

Інтелектуальна система теплозабезпечення будівель із застосуванням технології цифрового двійника

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.132>

Володимир Волощук

Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"
Київ, Україна
VI.Volodya@gmail.com

Павло Новіков

Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"
Київ, Україна
novikov.paolo@gmail.com

Олександр Степанець

Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"
Київ, Україна
stepanets.av@gmail.com

Анастасія Захарченко

Кафедра автоматизації енергетичних процесів
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"
Київ, Україна
nastochka.z@gmail.com

Інна Білоус

Кафедра теплової та альтернативної енергетики
Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна
biloys_inna@ukr.net

Анотація — У роботі представлено інтелектуальну низькотемпературну систему теплозабезпечення будівель, де впроваджено програмно-апаратний комплекс з реалізації технології цифрового двійника для вирішення задач оптимізації проектних та експлуатаційних параметрів системи для підвищення її ефективності (енергетичної, економічної та екологічної), а також діагностування стану роботи компонентів системи

Ключові слова — цифровий двійник; система теплозабезпечення; конденсаційний котел.

I. ВСТУП

Одним із досягнень сучасної опалювальної техніки є використання конденсаційної технології. Ефективна робота конденсаційного котла має місце лише при застосуванні низькотемпературних систем теплозабезпечення будинків із відповідними теплотехнічними характеристиками [1].

Заснована на величезному обсязі накопичених даних, отриманих в ході вимірювань цілого ряду показників, та відповідних математичних і комп'ютерних моделях технологія цифрового двійника (ЦД) дає можливість більш точно оцінити та спрогнозувати поведінку об'єкту, швидше

виявити можливі дефекти у ньому, більш обґрунтовано запропонувати технічні зміни і, як наслідок, суттєво підвищити ефективність відповідно до вибраних критеріїв [2].

На основі огляду літератури автори [2] дійшли висновку, що ЦД мають значний потенціал для підвищення енергоефективності будівель за рахунок можливості реалізації моніторингу в режимі реального часу, прогнозованого технічного обслуговування та прийняття рішень на основі реальних даних. Проведений аналіз результатів існуючих досліджень показав, що за рахунок технології ЦД вдається підвищити енергоефективність у будівлях на 10...15% і знизити їх експлуатаційні витрати на 8%.

Проведений аналіз існуючих робіт показав, що технологія ЦД може успішно застосовуватися для вирішення задач із підвищення ефективності об'єктів та систем енергетики. Зараз є потреба подальшого розвитку та удосконалення методів та засобів застосування цієї технології.

Мета роботи – розробити інтелектуальну низькотемпературну систему теплозабезпечення (СТ) будівель на базі конденсаційної модульної котельні, розробити її режимні характеристики та програмно-апаратний комплекс для підвищення енергетичної,

економічної та екологічної ефективності на основі контролю, моніторингу і діагностики такої системи та застосування сучасних інтернет-технологій.

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Для вирішення поставленої мети було передбачено вирішення наступних завдань:

- створення та реалізація комплексу математичних та комп'ютерних моделей СТ;
- розроблення та реалізація концепції ЦД СТ;
- створення дослідного зразка на основі результатів моделювання СТ з урахуванням розроблених критеріїв її ефективності.

Відповідно до типу та характеристик системи розроблено та реалізовано комплекс математичних та комп'ютерних моделей (в Matlab, Python, EnergyPlus), які дають можливість змодельовати як єдине ціле режими роботи будинку та СТ.

Додатково до існуючих критеріїв оцінювання ефективності системи, які базуються на енергетичних балансах та техніко-економічному оцінюванні, в роботі розроблено критерії ексергетичного аналізу, які, на відміну від існуючих дають можливість визначити місцезнаходження, значення, джерела, вартість та негативний вплив га доквілля термодинамічних втрат в системі.

Створено проєктну документацію програмно-апаратного комплексу СТ, яка включає в себе: функціональну схему автоматизації конденсаційного котла МН-120к; принципову електричну схему; схеми комутації пристроїв.

Розроблено програмне забезпечення промислового комп'ютера для реалізації функцій концентратора даних від пристроїв і датчиків, архівування даних і аналітики стану обладнання. Програмне забезпечення передбачає використання програми EnergyPlus, інструменту для візуального програмування потоком даних Node-RED, системи керування базами даних InfluxDB, мови програмування Python.

Розроблено та виготовлено дослідний зразок інтелектуальної низькотемпературної СТ у вигляді експериментального стенда, який включає в себе: модульний конденсаційний котел існуючої конструкції; об'язку конденсаційного котла; споживача теплової енергії (імітація будинку, виробниче приміщення співвиконавця тощо); програмно-апаратний комплекс системи керування СТ (блок керування, промисловий комп'ютер, додаткові датчики).

Розроблена та впроваджена архітектура програмного забезпечення ЦД, яка побудована за принципом модульної інтеграції, що забезпечує гнучкість, масштабованість і продуктивність системи. Основними компонентами є платформа Node-RED для управління потоками даних і логікою, база даних InfluxDB для зберігання часових рядів, система візуалізації Grafana та середовище

виконання скриптів Python для комп'ютерного моделювання.

На основі запропонованого програмно-апаратного забезпечення розроблено рекомендації з оптимізації режимних характеристик інтелектуальної низькотемпературної СТ. Передбачено два варіанта реалізації: більш детальний та спрощений. У першому варіанті необхідно проводити енергетичний аудит із залученням фахівців та подальшим детальним розрахунком та аналізом теплових режимів будівлі, які потім передаються у розроблену систему для подальшого аналізу. У другому варіанті використовується більш спрощений підхід, який використовує отримані безпосередньо на реально діючій СТ дані із використанням мінімально можливого набору даних датчиків.

Розроблена експлуатаційна документація, регламент технічного обслуговування інтелектуальної низькотемпературної СТ у вигляді інструкції користувача.

На прикладі реального об'єкту, із застосуванням запропонованої технології, досліджено теплотехнічні характеристики СТ на базі модульної конденсаційної котельні у різних режимах та показано, зокрема, що найбільше зростання ККД котла (на 6,6 %) має місце у випадку переходу на низькотемпературні системи опалення. Перехід на переривчастий обігрів знаходиться на другому місці щодо можливостей підвищення ККД котла (до 3,5 %). Утеплення будинку також забезпечує підвищення ККД котла, але менше ніж два попередні рішення (до 2,7 %).

Аналіз можливих рішень з підвищення ефективності досліджуваної системи в комплексі показав, що зниження температурного графіка системи опалення шляхом збільшення площі нагріву або застосування більш ефективних опалювальних приладів, перехід на переривчастий обігрів, а також додаткове утеплення будівлі дає можливість підвищити середньосезонний ККД конденсаційного котла на 8,8%. При цьому сезонне споживання природного газу може бути знижене на 69 %.

Робота виконана в рамках державного замовлення Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0123U104476).

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Satyavada, H.; Baldi, S. Monitoring Energy Efficiency of Condensing Boilers via Hybrid First-Principle Modelling and Estimation. *Energy* 2018, 142, 121–129, doi:10.1016/j.energy.2017.09.124.
- [2] Arsecularatne, B.; Rodrigo, N.; Chang, R. Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. *Sustainability* 2024, 16, 9275, doi:10.3390/su16219275.
- [3] Voloshchuk, V.; Bilous, I.; Novikov, P.; Stepanets, O.; Zakharchenko, A. Digital Twin-Based Smart Heating System with a Condensing Boiler. *Smart Energy* 2025, 19, 100198, doi:10.1016/j.segy.2025.100198.