модель, яка реалізується на мікропроцесорній техніці та алгоритмах теорії нечіткої логіки для керування інтенсивністю й спектральним складом світлодіодних світильників у теплицях. Реалізовано і експериментально досліджено макетний зразок системи керування штучним доосвітленням тепличних культур. Реалізовані апаратно-програмні засоби комп'ютерно-інтегрованої технології дозволяють в автоматичному режимі керувати параметрами світлодіодних світильників із обліком типів і періодів вегетації вирощуваних сільськогосподарських культур.

Ключові слова: штучне доосвітлення, комп'ютерно-інтегрована технологія, керування, теплиця.

IVAN LAKTIONOV, OLEKSANDR VOVNA, VLADYSLAV BORYCHEVSKIY
SHEE 'Donetsk National Technical University' of the Ministry of Education and Science of Ukraine

RESULTS OF DEVELOPMENT AND TESTING OF COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGY OF GREENHOUSES ARTIFICIAL LIGHTING CONTROL

The development and implementation of the automation and digitalization technologies of growing crops production processes in industrial greenhouses is being actualized for increasing of crop yields. This fact, in turn, positively influences on the re-equipment of the software and hardware base of protected soil domestic agricultural production, which stimulates an increase of investment attractiveness and long-term sustainability of Ukrainian agricultural enterprises. The main purpose of the article is developing of the scientific approaches on creation and testing of computer-integrated technology for artificial lighting control in the protected ground agricultural production conditions. The research object is automatic control process of artificial lighting. The research subject is methods and hardware-software components of the indoor greenhouse microclimate. Research methods are analysis of existing development methods, mathematical and computer modeling, hardware and software experimental testing. In course of the research, the component base has been substantiated and the block diagram of the hardware and software for the control of lighting technology has been developed. As a result, a computer model has been synthesized and tested, which is implemented on microprocessor technology and algorithms of the fuzzy logic theory for control the intensity and spectral composition of LED lamps in greenhouses. The prototype of control system for artificial additional lighting of greenhouse crops has been implemented and experimentally investigated. The implemented hardware and software means of computer-integrated technology allow to automatically control the parameters of LED lamps, taking into account the types and periods of growing crops.

Keywords: artificial lighting, computer-integrated technology, control, greenhouse.

Постановка проблеми дослідження

На сьогоднішній день овочівництво захищеного ґрунту є однією з найбільш наукомістких і перспективних галузей сільськогосподарського сегменту в світі. Ця галузь аграрного сектору у даний час знаходиться в стадії динамічного розвитку й становлення, який обумовлено сучасними досягненнями в галузі комп'ютерно-інтегрованих, сенсорних, цифрових та інфокомунікаційних технологій, а також методів статистичної інтелектуалізованої обробки даних. Задля підвищення врожайності тепличних культур актуалізується питання розробки і впровадження технологій автоматизації та цифровізації виробничих процесів вирощування сільськогосподарських культур у промислових теплицях. Цей факт, у свою чергу, позитивно впливає на переоснащення програмно-технічної бази вітчизняних аграрних виробництв захищеного ґрунту, що стимулює підвищення показників інвестиційної привабливості та довгострокової стійкості українських сільськогосподарських підприємств. Таким чином, науково-технічна задача розробки і впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій автоматичного керування штучним доосвітленням в умовах промислових теплиць є актуальною.

Основна мета статті полягає в розробці наукових підходів щодо створення й тестування комп'ютерно-інтегрованої технології керування штучним доосвітленням в умовах аграрних виробництв захищеного ґрунту.

Об'єкт дослідження – процес автоматичного контролю штучного доосвітлення з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій. Предмет дослідження – способи, апаратно-програмні компоненти та методи побудови і тестування комп'ютерно-інтегрованих технологій керування штучним доосвітленням. Методи дослідження: аналіз і систематизація відомих результатів досліджень і практичних розробок у галузі прикладних комп'ютерно-інтегрованих технологій, математичне і комп'ютерне моделювання, експериментальні методи випробувань апаратно-програмного забезпечення прикладних комп'ютерно-інтегрованих технологій, методи статистичного аналізу результатів вимірювального моніторингу.

Аналіз і систематизація відомих результатів досліджень і практичних розробок у галузі прикладних комп'ютерно-інтегрованих технологій

Під час аналізу актуальних на сьогоднішній день нормативних документів [1, 2] і наукових джерел [3, 4] були систематизовані загальні вимоги до показників інтенсивності та часового інтервалу освітлення культур в умовах промислових теплиць, а саме:

– у розсадних блоках промислових теплиць гранична інтегральна інтенсивність освітлення має бути не менше 25 Вт/м^2 ФАР (фотосинтетична активна радіація), а гранична добова кількість ФАР – не менше 250 Вт-год/м^2 ;

– в овочевих блоках промислових теплиць гранична інтегральна інтенсивність освітлення має бути для огірків не менше 80 Вт/м^2 ФАР та для томатів – не менше 95 Вт/м^2 ФАР, а гранична добова кількість ФАР для типових овочевих культур під час плодоношення – не менше 900 Вт-год/м^2 ;

– у період зростання культур за умов використання систем штучного доосвітлення для розсади і сянців рекомендовано приймати інтенсивність опромінення на рівні 80 Вт/м^2 , а для овочевих культур – у діапазоні від 80 Вт/м^2 до 160 Вт/м^2 ;

– для огірків рекомендовано використовувати системи доосвітлення з наступним розподілом енергій за спектральним складом: у діапазоні від 380 нм до 490 нм – до 20 %, від 490 нм до 590 нм – до 40 %, від 590 нм до 700 нм – до 40 %; для томатів у діапазоні від 380 нм до 490 нм – до 20 %, від 490 нм до 590 нм – до 15 %, від 590 нм до 700 нм – до 65 %.

У науково-практичних джерелах інформації [3, 5] було встановлено той факт, що вимірювальна інформація про інтенсивність освітлення з обліком фізіологічно значущих зон є вихідною задля генерування впливів керування технологічними процесами зволоження, опалення, підживлення рослин двоокису вуглецю та вентиляції. Апробовані науково-прикладні основи щодо створення сучасних систем вимірювального моніторингу й адаптивного керування технологічними процесами сільськогосподарських виробництв із використанням серійних мікропроцесорних і сенсорних технологій представлені в наукових працях [6–10]. Варто також зазначити, що авторами цієї статті на сьогоднішній день проведено ряд досліджень у галузі комп'ютерно-інтегрованих технологій світлокультури тепличних рослин [11, 12], які дозволили розвинути теоретико-прикладні основи побудови апаратно-програмних засобів, що представлені в даній роботі.

Шляхом критичного аналізу та систематизації відомих результатів досліджень щодо синтезу структурно-алгоритмічних організацій прикладних комп'ютерно-інтегрованих технологій сільськогосподарського призначення було встановлено, що їх невід'ємним функціональним блоком є підсистема моніторингу й автоматичного керування технологічним режимом штучного доосвітлення зони вирощування. Адже, накопичення біомаси культур і швидкість процесів фотосинтезу й евапотранспірації, безпосередньо залежать від кількості енергії, яка трансформується в біохімічні зв'язки. Також у джерелах інформації [3, 4] доведено, що ефективність фотосинтезу істотно залежить від спектрального складу джерел штучного доосвітлення (рис. 1).

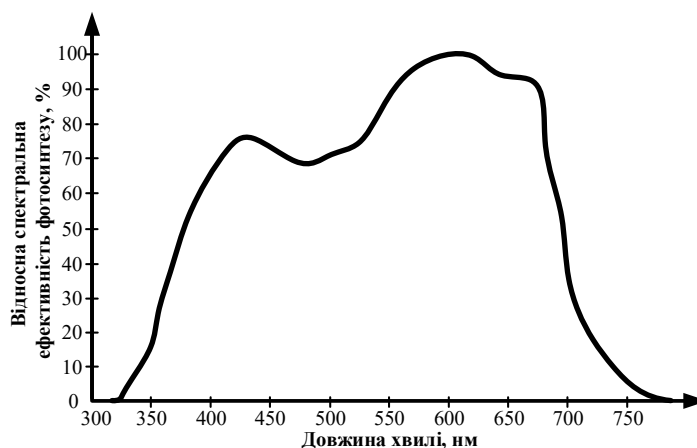


Рис. 1. Відносна спектральна ефективність фотосинтезу

Найбільш використовуваними джерелами штучного доосвітлення, що застосовуються в промислових теплицях, є: галогенні і газорозрядні лампи, а також світлодіоди [13]. Серед них світлодіодні технології набули значної популярності в науково-дослідних роботах та науково-практичних рішеннях завдяки своїм численним перевагам, таким як: компактний дизайн, економічна ефективність, якість світла, довговічність, низьке тепловиділення, а також можливість комбінування спектрального складу.

Виклад основного матеріалу

На першому етапі досліджень було обґрунтовано структурну схему апаратно-програмного забезпечення проєктованої комп’ютерно-інтегрованої технології керування штучним доосвітленням теплиць, як показано на рис. 2. Ця структурна схема є теоретичною основою під час реалізації засобів і алгоритмів регулювання інтенсивності й спектрального складу освітленості шляхом мікропроцесорного опрацювання результатів вимірювального моніторингу, що дозволяє отримати сприятливі умови мікроклімату з урахуванням типів і періодів вегетації вирощуваних культур.

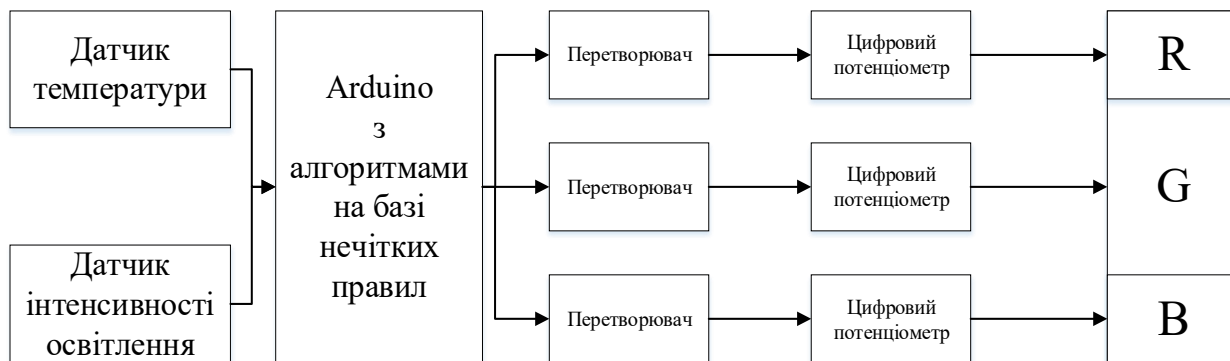


Рис. 2. Структурна схема проєктованої комп’ютерно-інтегрованої технології керування штучним доосвітленням теплиць (R, G, B – червона, зелена і синя ділянки спектру)

Алгоритмічне забезпечення у вигляді фазифікованої бази правил, яке становить основу вбудованого програмного забезпечення досліджуваної технології, було розроблено і протестовано в середовищі Matlab & Simulink, як показано на рис. 3 і 4.

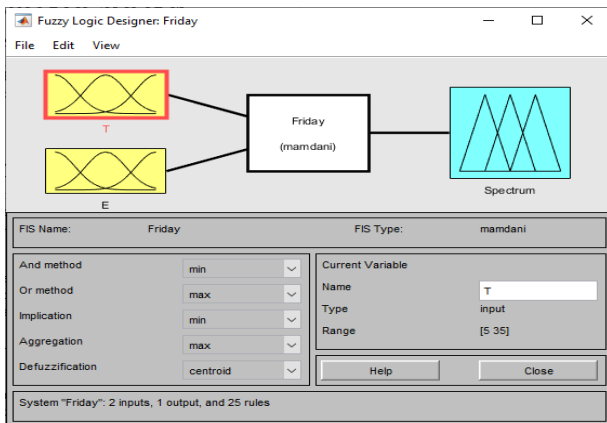


Рис. 3. Інтерфейс налаштування нечіткої моделі обробки даних

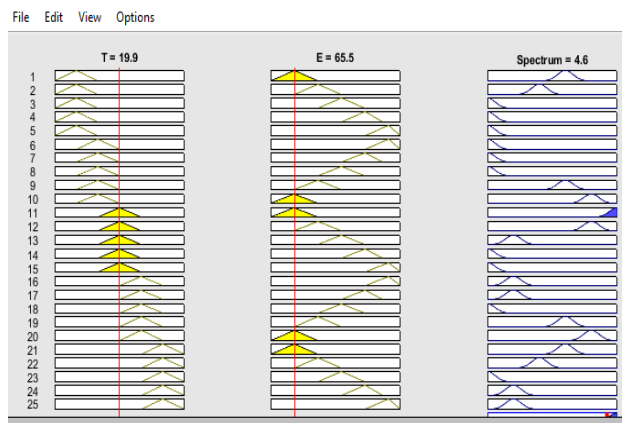


Рис. 4. Графічна інтерпретація синтезованої бази правил

Синтезована база правил відтворює експертні дані у відповідності до табл. 1, що являє собою матрицю можливих станів вхідних (Т – температура, Е – інтенсивність освітлення у фазифікованій формі) та вихідної (діюче значення широтно-імпульсно модульованої напруги на виході мікроконтролера) змінної.

Таблиця 1

Матриця станів вхідних та вихідних змінних

T / E	Night	Dawn	Morning	Noon	Afternoon
T ₁ (20 °C)	Medium	Low	Off	Off	Off
T ₂ (21 °C)	More medium	Medium	Off	Off	Off
T ₃ (22 °C)	High	More medium	Low	Off	Off
T ₄ (23 °C)	More medium	Medium	Off	Low	Low
T ₅ (24 °C)	Medium	Low	Off	Low	Low

Виходячи з аналізу даних, які наведено в таблиці 1, встановлено, що ввімкнення системи штучного доосвітлення має відбуватись із різною потужністю з обліком періоду доби та умов температурного режиму теплиці для формування пігментів та ефективного фотосинтезу сільськогосподарських культур.

На другому етапі досліджень було реалізовано і протестовано комп'ютерну імітаційну модель технології в середовищі Proteus, як показано на рис. 5. Логіка моделювання системи є наступною: на вході відбувається зчитування інформації з датчиків рівня освітлення і температури, а на виході детектуються сигнали керування світлодіодними світильниками. Під час побудови моделі використано методику п'ятирівневої системи трикутних вхідних функцій, яка дозволяє проводити зняття даних із датчиків максимально прецизійно. Через те, що в програмному забезпеченні Proteus відсутні моделі цифрових потенціометрів, для побудови і тестування імітаційної моделі було використано транзистори. Такий підхід відповідає внутрішній схемотехніці побудови цифрових потенціометрів X9C104 [14].

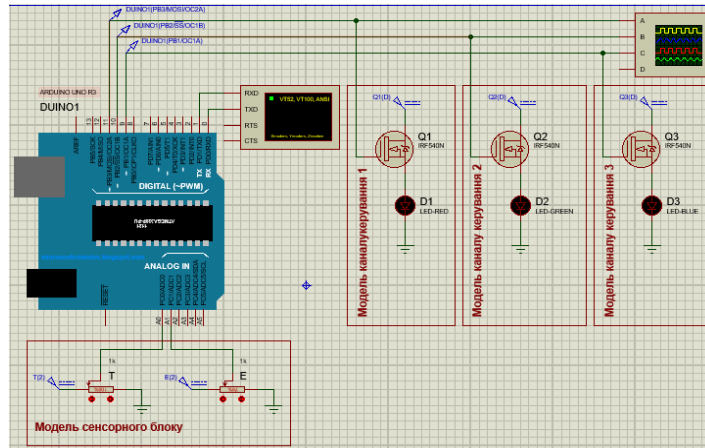


Рис. 5. Імітаційна комп'ютерна модель досліджуваної системи

Отримані результати моделювання, які візуалізовано на віртуальному послідовному порті (рис. 6) та осцилографі (рис. 7), доводять адекватність запропонованої логіки комп'ютерно-інтегрованого керування світлодіодним доосвітленням зони вирощування теплиць.

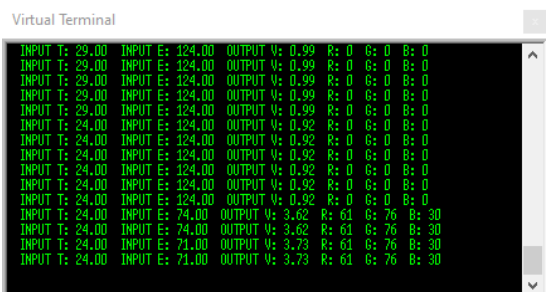


Рис. 6. Візуалізація результатів тестування імітаційної моделі з використанням послідовного порту

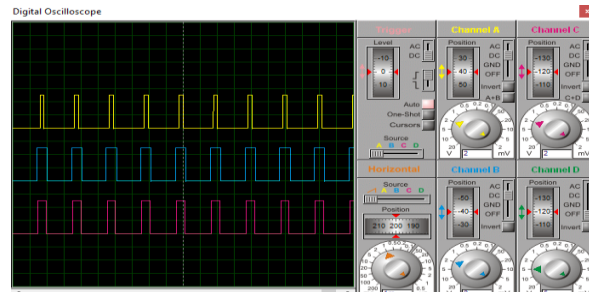


Рис. 7. Візуалізація результатів тестування моделі з використанням віртуального осцилографа

На підставі результатів імітаційного моделювання апаратно-програмного забезпечення комп'ютерно-інтегрованої технології керування штучним доосвітленням теплиць було реалізовано і експериментально досліджено відповідний макетний зразок системи. Апаратна частина створена з урахуванням мінімальних економічних витрат на обладнання за умови збереження функціональних і метрологічних показників на регламентованому технічному рівні, яка складається з наступних компонентів: мікроконтролерна платформа Arduino UNO, датчик температури BME 280, датчик освітленості BH1750 і цифровий потенціометр X9C104. Зовнішній вигляд реалізованого макетного зразка наведено на рис. 8.

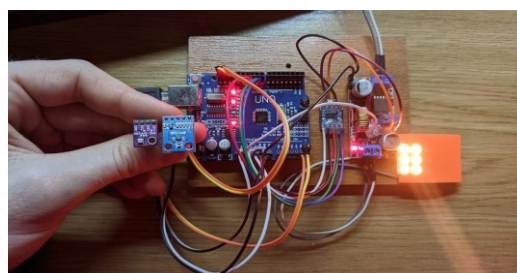


Рис. 8. Зовнішній вигляд реалізованого макетного зразка системи

Результати експериментальних випробувань, які доводять адекватність та доцільність використання запропонованих апаратно-програмних рішень із побудови комп'ютерно-інтегрованої технології керування штучним доосвітленням теплиць, наведено на рис. 9 і 10.

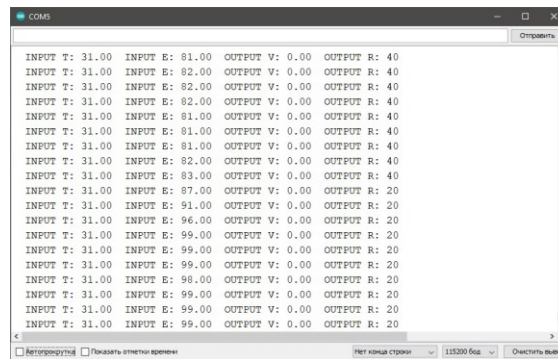


Рис. 9. Відображення функціональності макетного зразка системи через СОМ-порт

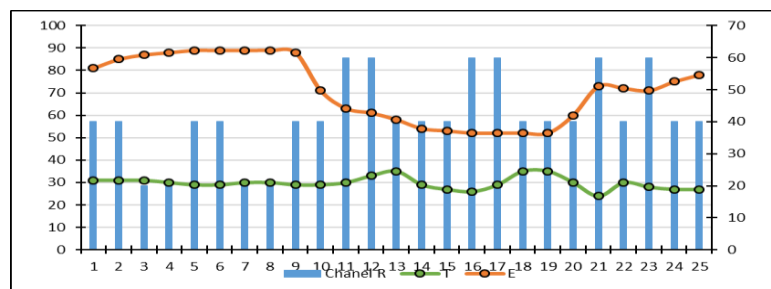


Рис. 10. Графічний вигляд результатів тестування системи (за віссю абсцис – відносні відліки у хвилинах, за віссю ординат – десятковий код, що відповідає рівню ШІМ-напруги)

Виходячи з проведеного аналізу результатів, які наведено на рис. 9 і 10, можна стверджувати про задовільну функціональність системи та адекватне відпрацювання нечітких алгоритмів керування інтенсивністю й спектральним складом світлодіодних світильників. Отримані результати дозволили обґрунтувати напрямки пріоритетних досліджень, які полягають у встановленні закономірностей взаємного впливу інформативних параметрів мікроклімату теплиць на якісні показники вирощування тепличних культур.

Висновки

У результаті проведених досліджень було обґрунтовано компонентну базу та розроблено структурну схему апаратно-програмних засобів технології керування доосвітленням, а також синтезовано й протестовано комп'ютерну модель, яка реалізується на мікропроцесорній техніці та алгоритмах теорії нечіткої логіки для керування інтенсивністю й спектральним складом світлодіодних світильників у теплицях. Реалізовано і експериментально досліджено макетний зразок системи керування штучним доосвітленням тепличних культур. Реалізовані апаратно-програмні засоби комп'ютерно-інтегрованої технології дозволяють у автоматичному режимі керувати параметрами світлодіодних світильників із обліком типів і періодів вегетації вирощуваних сільськогосподарських культур. Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці методу комп'ютерно-інтегрованого керування штучним доосвітленням тепличних культур, який, на відміну від відомих, враховує типи і періоди вегетації культур, що дозволяє оптимізувати технологічні процеси в теплицях. Практична цінність результатів полягає в реалізації апаратно-програмного забезпечення комп'ютерно-інтегрованої технології керування штучним доосвітленням тепличних культур із використанням серійних компонент та теорії нечіткої логіки.

Література

1. ВНТП АПК–19–07. Тепличні і оранжерейні підприємства. Споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування. – [Чин. від 2007-08-01]. – Київ : М-во аграр. політ. України, 2007. – 140 с.
2. НТП 10–95. Нормы технологического проектирования теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады: Ведомственные нормы технологического проектирования. – [Чин. від 1996-07-01]. – Москва : Минсельхозпрод РФ, 1996. – 87 с.
3. Тихомиров А.А. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы : учеб. пособие / А.А. Тихомиров, В.П. Шарупич, Г.М. Лисовский. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 2000. – 213 с.
4. Бахарев И. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц реальность и

перспективы / И. Бахарев, А. Прокофьев, А. Туркин, А. Яковлев // Современные технологии автоматизации. – 2010. – № 10. – С. 76–82.

5. Ministry of Agriculture and Forestry: Supports the growth, diversification and sustainability of Alberta's agriculture and forest industries [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.alberta.ca/agriculture-and-forestry.aspx> (дата звернення: 05.11.2021).

6. Laktionov I. Concept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses / I. Laktionov, O. Vovna, A. Zori // Bulg. Journal of Agric. Science. – 2017. – Vol. 23 (4). – P. 668–673.

7. Ahn Y.D. Power Controllable LED System with Increased Energy Efficiency Using Multi-Sensors for Plant Cultivation / Y.D. Ahn, S. Bae, S.-J. Kang // Energies. – 2017. – Vol. 10 (1607). – P. 1–13.

8. Vu Q.M. Automated Wireless Greenhouse Management System: Master of Engineering Thesis / Q.M. Vu. – Palmerston North: School of Engineering and Advanced Technology Massey University, 2011. – 173 p.

9. Shirsath D.O. IoT based smart greenhouse automation using Arduino / D.O. Shirsath, P. Kamble, R. Mane, A. Kolap, R.S. More // International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology. – 2017. – Vol. 5 (2). – P. 234–238.

10. Zade A.V. A smart green house automation system by wireless sensor networks / A.V. Zade, S. Harwani, P. Bawankule // International Journal of Research in Advent Technology. – 2017. – Vol. 5 (3). – P. 48–50.

11. Laktionov I. Results of experimental research on computerized intellectual monitoring means of effective greenhouse illumination / I. Laktionov, O. Vovna, I. Getman, A. Maryna, V. Lebediev // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2019. – Vol. 12 (1). – P. 1–19.

12. Vovna O. Method of adaptive control of effective energy lighting of greenhouses in the visible optical range / O. Vovna, I. Laktionov, S. Sukach, M. Kabanets, E. Cherevko // Bulg. Journal of Agric. Science. – 2018. – Vol. 24 (2). – P. 335–340.

13. Shamshiri R. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture / R. Shamshiri, F. Kalantari, K.C. Ting, K.R. Thorp, I.A. Hameed, C. Weltzien, D. Ahmad, Z.M. Shad // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2018. – Vol. 11 (1). – P. 1–22.

14. RENESAS. X9C104 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/x9c102-x9c103-x9c104-x9c503-datasheet> (дата звернення: 30.11.2021).

References

1. VNTP APK–19–07. Teplychni i oranzhereini pidpriemstva. Sporudy zakhyschenoho gruntu dlia fermerskykh (selianskykh) gospodarstv: Vidomchi normy tekhnolohichnoho proektuvannia. – [Chynnyi vid 2007-08-01]. – Kyiv : M-vo ahrar. polit. Ukrainy, 2007. – 140 s.

2. NTP 10–95. Normy tehnologicheskogo proektirovaniya teplic i teplichnyh kombinatov dlya vyrashivaniya ovoshej i rassady: Vedomstvennye normy tehnologicheskogo proektirovaniya. – [Chinnij vid 1996-07-01]. – Moskva : Minselhozprod RF, 1996. – 87 s.

3. Tihomirov A.A. Svetokultura rastenij: biofizicheskie i biotehnologicheskie osnovy : ucheb. posobie / A.A. Tihomirov, V.P. Sharupich, G.M. Lisovskij. – Novosibirsk : Izd-vo Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj Akademii nauk, 2000. – 213 s.

4. Baharev I. Primenenie svetodiodnyh svetilnikov dlya osvesheniya teplic realnost i perspektivy / I. Baharev, A. Prokofev, A. Turkin, A. Yakovlev // Sovremennye tehnologii avtomatizacii. – 2010. – № 10. – С. 76–82.

5. Ministry of Agriculture and Forestry: Supports the growth, diversification and sustainability of Albertas agriculture and forest industries [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.alberta.ca/agriculture-and-forestry.aspx> (data zvernennia: 05.11.2021).

6. Laktionov I. Copncept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses / I. Laktionov, O. Vovna, A. Zori // Bulg. Journal of Agric. Science. – 2017. – Vol. 23 (4). – R. 668–673.

7. Ahn Y.D. Power Controllable LED System with Increased Energy Efficiency Using Multi-Sensors for Plant Cultivation / Y.D. Ahn, S. Bae, S.-J. Kang // Energies. – 2017. – Vol. 10 (1607). – P. 1–13.

8. Vu Q.M. Automated Wireless Greenhouse Management System: Master of Engineering Thesis / Q.M. Vu. – Palmerston North: School of Engineering and Advanced Technology Massey University, 2011. – 173 p.

9. Shirsath D.O. IoT based smart greenhouse automation using Arduino / D.O. Shirsath, P. Kamble, R. Mane, A. Kolap, R.S. More // International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology. – 2017. – Vol. 5 (2). – P. 234–238.

10. Zade A.V. A smart green house automation system by wireless sensor networks / A.V. Zade, S. Harwani, P. Bawankule // International Journal of Research in Advent Technology. – 2017. – Vol. 5 (3). – P. 48–50.

11. Laktionov I. Results of experimental research on computerized intellectual monitoring means of effective greenhouse illumination / I. Laktionov, O. Vovna, I. Getman, A. Maryna, V. Lebediev // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2019. – Vol. 12 (1). – P. 1–19.

12. Vovna O. Method of adaptive control of effective energy lighting of greenhouses in the visible optical range / O. Vovna, I. Laktionov, S. Sukach, M. Kabanets, E. Cherevko // Bulg. Journal of Agric. Science. – 2018. – Vol. 24 (2). – P. 335–340.

13. Shamshiri R. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture / R. Shamshiri, F. Kalantari, K.C. Ting, K.R. Thorp, I.A. Hameed, C. Weltzien, D. Ahmad, Z.M. Shad // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2018. – Vol. 11 (1). – P. 1–22.

14. RENESAS. X9C104 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/x9c102-x9c103-x9c104-x9c503-datasheet> (data zvernennia: 30.11.2021).

Рецензія/Peer review : 22.11.2021

Надрукована/Printed : 30.12.2021