



Прийнято 22.07.2025. Прорецензовано 23.12.2025. Опубліковано 29.12.2025.

УДК 620

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-32-40

СУЧАСНІ СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ОПАЛЕННЯ: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Нагірний В. І.

Студент

Національний університет «Львівська політехніка»

76013, вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна

<https://orcid.org/0009-0005-7825-8858>

e-mail: vasyi.i.nahirnyi@lpnu.ua

Анотація. У статті здійснено комплексний огляд сучасних сенсорних технологій, що застосовуються в автономних системах опалення, зокрема у двоконтурних конфігураціях, які поєднують контури опалення та гарячого водопостачання. Розглянуто основні типи температурних сенсорів – термістори, термопари типу ТССТ, цифрові датчики DS18B20, а також RFID-сенсори, які використовуються для дистанційного зчитування параметрів. Проаналізовано їхні конструктивні особливості, принципи роботи, діапазони вимірювань і вплив точності сенсорів на енергоефективність систем. Особливу увагу приділено питанню підвищення стабільності роботи теплообмінників і котлів, що безпосередньо залежать від точності та швидкодії температурного контролю. Окремо розглянуто проблеми, пов'язані з деградацією сенсорів унаслідок високотемпературних впливів, утворенням накипу на теплообмінних поверхнях, а також впливом вологості та електромагнітних завад на достовірність вимірювань. У роботі наведено аналітичний огляд методів компенсації похибок, калібрування сенсорів і застосування алгоритмів фільтрації даних. Розкрито можливості впровадження систем віддаленого моніторингу та управління температурними параметрами за допомогою бездротових технологій, зокрема протоколів Wi-Fi, Bluetooth та ZigBee. Такі рішення дозволяють здійснювати централізований контроль роботи котлів і теплообмінників, прогнозувати відмови та підвищувати надійність експлуатації системи загалом. Запропоновано практичні підходи до підвищення точності вимірювань і ефективності регулювання теплових процесів за рахунок використання інтелектуальних сенсорних пристроїв, здатних до самодіагностики та адаптації до змін робочого середовища. Проведене дослідження базується на аналізі технічних характеристик сенсорів, математичних моделей теплопередачі та принципів функціонування цифрових систем керування. Отримані результати мають прикладне значення для створення енергоефективних, надійних і адаптивних систем автономного опалення в житлових будівлях, спрямованих на зниження енергоспоживання та підвищення комфорту користувачів.

Ключові слова: двоконтурна система опалення, температурний контроль, термістор, ТССТ, RFID-сенсори, DS18B20, тепловий моніторинг.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку систем опалення зумовлюють необхідність впровадження новітніх технологій діагностики, контролю та оптимізації теплових процесів.

Інтелектуальні та гібридні системи, які використовують сенсори, мікроконтролери та цифрові алгоритми обробки даних, відкривають нові можливості для підвищення енергоефективності та зменшення витрат ресурсів.

Запропоноване посилання: Нагірний, В. І. (2025). Сучасні сенсорні технології в системах автономного опалення: огляд і перспективи застосування. *Методи та прилади контролю якості*, 2(55), 32-40. doi: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-32-40

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

У ряді досліджень доведено, що ефективність котельного обладнання значною мірою залежить не лише від його конструктивних особливостей, а й від логіки керування та якості вимірювань температури. Використання стохастичних моделей, комбінованих гібридних систем та регресійного аналізу дозволяє точно передбачити поведінку теплоносія в умовах змінних зовнішніх параметрів.

Незважаючи на суттєвий прогрес, проблема стабільної та точної роботи температурних сенсорів в опалювальних системах, особливо у двоконтурних конфігураціях, залишається актуальною. Саме тому дане дослідження спрямоване на аналіз ефективності впровадження сенсорних елементів у структуру опалювальних систем із метою підвищення їх функціональності та надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку систем опалення зумовлюють необхідність впровадження новітніх технологій діагностики, контролю та оптимізації теплових процесів. Інтелектуальні та гібридні системи, які використовують сенсори, мікроконтролери та цифрові алгоритми обробки даних, відкривають нові можливості для підвищення енергоефективності та зменшення витрат ресурсів.

У роботі [1] розглянуто перспективи переходу житлового фонду Великобританії з традиційних газових котлів на гібридні системи типу CoCo (Cognitive Computing). Ці системи поєднують газовий котел і повітряний тепловий насос у єдиному компактному пристрої. Автори моделюють роботу таких гібридних установок та аналізують, як алгоритми керування (контрольні стратегії CoCo) впливають на розподіл тепла між котлом і тепловим насосом, а отже, і на споживання енергії та рівень викидів CO₂.

Дослідження показало, що навіть при незмінній апаратній конфігурації, продуктивність системи значно залежить від логіки управління, яка визначає, коли саме тепло має постачатися від котла, а коли – від теплового насоса. Отже, не всі гібридні си-

стеми однаково ефективні, і цей аспект має бути врахований під час стандартизації, тестування та впровадження таких систем. Висновок авторів однозначний: ефективна стратегія керування – ключ до зниження споживання енергії та декарбонізації опалення.

Інше дослідження, представлене в роботі [2], зосереджене на аналітичному моделюванні роботи водогрійного газового котла у системах централізованого теплопостачання. Автори дослідили, як змінні зовнішні умови (зокрема температура навколишнього середовища і теплові навантаження) впливають на роботу котла, і запропонували математичну модель, що враховує ці фактори.

Використовуючи стохастичний підхід, вони побудували рівняння множинної лінійної регресії, яке описує залежність вихідної температури теплоносія від кількох параметрів: вхідної температури, витрати газу та температури навколишнього середовища. Модель була перевірена статистичними критеріями (t-критерій Стюдента, F-критерій Фішера), що підтвердило її достовірність та практичну цінність.

Таким чином, обидва дослідження акцентують увагу на необхідності точного моніторингу температурних параметрів і оптимізації керування котельними системами. Це підтверджує важливість впровадження сенсорних мереж та інтелектуальних алгоритмів, які здатні адаптивно реагувати на змінні умови роботи.

Незважаючи на суттєвий прогрес, проблема стабільної та точної роботи температурних сенсорів в опалювальних системах, особливо у двоконтурних конфігураціях, залишається актуальною. Саме тому дане дослідження спрямоване на аналіз ефективності впровадження сенсорних елементів у структуру опалювальних систем із метою підвищення їх функціональності та надійності.

Постановка проблеми. У сфері систем опалення зберігається кілька проблем, які впливають на їх ефективність і функціональність. Одним із критичних питань є підтримання оптимальної температури те-

плоносія через проблему з накопиченням на стінках теплообмінників так званого накипу, у вигляді карбонатів, що може погіршити їх роботу. Іншою проблемою є продуктивність термісторів на теплообмінниках. Ці сенсори мають вирішальне значення для точного вимірювання температури. Іонізаційні електроди, що використовуються для контролю полум'я в газових котлах, представляють свої проблеми. Під час запуску котла часто виникають проблеми, які можуть вплинути на процес розпалювання та стабільність полум'я. Нарешті, сучасні системи опалення все частіше пропонують користувачам можливість контролювати кімнатну температуру за допомогою стаціонарних регуляторів, а також додатків для смартфонів. Ця функція заснована на сенсорах температури, встановлених на радіаторах або в різних частинах кімнати. Точність і чутливість цих сенсорів життєво важливі для ефективного керування температурою та зручності користувача.

Мета роботи – аналіз та оцінка ефективності впровадження сучасних сенсорних технологій у структуру автономних систем опалення з метою підвищення точності температурного моніторингу, енергоефективності та надійності роботи теплових приладів, зокрема в умовах змінних зовнішніх параметрів і навантажень.

Викладення основного матеріалу дослідження. Двоконтурна система опалення складається з двох окремих контурів. Як правило, один контур призначений для забезпечення опалення приміщення (наприклад, нагріву радіаторів або теплої підлоги), а інший контур використовується для гарячого водопостачання (наприклад, підігріву води тощо). Це налаштування дозволяє системі незалежно контролювати та керувати потребами для опалення приміщень і нагріву води, забезпечуючи ефективно та одночасне постачання обох.

Для порівняння використаємо триконтурні системи опалення.

Триконтурна система опалення, як впливає з назви, складається з трьох окремих контурів. Вони можуть бути налашто-

вані різними способами залежно від конкретних вимог будівлі чи застосування. Наприклад, один контур може бути призначений для опалення радіаторів, другий – для теплої підлоги, а третій – для гарячої води. Крім того, у більших або складніших установках один контур може обслуговувати опалення для певної зони або ділянки будівлі (наприклад, окремої квартири), інший для іншої зони, а третій для гарячого водопостачання. Такі системи, як правило, є складнішими за двоконтурні системи, пропонуючи більшу гнучкість у тому, як опалення розподіляється та контролюється між різними зонами чи функціями. До того ж, триконтурна система забезпечує кращий контроль за різними зонами або функціями опалення, дозволяючи точніше керувати температурою та споживанням енергії в різних частинах будівлі. Однак описані переваги є виправданими лише за умови, що системи опалення використовуватимуться у великих або складніших будівлях, де наявні кілька зон або окремі потреби в опаленні (наприклад, різні поверхи або великі приміщення) потребують окремого керування. У іншому випадку, двоконтурні системи виявляються простішим рішенням та є поширеними в житлових приміщеннях, де опалення та гаряча вода є основними потребами.

Фокусом поточного дослідження є системи, які поєднують структурні особливості котлів, використовуваних у домашніх умовах, та теплових електронних насосних систем. Комбіновані котли забезпечують як опалення приміщень, так і миттєве виробництво гарячої води в одному приладі без окремого бака для гарячої води. Таким чином, вони компактніші, дешевші та швидші в установці, ніж традиційні системні котли з резервуарами для гарячої води. Миттєва гаряча вода є корисною для енергоефективності, з точки зору уникнення втрат тепла з накопичувального баку, але неефективність комбінованих втрат та обмежений діапазон модуляції може негативно вплинути [3] на ефективність.

Забруднення теплообмінника є основною проблемою для експлуатації котлів. Ця проблема викликана накопиченням ка-

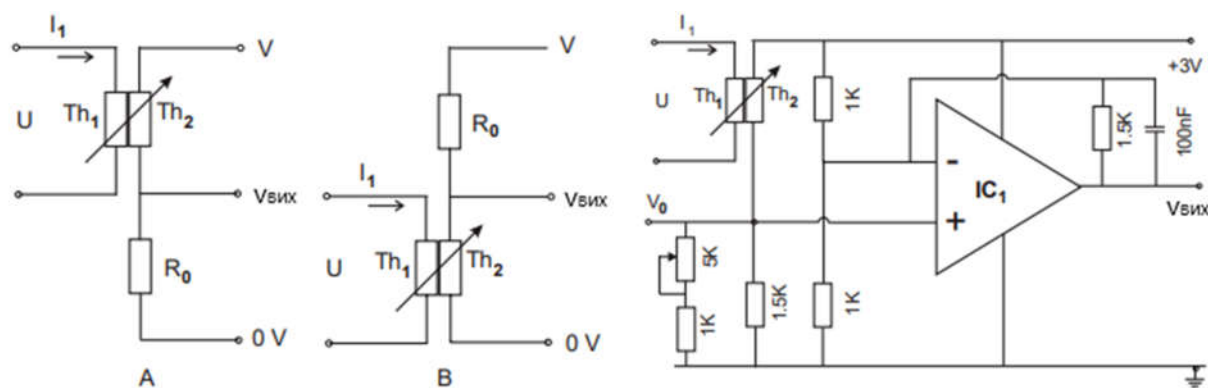


Рисунок 1 – Схема роботи термістора з термічною мікросхемою [6] (ТССТ)

рбонатних відкладень на внутрішніх поверхнях теплообмінників з часом [4]. Першим наслідком є зменшення теплопродукції через втрату тепловіддачі і, нарешті, зупинка котла через засмічення. Більша частина забруднень складається з дрібних частинок, які походять від реакцій випаровування лужних металів та реакцій відновлення переважно сіркою, хлором і вуглецем. Температура є найбільш часто вимірюваною величиною. Вимірювання температури може здійснюватися як за допомогою прямого контакту з джерелом тепла, так і дистанційно – шляхом використання випромінюваної енергії. RTD-сенсори (термометри опору) забезпечують високу точність і стабільність, що робить їх придатними для точних вимірювань. Термістори, зі свого боку, вирізняються високою чутливістю та швидкою реакцією на зміни температури.

Основу температурних сенсорів у котлових системах складають напівпровідникові типи резисторів – термістори. Термістори класифікуються за типом провідності. Термістори з негативним температурним коефіцієнтом [5] (NTC–Negative-temperature-coefficient) мають менший опір при вищих температурах, тоді як термістори з позитивним температурним коефіцієнтом (PTC–Positive-temperature-coefficient) мають більший опір при вищих температурах. Вони часто застосовуються для вимірювання та контролю температури завдяки високій чутливості та точності. Крім того, вони мають широкий діапазон робочих температур і випускаються в різних розмірах та конструкціях, що дозволяє адаптувати їх під конкретні вимоги проєкту. Маленький

розмір і швидка реакція на зміну температури роблять їх придатними для застосувань, де важливі просторові обмеження та час реагування. Оскільки опір термісторів NTC зменшується зі збільшенням температури, що сприяє моніторингу та контролю температури в системі котла, то вони найчастіше використовуються у таких системах. Для визначення придатності або непридатності термісторів на теплообмінниках, їх правильної роботи та необхідності ранньої заміни, застосування пристрою термістора з термічною мікросхемою [6] (TCST – thermally coupled chip thermistor) є рішенням вибору. Пристрій TCST працює через два термістори Th1 і Th2, де Th1 самонагрівається, а Th2 діє як теплоприймач. Вихідний опір, який змінюється залежно від температури та напруги, є ключовим для моніторингу продуктивності термістора та виявлення потенційних проблем.

Пристрій налаштовується за модифікованою мостовою схемою, як показано на рисунку 1, де вихідна напруга ($V_{\text{вих}}$) залежить від різниці температур між Th1 і Th2. Струм самонагрівання I_1 в Th1 генерує тепло P_1 , яке передається Th2, тим самим впливаючи на його опір R_2 і вихідну температуру T_2 . Це співвідношення дозволяє перетворювати температуру та потужність у сигнали напруги, які можна використовувати для моніторингу роботи термістора.

Стабільність струму самонагрівання є критичною для забезпечення належної роботи термістора. Критерії стабільності застосовуються, щоб гарантувати, що тепло, яке виділяється, знаходиться в балансі з теплом, що розсіюється. Будь-яке відхи-

лення від цього балансу може свідчити про проблеми з терморезистором, такі як старіння, деградація матеріалу або зовнішні впливи, що вимагатиме завчасної заміни.

Теплові характеристики ТССТ можна повністю зрозуміти, проаналізувавши динаміку теплопередачі в системі. Це передбачає перевірку вхідної потужності, що подається на термістори, передачу тепла через епоксидний інтерфейс, який з'єднує термістори, і розсіювання тепла в навколишнє повітря. Ключовим параметром є різниця температур між двома термісторами, ΔT , яка відображає ефективність теплового зв'язку між ними. Цей зв'язок відіграє вирішальну роль в оцінці продуктивності та придатності термісторів для точного вимірювання температури.

Потужність, що подається на термістор і перетворюється на тепло, визначається за формулою:

$$P_{\text{вх}} = I^2 \times R,$$

де I – струм через термістор, а R – його опір.

Швидкість теплопередачі через епоксидну поверхню описується законом Фур'є:

$$Q_t = k \times A \times \frac{(T_{h1} - T_{h2})}{d},$$

де k позначає теплопровідність епоксидної смоли, A – площу поперечного перерізу теплопередачі, T_{h1}, T_{h2} – температури з двох сторін термістора, d – товщину епоксидного шару.

Швидкість розсіювання тепла в навколишнє повітря можна описати конвективним теплообміном:

$$Q_d = h \times A \times (T_{h1} - T_{\text{пов}}),$$

де h – коефіцієнт конвективної теплопередачі, A – площа поверхні, яка піддається впливу повітря, $T_{\text{пов}}$ – температура навколишнього повітря.

На практиці пристрій ТССТ можна використовувати для керування перетворювачами змінного/постійного струму малої потужності шляхом моніторингу вхідної потужності P_1 як функції вихідної температури T_2 . Аналізуючи термічну поведінку та стабільність пристрою, можна визначити, чи правильно працюють термістори, чи наближаються до кінця терміну своєї служби, тому потребують заміни.

Таким чином, пристрій ТССТ пропонує метод постійного моніторингу продуктивності термісторів на теплообмінниках. Аналізуючи співвідношення “температура-напруга” та “потужність-напруга”, а також забезпечуючи стабільність струму самонагрівання, можна визначити придатність термісторів для подальшого використання або виявити необхідність ранньої заміни, таким чином забезпечуючи надійну роботу теплообмінної системи.

Однією з можливих технологій, що лежать в основі сучасних систем контролю температури в будівлях, є використання бездротових сенсорів температури в поєднанні з додатками для смартфонів. Ця технологія дозволяє користувачам автоматично, або вручну регулювати параметри температури в окремих кімнатах будівлі, забезпечуючи оптимальний комфорт і ефективне використання енергії.

Центральним компонентом цієї системи є сенсор температури, який можна стратегічно розмістити на радіаторах або в певних частинах кімнати. Ці сенсори постійно контролюють температуру навколишнього середовища та передають дані на центральний контролер, часто інтегрований у додаток для смартфона. Додаток служить інтерфейсом, що дозволяє користувачеві встановлювати бажані температури для різних приміщень і регулювати їх віддалено з будь-якого місця, маючи доступ до мережі інтернет.

На відміну від традиційних термостатів, ці системи забезпечують більш детальний контроль, дозволяючи регулювати температуру в кожній кімнаті, а не для всієї будівлі. Сенсори здатні виявляти навіть незначні зміни температури, які потім передаються в програму в реальному часі.

Зв'язок між сенсорами температури та додатком на смартфоні зазвичай здійснюється за допомогою бездротових протоколів, таких як Wi-Fi, Bluetooth або Zigbee. Вибір протоколу зв'язку залежить від конкретних вимог системи, таких як діапазон, споживання енергії та швидкість передачі даних. Сенсори температури, які використовуються в цих системах, розроблені таким чином, щоб бути енергоефективними,

часто працюючи від акумулятора протягом тривалого часу. Це досягається шляхом оптимізації роботи сенсора для мінімізації споживання енергії, що передбачає передачу даних лише у разі значної зміни температури, або коли користувач запитує оновлення.

У наступному дослідженні [7] використовуються високочастотні сенсори RFID, які передають і отримують як енергію, так і дані за допомогою індуктивного зв'язку, що досягається через змінне магнітне поле між котушковими антенами зчитувача та мітки. Змінне магнітне поле генерується контуром резонансного бака, що складається з котушки індуктивності та конденсатора.

У системі RFID, призначеній для дистанційного контролю температури котла, RFID-мітки оснащені сенсорами температури [8]. Зчитувач RFID не тільки спілкується з мітками, але й контролює дані про температуру, які надсилаються цими мітками. Дані про температуру кодуються у відповідь мітки та надсилаються на зчитувач.

У системі використовується протокол RTF (reader-talks-first), за яким зчитувач ініціює передачу даних перед отриманням відповіді від ключових міток. У цьому протоколі використовується амплітудна модуляція з кодуванням позиції імпульсу на каналі зв'язку "зчитувач-мітка". Індекс модуляції становить 10%, а передача даних відбувається за схемою імпульсного кодування 1 позиції з 256 можливих. Стартовий імпульс 9,44 мкс сигналізує демодулятору RFID-мітки про те, що передається нова послідовність даних. Кожен біт даних має тривалість 18,88 мкс, а вся послідовність команд, що складається з 8 байтів, передається за 38,7 мс. Резонансна частота розраховується наступним чином:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}},$$

L_1 і C_1 утворюють резонансний контур бака для передачі енергії з резонансною частотою f_0 , зазвичай 13,56 МГц для високочастотних RFID.

Індуктивна напруга антени мітки прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Ψ через котушки, яка може бути виражена як:

$$v_2 = \frac{d\Psi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \left[\int B \cdot dS \right],$$

де N_2 та N_1 – кількість витків у котушках мітки та зчитувача відповідно, Φ – магнітний потік через кожну котушку, B – магнітна індукція, а S – площа котушки. Для кута між B і S , що дорівнює 0° , v_2 можна обчислити як:

$$v_2 = \left[\frac{\mu_0 N_1 N_2 a^2 S}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt},$$

де M – коефіцієнт взаємної індуктивності. Напруга може бути оброблена за допомогою схеми випрямляча та регулятора для живлення мікросхеми RFID і модуля датчика температури для збору та передачі даних.

Температурні сенсори відіграють вирішальну роль у підтриманні оптимальних умов, підвищенні ефективності та забезпеченні надійності різноманітних систем, зокрема і систем опалення.

На рисунку 2 зображено попередньо підключена та водонепроникна версія сенсора DS18B20. [9]. Вона особливо зручна у випадках, коли потрібно вимірювати температуру на відстані або в умовах підвищеної вологості. Сам сенсор здатний працювати при температурах до 125°C .

Завдяки цифровому інтерфейсу ми не втрачаємо сигналу, навіть при використанні на великих відстанях. Ці цифрові температурні сенсори з однією лінією зв'язку досить точні ($\pm 0,5^\circ\text{C}$ – у більшості діапазону) та можуть забезпечити до 12-бітної точності завдяки вбудованому в сенсор цифро-аналоговому перетворювачу.

Даний сенсор чудово працює з будь-яким мікроконтролером, що використовує лише один цифровий пін, і, навіть, дозволяють підключати декілька сенсорів до одного виводу. Кожен сенсор має унікальний 64-бітний ідентифікатор, який записано на заводі для його розпізнавання. Працюють від живлення в діапазоні від 3.0 до 5.0 В.

Сенсор DS18B20 сумісний з Arduino (5 В) та ESP8266 (3,3 В). Однією з великих переваг цього пристрою є можливість монтажу на значній відстані від плати мікроконтролера – щонайменше до 20 метрів.

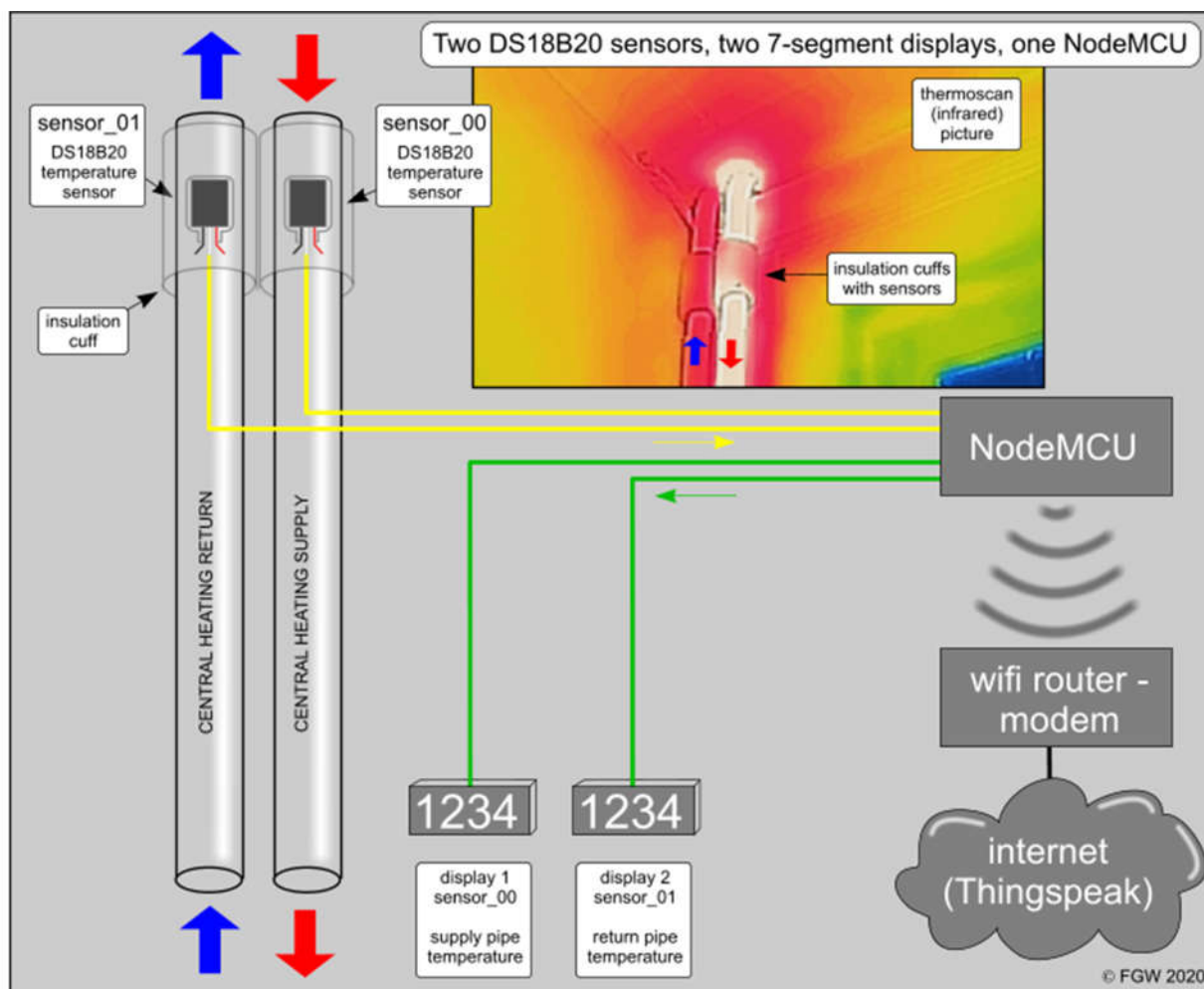


Рисунок 2 – Схема підключення сенсора DS18B20

Інші сенсори, наприклад ті, що використовують протокол I2C, мають бути встановлені значно ближче до мікроконтролера. Ця дальність з'єднання є критично важливою, оскільки сенсори встановлюються на трубах, розташованих на певній відстані від плати NodeMCU та постійного джерела живлення.

Фактично, живлення 5 В DC (через micro USB роз'єм) для NodeMCU подається від Wi-Fi роутера, що дозволяє уникнути використання окремої розетки 230 В AC та адаптера живлення.

Відстань у 5 метрів між температурними сенсорами та мікроконтролером перекривається за допомогою трижильного кабелю: живлення, дані та земля (GND). На обох кінцях лінії даних встановлені підтягуючі резистори: 6,8 кОм на боці DS18B20 та 4,7 кОм на боці NodeMCU. Значення резистора 6,8 кОм було підібране емпірично.

Для роботи сенсора DS18B20 у звичайному режимі необхідне трипровідне або трипровідне з'єднання [10]. У цьому режимі вивід VCC датчика підключається до джерела живлення 5 В.

На рисунку 3 показано схему підключення сенсора DS18B20 до Arduino у звичайному режимі.

Отже, термістори NTC (з негативним температурним коефіцієнтом), так і температурні сенсори DS18B20 можуть бути обрані для різних потреб залежно від їхніх технічних.

Висновки

У статті здійснено комплексний аналіз сучасних сенсорних технологій, що використовуються в автономних системах опалення, з акцентом на температурні сенсори, їх точність, надійність і вплив на ефективність теплових процесів. Доведено, що

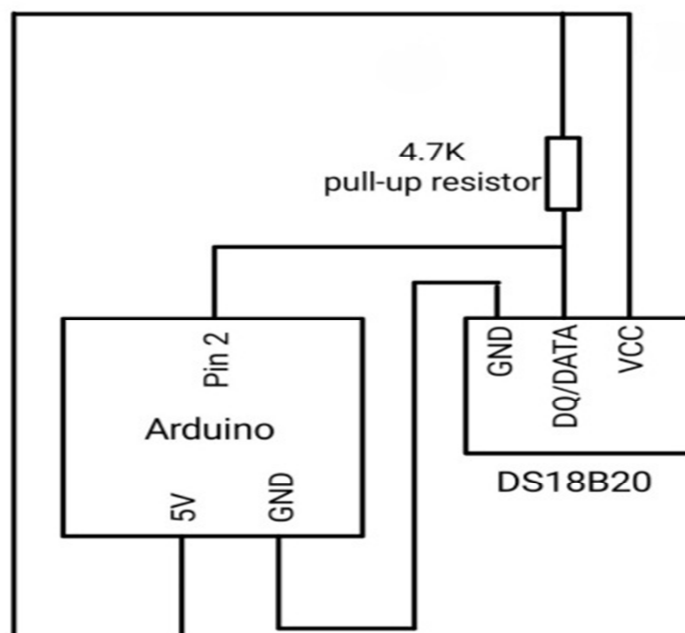


Рисунок 3 – Схема підключення сенсора DS18B20 до Arduino

вибір і правильне застосування сенсорів (зокрема термісторів NTC, ТССТ-модулів, цифрових сенсорів DS18B20 та RFID-технологій), є критичним для забезпечення стабільної роботи котлів, точного контролю температури та своєчасного реагування на зміну теплових умов.

Особливу увагу приділено аналізу проблем, пов'язаних з деградацією термісторів, утворенням накипу на теплообмінниках та точністю вимірювань у двоконтурних системах. Продемонстровано доцільність використання бездротових систем моніторингу з дистанційним керуванням температурою за допомогою мобільних застосунків, що відкриває нові можливості для автоматизації опалення в житловому секторі.

Отримані результати вказують на те, що впровадження інтелектуальних сенсорних рішень дозволяє не лише покращити контроль за тепловими параметрами, а й оптимізувати енергоспоживання, підвищити безпеку експлуатації та продовжити ресурс систем опалення. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на адаптивних алгоритмах обробки сенсорних даних, моделюванні теплових навантажень і інтеграції сенсорів в розумні енергосистеми.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Bennett G., Watson S., Wilson, Oreszczyn T. Domestic heating with compact combination hybrids (gas boiler and heat pump): A simple English stock model of different heating system scenarios. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021. Vol. 43. Issue 2. P. 143-159. doi:[10.1177/01436244211040449](https://doi.org/10.1177/01436244211040449)
2. Snurnykov D., Krasnikov I., Babichenko A. Study of a District Heating System Water Boiler as a Object of Control. *Integrated Technologies and Energy Saving*. 2023. Vol. 1. P. 51-61. doi:[10.20998/2078-5364.2023.1.06](https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.1.06)
3. Bennett G., Elwell C. Effect of boiler oversizing on efficiency: a dynamic simulation study. *Building Serv Eng Res Technol*. 2020. №41(6). P. 709–726. doi: [10.1177/0143624420927352](https://doi.org/10.1177/0143624420927352)

4. Kazi S. Fouling and fouling mitigation of calcium compounds on heat exchangers by novel colloids and surface modifications. *Reviews in Chemical Engineering*. 2020. Vol. 36. Issue 6. P. 653-685. doi: [10.1515/revce-2017-0076](https://doi.org/10.1515/revce-2017-0076)
5. Anastase A., Tarlea G. Thermistor NTC Sensor Inaccuracies Impact On The HVAC/R Compressor Performance. *CLIMA 2022 Conference*. 2022. doi:[10.34641/clima.2022.110](https://doi.org/10.34641/clima.2022.110)
6. Bodić M., Aleksić S., Rajs V., Damnjanovic M., Kisic M. Thermally Coupled NTC Chip Thermistors: Their Properties and Applications. *Sensors*. 2024. Vol. 24. 3547 p. doi:[10.3390/s24113547](https://doi.org/10.3390/s24113547)
7. Preradovic S., Karmakar N.C. RFID tag as a sensor: A review on RFID sensor networks. *IEEE Sensors Journal*. 2010. Vol.10(11). P. 1743–1756. doi:[10.1109/JSEN.2010.2051437](https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2051437)
8. Liu Y., Wang J., Zhang L. RFID integration into a low-power sensor platform for temperature monitoring. *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Sensor Networks*. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/319347409_RFID_Integration_into_a_Low_Power_Sensor_Platform
9. The Solar Universe. Waterproof version of the DS18B20 sensor: digital accuracy and Arduino compatibility. URL: <https://thesolaruniverse.wordpress.com/2020/02/01/1019>
10. ElProCus. (n.d.). DS18B20 Waterproof Temperature Sensor – Working and Its Applications. 2025. URL: <https://www.elprocus.com/ds18b20-waterproof-temperature-sensor>

MODERN SENSOR TECHNOLOGIES IN AUTONOMOUS HEATING SYSTEMS: REVIEW AND APPLICATION PROSPECTS

Nahirnyi V. I.

Student

Lviv Polytechnic National University

76013, S.Bandery St., 12, Lviv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0005-7825-8858>

e-mail: vasyli.nahirnyi@lpnu.ua

Abstract. The article presents a comprehensive review of modern sensor technologies used in autonomous heating systems, particularly in dual-circuit configurations that combine heating and domestic hot water supply circuits. The main types of temperature sensors – thermistors, TCCT thermocouples, digital DS18B20 sensors, and RFID sensors used for remote parameter acquisition – are examined. Their design features, operating principles, measurement ranges, and the influence of sensor accuracy on the overall energy efficiency of heating systems are analyzed. Special attention is paid to improving the operational stability of heat exchangers and boilers, which directly depend on the precision and response speed of temperature control. The study also addresses issues related to sensor degradation caused by high-temperature exposure, scale formation on heat exchange surfaces, and the impact of humidity and electromagnetic interference on measurement reliability. An analytical overview of error compensation methods, sensor calibration techniques, and data filtering algorithms is provided. The article explores the potential for implementing remote temperature monitoring and control systems based on wireless technologies, including Wi-Fi, Bluetooth, and ZigBee protocols. These solutions enable centralized supervision of boiler and heat exchanger performance, facilitate fault prediction, and enhance overall system reliability. Practical approaches are proposed to improve measurement accuracy and optimize thermal process control through the use of intelligent sensor devices capable of self-diagnosis and adaptation to changing operating conditions. The research is grounded in the analysis of sensor technical specifications, heat transfer models, and the functional principles of digital control systems. The obtained results have practical significance for the development of energy-efficient, reliable, and adaptive autonomous heating systems for residential buildings, aimed at reducing energy consumption and enhancing user comfort.

Keywords: dual-circuit heating system, temperature control, thermistor, TCCT, RFID sensors, DS18B20, thermal monitoring.