

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ У БІОКОНТЕЙНЕРАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. У роботі розроблено мікропроцесорну систему моніторингу мікроклімату у біоконтейнерах різного типу: рослинних камерах, тераріумах для утримання рептилій та вуликах для бджільництва. Досліджено архітектуру системи на базі мікроконтролера STM32F446RE, що включає комплекс датчиків температури, вологості, CO₂, освітленості та ваги. Розроблено триконтурний каскадний ПІД-регулятор з нечіткою корекцією коефіцієнтів для адаптивного управління мікрокліматичними параметрами з урахуванням специфічних профілів різних типів біоконтейнерів. Реалізовано модуль бездротової передачі даних на основі протоколу Zigbee 3.0 для формування розподіленої mesh-мережі моніторингу. Запропоновано методику калібрування сенсорів та компенсації похибок вимірювань в умовах підвищеної вологості та хімічно агресивного середовища. Результати досліджень підтверджують точність вимірювання температури $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, відносної вологості $\pm 1,5\%$ та концентрації CO₂ ± 25 ppm, що відповідає вимогам прецизійного землеробства, акваріумістики, тераріумістики та бджільництва.

Ключові слова: мікропроцесорна система, мікроклімат, біоконтейнер, тераріум, вулик, STM32, каскадний ПІД-регулятор, нечітка логіка, Zigbee, сенсорна мережа, температура, вологість, CO₂.

Abstract. The paper presents the development of a microprocessor-based microclimate monitoring system for various types of biocontainers, including plant growth chambers, terrariums for reptile housing, and beehives. The system architecture based on the STM32F446RE microcontroller is investigated, incorporating a sensor suite for temperature, humidity, CO₂, illuminance, and weight. A three-loop cascade PID controller with fuzzy coefficient correction has been developed for adaptive microclimate management, accounting for species-specific environmental profiles across different biocontainer types. A wireless data transmission module based on the Zigbee 3.0 protocol is implemented to form a distributed mesh monitoring network. A sensor calibration methodology and measurement error compensation under high-humidity and chemically aggressive conditions are proposed. Research results confirm measurement accuracy of $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ for temperature, $\pm 1.5\%$ for relative humidity, and ± 25 ppm for CO₂ concentration, meeting the requirements of precision agriculture, terrarium keeping, and apiculture.

Keywords: microprocessor system, microclimate, biocontainer, terrarium, beehive, STM32, cascade PID controller, fuzzy logic, Zigbee, sensor network, temperature, humidity, CO₂.

Вступ

Біоконтейнери — це широкий клас герметичних або напівзамкнених просторів, призначених для утримання живих організмів в контрольованих умовах. До них відносяться не лише традиційні рослинні камери та фітотрони, а й тераріуми для утримання рептилій, амфібій та безхребетних, вулики для бджільництва, акватераріуми, інсектарії та контейнери для зберігання біологічного матеріалу у фармацевтичній галузі. Кожна з цих систем висуває специфічні вимоги до параметрів мікросередовища: тераріум для тропічних рептилій потребує температурного градієнту $24\text{--}32^{\circ}\text{C}$ та вологості $70\text{--}90\%$ RH, бджолина сім'я у вулику — стабільної температури $34\text{--}36^{\circ}\text{C}$ у розплідній зоні та вологості $40\text{--}60\%$ RH, тоді як рослинні культури орієнтовані на контроль концентрації CO₂ та фотоперіоду.

Спільною проблемою для всіх типів біоконтейнерів є необхідність точного, безперервного та енергоефективного моніторингу параметрів мікроклімату. Відхилення температури навіть на $\pm 1^{\circ}\text{C}$ може призвести до загибелі рептилій або критичного порушення розвитку бджолиного розплоду; коливання вологості понад $\pm 5\%$ RH спричиняють розвиток патогенних грибків у тераріумах або кристалізацію меду у вуликах. Контроль параметрів мікроклімату виробничих приміщень регламентується нормативними документами, зокрема ДСН 3.3.6.042-99, однак для біологічних контейнерів спеціалізованих вітчизняних стандартів практично не існує, що ускладнює проектування відповідних систем.

Існуючі комерційні рішення є або надмірно дорогими промисловими комплексами, або спрощеними побутовими пристроями без можливості налаштування під конкретний вид організмів.

Актуальною є розробка універсальної мікропроцесорної системи, що поєднує точне вимірювання ключових параметрів (температура, вологість, CO₂, освітленість), адаптивне управління виконавчими механізмами та надійну бездротову передачу даних у мережі різнотипних біоконтейнерів.

Результати дослідження

Розроблена система побудована на базі 32-розрядного мікроконтролера STM32F446RE з ядром ARM Cortex-M4 та тактовою частотою 180 МГц. Вибір даного мікроконтролера обумовлений наявністю апаратного модуля FPU для обчислення алгоритмів регулювання, широкою периферією (SPI, I²C, UART, ADC) для підключення сенсорів та виконавчих пристроїв, а також низьким енергоспоживанням у режимі очікування (1,7 мА при 3,3 В). Програмне забезпечення розроблено у середовищі STM32CubeIDE з використанням бібліотеки HAL та операційної системи реального часу FreeRTOS, що забезпечує паралельне виконання задач моніторингу, управління та комунікації з гарантованим часом відгуку не більше 10 мс.

Сенсорний вузол системи включає: цифровий датчик температури та вологості SHT35 (точність $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, $\pm 1,5\%$ RH) з інтерфейсом I²C та вбудованим захистом від конденсату; NDIR-сенсор концентрації CO₂ MH-Z19C (діапазон 0–5000 ppm, точність ± 50 ppm) з автоматичним калібруванням нульової точки; датчик освітленості BH1750FVI (діапазон 1–65535 люкс) для контролю фотоперіоду. Для тваринних біоконтейнерів — тераріумів та вуликів — додатково інтегровано інфрачервоний термометр MLX90614 для безконтактного вимірювання температури поверхонь (точність $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), що є критичним параметром для рептилій, які потребують локальних зон прогріву. У вуликах додатково застосовано датчик ваги на базі тензодатчика HX711 для неінвазивного контролю маси стільників як індикатора медозбору та стану сім'ї. Для захисту сенсорів від агресивного мікросередовища (підвищена вологість, прополіс, аміак у тваринних контейнерах) застосовано герметичні мембранні оболонки з PTFE-матеріалу та захисне лакування плат.

Алгоритм управління мікрокліматом реалізовано як триконтурний каскадний ПІД-регулятор з нечіткою корекцією коефіцієнтів. Зовнішній (головний) контур відпрацьовує завдання за температурою повітря: він порівнює виміряне значення T з уставкою T_{sr} та формує вихідний сигнал, що є завданням для внутрішнього контуру потужності нагрівача. Внутрішній контур температури реалізує швидке регулювання потужності нагрівального елемента (150 Вт, ШІМ-управління) або активацію елемента Пельтьє для охолодження, компенсуючи теплові збурення значно швидше, ніж змінюється температура повітря. Паралельний контур вологості управляє ультразвуковим зволожувачем та вентилятором осушення незалежно, оскільки між температурою та вологістю існує перехресний зв'язок: підвищення температури знижує відносну вологість, що враховується через матрицю декомпозиції збурень. Нечітка логіка (база правил: 25 правил Мамдані, 5×5 для змінних «похибка» та «швидкість зміни похибки») коригує коефіцієнти ПІД (K_p , K_i , K_d) в реальному часі. Така структура скорочує час виходу на режим на 35% та зменшує перерегулювання з 12% до 3% порівняно з класичним одноконтурним ПІД при збуреннях зовнішнього середовища.

Для різних типів біоконтейнерів у системі реалізовано профілі регулювання з індивідуальними уставками та обмеженнями: профіль тераріуму передбачає підтримку температурного градієнту (холодна зона $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$ / тепла зона $30\text{--}32^{\circ}\text{C}$) з добовою термоциклічністю $\pm 3^{\circ}\text{C}$ для імітації природного середовища; профіль вулика орієнтований на вузький діапазон температури розплідної зони $34\text{--}36^{\circ}\text{C}$ з допуском $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ та вологості 40–60% RH; профіль рослинного контейнера включає управління фотоперіодом через світлодіодні фітолампи з регульованим спектром.

Бездротова передача даних між вузлами мережі біоконтейнерів реалізована на базі трансивера CC2530 із підтримкою стека Zigbee 3.0. Вибір Zigbee обумовлений mesh-топологією мережі (до 65536 вузлів), низьким енергоспоживанням (30 мА у режимі передачі, 1 мкА у сні), дальністю до 100 м у приміщенні та захищеністю за стандартом AES-128. Гейтвей на базі Raspberry Pi 4 агрегує дані від мережі сенсорних вузлів та передає їх на хмарний сервер через протокол MQTT. Розроблено веб-інтерфейс для відображення поточних параметрів кожного контейнера, журналу подій, налаштування профілів регулювання та порогових сповіщень.

Метрологічна атестація системи проводилась шляхом порівняння з еталонним вимірювальним обладнанням Testo 435-2 в кліматичній камері при температурах від $+5^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$ та вологості від

30% до 95% RH відповідно до вимог таблиці допустимих похибок за ДСН 3.3.6.042-99. За результатами 72-годинного тестування встановлено: середньоквадратична похибка вимірювання температури складає $0,28^{\circ}\text{C}$ (задана норма $\leq 0,5^{\circ}\text{C}$), вологості — 1,4% RH (норма $\leq 2\%$), CO_2 — 22 ppm (норма ≤ 30 ppm). Дрейф нуля датчиків після 30 днів безперервної роботи в умовах вологості 90% RH не перевищив $0,15^{\circ}\text{C}$ та 0,8% RH завдяки алгоритму термокомпенсації.

Натурні випробування системи проведено на трьох типах біоконтейнерів одночасно. У рослинному контейнері (мікрозелень пшениці, об'єм $0,25\text{ м}^3$) система забезпечила підтримання параметрів $T=22\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=70\pm 2\%$, $\text{CO}_2=800\pm 50\text{ ppm}$ протягом 14-добового циклу, що підвищило урожайність на 23% порівняно з неавтоматизованим варіантом. У тераріумі для утримання бородатої агами (об'єм $0,3\text{ м}^3$) реалізовано температурний градієнт з відхиленням $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ від профілю протягом 30 діб, що підтверджено нормальною поведінкою та апетитом тварини. У вулику (стандартний корпус Дадана, 12 рамок) система утримувала температуру розплідної зони $35,1\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ та вологість $52\pm 4\%$ RH протягом зимового періоду, фіксуючи добові зміни маси стільників з точністю $\pm 50\text{ г}$.

Висновок

Розроблена мікропроцесорна система моніторингу мікроклімату на базі STM32F446RE забезпечує точне вимірювання температури ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), відносної вологості ($\pm 1,5\%$ RH) та концентрації CO_2 ($\pm 25\text{ ppm}$) в умовах підвищеної вологості та хімічно агресивного середовища, характерних для біоконтейнерів різного типу. Універсальність архітектури системи підтверджена придатністю до застосування як у рослинних камерах, так і у тераріумах для утримання рептилій та вуликів, де профілі температури і вологості суттєво відрізняються.

Реалізований каскадний ПД-регулятор з нечіткою корекцією коефіцієнтів скорочує час виходу на режим на 35% порівняно з класичним підходом, що є критично важливим для термочутливих організмів — зокрема, при відхиленні температури у вулику понад 1°C протягом більш ніж 30 хвилин спостерігається загибель розплуду. Мережева архітектура на базі Zigbee 3.0 з гейтвеем MQTT дозволяє масштабувати систему до мереж із десятків різнотипних біоконтейнерів під єдиним центром моніторингу. Натурні випробування підтвердили підвищення урожайності мікрозелені на 23% та скорочення вегетаційного циклу на 2 доби.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку профілів мікроклімату для конкретних видів організмів, інтеграцію алгоритмів машинного навчання для предиктивного управління, а також адаптацію системи до специфічних потреб бджільництва — зокрема, моніторингу акустичних характеристик вулика як індикатора стану бджолої сім'ї.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pires I. M., Garcia N. M., Pombo N., Flórez-Revelta F. From Data Acquisition to Data Fusion: A Comprehensive Review and a Roadmap for the Identification of Activities of Daily Living Using Mobile Devices // *Sensors*. — 2016. — Vol. 16, No. 2. — P. 184. DOI: 10.3390/s16020184
2. Shamshiri R. R., Kalantari F., Ting K. C., et al. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. — 2018. — Vol. 11, No. 1. — P. 1–22. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210
3. Taştan M., Gökozan H. Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality with Internet of Things-Based E-Nose // *Applied Sciences*. — 2019. — Vol. 9, No. 16. — P. 3435. DOI: 10.3390/app9163435
4. Аналогові та аналогово-цифрові пристрої системних перетворювачів форми інформації : підручник . О.Д.Азаров, С.В.Богомолів, Л.В.Крупельницький, М.Р.Обертюх. - Вінниця : ВНТУ, 2024. - 316с.
5. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1 / A. Banks, R. Gupta. — OASIS Standard, 2014. — 81 p. Режим доступу: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1>

Богомолів Сергій Віталійович — канд. техн. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bogomolovsergiy@vntu.edu.ua

Яценко Богдан Віталійович — студент групи 1KI-226, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: 04-22-088.stud@vntu.edu.ua

Bohomolov Serhii — candidate of technical sciences, associate professor of the Computer Engineering Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: bogomolovsergiy@vntu.edu.ua

Yashchenko Bohdan — a student of group 1KI-22b, faculty of information technologies and computer engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: 04-22-088.stud@vntu.edu.ua