

**Луценко Вадим Юрійович**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0002-9727-5574>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Компанієць Павло Олегович**

Студент магістратури кафедри автоматизації технологічних процесів

<https://orcid.org/0009-0005-3296-5696>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Волчков Максим Володимирович**

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0001-9427-0754>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Вольтерс Андрій Олександрович**

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0002-3842-8198>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Самойленко Микола Іванович**

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0001-9410-6962>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

## **ПРОГРАМНЕ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ПОБУТОВИХ ВОДОГРІЙНИХ ПРИСТРОЇВ (БОЙЛЕРІВ)**

**Анотація.** У дослідженні обґрунтовано, що одним із перспективних підходів у вирішенні задач підвищення якості, стабільності та надійності функціонування вітчизняної енергосистеми є управління попитом на електроенергію. Метою такого управління є перерозподіл навантаження на енергомережі з урахуванням можливостей генераційних потужностей. Встановлено, що хоча не всі види навантаження можуть бути перенесені в інші часові зони без втрати показників, для побутових водогрійних бойлерів така можливість існує. Актуальність та своєчасність розробки систем для їх програмного управління визначаються відносно високою середньою потужністю нагрівального елементу (близько 2 кВт) та масовим застосуванням. Розроблено математичну модель споживання гарячої води з бойлера. Аналіз результатів моделювання переконливо свідчить про доцільність впровадження програмного управління побутовим бойлером. Запропоновано модель, що може скласти основу алгоритмічного забезпечення таких систем. Наступним етапом стала розробка системи управління роботою побутового бойлера. Запропоновано пристрій на базі мікроконтролера ESP32, який має Web-інтерфейс користувача, а його програмне забезпечення відповідає клієнт-серверній архітектурі. Такий підхід дозволив вирішити задачу синхронізації роботи бойлера з астрономічним часом та реалізувати інтерфейс користувача засобами Web-браузера без додаткових апаратних пристроїв. Розроблена система управління не впливає на роботу штатної автоматики бойлера від виробника, яка забезпечує виконання базової функції підтримання сталої температури води. Програмне забезпечення пристрою складається з клієнтської та серверної частин. Інформаційний обмін між ними здійснюється по бездротовому каналу із застосуванням Wi-Fi модулю, що входить до складу контролера, за допомогою повідомлень у форматі JSON. Алгоритм обміну передбачає передачу команд на сервер та отримання від нього необхідних даних для відображення в браузері.

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

## Постановка проблеми

Стан сучасної енергетичної системи України часто характеризується нестабільністю та значними коливаннями у постачанні електроенергії. Статистичні дані [1] демонструють, що дефіцит електроенергії в піковий період споживання може сягати від 2–6 ГВт-годин (залежно від пори року). Як наслідок, мають місце планові та аварійні відключення, які мають безпосередній вплив на функціонування промисловості, роботу бізнесу та якість життя громадян.

Аналіз поточної ситуації у вітчизняній енергетиці дозволяє виділити ряд внутрішніх та зовнішніх факторів, що мають вирішальний вплив на її стан.

- *Руйнування енергетичної інфраструктури внаслідок бойових дій та їх наслідків.* Станом на сьогодні було зруйновано або окуповано близько 42% генеруючих потужностей, включаючи 87% вугільних ТЕЦ та Запорізьку АЕС потужністю 6 ГВт. Також пошкоджено 2,3 ГВт потужностей, що генерували гідроелектростанції, та близько 3,9 ГВт потужностей сонячних та вітрових електростанцій.

- *Зношеність інфраструктури.* Значна кількість ліній електропередач та трансформаторних підстанцій потребують модернізації або повної заміни. Зношеність обладнання часто є причиною аварій та втрат.

- *Природні фактори.* Сезонні коливання температури, опади, шквальні вітри та ожеледиця регулярно спричиняють пошкодження повітряних ліній електропередач.

- *Скорочення добування таких енергоресурсів як вугілля та природний газ, що використовуються для теплової генерації, обмежує можливості маневрування потужностями теплоелектростанцій в години пікових навантажень [2; 3].* Відзначимо, що накопичення достатніх обсягів палива ускладнюється логістичними проблемами та фінансовими обмеженнями.

Відзначимо, що приведений перелік не є вичерпним, проте навіть часткове зменшення негативного впливу окремих факторів мало б суттєве значення для підвищення енергонезалежності та стабільної роботи енергосистеми.

Безумовно, що перераховані проблеми носять комплексний характер, а їх вирішення потребує значних ресурсів та коштів. Проте можна сформулювати ряд відносно простих пропозицій, що будуть позитивно впливати на стан вітчизняної енергосистеми. Одним із таких рішень може бути «розумне споживання» електроенергії, що передбачає споживання електроенергії в періоди між добовими піками споживання. Такий підхід стимулюється економічно, шляхом запровадження

знижених нічних тарифів. У той же час, наприклад, у побутовому секторі є відносно невелика частка приладів, що дозволяють відтермінувати їх увімкнення. Таким чином, проблема «нічного споживання» вирішена частково і потребує розробки недорогих пристроїв, що дозволили б здійснювати підключення споживачів до електромережі за певним розкладом, знижуючи таким чином її навантаження.

## Мета дослідження

Значну частину у побутовому споживанні електроенергії займають пристрої для нагрівання води – бойлери. У більшості випадків потужність нагрівальних елементів цих пристроїв складає  $1,5 \div 2$  кВт, а час роботи залежить від заданої температури та об'єму води, що потребує нагріву, і може сягати 2–3 годин. 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 бездротовим каналом передачі даних.

## Аналіз останніх досліджень

Ефективне управління енергетичною галуззю потребує постійного вирішення задач, пов'язаних з модернізацією матеріальної бази, запобіганням аварійних ситуацій та швидким реагуванням на їх появу й оперативною ліквідацією наслідків. Проте пріоритетним напрямком залишаються заходи, спрямовані на підвищення стійкості та стабільності функціонування енергосистеми.

Одним із перспективних способів вирішення проблеми стабільності енергоживлення є використання мікромереж. У дослідженні [3] пропонується використання мікромереж, що містять відновлювані джерела енергії. Автори обґрунтовують доцільність розвитку розподіленої генерації, яка ґрунтується на локальних мережах, що, на їх думку, повинно мати суттєвий позитивний вплив на роботу всієї енергосистеми.

У роботі [4] досліджується місце та роль теплових електростанцій у балансуванні процесів енергоспоживання. Автори пропонують ряд заходів, спрямованих на модернізацію існуючих ТЕС, в тому числі й використання альтернативних видів палива для підвищення можливостей маневрування їхніми потужностями.

Одним із способів підвищення стійкості роботи енергосистеми є її підключення (або об'єднання) з енергосистемами інших країн. Дослідженню питання забезпечення стійкості енергосистем в умовах їх інтеграції з європейською мережею ENTSO-E присвячене дослідження [5]. Особлива увага приділяється аналізу методів верифікації динамічних

моделей енергосистем та дослідженню стійкості за частотою, що, на думку авторів, забезпечить ефективне керування потоками електричної енергії між окремими частинами об'єднаної мережі.

У роботі [6] автори досліджують проблему акумулювання електроенергії та можливі варіанти її вирішення за умов зростання частки відновлюваних джерел енергії. Інтеграція таких джерел до загальної енергосистеми сприятиме підвищенню стабільності останньої, оскільки з'являються додаткові маневрові потужності, що дозволять згладжувати коливання, пов'язані зі споживанням, та зменшити навантаження на традиційні джерела енергії.

У роботі [7] наведено результати дослідження механізмів управління попитом, ефективне застосування яких ґрунтується на балансі між виробництвом і споживанням електроенергії. Автори пропонують ряд інтелектуальних алгоритмів, спрямованих на оптимізацію споживання шляхом переносу навантаження на непікові години, що забезпечить підвищення стабільності роботи енергомережі.

У роботі [8] обговорюється модель адаптивного прогнозного управління навантаженням на прикладі побутових водонагрівачів. Автори пропонують динамічно керувати температурними режимами бойлерів, з метою перенесення споживання на позапікові періоди (включаючи нічні години) без шкоди для комфорту користувачів.

### Викладення основного матеріалу

Розробка системи програмного керування бойлером ґрунтується на моделі споживання гарячої води. Вихідними положеннями для розробки такої моделі будуть наступні припущення.

Будемо розглядати систему побутового гарячого водопостачання, до складу якої входить електричний бойлер і змішувач, після якого здійснюється відбір гарячої води.

Розглядається випадок, коли вода в бойлері нагріта до температури –  $T_{г0}$  і потім здійснюється лише її споживання без додаткового підігріву.

У змішувачі відбувається змішування холодної води з мережі з температурою  $T_x$  та гарячої води, що подається з бойлера. Позначимо поточне значення температури води в бойлері –  $T_{гi}$ . Будемо розглядати випадок, коли відбір води споживачем здійснюється порціями, для позначення яких використовується індекс «i». Причому значення  $i=0$  відповідає початковим умовам, коли вода в бойлері нагріта до номінального значення температури.

Для споживання об'єму води  $\Delta V_{гi}$  з температурою  $T_c$  до змішувача необхідно подати певну кількість гарячої води з бойлера (позначимо цей об'єм як  $\Delta V_{гi}$ ) та певну кількість холодної води з мережі –  $\Delta V_{xi}$ . Тоді закон збереження

речовини для процесу змішування можна представити у вигляді:

$$\Delta V_{ci} = \Delta V_{гi} + \Delta V_{xi}. \quad (1)$$

На рис. 1 представлено структурну схему постачання гарячої води.

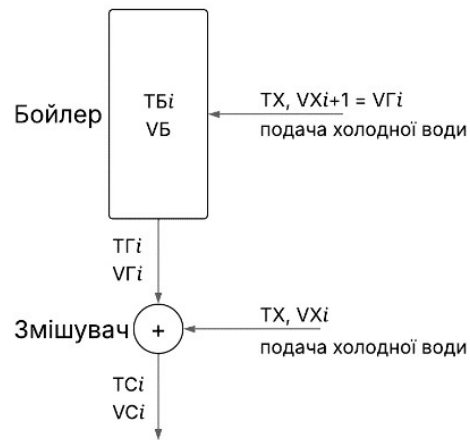


Рисунок 1 – Структурна схема постачання гарячої води

Будемо вважати, що в процесі відбору з бойлера об'єму води  $\Delta V_{гi}$  його температура не змінюється, а на момент наступного відбору в бойлері встановлюється стан теплової рівноваги, який характеризується новим значенням температури. Рівняння теплового балансу для змішувача можна представити таким чином:

$$cm_{гi}(T_{гi} - T_c) = cm_{xi}(T_c - T_x), \quad (2)$$

де  $c$  – питома теплоємність води;  $m_{гi}$  – маса гарячої води, що подається в змішувач від бойлера;  $m_{xi}$  – маса холодної води, що подається в змішувач з мережі холодного водопостачання.

Враховуючи що маса води лінійно залежить від її об'єму

$$m = \rho \cdot V,$$

де  $\rho$  – густина води.

З рівняння (1) визначимо об'єм гарячої води, що поступає в змішувач з бойлера:

$$\Delta V_{гi}(T_{гi} - T_c) = \Delta V_{xi}(T_c - T_x), \quad (3)$$

або:

$$\Delta V_{гi} = \frac{(T_c - T_x)}{(T_{гi} - T_c)} \cdot \Delta V_{xi}. \quad (4)$$

Рівняння (1) та (4) описують процес змішування води в змішувачі, причому рівняння (4) представляє собою закон збереження теплової енергії для змішувача, в той час як (1) є законом збереження маси рідини в процесі змішування.

Після відбору з бойлера гарячої води  $\Delta V_{гi}$  туди добавляється така ж кількість холодної води з мережі, цей процес вже буде відповідати наступному циклу (етапу) споживання:

$$\Delta V_{гi} = \Delta V_{xi+1}. \quad (5)$$

Після змішування води, що залишилася в бойлері з попереднього етапу з водою з мережі, нове значення температури води можна визначити з рівняння теплового балансу:

$$(V_6 - \Delta V_{Gi}) \cdot (T_{Gi} - T_{Gi+1}) = \Delta V_{xi} \cdot (T_{Gi} - T_x), (6)$$

де  $V_6$  – об'єм бойлера, або:

$$T_{Gi+1} = \frac{(V_6 - \Delta V_{Gi}) \cdot T_{Gi} + \Delta V_{xi} \cdot T_x}{V_6} \quad (7)$$

Рівняння (1), (4) та (7) представляють собою математичну модель процесу споживання гарячої води з бойлера, а їх сумісний розв'язок дозволяє встановити або залежність температури води в бойлері від об'єму спожитої води, або, наприклад, визначити об'єм бойлера необхідний для споживання заданої кількості води відповідної температури.

На рис. 2 представлено залежності температури води в бойлері від відносного споживання, яке визначимо як

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta V_{Gi}}{V_6},$$

де  $\sum_{i=1}^k \Delta V_{Gi}$  кількість гарячої води, що була взята з бойлера за  $k$  разів для різних значень початкової температури води в бойлері  $T_{G0} = 85^\circ\text{C}; 75^\circ\text{C}; 55^\circ\text{C}$ .

Отримана залежність дозволяє зробити висновок, що за умови відбору з бойлера гарячої води об'ємом, рівним об'єму бойлера, температура води в бойлері буде на рівні  $\approx 50\%$  від початкового значення.

Відзначимо, що запропонована модель споживання гарячої води не враховує втрат тепла через стінки бойлера. Слід відзначити, що чим більший об'єм бойлера, тим більша площа його поверхні і тим більшими будуть втрати тепла через неї.

Ще один вид втрат теплової енергії пов'язаний із гарячою водою, що залишається в трубі після споживання. З плином часу ця вода охолоджується і при наступному споживанні з бойлера буде взято додатковий об'єм води, що буде компенсувати ці втрати.

Теплоізоляція бойлера, трубопроводу та мінімізація відстані від бойлера до точок споживання гарячої води є основними напрямками підвищення ефективності автономної системи гарячого водопостачання.

У той же час отримані результати свідчать про перспективність реалізації програмного керування роботою бойлера, з метою зменшення навантаження на електромережу у години пікових навантажень та із забезпеченням достатнього рівня комфорту для споживача.

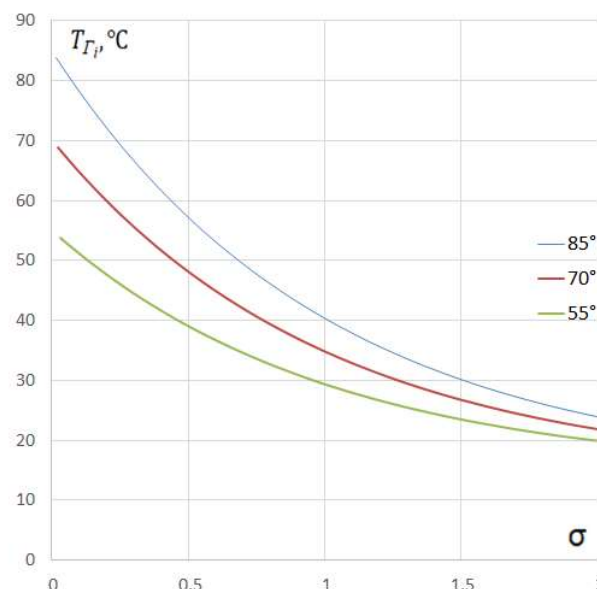


Рисунок 2 – Графік зміни температури гарячої води залежно від відносного відбору з бойлера

### Розробка системи програмного керування бойлером

Розробку системи програмного керування роботою бойлера проведено з дотриманням наступних вимог:

- Мінімальна вартість обладнання. Цей критерій обумовлений наявністю бойлера у споживача та відсутністю мотивації для його заміни на більш нову та функціональну модель.
- Мінімальне втручання в електричну схему бойлера, що обумовлено вимогами електро- та пожежної безпеки.
- Можливість вибору роботи з програмним управлінням або у передбаченому виробником штатному режимі з використанням встановленої автоматики.
- Програмне керування повинно здійснюватися з прив'язкою до астрономічного часу, що дозволить підключати бойлер до електричної мережі відповідно до встановленого користувачем графіку роботи.

Відповідно до зазначених вимог у складі системи програмного управління бойлером було використано мікроконтролер ESP32, основними перевагами якого є його низька вартість, наявність інтегрованих модулів Wi-Fi та Bluetooth, що розширює можливості його інтеграції в екосистему IoT-рішень.

Структурна схема розробленої системи представлена на рис. 3.

Взаємодія користувача з системою програмного керування роботою бойлера здійснюється за допомогою Web-інтерфейсу, що реалізується засобами Інтернет-браузера (рис. 4).



Рисунок 3 – Структурна схема системи програмного управління побутовим електричним бойлером



Рисунок 4 – Інтерфейс веб-застосунку

Контролер ESP32 виконує функції системоутворюючого обчислювального вузла. Він забезпечує створення та роботу бездротового каналу передачі даних, їх обробку та управління модулем реле, за допомогою якого відбувається підключення кола живлення бойлера до електричної мережі.

Програмне забезпечення системи має клієнт-серверну архітектуру.

Серверна частина програмного забезпечення виконується апаратними засобами контролера ESP32 і забезпечує вирішення ряду задач:

1. Ініціалізацію та налаштування Wi-Fi модулю в режимі одночасної роботи станції та точки доступу (STA+AP).

2. Синхронізацію внутрішнього часу системи з використанням протоколу NTP (Network Time Protocol).

3. Застосування технології WebSocket для організації повнодуплексного зв'язку між клієнтом та сервером.

4. Обробку HTTP-запитів від клієнта та реалізацію інтерфейсу користувача.

5. Управління роботою бойлером відповідно до заданого розкладу.

6. Створення архіву роботи бойлера.

На рис. 5 представлено блок-схему алгоритму роботи серверного програмного забезпечення.

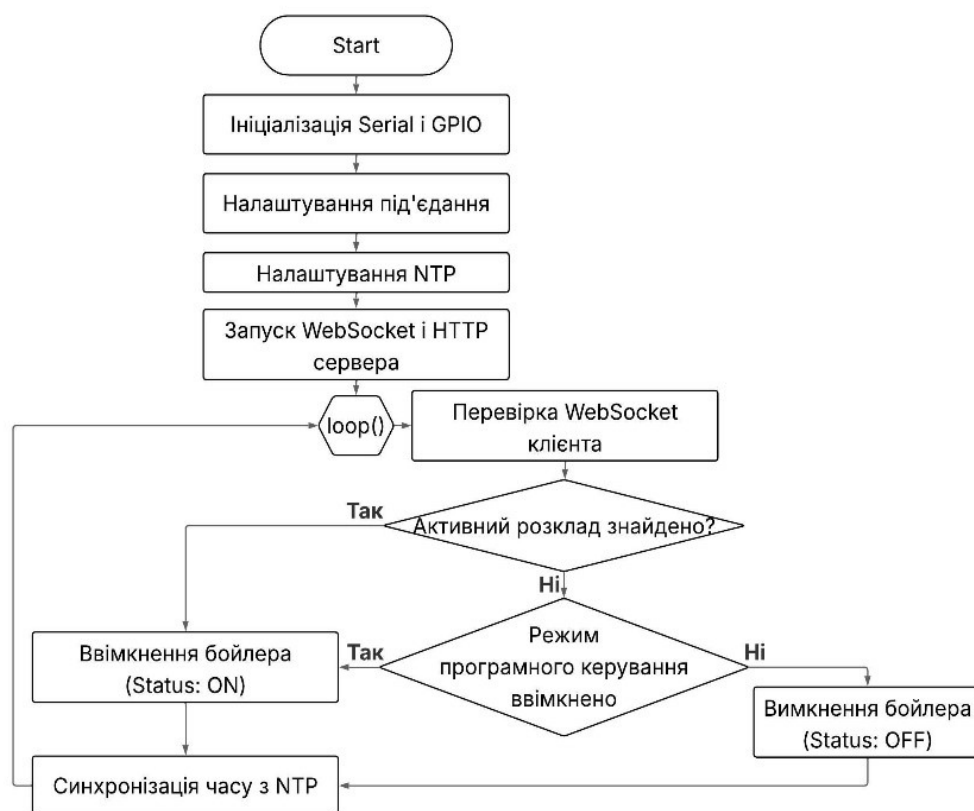


Рисунок 5 – Блок-схема серверного програмного забезпечення

Клієнтська частина представлена веб-інтерфейсом користувача, який реалізовано як Single Page Application і структуровано у вигляді трьох основних вкладок: Schedule, Statistics і Settings браузера (рис. 4).

Основний функціонал клієнтської частини включає можливість управління режимами роботи бойлера (базовий режим роботи з використанням встановленої виробником штатної автоматики та режим програмного керування за заданим користувачем розкладом). Також є можливість

задавати часові інтервали роботи бойлера, створюючи таким чином добові розклади роботи. У системі передбачено функцію видалення всіх записів у розкладі з обов'язковим підтвердженням через модальне вікно.

На вкладці «Statistics» у графічній формі виводиться інформація про роботу бойлера, в той час як на вкладці «Settings» здійснюються основні налаштування системи. Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення на стороні клієнта представлена на рис. 6.

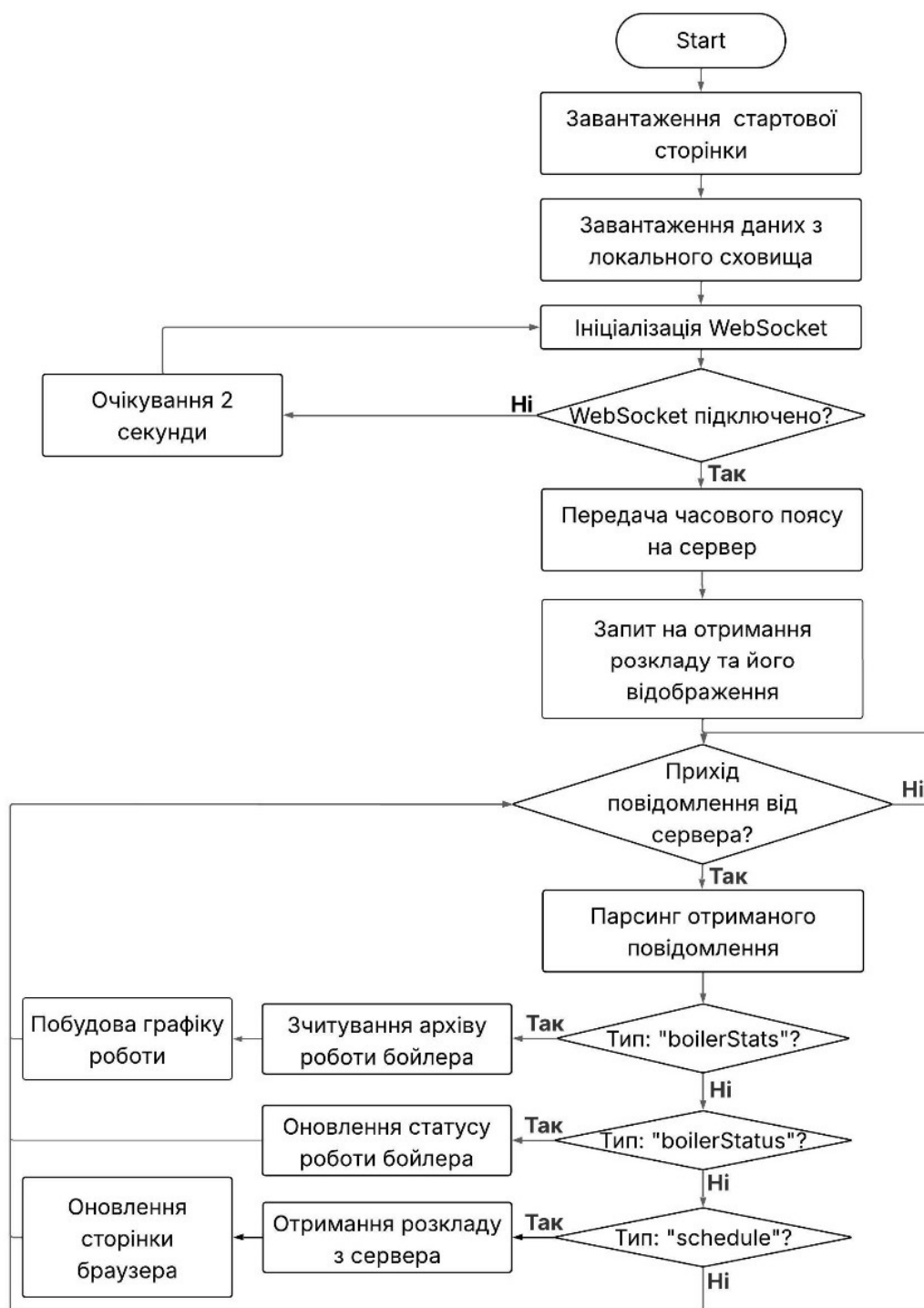


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення на стороні клієнта



Інтерфейс веб-застосунку реалізує подійну модель реакції на дії користувача, яка передбачає виклик програми-обробника при активації відповідного елементу графічного інтерфейсу. У ході розробки передбачено події, виникнення яких буде супроводжуватись формуванням та відправкою на сервер запитів на створення/видалення запису в розкладі, оновлення розкладу, отримання статистики роботи бойлера за вказаний період, вибору режиму роботи, вибору часового поясу, видалення усіх записів у розкладі. Крім того, розроблено додаткові події, обробники яких реалізують перемикання між вкладками, створення діалогового вікна для додавання нового запису в розклад, відображення в графічній формі даних про години роботи бойлера.

Обмін даними між клієнтською та серверною частинами відбувається за допомогою повідомлень у форматі JSON.

### Висновки

Ефективне функціонування вітчизняної енергосистеми потребує виконання комплексу заходів, спрямованих на підвищення якості, стабільності та надійності її роботи. Одним із перспективних напрямків у вирішенні цих задач є управління попитом на електроенергію, метою якого є перерозподіл навантаження на електромережі з урахуванням можливостей генераційних потужностей.

Відзначено, що не всі види навантаження, навіть у побутовому секторі, можуть бути перенесені в інші часові зони роботи без втрати економічних чи якісних показників. Проте, наприклад, для побутових водогрійних бойлерів така можливість присутня. Відносно висока середня потужність нагрівального елементу бойлера складає близько 2 кВт, а з урахуванням їх масового застосування актуальність та своєчасність розробки систем для їх програмного управління, без сумніву, є досить високою.

Результатом проведеного дослідження стала розробка математичної моделі споживання гарячої води з бойлера. Аналіз результатів моделювання переконливо свідчить про доцільність впровадження програмного управління побутовим бойлером, а запропонована модель може скласти основу алгоритмічного забезпечення таких систем.

Розробка системи управління роботою побутового бойлера стала наступним етапом, у ході якого запропоновано пристрій на базі мікроконтролера ESP32, що має Web-інтерфейс користувача, а його програмне забезпечення відповідає клієнт-серверній архітектурі. Такий підхід

дозволив без додаткових апаратних пристроїв вирішити задачу синхронізації роботи бойлера з астрономічним часом та реалізувати інтерфейс користувача засобами Web-браузера.

Відзначимо, що штатна автоматика бойлера від виробника продовжує виконувати свої функції автоматичного контролю температури води в бойлері. При цьому силова частина запропонованого пристрою, що представлена електромагнітним реле, забезпечує підключення бойлера до електромережі відповідно до обраного графіку роботи. Для випадків позачергового нагріву води передбачається можливість вимкнення режиму програмного управління та переходу до функціонування виключно на автоматичі від виробника.

Таким чином, проектування проводилось з дотриманням вимог безпеки, мінімального втручання чи змін в електричну схему бойлера. Ще одним важливим критерієм на всіх етапах розробки була мінімальна вартість системи, що забезпечить її доступність та масовість.

Програмне забезпечення розробленого пристрою представлено клієнтською та серверною частинами. Інформаційний обмін між ними здійснюється по бездротовому каналу із застосуванням Wi-Fi модулю, що входить до складу контролера.

Алгоритм інформаційного обміну передбачає передачу команд на сервер та отримання від нього необхідних даних для їх відображення в браузері. Обмін даними між серверною та клієнтською частинами відбувається за допомогою повідомлень у форматі JSON.

Запропонований підхід має значний потенціал для подальшого розвитку та масштабування. Зокрема, архітектуру системи можна модифікувати для автономного управління водогрійним обладнанням не лише в межах окремого приміщення, але й для цілої будівлі з множинними споживачами. Така розширена версія системи дозволить здійснювати інтелектуальний розподіл навантаження, мінімізуючи пікові навантаження на електромережу.

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 у житлово-комунальному секторі.

## Список літератури

1. Ігнат'єв С. Є. Енергетична система України: стан на кінець 2024 року та сценарії на 2025. *Нафта і Газ України*. 2024. URL: [https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna\\_systema\\_ukrainy\\_stan\\_na\\_kinets\\_2024\\_roku\\_ta\\_stsenarii\\_na\\_2025](https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna_systema_ukrainy_stan_na_kinets_2024_roku_ta_stsenarii_na_2025).
2. Гламаздин В. П., Мельник О. В., Тонкогосюк В. М. Аналіз роботи паливно-енергетичного комплексу України в умовах військової агресії та визначення перспективних напрямів розвитку. *Science, Technologies, Innovations*. 2023. № 2 (26). С. 11–19.
3. 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.
4. Кириленко О. І. та ін. Проблеми стійкості у сучасних енергетичних системах. *Computational problems of Electrical Engineering*. 2015. Вип. 5, № 1. С. 23–32.
5. Botterud A., Levin T., Koritarov V. Pumped Storage Hydropower Benefits for Grid Reliability and Integration of Variable Renewable Energy. Argonne National Lab. 2014.
6. Sioshansi F. Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed and Efficient Energy. Amsterdam: Academic Press. 2011. 584 с.
7. 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>.
8. Conte S. 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>.

Стаття надійшла до редколегії 10.09.2025

**Lutsenko Vadym**

PhD, associate professor, department of process automation,

<https://orcid.org/0000-0002-9727-5574>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Kompaniets Pavlo**

Master's student, department of automation of technological processes,

<https://orcid.org/0009-0005-3296-5696>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Volchikov Maksym**

Assistant, department of automation of technological processes,

<https://orcid.org/0000-0001-9427-0754>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Volters Andrii**

Assistant, department of automation of technological processes,

<https://orcid.org/0000-0002-3842-8198>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**Samoilenko Mykola**

Assistant, department of automation of technological processes,

<https://orcid.org/0000-0001-9410-6962>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

## SOFTWARE-BASED CONTROL OF DOMESTIC WATER HEATER OPERATION

**Abstract.** One of the promising approaches to improving the quality, stability, and reliability of the domestic power system is demand-side management (DSM), which aims to redistribute the load on the power grid while considering the capabilities of generation capacities. It should be noted that not all types of loads, even in the residential sector, can be shifted to other time zones without losing economic or quality indicators. However, for household water heaters, such a possibility exists. The relatively high average power of a water heater's heating element (about 2 kW) and their widespread use highlight the relevance and timeliness of developing systems for their automated control. In this study, a mathematical model of hot water consumption from a water heater was developed. The analysis of simulation results strongly supports the feasibility of implementing automated control for household water heaters, and the proposed model can serve as the basis for algorithmic support in such systems. The development of a control system for household water heaters was the next stage, during which a microcontroller-based device (ESP32) with a web-based user interface was proposed. Its software follows a client-server architecture. This approach eliminated the need for additional hardware, allowing synchronization of the water heater's operation with astronomical time and implementing a user interface via a web browser. Notably, the developed control system does not interfere with the manufacturer's built-in automation,



which ensures the basic function of maintaining a stable water temperature in the tank. The software of the developed device consists of client and server components, which communicate wirelessly via the controller's built-in Wi-Fi module. The data exchange algorithm involves sending commands to the server and receiving the necessary data for display in the browser. Communication between the server and client parts is carried out using JSON-formatted messages.

**Keywords:** automation; hot water supply; water heater; consumption optimization; measurement; mathematical modeling; software control; microcontroller; Internet of Things (IoT); cyber-physical system

#### References

1. Ihnatiev S. Ye. (2024). The Energy System of Ukraine: Status at the End of 2024 and Scenarios for 2025. *Oil and Gas of Ukraine*. URL: [https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna\\_systema\\_ukrainy\\_stan\\_na\\_kinets\\_2024\\_roku\\_ta\\_stsenarii\\_na\\_2025](https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna_systema_ukrainy_stan_na_kinets_2024_roku_ta_stsenarii_na_2025).
2. Hlamazdin V. P., Melnyk O. V., Tonkoholosiuk V. M. (2023). Analysis of the fuel and energy complex of Ukraine under military aggression and identification of promising development directions. *Science, Technologies, Innovations*, 2 (26), 11–19.
3. Kostenko G., Zaporozhetz A. (2023). Enhancing the power system resilience through the application of micro power systems (microgrids) with renewable distributed generation. *System Research in Energy*, 3 (74), 25–38.
4. Kyrilenko O. I. et al. (2015). Stability problems in modern power systems. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 5 (1), 23–32.
5. Botterud A., Levin T., Koritarov V. (2014). *Pumped storage hydropower benefits for grid reliability and integration of variable renewable energy*. Argonne National Lab. DOI: URL: <https://doi.org/10.2172/1165460>.
6. Sioshansi F. (2011). *Smart grid: Integrating renewable, distributed and efficient energy*. Amsterdam: Academic Press.
7. Assad U. et al. (2022). Smart grid, demand response and optimization: A critical review of computational methods. *Energies*, 15 (6). URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2003>.
8. Conte S. et al. (2023). Demand response by aggregates of domestic water heaters with adaptive model predictive control. (Preprint Cornell University). URL: <https://arxiv.org/abs/2307.02218>.

---

#### Посилання на публікацію

- APA     Lutsenko, V., Kompaniets, P., Volchkov, M., Volters, A., & Samoilenko, M. (2025). Software-based control of domestic water heater operation. *Management of Development of Complex Systems*, 63, 230–238, [dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2025.63.230-238](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.63.230-238).
- ДСТУ    Луценко В. Ю., Компанієць П. О., Волчков М. В., Вольтерс А. О., Самойленко М. І. Програмне управління роботою побутових водогрійних пристроїв (бойлерів). *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2025. № 63. С. 230 – 238, [dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2025.63.230-238](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.63.230-238).