

Програмне управління роботою побутових водогрійних пристроїв (бойлерів)

Павло Компанієць, студент¹ (ORCID: 0009-0005-3296-5696)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

У проведеному дослідженні розроблено систему програмного управління побутового бойлера, впровадження якої дозволить гнучко керувати графіком його роботи. В основі розробленого пристрою керування використано мікроконтролер ESP-32, що дозволило реалізувати бездротовий канал доступу та розробити Web-інтерфейс користувача. Розроблене програмне забезпечення ґрунтується на математичній моделі процесу споживання води від бойлера, яка в подальшому може бути використана для оптимізації його режимів роботи.

Ключові слова: автоматизація, гаряче водопостачання, бойлер, оптимізація споживання, вимірювання, математичне моделювання, програмне управління, мікроконтролер, Internet речей, кіберфізична система.

1. ВСТУП

Сучасний стан енергетичної системи України характеризується нестабільністю електропостачання з дефіцитом 2-6 ГВт годин у піковий період, що призводить до планових і аварійних відключень та негативно впливає на промисловість і життя громадян.

Одним із способів підвищення стабільності енергосистеми є перенесення споживання електроенергії на нічні години. Слід відзначити, що далеко не всі споживачі дозволяють реалізувати таке зміщення навантаження. Проте, наприклад, у побутовому секторі є достатньо велика кількість приладів, які можуть працювати в нічні години без втрати комфорту. До їхнього переліку, безумовно, можна віднести побутові електричні водонагрівачі – бойлери. Моделі багатьох сучасних бойлерів обладнані системами управління, що дозволяють реалізувати їх роботу за розкладом. У той же час, переважна кількість бойлерів, що знаходяться в експлуатації подібних функцій не мають. Тому розробка систем програмного управління для побутових бойлерів є актуальною та своєчасною задачею.

2. МЕТА

Бойлери займають значну частку побутового споживання електроенергії. Їхня потужність становить 1,5-2 кВт, а час роботи може досягати 2-3 годин залежно від температури та об'єму води. Наявність ефективної теплоізоляції та достатньо великі об'єми сучасних бойлерів роблять їх перспективними об'єктами для програмного управління.

Метою даного дослідження є розробка системи програмного керування бойлером з безпроводним каналом передачі даних.

3. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Забезпечення ефективного функціонування енергетичної галузі вимагає комплексного підходу до вирішення завдань модернізації інфраструктури, превентивних заходів щодо попередження аварійних ситуацій та оперативного усунення їх наслідків. Водночас

першочерговими є ініціативи, спрямовані на зміцнення стійкості та стабільності роботи енергосистеми.

Серед найбільш ефективних рішень слід відзначити розвиток розподіленої генерації на основі мікромереж з відновлюваними джерелами енергії [1], що дозволяє створити локальні енергетичні вузли, здатні функціонувати автономно та забезпечувати додаткову стабільність загальної системи. Не менш важливим є процес інтеграції з європейською мережею ENTSO-E [2], який відкриває можливості для ефективного керування перетоками електричної енергії між різними частинами об'єднаної мережі та забезпечує додаткові резерви потужності в критичні періоди.

Значний потенціал для стабілізації енергосистеми має впровадження сучасних механізмів управління попитом [3], що базуються на інтелектуальних алгоритмах оптимізації споживання через перенесення навантаження на непікові години, забезпечуючи таким чином більш рівномірний розподіл енергетичних потоків протягом доби.

Особливої уваги заслуговує інноваційна модель адаптивного прогнозного управління навантаженням на прикладі побутових водонагрівачів [4], яка передбачає динамічне керування температурними режимами бойлерів з метою оптимального перенесення споживання на позапікові періоди, включаючи нічні години, без будь-якої шкоди для комфорту користувачів. Цей підхід демонструє практичну можливість залучення побутового сектору до процесів балансування енергосистеми через розумне управління великими групами енергоспоживчих пристроїв.

4. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Система програмного керування бойлером розроблена з дотриманням вимог мінімальної вартості обладнання, мінімального втручання в електричну схему, можливості вибору режиму роботи та прив'язки до астрономічного часу. У складі системи використано мікроконтролер ESP-32 з інтегрованими модулями Wi-Fi та Bluetooth. Структурна схема розробленої системи представлена на рис. 1.

Для реалізації програмного управління роботою бойлера розроблена його математична модель. У моделі розглядається система побутового гарячого водопостачання з електричним бойлером і змішувачем. Вода в бойлері нагрівається до температури $T_{го}$, після чого здійснюється лише споживання без додаткового підігріву.



Рисунок 1. Структурна схема системи програмного управління побутовим електричним бойлером

У змішувачі відбувається змішування холодної води з температурою T_x з гарячою водою з бойлера з температурою $T_{Гi}$. Відбір води здійснюється порціями з індексом «i», де значення $i=0$ відповідає початковим умовам. На рисунку 2 представлено структурну схему постачання гарячої води.

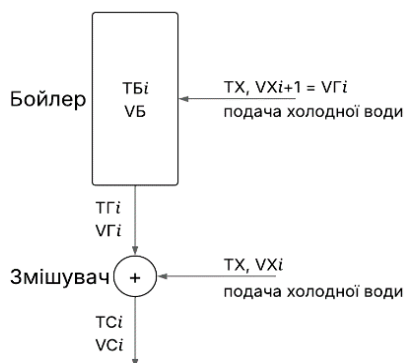


Рисунок 2. Структурна схема постачання гарячої води

Для опису процесу використовується закон збереження речовини:

$$\Delta V_{ci} = \Delta V_{Гi} + \Delta V_{Xi}, \quad (1)$$

де ΔV_{ci} - об'єм спожитої води, $\Delta V_{Гi}$ - об'єм гарячої води з бойлера, ΔV_{Xi} - об'єм холодної води з мережі.

Тепловий баланс змішувача описується рівнянням:

$$\Delta V_{Гi} = \frac{(T_c - T_x)}{(T_{Гi} - T_c)} \cdot \Delta V_{Xi}. \quad (2)$$

Рівняння дозволяє визначити необхідний об'єм гарячої води для отримання заданої температури споживання. Після відбору гарячої води з бойлера туди додається така ж кількість холодної води, і нове значення температури визначається з рівняння теплового балансу:

$$T_{Гi+1} = \frac{(V_{\delta} - \Delta V_{Гi}) \cdot T_{Гi} + \Delta V_{Xi} \cdot T_x}{V_{\delta}}. \quad (3)$$

Запропонована модель не враховує втрати тепла через стінки бойлера та охолодження води в трубах після споживання. Теплоізоляція бойлера і трубопроводу, а також мінімізація відстані від бойлера до точок споживання є основними напрямками підвищення ефективності системи.

Взаємодія користувача з системою здійснюється через web-інтерфейс, реалізований засобами браузера (рис. 3).



Рисунок 3. Інтерфейс веб-застосунку

Програмне забезпечення має клієнт-серверну архітектуру. Серверна частина виконується на контролері ESP-32 і забезпечує ініціалізацію Wi-Fi модулю, синхронізацію часу через протокол NTP, організацію WebSocket зв'язку, обробку HTTP-запитів та управління бойлером відповідно до заданого розкладу.

Клієнтська частина представлена веб-інтерфейсом як Single Page Application з трьома основними вкладками: Schedule, Statistics і Settings. Інтерфейс реалізує подійну модель реакції на дії користувача з формуванням запитів у форматі JSON. Обмін даними між клієнтською та серверною частинами відбувається по безпроводному каналу з використанням Wi-Fi модулю контролера.

Штатна автоматика бойлера продовжує виконувати функції контролю температури води, в той час як силова частина пристрою забезпечує підключення бойлера до електромережі відповідно до обраного графіку роботи.

5. ВИСНОВОК

Практичне впровадження подібних систем програмного управління сприятиме підвищенню енергоефективності житлових та комерційних об'єктів та покращенню стабільності роботи електромереж загалом. Результати дослідження можуть стати основою для створення комплексних кіберфізичних систем в житлово-комунальному секторі.

Список літератури

- [1] Kostenko G., Zaporozhietz A. Enhancing of the Power System Resilience Through the Application of Micro Power Systems (microgrid) with Renewable Distributed Generation. *System Research in Energy*. 2023. №3 (74). С. 25-38
- [2] Botterud A., Levin T., Koritarov V. Pumped Storage Hydropower Benefits for Grid Reliability and Integration of Variable Renewable Energy. *Argonne National Lab*. 2014
- [3] Assad U. et al., Smart Grid, Demand Response and Optimization: A Critical Review of Computational Methods Energies. 2022, 15(6). URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2003>
- [4] Conte et al., Demand response by aggregates of domestic water heaters with adaptive model predictive control. (Preprint Cornell University) URL: <https://arxiv.org/abs/2307.02218>

Робота виконана під керівництвом канд. тех. наук, доц. Вадима Луценка