

І. А. Поліщук; П. В. Гікало; М. Г. Шевченко

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МІКРОКЛІМАТУ У ПРИМІЩЕННЯХ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ІНЖЕНЕРНИМИ СИСТЕМАМИ БУДІВЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

У статті описані недоліки алгоритмів керування наявних систем автоматизації інженерних систем будівель, які приводять до надмірного енергоспоживання. Розглянуто проблеми підтримки оптимального мікроклімату у приміщеннях, вказано фактори, які суттєво впливають на його забезпечення.

Виконано аналіз сучасних підходів до забезпечення температурного комфорту у приміщеннях та підвищення енергоефективності будівель за допомогою інноваційних технологій і методів. Висвітлено використання цифрових двійників та алгоритмів машинного навчання для моделювання мікроклімату та оптимізації роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування. Підкреслено роль сучасних інформаційних технологій, які дозволяють застосовувати адаптивні підходи до керування інженерними системами будівель.

Запропоновано використання додаткових датчиків сонячного випромінювання, швидкості руху повітря для оцінки рівня комфорту в приміщенні, а також надані рекомендації щодо вибору і обчислення коефіцієнтів ізоляційних властивостей одягу та метаболічної активності людей у приміщенні.

У статті запропонована архітектура системи для побудови цифрового двійника мікроклімату у приміщенні, що передбачає розділення процесів збору, накопичення та обробки даних між різними сервісами, які запускаються у Docker контейнерах в середині Kubernetes кластера. Запропонована архітектура забезпечує гнучкість розгортання цифрового двійника, з можливістю його використання як на локальних серверах так і у хмарному середовищі. Розглянуто процес збору та інтеграції даних завдяки розширених бібліотек Node-Red. Цифровий двійник передбачає застосування моделі NeuralProphet, яка адаптована для використання в системах з періодичною зміною станів та умов. Навчена модель дозволяє прогнозувати зміни індексу Predicted Mean Vote, що використовується для оцінки рівня комфорту у приміщенні. Дані прогнозів використовуються для корекції керуючих сигналів контролерів температури повітря, теплої підлоги та вентиляції, при цьому забезпечуючи найбільш енергоефективне підтримання мікроклімату у приміщеннях.

Ключові слова: цифровий двійник, автоматизація інженерних систем будівель, мікроклімат, енергоефективне керування.

Вступ

Сучасний рівень автоматизації інженерних систем будівель дозволяє забезпечувати їх надійну роботу, підтримувати регульовані параметри на заданому рівні, а також своєчасно реагувати на позаштатні ситуації в автоматичному режимі. Основною задачею таких систем є забезпечення комфорту людей, які знаходяться у приміщенні. Хоча всі інженерні системи будівель вже добре вивчені і алгоритми керування ними також загальновідомі, все ж існує ряд недоліків, які перш за все впливають на надмірне енергоспоживання. При чому для інженерних систем, таких як водопостачання чи електроосвітлення енергоефективність в основному досягається за рахунок використання сучасних засобів автоматизації і простих алгоритмів роботи обладнання, наприклад, робота обладнання за розкладом, коли у вказаних системах є потреба. В свою чергу, системи опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВК) характеризуються більш складними алгоритмами керування, з перехресними зв'язками і

впливом одна на одну, що призводить до неефективного енергоспоживання. Також робота цих систем безпосередньо впливає на мікроклімат у приміщенні, який відчуває людина. Тому забезпечення оптимальної роботи таких систем є актуальною задачею.

Забезпечення оптимального мікроклімату у приміщенні є непростою задачею, оскільки він залежить від різних факторів: впливу сонячного випромінювання, відносної вологості повітря, швидкості руху повітря, температури поверхонь, зміни кількості людей у приміщенні, ізоляційних властивостей одягу людини та рівня її фізичної активності [1, 2]. Типові системи автоматизації, які підтримують мікроклімат у приміщенні, не враховують вплив вказаних факторів, а в основному регулюють лише один із параметрів, наприклад, температуру повітря у приміщенні. Для досягнення бажаного мікроклімату у приміщеннях та енергоефективного керування системами ОВК необхідно впроваджувати нові алгоритми керування, які враховують описані недоліки. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є використання цифрових двійників та методів машинного навчання, за допомогою яких можна заздалегідь прогнозувати мікроклімат у приміщенні і вносити необхідні коригуючі зміни у роботу регуляторів систем автоматизації [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останні дослідження щодо забезпечення температурного комфорту у приміщеннях та енергоефективності будівель висвітлюють різноманітні інноваційні підходи, які включають застосування різних алгоритмів оптимізації та сучасних інформаційних технологій. Зокрема у роботі [2] запропоновано використання цифрових двійників і машинного навчання для моделювання температурного комфорту у приміщенні. У роботі [3] досліджується ряд методів контролю температурного комфорту, зосереджуючи увагу на керуванні систем автоматизації для ОВК. У дослідженні відзначено, що адаптивні системи управління, що реагують на зміни умов навколишнього середовища, можуть значно підвищити ефективність використання енергії, одночасно підтримуючи необхідний комфорт у приміщенні.

У роботі [4] представлено порівняльний аналіз системи холодних стель з іншими системами підтримки температури у приміщенні в контексті їх енергоефективності. Холодні стелі мають не лише кращі показники споживання енергії, але й краще підтримують комфортний мікроклімат, особливо за умов високих зовнішніх температур.

Застосування сучасних цифрових технологій для аналізу та оптимізації роботи систем автоматизації інженерних систем будівель надає значні переваги. Дані з датчиків температури, вологості, вмісту CO₂ у повітрі застосовуються для алгоритмів глибинного навчання та прогнозування енергетичних потреб, що дає можливість суттєво зменшити витрати на енергоресурси [5].

У роботі [6] представлено новий підхід до оптимізації промислових систем ОВК за допомогою ієрархічного підкріпленого навчання. Вказується, що використання алгоритмів машинного навчання дозволяє досягти значного зниження енергетичних витрат і покращення продуктивності системи. Цей підхід пропонує адаптивні рішення для управління системами автоматизації, що може бути корисно як у промисловому секторі так і в автоматизації інженерних систем будівель.

Проведений аналіз наявних підходів до зниження енерговитрат інженерними системами будівель із забезпечення необхідних параметрів мікроклімату показує значний потенціал сучасних інформаційних технологій. Інтеграція новітніх рішень, таких як адаптивні системи управління, машинне навчання та цифрові двійники можуть суттєво поліпшити роботу систем.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є розробка архітектури цифрового двійника приміщення для забезпечення комфортного мікроклімату, прогнозування змін у роботі та оптимізації енерговитрат інженерних систем будівель.

Основна частина

Розвиток сучасних інформаційних технологій також вплинув на розвиток систем автоматизації, зокрема з'явилися нові можливості для аналізу роботи систем, моделювання та оптимізації їх роботи. Ці можливості відносять до четвертої промислової революції, яка має абревіатуру Індустрія 4.0. Зокрема Індустрія 4.0 передбачає можливість створення цифрових двійників реальних об'єктів, агрегатів або процесів. Ці цифрові двійники дають можливість симуляції та прогнозування зміни вихідних параметрів чи станів з залежності від зміни вхідних параметрів. Особливістю цифрового двійника є те, що модель, яка його представляє, взаємодіє з його фізичною копією, тобто має можливість навчатися або вдосконалюватися на реальних даних. Також цифровий двійник дозволяє аналізувати поточні і історичні дані для оптимізації значень цільових параметрів, передаючи необхідні коригуючі дії на його фізичну сутність. Таким чином між цифровим двійником і його фізичною копією існує двостороння взаємодія.

Створення цифрового двійника приміщення для оптимізації енерговитрат та забезпечення комфортного мікроклімату починається зі збору даних. Слід зазначити, що на цьому етапі часто виникають проблеми з інтеграцією різних підсистем, датчиків та серверів обробки інформації, оскільки наявне обладнання для систем автоматизації часто використовує специфічні для цих систем протоколи обміну даними, які несумісні зі стандартами Індустрії 4.0. Тому важливо враховувати ці особливості, будуючи архітектуру системи. Одним із можливих варіантів вирішення вказаної проблеми є використання Node-Red, який є відкритим інструментом для поєднання різних пристроїв та онлайн-сервісів. Node-Red має велику кількість додаткових бібліотек, які забезпечують як комунікацію через стандартні промислові протоколи обміну даними, так і надають можливість виконувати обробку та запит даних з інших сервісів, в тому числі використовувати методи машинного навчання.

Системи опалення і кондиціонування приміщень застосовують різні типи нагрівальних та охолоджувальних теплообмінників, вибір обладнання також залежить від типу приміщень, де буде підтримуватися необхідний температурний режим. В дослідженні були розглянуті системи нагріву за допомогою водяних теплих підлог та охолодження за допомогою холодної стелі для приватного будинку. Ці системи стають все більш популярними оскільки забезпечують більш рівномірний нагрів і охолодження приміщення [4], а також не мають недоліків пов'язаних з шумом роботи обладнання, що є дуже актуальним для приватних будинків. Принцип роботи цих систем полягає у тому, що тепло- або холодоносії циркулює у контурах труб, які вмонтовані у підлозі або стелі. Таким чином відбувається нагрівання чи охолодження цих поверхонь, які в свою чергу за допомогою конвективного теплообміну впливають на температуру повітря в приміщенні. Слід зазначити, що система теплої підлоги виконує одразу дві функції – нагрів повітря та нагрів підлоги. Оскільки з підлогою безпосередньо контактує людина, то температура підлоги повинна знаходитися в певних межах, щоб забезпечувати комфортні умови. Тому виникає додаткова складність синхронізації роботи систем нагріву і охолодження, де потенційно ці системи можуть впливати одна на одну, що призводить до неефективного використання енергоресурсів. Зважаючи на те, що температура повітря в приміщенні є інерційним об'єктом з точки зору автоматизації, то найефективніше її регулювання відбувається за двопозиційним законом з гістерезисом. Тобто при необхідності нагріву приміщення відкривається клапан подачі теплоносія у теплу підлогу, а при досягненні заданої температури цей клапан закривається. Аналогічно для охолодження приміщення.

Крім температури повітря у приміщенні для забезпечення бажаного комфорту необхідно підтримувати рівень відносної вологості повітря, а також забезпечувати приплив свіжого повітря. Для цього було розглянуто застосування системи припливно-витяжної системи вентиляції з парозволожувачем. Ця система в автоматичному режимі нагріває або охолоджує припливне повітря до необхідної температури, а також за допомогою парозволожувача підтримує необхідний рівень вологості. В свою чергу, завдяки роботі припливно-витяжної

системи вентиляції за рахунок постійного повітрообміну в приміщенні досягається бажаний рівень вологості повітря в приміщенні. Враховуючи, що система вентиляції, як правило, подає повітря одразу в декілька приміщень або в усі приміщення будинку, то відносна вологість повітря в цих приміщеннях може відрізнятись від заданого значення. Оскільки забезпечити однакову вологість у всіх приміщеннях за допомогою такої системи вентиляції не можливо, то регулювання вологості повітря відбувається по усередненому значенню, яке вимірюється у витяжному каналі.

Для оцінки бажаного рівня комфорту у приміщенні був використаний індекс Predicted Mean Vote (PMV), який задокументований у міжнародному стандарті ISO 7730:2005 – "Ергономіка теплового середовища" [2]. Цей індекс обчислюється в залежності від наступних параметрів:

- температури повітря;
- вологості повітря;
- швидкості повітря;
- інтенсивності сонячного випромінювання;
- середньої радіаційної температури поверхонь (стін, підлоги, стелі, тощо);
- ізоляційних властивостей одягу людей у приміщенні;
- метаболічної активності людей у приміщенні.

Якщо PMV більше нуля, то це означає, що більшість людей у приміщенні відчувають надмірну температуру повітря у приміщенні. Якщо ж значення нижче нуля, то навпаки відчувається низька температура повітря. Тому бажано підтримувати PMV близький до нуля.

Зважаючи на те що PMV залежить від різних параметрів, то необхідно забезпечити вимірювання цих параметрів за допомогою відповідних датчиків. Для вимірювання температури і вологості у приміщенні були використані датчики MOES ZigBee Smart Temperature and Humidity Sensor, які передають вимірювання через безпроводний інтерфейс ZigBee. Ці датчики зручні для встановлення, їх можна розташовувати якомога близько до місць де знаходяться люди. Крім того можна встановлювати необхідну кількість таких датчиків для покращення рівня комфорту. Для вимірювання швидкості повітря у приміщенні використовуються датчики E+E EE660, які можуть вимірювати дуже низьку швидкість повітря, що важливо для даного дослідження. Ці датчики передають інформацію через інтерфейс RS-485 і протокол Modbus RTU. Аналогічно піранометр Kipp & Zonen SMP10-L передає інформацію про сонячне випромінювання через інтерфейс RS-485 і протокол Modbus RTU. Для вимірювання температури теплої підлоги і холодної стелі застосовуються датчики температури з характеристикою NTC 10K.

Для того щоб врахувати ізоляційні властивості одягу людей у приміщенні для обчислення PVM можна застосовувати або константи значення, які залежать від пори року або встановити залежність цього коефіцієнту від зовнішньої температури. Для літнього одягу цей коефіцієнт рівний 0,5, а для зимової збільшується до 1,5 [2].

Параметр метаболічної активності людей у приміщенні залежить від виду їх діяльності у приміщенні. Для приватного будинку цей параметр може бути встановлений згідно рекомендацій стандарту ISO 7730:2005 як постійне значення, оскільки зазвичай приміщення експлуатуються для конкретних цілей.

Для керування системами теплої підлоги, холодних стін та вентиляції існує велика кількість обладнання від різних виробників. Тому вибір обладнання обмежується лише додатковим функціоналом, необхідним для специфічних вимог проекту. Для дослідження було обрано обладнання від компанії SchneiderElectric, а саме програмований логічний контролер M172 і шлюз зв'язку PAS600L. Контролер M172 призначений для задач ОВК і має можливості комунікації через інтерфейси RS-485 і Ethernet за протоколами ModbusRTU і ModbusTCP відповідно. Шлюз зв'язку PAS600L забезпечує інтеграцію датчиків температури і вологості по інтерфейсу ZigBee, а також має можливість передавати дані за протоколами ModbusRTU і ModbusTCP. На рис. 1 зображено підключення датчиків температури та

вологості у приміщенні, а також піранометра сонячного випромінювання до шлюзу зв'язку PAS600L.

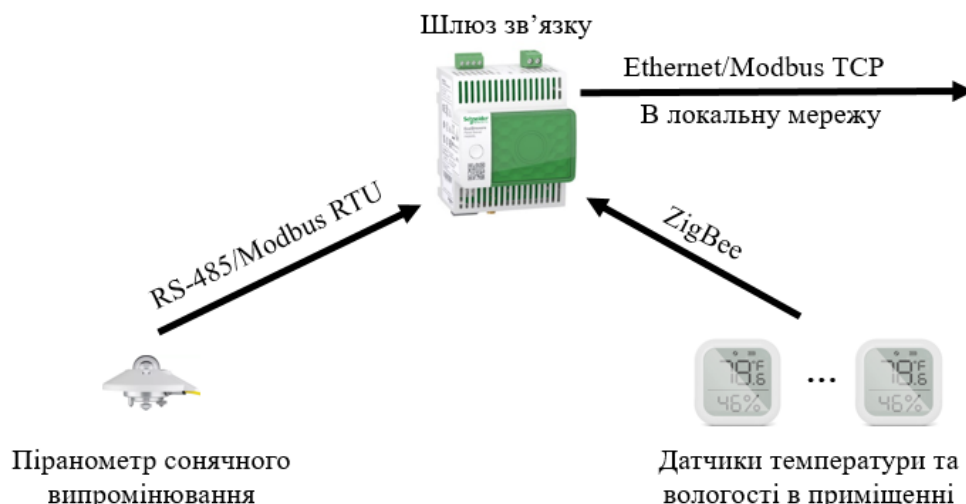


Рис. 1. Підключення датчиків температури та вологості і сонячного випромінювання до шлюзу зв'язку

Отримані значення вимірювання температури і вологості передаються у локальну мережу Ethernet за протоколом Modbus TCP і використовуються контролером температури повітря і теплої підлоги у приміщенні для регулювання відповідних параметрів, відкриваючи чи закриваючи клапани подачі тепло- або холодноносія через сервоприводи з сигналом керування 230 В. Також до цього контролера під'єднанні датчики теплої підлоги, холодної стелі та швидкості повітря в приміщенні рис. 2.

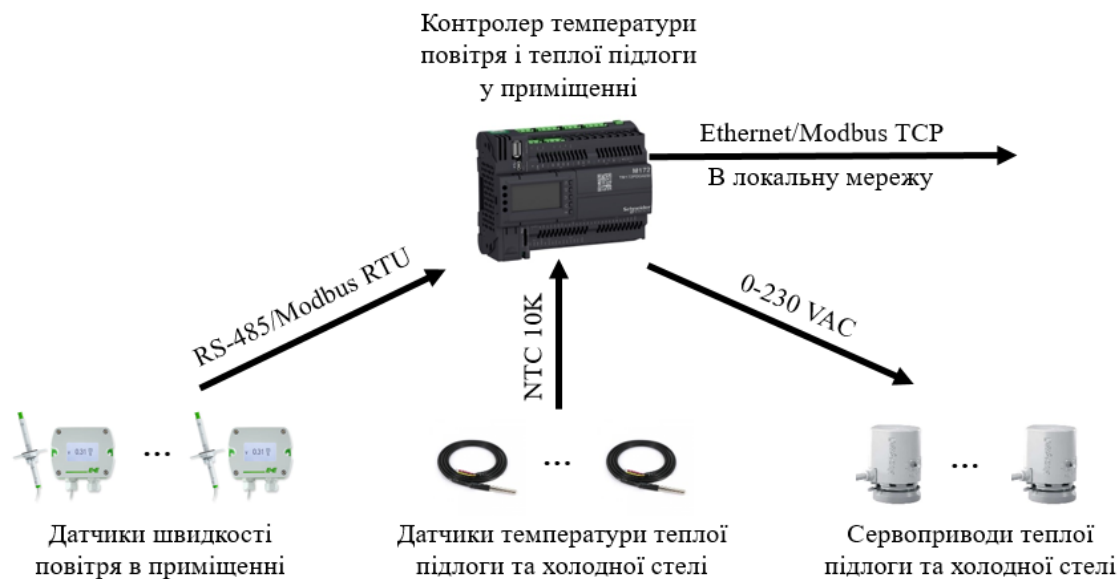


Рис. 2. Підключення датчиків і виконавчих механізмів до контролера температури повітря і теплої підлоги

Об'єднані в локальну обчислювальну систему контролери та шлюз зв'язку мають можливість передачі даних у інші системи, в тому числі для комунікації з Node-Red, який має необхідну бібліотеку для ModbusTCP. Node-Red може запускатися як окремий сервіс у операційній системі, або працювати у контейнері Docker, що має свої переваги, а саме:

- можливість портативності або переносу програмного забезпечення з однієї операційної системи на іншу;
- ізоляції додатків від основної операційної системи, що дає можливість запуску додатків без конфліктів і залежності від бібліотек операційної системи;
- масштабування та керування запуском додатків.

Тому для розгортання Node-Red було вирішено застосувати офіційного образу Node-Red для його запуску у контейнері Docker.

Для побудови цифрового двійника необхідно накопичувати історичні дані вимірювань від датчиків і сигналів керування, тому для цих потреб необхідно забезпечити швидку і зручну базу даних, яка оптимізована для роботи з часовими рядами даних. Відповідним вимогам добре відповідає база даних InfluxDB, яка й була обрана для дослідження. Накопичені історичні дані використовуються для побудови моделей цифрового двійника. У роботі [2] показані переваги застосування бібліотеки NeuralProphet для побудови моделі цифрового двійника. Слід зазначити, що ця модель також оптимізована для роботи з даними, які періодично змінюються в часі, що є актуальним для поставленої задачі. Наприклад, можна досягти додаткової економії енергоресурсів, якщо зменшувати вимоги до комфорту в приміщенні, коли в даному приміщенні немає людей. InfluxDB і NeuralProphet можуть також працювати у Docker контейнерах, тому, враховуючи аналогічні переваги, було запропоновано їх запускати в цих контейнерах. Для того щоб запускати Docker контейнери з усіма налаштуваннями в автоматичному режимі необхідно використовувати системи оркестрації такі як DockerSwarm або Kubernetes. Оскільки Kubernetes має ряд переваг у гнучкості та масштабуванні, то була запропонована архітектура системи для побудови цифрового двійника мікроклімату у приміщенні з використанням саме цього оркестратора. На рис. 3 зображена розроблена архітектура.

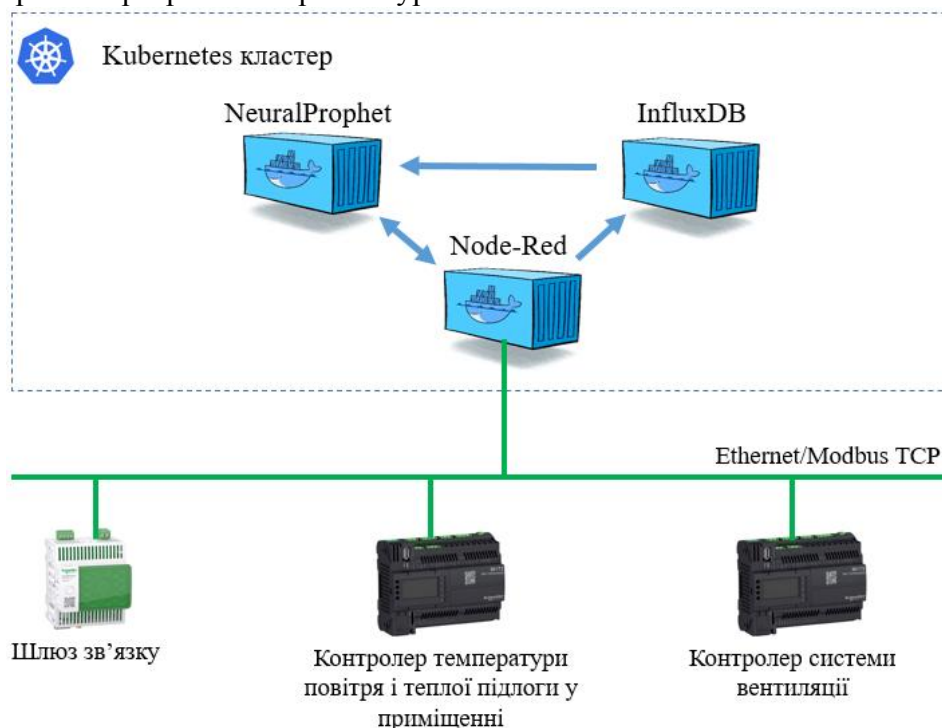


Рис. 3. Архітектура системи для побудови цифрового двійника мікроклімату у приміщенні

Крім зазначених переваг Kubernetes дає можливість запускати контейнери Docker в кластері як на локальному сервері, так і хмарному середовищі, так як більшість провайдерів мають таку підтримку. Це додає ще більшої гнучкості, особливо коли важко наперед передбачити необхідні системні ресурси локального сервера. В запропонованій архітектурі побудови цифрового двійника мікроклімату у приміщенні Node-Red виконує опитування засобів автоматизації і передає виміряні сигнали датчиків та керуючих сигналів у базу даних InfluxDB за допомогою відповідної бібліотеки. Далі накопичені історичні дані з бази даних передаються для навчання моделі NeuralProphet. Запуск процесу навчання відбувається періодично за допомогою Python скрипта, який виконується у вбудованому Exec блоці Node-Red, призначеному саме для запусків скриптів. Навчена модель NeuralProphet передає

прогнози зміни індексу PVM на майбутні періоди назад у Node-Red. В свою чергу Node-Red використовує дані прогнозу для передачі коригуючих сигналів для контролерів температури повітря і теплої підлоги та вентиляції, щоб забезпечити найбільш енергоефективне підтримання мікроклімату у приміщеннях.

Висновки

Запропонована архітектура цифрового двійника приміщення дозволяє інтегрувати типові системи автоматизації інженерних систем будівель за допомогою Node-Red, з можливістю розгортання як на локальному сервері так і у хмарному середовищі. Розроблений цифровий двійник виконує прогнозування змін індексу PVM і надсилає коригуючі сигнали для контролерів температури повітря і теплої підлоги та вентиляції, при цьому забезпечуючи енергоефективність роботи обладнання. Слід зазначити, що для навчання моделі розробленого цифрового двійника можуть бути додані додаткові сигнали, такі як зміна кількості людей у приміщенні, відкриття вікон і дверей, а також інформація з сервісів прогнозу погоди, яку можна отримати через додаткові бібліотеки Node-Red.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shahinmoghdam M., Natephra W., Motamedi A. BIM- and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures. *Building and Environment*. July 2021. Vol. 199. P. 107905. DOI:10.1016/j.buildenv.2021.107905.
2. ElArwady Z., Kandil A., Afiffy M., Marzouk M. Modeling indoor thermal comfort in buildings using digital twin and machine learning. *Development in the Built Environment*. 2024. Vol. 19. P. 100480. DOI:10.1016/j.dibe.2024.100480.
3. Taleghani M., Tenpierik M., Kurvers S., Dobbelsteen van den A. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. October 2013. Vol. 26. P. 201 – 215. DOI:10.1016/j.rser.2013.05.050.
4. Hui S. C. M., Leung J. Y. C. Thermal comfort and energy performance of chilled ceiling systems. *Conference: Fujian-Hong Kong Joint Symposium*. 2012. 29 – 30 June 2012. Fuzhou, China. P. 36 – 48.
5. Du Y., Zandi H., Kotevska O., Kurte K., Munk J., Amasyali K., Mckee E., Li F. Intelligent multi-zone residential HVAC control strategy based on deep reinforcement learning. *Applied Energy*. January 2021. Vol. 281. P. 116117. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.116117.
6. Azuatalam D., Lee Wee-Lih, Nijs de F., Liebman A. Reinforcement learning for whole-building HVAC control and demand response. *Energy and AI*. November 2020. Vol. 2. P. 100020. DOI:10.1016/j.egyai.2020.100020.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2024.

Стаття пройшла рецензування 29.09.2024.

Поліщук Ігор Анатолійович – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики, e-mail: pi020883@gmail.com.

Гікало Павло Валерійович – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики.

Шевченко Марія Григорівна – магістрант кафедри автоматизації енергетичних процесів навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики.

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