

М. А. Коваль<sup>1</sup>  
О. М. Цибровський<sup>1</sup>  
О. Ю. Мирончук<sup>1</sup>

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМ ПОВІТРЯНИМ КОЛЕКТОРОМ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

У статті представлено розробку інтелектуальної IoT-системи керування повітряним сонячним колектором, призначеної для підвищення енергоефективності опалення та вентиляції приміщень і забезпечення безпечних параметрів мікроклімату. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вартості енергоресурсів, необхідністю скорочення викидів парникових газів та наявністю значного сонячного потенціалу України (середньорічний показник GHI близько 1200 кВт·год/м<sup>2</sup>), що створює сприятливі умови для впровадження повітряних сонячних колекторів. Проаналізовано сучасні комерційні рішення та встановлено, що більшість з них мають обмежені можливості автоматизації й не забезпечують повноцінного дистанційного моніторингу та захисту від ризику конденсації. Запропоновано архітектуру системи на основі мікроконтролера з підключенням датчиків температури, відносної вологості та концентрації CO<sub>2</sub>, а також GSM/NB-IoT-модема для передавання даних у хмарне середовище з використанням захищених протоколів (TLS, AES). Особливу увагу приділено алгоритму запобігання утворенню конденсату шляхом розрахунку температури точки роси за формулою Магнуса–Тетенса та впровадженню логіки прийняття рішень на основі порівняння температурних і волюгічних параметрів. Система функціонує в трьох режимах: «опалення та осушення», «термінова вентиляція» та «захист/простій», що дозволяє адаптивно реагувати на зміну умов у приміщенні та зовнішньому середовищі. Передбачено мобільний застосунок для моніторингу показників у реальному часі та віддаленого керування. Реалізовано механізми автентифікації пристрою, шифрування даних і автономної роботи у разі втрати зв'язку. Живлення системи здійснюється від джерела постійної напруги 12 В з резервуванням акумулятором і BMS, що забезпечує безперервність функціонування. Отримані результати підтверджують доцільність застосування розробленої системи для модернізації наявних повітряних сонячних колекторів та впровадження в житлових і малих комерційних об'єктах з метою підвищення енергоефективності та підвищення якості внутрішнього повітря.

**Ключові слова:** повітряний сонячний колектор, IoT-система керування, енергоефективність, мікроконтролер, дистанційне керування, хмарні технології, мікроклімат приміщення.

### Вступ

Зростання вартості енергоресурсів і потреба у зменшенні викидів парникових газів стимулюють активне впровадження відновлюваних джерел енергії в системи теплопостачання та вентиляції будівель. Одним з перспективних рішень є повітряні сонячні колектори, які дають змогу перетворювати сонячну енергію на теплову без використання складних теплоносіїв і додаткових контурів. Вони вирізняються конструктивною простотою, відносно низькою вартістю та можливістю інтеграції в наявні системи вентиляції [1], [2].

Водночас ефективність роботи повітряного сонячного колектора значною мірою залежить від якості керування його режимами. Неконтрольована подача нагрітого повітря може призводити до перегріву приміщень, надмірних тепловтрат або утворення конденсату на холодних поверхнях. Тому актуальним завданням є створення інтелектуальної системи керування, здатної адаптуватися до змін зовнішніх умов, параметрів внутрішнього мікроклімату та потреб користувача.

Розроблено систему керування повітряним сонячним колектором на основі мікроконтролера із застосуванням датчиків температури, вологості та концентрації CO<sub>2</sub>. Запропонований підхід передбачає збір і обробку телеметричних даних, розрахунок ключових параметрів (зокрема точки

роси), а також автоматичне регулювання виконавчих механізмів. Особливу увагу приділено забезпеченню безпечної експлуатації та можливості дистанційного моніторингу й керування системою.

*Метою статті є розробка та обґрунтування структури системи керування повітряним сонячним колектором, що забезпечує підвищення енергоефективності його роботи, стабілізацію параметрів мікроклімату в приміщенні та запобігання утворенню конденсату.*

### Сонячний потенціал України

Реалізація систем, які використовують у своїй роботі сонячну енергію, починається з аналізу сонячного потенціалу регіону, де планується використання системи. В табл. 1 подано показники глобального горизонтального радіаційного випромінювання (Global Horizontal Irradiance – GHI) в регіонах України з урахуванням розподілу території на геліоенергетичні зони [3].

Таблиця 1

Показники сонячного потенціалу в регіонах України

Геліоенергетична зона	Регіони / Міста	Середньорічний GHI (кВт·год/м <sup>2</sup> )
Зона I (Максимальна)	Одеська, Миколаївська, Херсонська обл., АР Крим	1350...1400
Зона II (Висока)	Запорізька, Дніпропетровська, Кіровоградська обл.	1200...1280
Зона III (Середня)	Київська, Черкаська, Вінницька, Полтавська обл.	1100...1180
Зона IV (Помірна)	Західні (Львів, Тернопіль) та Північні (Чернігів, Суми) області	1050...1100

В табл. 2 подано порівняння показників середньорічного значення GHI України з країнами Європи, які активно використовують та розвивають сонячну енергетику.

Таблиця 2

Порівняння сонячного потенціалу України з країнами Європи

Країна	Середньорічний GHI (кВт·год/м <sup>2</sup> )	Примітки
Україна	~1200	значний потенціал, особливо у південних та центральних областях
Німеччина	~1050...1100	показники варіюються від 950 на півночі до 1200 на півдні (Баварія)
Польща	~1080	схожі умови із Західною Україною, але нижчі за Південну Україну

Подані дані показують, що Україна має високий сонячний потенціал, який відкриває великі можливості для впровадження та розвитку сонячних повітряних колекторів. Ця технологія може позитивно вплинути як на державний економічний та енергетичний сектор, так і на особисту енергонезалежність, економію та здоров'я кожної людини, оскільки сонячний повітряний колектор може дозволити знизити кількість ресурсів, що витрачаються для забезпечення опалення, а також забезпечити постійну вентиляцію та приплив свіжого повітря.

Аналізуючи сучасні рішення на ринку повітряних сонячних колекторів, можна констатувати — хоча на ринку наявні пристрої з локальною автоматикою (наприклад, SolarVenti) чи простіші системи з термостатами (Torray Solar, Nakoair), віддалене керування, моніторинг у реальному часі, збір телеметрії (температура, CO<sub>2</sub>, витрата повітря) та інтеграція з мобільним додатком/хмарою — практично не реалізовані «з коробки». Більше того, базове керування сонячного повітряного колектору є недостатнім і може створювати ризик конденсації, що нівелює переваги осушення. Інтелектуальне керування є обов'язковим для забезпечення здоров'я людини та цілісності будівлі.

Саме в цьому просторі відкривається комерційна та технічна можливість: створення рішення «smart retrofit / upgrade» для наявних колекторів, яке б дозволяло додати модуль віддаленого управління (GSM/NB-IoT), датчики температури та CO<sub>2</sub>, моторизований клапан із локальною і хмарною логікою, зберігаючи при цьому енергетичну автономність (PV-панель + акумулятор), забезпечуючи захищену передачу даних (MQTT/TLS) і надійну автоматичну логіку (гітерезис, таймаути, fallback у разі втрати зв'язку).

### Архітектура IoT системи керування сонячним повітряним колектором

На рис. 1. показано структурну схему запропонованої IoT системи керування сонячним повітряним колектором.

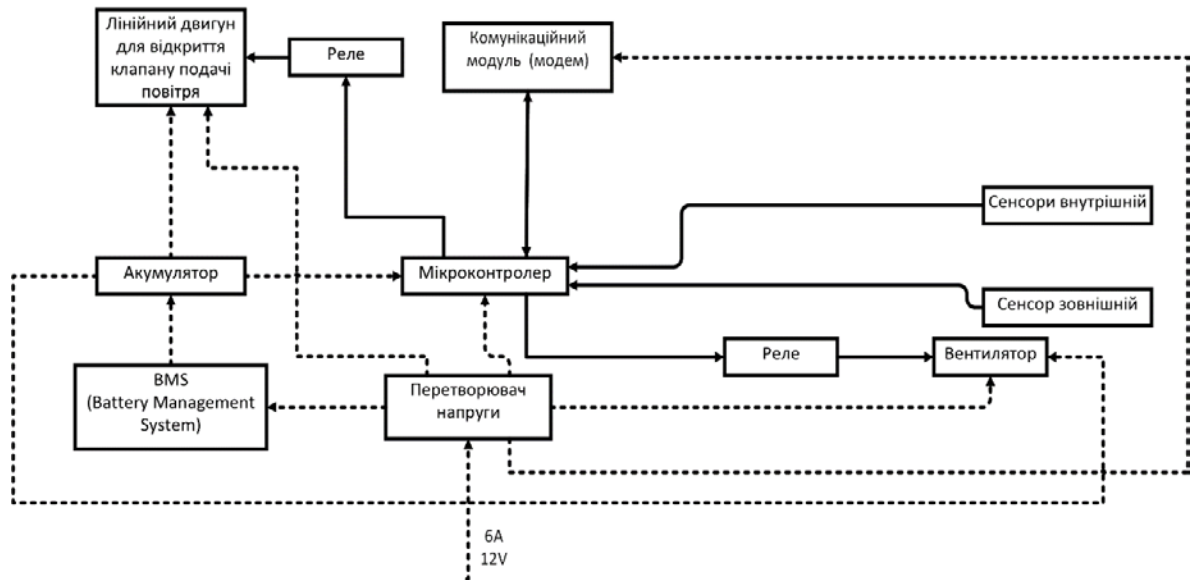


Рис. 1. Структурна схема IoT системи керування сонячним повітряним колектором

Основою системи є мікроконтролер, який відповідає за збір і обробку телеметричних даних, керування периферійними модулями та виконання розрахунків, необхідних для ефективної роботи сонячного повітряного колектора. Однією з ключових його функцій є взаємодія з модемом, а також шифрування і дешифрування інформації для забезпечення надійного зв'язку між системою керування та користувачем. Структура системи передбачає використання датчиків температури, вологості та концентрації CO<sub>2</sub> для збору параметрів, необхідних для реалізації алгоритму керування.

Одним з ризиків застосування системи сонячного опалення та вентиляції є утворення конденсату на холодних поверхнях (стінах, вікнах) під час використання повітряного опалення, що може спричинити появу та розвиток плісняви. Відповідно до рекомендацій Всесвітньої організації охорони здоров'я та стандарту ASHRAE 160 [4], тривале значення відносної вологості на поверхнях у межах 65...80 % і вище є критичним та створює сприятливі умови для росту грибків.

Ключовим чинником запобігання утворенню плісняви є контроль температури точки роси. Температура точки роси — це значення, до якого необхідно охолодити повітря, щоб водяна пара в ньому досягла стану насичення та почала конденсуватися. Нагріте повітря, що надходить з колектора, може містити значну абсолютну вологість. Якщо воно потрапляє в приміщення та охолоджується поблизу холодної стіни до температури, нижчої за точку роси, відбувається випадання конденсату.

Температура точки роси розраховується за формулою Магнуса–Тетенса [5]

$$T_{dew} = \frac{b \cdot f(T, Rh)}{a - f(T, Rh)}; \quad (1)$$

$$f(T, Rh) = \frac{aT}{b + T} + \ln\left(\frac{Rh}{100}\right), \quad (2)$$

де  $a = 17,27$ ,  $b = 237,7$  — емпіричні коефіцієнти,  $T$  — виміряна температура,  $Rh$  — відносна вологість повітря.

На підставі отриманих від сенсорів даних, обчисленої температури точки роси та команд, що надходять через модем, мікроконтролер здійснює керування лінійним двигуном постійного струму і вентилятором. Живлення системи забезпечується джерелом постійної напруги 12 В. Для автономної роботи в умовах недостатнього освітлення або в нічний час передбачено акумулятор і систему керування батареєю (BMS).

Система передбачає роботу в трьох режимах: опалення та осушення, термінова вентиляція, захист/простій. Режим опалення та осушення активується, якщо  $T_{\text{колектора}} > T_{\text{кімнати}} + \Delta T_{\text{min}}$  та безпечно переверіено  $T_{\text{колектора}} \geq T_{dew} + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Режим термінова вентиляція активується, якщо  $\text{CO}_2 > 1000$

ррт або RH > 65 %, незалежно від потреби в опаленні. Режим захист/простій активується коли необхідно запобігти втратам тепла (наприклад, у нічний час).

Система передбачає мобільний додаток, за допомогою якого користувач може аналізувати стан системи та здійснювати керування нею. Контролер має періодично активізуватися, опитувати датчики температури, вологості та CO<sub>2</sub>, аналізувати отримані дані й залежно від різниці температур вирішувати, чи потрібно відкрити клапан подачі повітря та увімкнути вентилятор в режимі «опалення та осушення», або в режимі «термінова вентиляція», або ж закрити їх і перейти в режим «захист/простій». Коли настає час передачі даних, контролер формує пакет з показниками, шифрує його за допомогою AES або надсилає через захищене TLS-з'єднання, після чого активує GSM-модем, який через APN мобільного оператора встановлює захищений канал зв'язку з хмарним сервером. Хмара отримує дані, перевіряє автентичність пристрою й зберігає та оновлює інформацію для відображення в додатку. Забезпечення вищезазначених функцій потребує реалізації багатозадачності на контролері [6], [7]. Алгоритм передачі даних до користувача з використанням мобільних даних показано на рис. 2.

Якщо користувач у застосунку надсилає команду (наприклад, «відкрити заслінку» чи «увімкнути вентилятор»), хмара шифрує її, підписує токеном (ключом) доступу та передає назад до модема, який доставляє команду контролеру. Контролер перевіряє ключ, виконує дію й надсилає зашифроване підтвердження назад у хмару, після чого переходить у енергозберіжливий режим до наступного циклу вимірювань. Алгоритм передачі команд від користувача до системи з використанням мобільних даних показано на рис. 3.

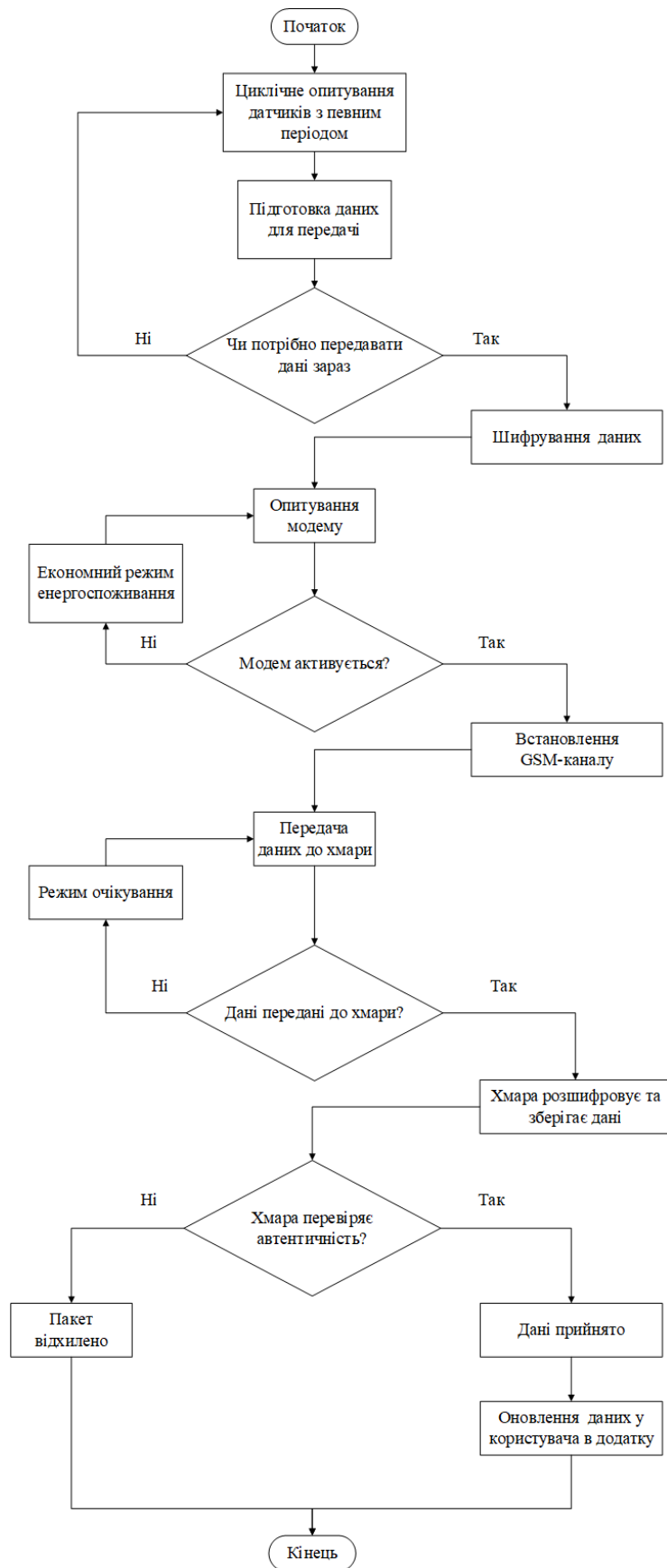


Рис. 2. Алгоритм передачі даних системи до користувача з використанням мобільних даних

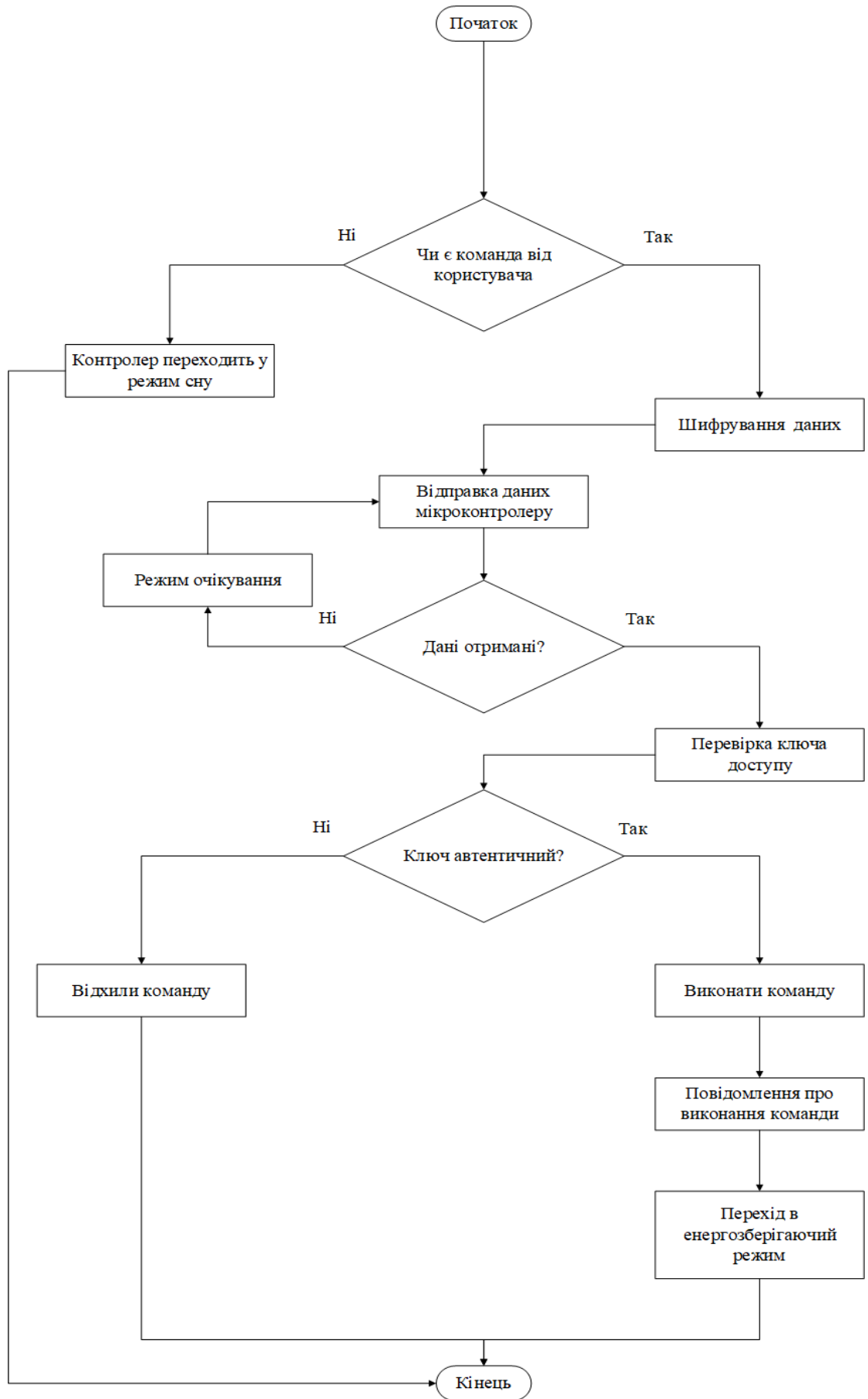


Рис. 3. Алгоритм передачі команд від користувача до системи з використанням мобільних даних

## Висновки

В роботі запропоновано структуру та алгоритмічне забезпечення системи керування повітряним сонячним колектором, орієнтованої на підвищення енергоефективності та забезпечення стабільних параметрів мікроклімату в приміщенні. Запропонована система базується на використанні мікроконтролера, який здійснює збір і обробку телеметричних даних, розрахунок температури точки роси та формування керувальних впливів на виконавчі механізми.

Реалізований підхід забезпечує адаптивне регулювання роботи вентилятора та приводу повітряних заслінок з урахуванням температури, відносної вологості та концентрації CO<sub>2</sub>, що дозволяє зменшити тепловтрати та підвищити ефективність використання сонячної енергії. Контроль температури точки роси дає змогу мінімізувати ризик утворення конденсату на холодних поверхнях і відповідно запобігти розвитку плісняви.

Передбачена можливість дистанційного моніторингу та керування розширює функціональні можливості системи й підвищує зручність її експлуатації. Використання автономного живлення з акумуляторною підтримкою забезпечує безперервність роботи в умовах недостатнього освітлення або в нічний час.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування запропонованої системи керування в побутових та малих комерційних об'єктах. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів прогнозування режимів роботи з урахуванням погодних умов та інтеграцію системи в комплексні рішення «розумного» будинку з можливістю застосування технологій штучного інтелекту [8]—[10].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. K. Prasad, and M. K. Singh, "Design and analysis of different types of solar collector for solar air dryer: A review," *2022 1st IEEE International Conference on Industrial Electronics: Developments & Applications (ICIDEA)*, Bhubaneswar, India, 2022, pp. 169-174, <https://doi.org/10.1109/ICIDEA53933.2022.9970183>.
- [2] A. E. Rafaat, A. A. M. Hassan, D. A. Kotin, A. A. Z. Diab, and E. A. A., "Novel Models on Packed Bed Solar Air Collectors," *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 853-857, <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755772>.
- [3] *Global Solar Atlas* / World Bank Group. [Electronic resource]. Available: <https://globalsolaratlas.info/>.
- [4] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *ANSI/ASHRAE Standard 160-2021—Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*. [Electronic resource]. Available: <https://basf.pnnl.gov/library/criteria-moisture-control-design-analysis-buildings-ansiashrae-160-2021>.
- [5] A.W.T. Barenburg, *Psychrometry and Psychrometric Charts*, 3rd Edition, Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974.
- [6] M. Lubbers, P. Koopman, and R. Plasmeijer, "Multitasking on Microcontrollers using Task Oriented Programming," *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, Croatia, 2019, pp. 1587-1592, <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8756711>.
- [7] A. В. Бруско, і О. Ю. Мирончук, «Особливості реалізації багатозадачності на платформах Raspberry Pi та Arduino,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 80-85, 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-164-5-80-85>.
- [8] G. Singh, R. Das, and A. Singh, "Application of Artificial Neural Network in Renewable Energy-Based Building Cooling Systems," *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, India, 2024, pp. 666-671, <https://doi.org/10.1109/ICPEICES62430.2024.10719162>.
- [9] O. Myronchuk, O. Shpylka, D. Strukov, and A. Petrovskiy, "Neural Network for Channel Frequency Response Estimation in OFDM Communication Systems," *2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 54-58, <https://doi.org/10.1109/PICST57299.2022.10238631>.
- [10] R. Du, S. Magnusson, and C. Fischione, "The Internet of Things as a Deep Neural Network," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 9, pp. 20-25, September 2020, <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000015>.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Дата надходження 16.03.2026

Дата прийняття до друку після рецензування 16.04.2026

Дата публікації 7.07.2026

Ця робота ліцензується відповідно до

[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**Коваль Максим Андрійович** — студент магістратури кафедри радіотехнічних систем, e-mail: makskova534@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0006-1872-7066>;

**Цибровський Олександр Михайлович** — аспірант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: a.tsybrovskiy@gmail.com ; <https://orcid.org/0009-0003-6918-9956>;

**Мирончук Олександр Юрійович** — д-р філософії, доцент кафедри радіотехнічних систем, e-mail: myronchukalex@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0001-5251-3578>.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**M. A. Koval<sup>1</sup>**  
**O. M. Tsybrovskyi<sup>1</sup>**  
**O. Yu. Myronchuk<sup>1</sup>**

## **Solar Air Collector Control System**

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*The article presents the development of the intelligent IoT-system for controlling an air solar collector, designed to increase the energy efficiency of heating and ventilation of premises and ensure safe microclimate parameters. The relevance of the study is due to the increase in the cost of energy resources, the need to reduce greenhouse gas emissions and the presence of significant solar potential in Ukraine (average annual GHI indicator of about 1200 kWh/m<sup>2</sup>), which creates favorable conditions for the implementation of air solar collectors. Modern commercial solutions were analyzed and it was found that most of them have limited automation capabilities and do not provide full remote monitoring and protection against the risk of condensation. The architecture of the system is proposed based on a microcontroller with connection of temperature, relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration sensors, as well as a GSM/NB-IoT modem for data transmission to the cloud environment using secure protocols (TLS, AES). Special attention is paid to the algorithm for preventing condensation formation by calculating the dew point temperature according to the Magnus–Tetens formula and implementing decision-making logic based on comparing temperature and humidity parameters. The system operates in three modes: “heating and dehumidification”, “urgent ventilation” and “protection/idleness”, which provides adaptive response to changing conditions in the room and the external environment. A mobile application is provided for real-time monitoring of indicators and remote control. Mechanisms for device authentication, data encryption and autonomous operation in case of loss of communication are implemented. The system is powered by a 12 V DC voltage source with battery backup and BMS, which ensures continuity of operation. The results obtained confirm the feasibility of using the developed system for upgrading the existing air-based solar collectors and implementing it in residential and small commercial facilities to increase energy efficiency and improve indoor air quality.*

**Keywords:** air solar collector, IoT control system, energy efficiency, microcontroller, remote control, cloud technologies, indoor microclimate.

**Koval Maksym A.** — Master’s student of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: makskova534@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0006-1872-7066>;

**Tsybrovskyi Oleksandr M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: a.tsybrovskyi@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0003-6918-9956>;

**Myronchuk Oleksandr Yu.** — PhD, Associate Professor of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: myronchukalex@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0001-5251-3578>