

УДК 621.31:
535.215

ШАВЬОЛКІН О. О., ПІДГАЙНИЙ М. О.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ САМОСПОЖИВАННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ З РЕГУЛЮВАННЯМ СПОЖИВАННЯ

Мета. Удосконалення управління гібридної фотоелектричної системи житлового будинку з кондиціонером та регульованим електричним бойлером для нагрівання води шляхом підвищення ступеню використання енергії фотоелектричної батареї на споживання, розвиток принципів реалізації системи управління енергоспоживанням з використанням прогнозу.

Методика. Аналіз можливостей застосування кондиціонера при різних температурах повітря та генерації фотоелектричної батареї за статистичними даними. Аналіз температурних режимів бойлера з урахуванням енергоспоживання кондиціонера та характеру зміни його потужності у часі. Використання комп'ютерного моделювання для оцінювання результатів.

Результати. Розроблено структуру блоку регулювання потужності бойлера з вирівнюванням споживання в часі та алгоритм управління температурним режимом бойлера за прогнозом генерації фотоелектричної батареї та температури повітря.

Наукова новизна. Розвинуто спосіб реалізації регулювання потужності бойлера з вирівнюванням графіку загальної потужності споживання в часі. Розвинуто принцип реалізації системи управління енергоспоживанням з використанням прогнозу температури повітря та генерації фотоелектричної батареї для завдання температурних режимів бойлера. Це сприятиме підвищенню використання енергії фотоелектричної батареї та зменшенню споживання електроенергії з мережі.

Практичне значення. Отримані рішення є основою для проектування фотоелектричних систем для самоспоживання приватних будинків в разі застосування електричного бойлера в системі забезпечення теплою водою та кондиціонеру.

Ключові слова: гібридна фотоелектрична система; регулювання потужності бойлера; вирівнювання потужності в часі; управління за прогнозом; моделювання енергетичних процесів.

Вступ. Використання відновлювальної енергії зараз є глобальною світовою тенденцією розвитку людства. Виробництво «зеленої» електроенергії постійно зростає, це стосується і побутових споживачів. Важливим аспектом є максимальне використання цього ресурсу на споживання. Інтерес щодо досягнення максимального самоспоживання електроенергії відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) для локальних гібридних систем, підключених до мережі, зростає серед власників систем і в науковій спільноті. До того ж, у низці країн Європи відмовляються від стимулювання локалізованого виробництва електроенергії від невеликих фотоелектричних систем (ФЕС). Виключення експорту надлишкової енергії в разі повного споживання дозволить знизити навантаження на розподільчі мережі електроенергії. Таким чином, самоспоживання є важливою моделлю використання локальних систем з ВДЕ, особливо, в разі відсутності пільгових тарифів. Отже, підвищення ступеня використання енергії ВДЕ в приватному секторі для зниження витрат на електроенергію, що споживається, при зниженні експорту в мережу, аж до його повного виключення, є актуальним завданням.

Аналіз попередніх досліджень. У оглядовій роботі [1] узагальнюються існуючі дослідження щодо самоспоживання енергії ФЕС для житлових систем. За цього пропонується визначати самоспоживання як частку загального обсягу фотоелектричної енергії, безпосередньо споживану власником ФЕС. Визначається два основних чинники збільшення власного споживання. Це зберігання енергії та управління навантаженням (або керуванням попитом). Розвиток цієї роботи представлено в [2]. У роботі [3] також зазначається, що вирішення проблем енергетичного балансу в житлових будинках з ФЕС пов'язано зі скороченням експорту енергії в мережу та збільшенням її локального споживання. Обмеження

експорту надлишкової енергії в мережу до повного його виключення є функцією, що передбачають сучасні гібридні інвертори для ФЕС побутових споживачів [4, 5].

В роботі [6] зазначено, що найбільша частка (до 65%) споживання енергії у житлових будинках посідає опалення приміщень, зокрема, 15% використовується на нагрівання побутової води. Це ж констатують у роботі [7], де зазначено, що освітлення та опалення, вентиляція та кондиціонування є основною складовою загального енергоспоживання будівель. Ця обставина визначає напрям більшості робіт.

Оптимізацію фотоелектричного споживання з використанням систем гарячого водопостачання розглянуто в роботі [8]. За цього надлишкове виробництво ФЕС зберігається у резервуарі з гарячою водою як теплова енергія. При заповненні резервуара надлишок фотоелектричної енергії продається в мережу. Автори наголошують на великому потенціалі електрифікованих систем гарячого водопостачання для використання енергії ФЕС за рахунок управління енергоспоживанням. Однак використання додаткового резервуара-накопичувача не завжди можливе. А продаж надлишку фотоелектричної енергії у мережу зберігається. І це матиме місце влітку, коли генерація фотоелектричної батареї (ФБ) є максимальною. Планування часу роботи побутової техніки в роботі [9] представлено як одна з найбільш ефективних стратегій управління домашнім енергоспоживанням. За цього можна змістити час роботи побутових приладів на період високої генерації ФЕС. Системи зберігання енергії, зокрема, акумуляторні батареї (АКБ) доцільно використовуватися для заряджання у періоди низьких цін, а також при надлишку фотоелектричної енергії. Розрядка можлива в періоди високих цін та нестачі енергії ФЕС.

В роботі [10] досліджується потенціал управління попитом шляхом зсуву часу попиту електроенергію. На прикладі побутової посудомийної машини демонструється можливість збільшення відновлюваної електроенергії, що споживається, з одночасною фінансовою економією для споживача. Також можливе зниження попиту в години пік більш як на 60%. Автори [5] вважають, що такі важливі навантаження, як освітлення та опалення, вентиляція та кондиціонування можна безперервно регулювати за допомогою регулювання яскравості, термостатування та/або керування швидкістю вентилятора. Таким чином, перспективним є активне управління попитом із регулюванням енергоспоживання. Перспективність використання навантаження з регульованою потужністю як елемента системи оптимізації енергоспоживання стверджується також в роботі [11].

В роботі [12] поєднано використання планування енергоспоживання приватного будинку з використанням сценаріїв та використанням електричного накопичувального бойлеру з регульованою потужністю. За цього розглянуто підвищення ступеня споживання енергії фотоелектричної батареї (ФБ). Проте автори обмежилися реалізацією управління з формування стану заряду АКБ SoC(t) при генерації ФБ вище літньої середньомісячної з використанням кондиціонеру. Не вирішено питання керування температурними режимами бойлеру при зміні генерації ФБ та продуктивності кондиціонеру. Також розгляд обмежено використанням інверторного кондиціонеру з рівномірним споживанням енергії в часі згідно продуктивності.

Підвищення ступеня використання енергії ВДЕ на споживання можливе за умови використання прогнозу генерації ФБ. У роботі [13] представлено рішення з використанням прогнозу генерації ФБ для формування графіка SoC(t) АКБ. Використовуються дані прогнозу генерації одного з веб-ресурсів [14, 15]. Застосовується дане рішення, коли генерація ФБ є недостатньою для забезпечення навантаження об'єкту і недостатня енергія споживається з мережі.

Постановка завдання. Підвищення ступеню використання енергії ФБ в гібридній системі електроживлення житлового будинку для забезпечення власних потреб є можливим за удосконаленням управління бойлеру системи тепловодопостачання. За цього потребує вирішення ряд питань щодо: можливостей використання з різними типами кондиціонерів;

врахування прогнозу генерації ФБ та температури повітря в процесі керування температурними режимами бойлера та формування SoC(t) АКБ.

Мета роботи полягає у вдосконаленні управління гібридною ФЕС для житлового будинку с кондиціонером та регульованим електричним бойлером для нагрівання води шляхом підвищення ступеня споживання фотоелектричної енергії та зниження витрат на електроенергію.

Завдання для вирішення:

- виконати оцінку можливостей використання кондиціонера за різної генерації ФБ та температури повітря з використанням статистичних даних;
- розробити алгоритм управління температурними режимами бойлеру у всьому діапазоні змінювання генерації ФБ та енергоспоживання кондиціонера за використанням даних прогнозу генерації ФБ та температури повітря;
- обґрунтувати реалізацію управління потужністю бойлера в разі використання кондиціонеру, продуктивність якого регулюється змінюванням тривалості режимів максимальної та мінімальної потужності;
- виконати моделювання з оцінкою ефективності запропонованих рішень.

Основні матеріали дослідження. Розглядається гібридна ФЕС приватного жилого будинку. За основу прийнято систему, наведену в роботі [12], з використанням електричного накопичувального бойлера для забезпечення теплою водою та кондиціонера. Для можливості зіставлення отриманих результатів розглядаються ті ж графіки електроспоживання та споживання теплої води. Як і в роботі [12], для спрощення розглядається сконцентроване споживання трьох обсягів теплої води протягом дня: вранці, вдень та ввечері. Графіки температури води в бойлері τ наведено на рис.1 при поділі на інтервали часу: ранок (t_1, t_2), денний час (t_2, t_3), вечір (t_3, t_4). Потужність електроспоживання має ранковий (t_1, t_2) та вечірній пік (t_4, t_5). Також збережено концепцію використання для нагрівання води надлишкової енергії ФБ, яка не використовується на споживання навантаженням та заряд АКБ. Це є можливим на інтервалі (t_2, t_3), коли генерація ФБ достатня. При високій генерації ФБ також переслідується завдання максимального заряду АКБ у денний час з подальшим використанням у вечірній час та години вечірнього піку для зниження споживання з мережі.

Аналіз архівних даних генерації ФБ та температури повітря t_B для літнього періоду (2016 рік) показує, що висока генерація $W_{PV} > 5$ кВт (максимальна 6 кВт) мала місце 30 днів. При цьому температура змінювалася від 24 °C (прийнято як нижнє значення температури, коли включається кондиціонер) до 34 °C: протягом 6 днів середнє значення температури (с 11:00 до 20:00) 24–26 °C; 15 днів – 26–29 °C; 7 днів – 26–29 °C. Таким чином, кондиціонер використовується з регулюванням продуктивності у досить широкому діапазоні. Генерація ФБ лише на рівні середньомісячних значень мала місце переважно при температурах 24–28 °C.

При тому самому значенні генерації ФБ температура повітря може істотно відрізнятись. При цьому можливе функціонування з кондиціонером та без кондиціонера. Крім того, кондиціонер може включатись у різний час. Розглянемо роботу системи з використанням прогнозу потужності генерації ФБ P_{PV} та температури повітря t_B з дискретністю 1 час. Для цього блок керування доповнено wi-fi модулем для зв'язку з веб-ресурсом [14, 15] та модулем розрахунку для керування температурним режимом бойлера.

Використання без кондиціонера ($t_B < 24$ °C). Надлишкова енергія ФБ на нагрівання води у бойлері W_{B23} на інтервалі (t_2, t_3)

$$W_{B23} = W_{PV23} \cdot \eta_C - W_{L23}, \quad ()$$

де W_{PV23} – розрахункове значення енергії ФБ на інтервалі;

W_{L23} – розрахункове значення енергії, що споживається навантаженням;

η_C – ККД перетворювача енергії.

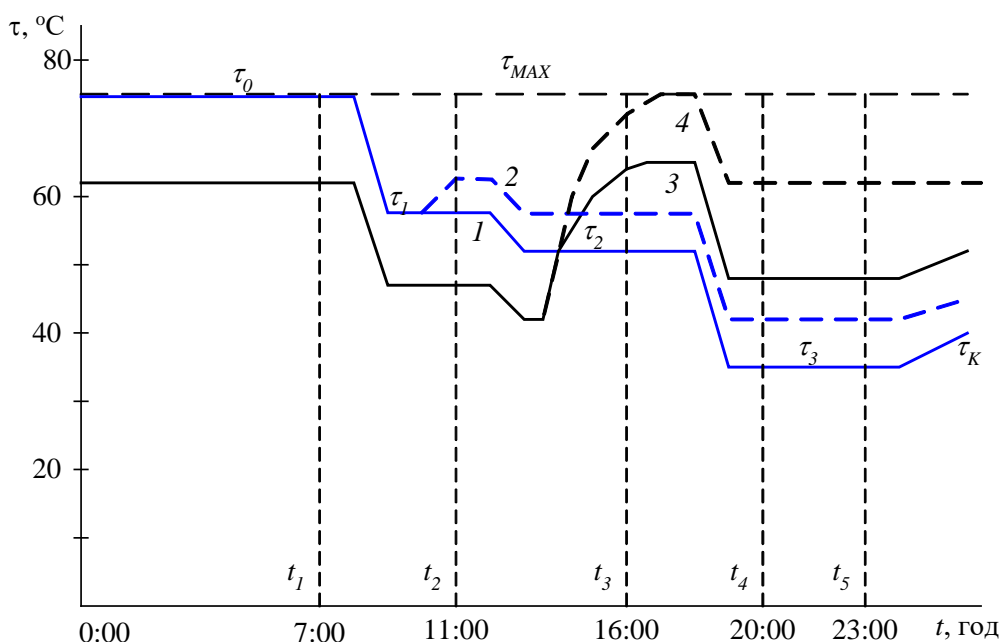


Рис. 1. Графіки температурних режимів води у бойлері за добу

Якщо $W_{Б23} \leq 0$ нагрівання не здійснюється і в міру витрати теплої води температура води в бойлері знижується. Навіть якщо початкове значення температури τ_0 дорівнює максимальному значенню 75°C , значення температури води у бойлері ввечері τ_3 буде нижче за комфортне значення 37°C (крива 1 на рис. 1). Це є неприпустимим і необхідно використовувати додаткове нагрівання $\Delta W_{БД} = c \cdot V \cdot \Delta\tau$ (c – теплоємність води, V – об'єм води в бойлері). Для прийнятого графіка витрат теплої води значення $\Delta\tau \geq 3^\circ\text{C}$. Нагрівання здійснюється на інтервалі (t_1, t_2) (на рис. 1 (крива 2) або (t_2, t_3)), нагрівання до значення τ_0 здійснюється вночі. Також передбачено незалежне додаткове нагрівання води при зниженні температури нижче 38°C до значення $\tau_{MIN} = 40^\circ\text{C}$. Це компенсує перевищення споживання вище за прийнятий графік.

Значення $W_{Б23} > 0$. При $W_{Б23} \leq \Delta W_{БД}$ енергія на додаткове нагрівання знижується. За умови максимального використання надлишкової енергії ФБ на нагрівання води при $W_{Б23} > \Delta W_{БД}$ значення τ_2 має мати мінімально можливе значення. При цьому $W_{Б23MAX} \leq c \cdot V \cdot (\tau_{MAX} - \tau_{2MIN})$, що відповідає кривій 4 на рис. 1. Використання з кондиціонером ($t_B > 24^\circ\text{C}$).

В роботі [12] розглянуто використання інверторного кондиціонера, коли енергоспоживання є рівномірним та потужність відповідає його продуктивності. Водночас широко поширені кондиціонери, в яких регулювання продуктивності здійснюється зміною тривалості режиму максимальної та мінімальної потужності. При цьому за цикл роботи $T = \Delta t$ (рис. 2) маємо час t_{on} , коли потужність кондиціонера $P_K = P_{KR}$ (P_{KR} – номінальна потужність). Середнє значення потужності $P_{KC} = \gamma P_{KR}$ ($\gamma = t_{on} / T$). При цьому значення P_{KR} є досить велике (у роботі [12] $P_{KR} = 980$ Вт), що призводить до значних коливань потужності навантаження $\Delta P_L = (P_{LMAX} - P_{LMIN}) \approx 1$ кВт. Це особливо проявляється при стані заряду АКБ $Q^* > Q^*_d$ ($Q^* = Q/Q_R$ – стан заряду SoC (%), $Q = Q_0 + \int I_B dt$, Q^*_0 – початкове значення, Q_R – відповідає ємності АКБ C_B (А·год), Q^*_d – відповідає переходу в режим заряду з постійною напругою при зниженні струму заряду I_B [16]), коли ΔP_L значно перевищує потужність заряду АКБ. Це при виключенні експорту енергії в мережу зумовлює необхідність зниження потужності генерації ФБ та призводить до неповного використання енергії ФБ на споживання.

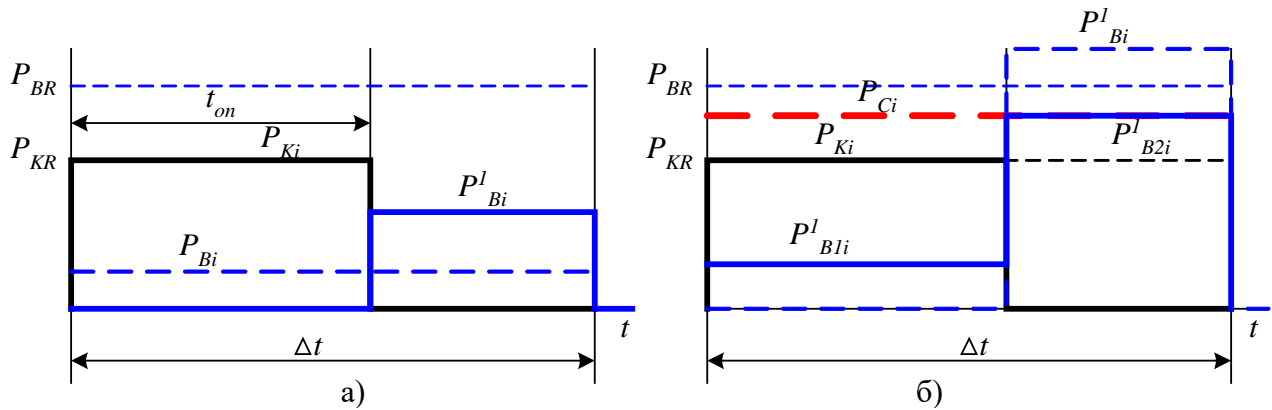


Рис. 2. Принцип вирівнювання сумарної потужності бойлера та кондиціонера при:
 а) $P^l_{Bi} \leq P_{KR}$; б) $P^l_{Bi} > P_{KR}$

Таким чином, при регулюванні потужності бойлера по відхиленню Q^* щодо заданого значення $Q^*_R(t)$ виникає додаткове завдання – забезпечити вирівнювання потужності споживання у часі. При розглянутому співвідношенні максимальних значень потужності бойлера $P_{BR} = 1.5$ кВт та кондиціонера $P_{KR} = 980$ Вт ($P_{BR} > P_{KR}$) це реально. Сумарна потужність у цьому випадку $(P_B + P_K) \leq P_{BR}$.

Принцип вирівнювання сумарної потужності бойлера та кондиціонера на інтервалі дискретності регулювання потужності бойлера ілюструє рис. 2. Крок дискретності регулювання потужності бойлера $\Delta t = T$ задається циклом роботи кондиціонера за вимірним значенням його потужності. Потужність бойлера на i -тому інтервалі дискретності задається регулятором [12] за відхиленням стану заряду АКБ Q^* відносно заданого графіка $Q^*_R(t)$ як

$$P_{Bli} = \begin{cases} K(Q^*_R - Q^*_M), & \text{if } (Q^*_R - Q^*_M) < 0 \\ 0, & \text{if } (Q^*_R - Q^*_M) \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

де Q^*_M – вимірне значення;
 K – коефіцієнт підсилення регулятора.

Значення P_{Bi} перераховується до тривалості інтервалу, що відповідає вимкненому стану кондиціонера

$$P^l_{Bi} = \frac{P_{Bi}}{1 - \gamma}. \quad (2)$$

Значення потужності бойлера для інтервалу t_{on} (при обмеженні $P_{Bli} \leq (P_{BR} - P_{KR})$)

$$P_{Bli} = \begin{cases} (P^l_{Bi} - P_{KR})(1 - \gamma), & \text{if } P^l_{Bi} > P_{KR} \\ 0, & \text{if } P^l_{Bi} \leq P_{KR}. \end{cases} \quad (3)$$

Значення потужності бойлера для інтервалу вимкнення кондиціонера

$$P_{B2i} = \begin{cases} ((P^l_{Bi} - P_{KR})(1 - \gamma) + P_{KR}), & \text{if } P^l_{Bi} > P_{KR} \\ P^l_{Bi}, & \text{if } P^l_{Bi} \leq P_{KR}. \end{cases} \quad (4)$$

Зазначимо, що у цьому варіанті порівняно з використанням інверторного кондиціонера маємо зниження граничної сумарної потужності бойлера та кондиціонера P_{C1} . Так при $\gamma = 0.6$ отримуємо $P_{C1} = 1.5$ кВт, при інверторному кондиціонері $P_{C2} = \gamma P_{KR} + P_{BR} = 2088$ Вт. Це

призводить до обмеження рівня підвищення споживання. Компромiсним є підвищення межі $P_{Bli} \leq (bP_{BR} - P_{KR})$ при значенні b залежно від прогнозу генерації ФБ від $b = 1.1$ до $b = 1.3$. Це дає можливість збільшувати P_{Cii} при підвищенні генерації ФБ та незначному коливанні сумарної потужності.

Задання температурного режиму. На момент часу t_2 (11:00), коли вже досить жарко і планується включення кондиціонера, його енергоспоживання невідоме. Можливе наступне рішення. Оцінюється фактичне (вимірне) значення стану заряду АКБ Q^*_{*2} , формується графік $Q^*_{*R}(t)$ з розрахунку $Q^*_{*3} \rightarrow 100\%$ з дискретністю 0,5 час [12]. Згідно $\Delta Q^*_{*23} = (Q^*_{*3} - Q^*_{*2})$ визначається енергія на заряд АКБ

$$\Delta W_{B23} = 0.01 \Delta Q^*_{*23} W_B / \eta_C \eta_B,$$

де $W_B = C_B \cdot U_B$ – енергоемність АКБ;
 η_B – ККД акумуляторної батареї.

Надлишкова енергія ФБ на інтервалі. (t_2, t_3) , яка може використовуватися для нагрівання бойлера

$$W_{B23} = W_{PV23} \cdot \eta_C - W_{L23} - \gamma P_{KR}(t_3 - t_2) - \Delta W_{B23}. \quad (5)$$

Розглядаємо граничний випадок для $\gamma = 1$.

При $W_{B23} > 0$ має місце повний заряд АКБ та нагрівання бойлера. Прийнятому графіку обсягів споживання теплої води відповідає енергія, що споживається на нагрівання W_{BM} , в даному випадку $W_{BM} = 3880$ Вт. Це значення енергії забезпечує добовий баланс температури води в бойлері при $\tau_0 = \tau_K$. Отримане згідно (5) значення W_{B23} при $W_{B23} \leq W_{BM}$ визначає температуру нагрівання води $\Delta \tau_{23} = W_{B23} / cV$. У разі перевищення частина енергії ФБ, яка дорівнює $(W_{B23} - W_{BM})$ буде не використана.

З урахуванням значення $\Delta \tau_{23}$ графік нагрівання набуває вигляду кривої 3 або 4 на рис. 1. При цьому значення τ_0, τ_3 визначаються за умов

$$\tau_3 = ((\tau_{2MIN} + \Delta \tau_{23}) - \Delta \tau_3) \geq \tau_{MIN}, \quad \tau_0 = \tau_{2MIN} + \Delta \tau_2 + \Delta \tau_1,$$

де $\Delta \tau_2, \Delta \tau_1, \Delta \tau_3$ – зниження температури води у бойлері для прийнятих обсягів споживання води на інтервалах протягом дня.

Якщо фактичне значення $\gamma < 1$ графік зберігається у частині значень τ_0, τ_1, τ_2 , значення W_{B23} і $\Delta \tau_{23}$ збільшуються.

При $W_{B23} \leq 0$ значення $\Delta \tau_{23} = 0$ маємо графік 2 (рис. 1) з додатковим нагріванням. Додаткове нагрівання здійснюється на інтервалі 12:00–13:00. Якщо кондиціонер не ввімкнувся, додаткове нагрівання не використовується. При генерації ФБ нижче 0.5 щодо середньомісячної літом вводиться обмеження стану заряду АКБ $Q^*_{*MIN} \geq 50\%$, що має на меті підвищити термін його експлуатації.

Результати моделювання. Моделювання енергетичних процесів виконано з використанням моделі [12], яка доповнена блоком формування заданого значення потужності бойлера відповідно до (1) – (4).

Розглянуто варіанти керування з вирівнюванням потужності бойлера та без вирівнювання. Дані наведені в табл. 1 при енергоспоживанні кондиціонера $\gamma = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ для літніх днів з максимальною генерацією ФБ та генерацією близькою до середньомісячної. При цьому враховувався додатковий підігрів води, необхідний для підтримки температурного режиму для прийнятого графіка споживання теплої води. У табл. 1 наведено значення енергоспоживання бойлера $W_{B23} + W_{BD}$, загального споживання електроенергії W_{LC} , невикористаної енергії ФБ (або генерація енергії у мережу) W_g , споживання електроенергії з

мережі за добу), ступінь зниження витрат на електроенергію за однієї ставки тарифу оплати k_{E1} та для двох ставок тарифу k_{E2} (нічний тариф прийнято 0.5 від денного).

Таблиця 1

Результати моделювання

γ , в.о.	$W_{B23}+W_{БД}$, Вт	W_{LC} , Вт	W_g , Вт	k_{E1} , в.о.	k_{E2} , в.о.	$W_{B23}+W_{БД}$, Вт	W_{LC} , Вт	W_g , Вт	k_{E1} , в.о.	k_{E2} , в.о.
З вирівнюванням графіку потужності						Без вирівнювання графіку потужності				
День літа з максимальною генерацією ФБ										
0	3802	17230	3171	4.71	4.94	3802	17230	3171	4.71	4.94
0.2	3802	19000	2033	7.576	8.19	3802	1900	2091	7.294	7.858
0.4	3802	20760	940	10.39	11.51	3.802	20760	1124	8.7	9.46
0.6	3771	22520	26.53	11.8	13.26	2997	22520	824.8	6.393	7.536
0.8	2678	24290	20.55	6.65	8.176	2251	24290	461.6	5.355	6.569
День літа з середньомісячною генерацією ФБ										
0	2225	17230	32.67	7.208	11.59	2225	17230	32.67	7.208	11.59
0.2	1056+380	19000	69.6	4.565	6.339	994+380	18990	102.7	4.475	6.205
0.4	0+380	20760	119	3.46	4.61	0+380	20760	119	3.46	4.61
0.6	0+380	22520	0	3.03	3.738	0+380	22520	0	3.03	3.738
0.8	0+380	24290	0	2.639	3.068	0+380	24290	0	2.639	3.068

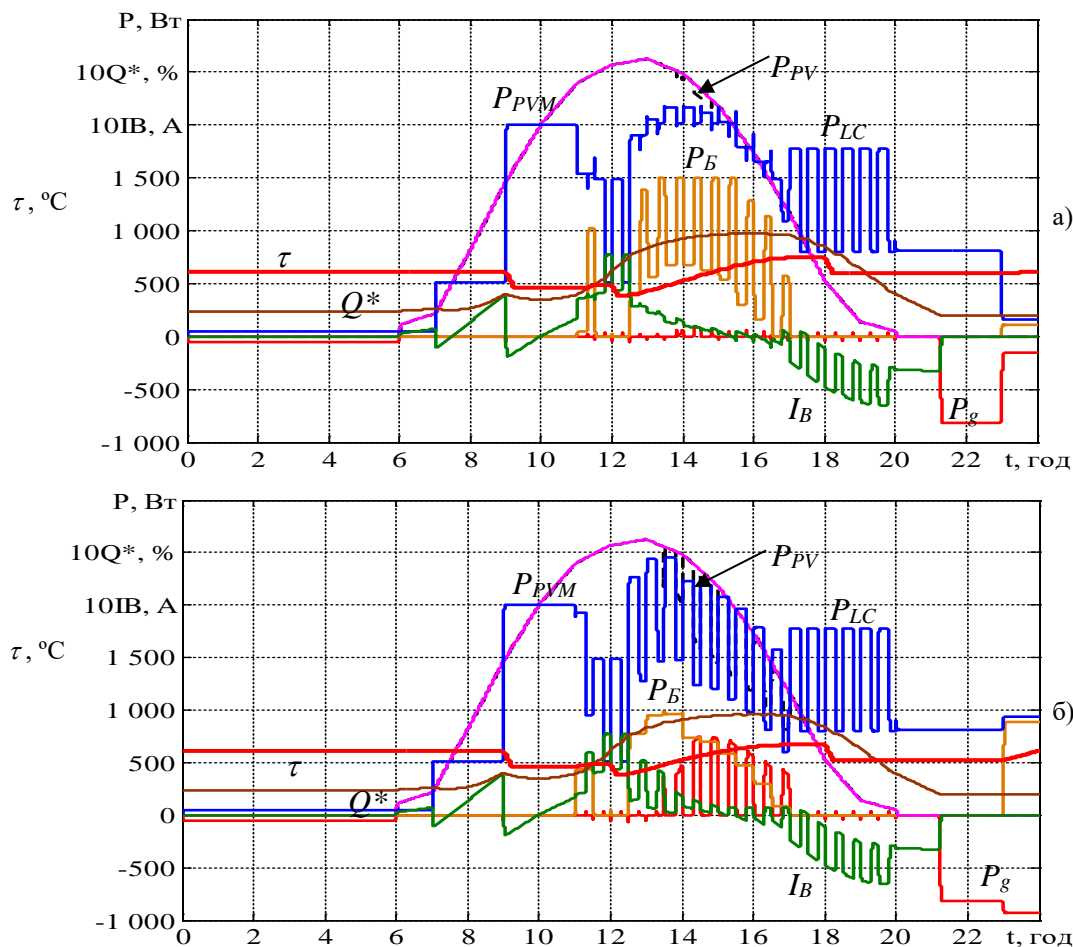


Рис. 3. Осцилограми процесів за максимальної потужності генерації ФБ:
 а) з вирівнюванням потужності; б) без вирівнювання потужності

Осцилограми потужності ФБ в режимі максимальної потужності P_{PVM} і з врахуванням регулювання P_{PV} (виключення експорту енергії в мережу), потужності, що споживається з мережі P_g , потужності бойлера P_B , температури води в бойлері τ , стану заряду АКБ Q^* , загальної потужності споживання будинку P_{LC} для дня з максимальною генерацією наведені на рис. 3, а $\gamma = 0.6$ з вирівнюванням потужності та на рис. 3, б без вирівнювання потужності.

Зміну температурного режиму для літнього дня із середньою генерацією ФБ демонструє осцилограма на рис. 4, а при $\gamma = 0$ та дня з низькою генерацією ФБ на рис. 4, б.

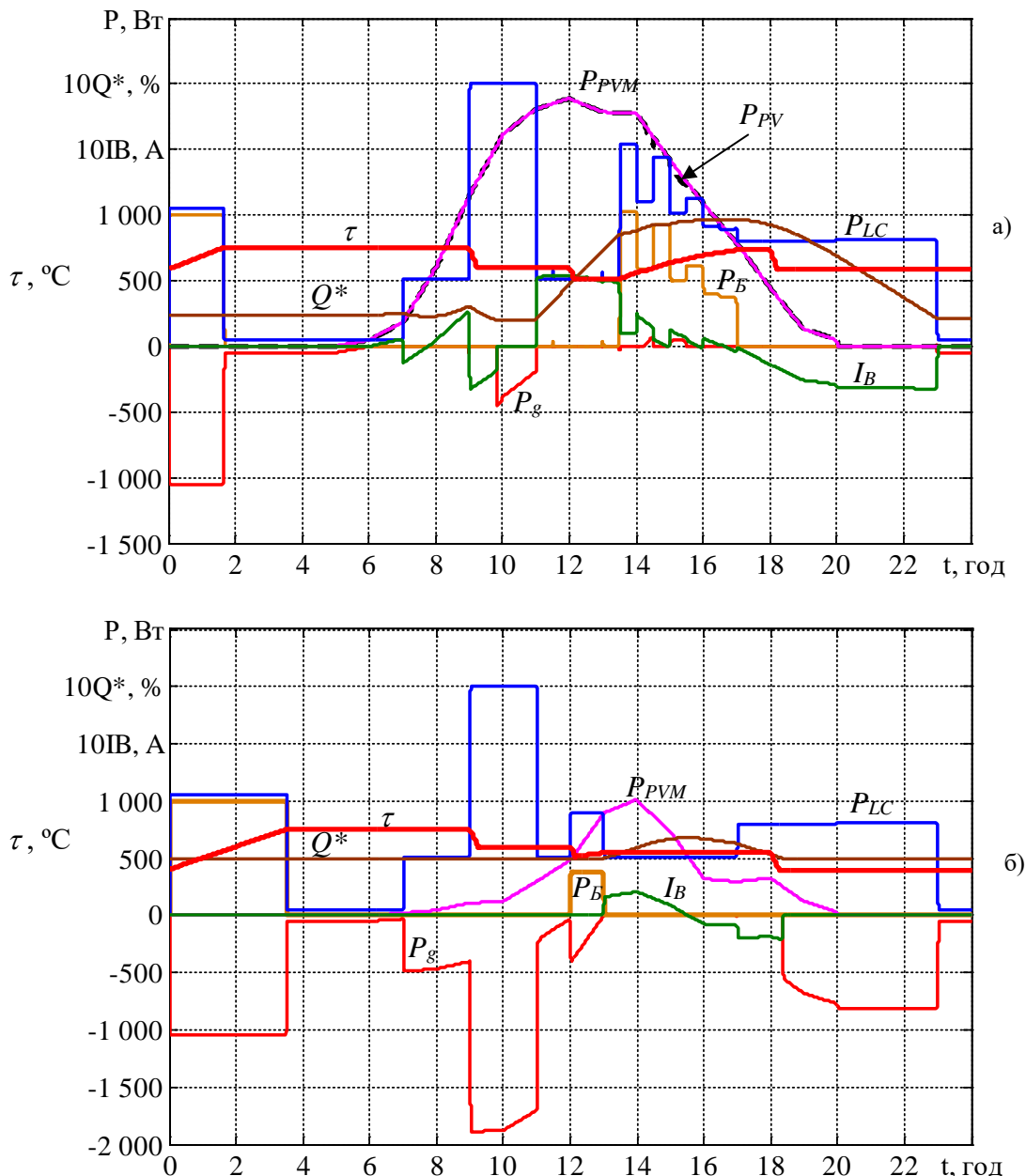


Рис. 4. Осцилограми процесів: а) за середньої потужності генерації ФБ;
 б) за низької потужності генерації ФБ

Також розглянуто зміну енергоспоживання бойлера протягом дня у разі зміни $\gamma = 0.6 - 0.72$ (в межах 20%). При цьому для спрощення цикл роботи кондиціонера зберігався

постійним. При обраному за методикою [12] значенні $K = 220$ при максимальній генерації ФБ показники порівняно з постійним $\gamma = 0.6$ не погіршилися.

Висновки. Визначено доцільність врахування прогнозу температури повітря та потужності генерації ФБ. За цього в структуру блока управління введено wi-fi модуль зв'язку з веб-ресурсом та модуль розрахунку параметрів згідно прогнозу.

Алгоритм управління реалізується згідно температурі та розрахованому значенню надлишкової енергії ФБ на нагрівання води в бойлері та визначеному значенню додаткової енергії на нагрів. Це забезпечує завдання графіку температурного режиму для прийнятого графіку споживання теплої води.

Вирівнювання в часі графіку потужності споживання дозволяє підвищити ступінь використання енергії ФБ. За цього в разі максимальної генерації ФБ влітку витрати на споживання з мережі зменшуються від 1.038 до 1.848 разів. При $\gamma = 0.8$ досягається практично повне використання енергії ФБ. За середньої генерації влітку витрати на споживання з мережі зменшуються лише в 1.02 рази.

Подальший напрямок роботи пов'язано з удосконаленням реалізації отриманих рішень та експериментальними дослідженнями.

References

1. Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*, Vol. 142, P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
2. Luthander, R., Widén, J., Munkhammar, J., Lingfors, D. (2016). Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment. *Energy*, Vol. 112, P. 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.039>.
3. Abdalla, M. A. A., Min, W., Bing, W., Ishag, A. M., Saleh, B. (2023). Double-layer home energy management strategy for increasing pv self-consumption and cost reduction through appliances scheduling, ev, and storage. *Energy reports*, Vol. 10, P. 3494–3518. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.019>.
4. ABB solar inverters. Product manual react-3.6/4.6-tl (from 3.6 to 4.6 kw). URL: <https://solaren-power.com/pdf/manuals/abb-inverter-react-3.6tl-4.6tl-manual.pdf>
5. Growatt MIN 8200-11400 TL-XH-US PRO Datasheet. URL: https://us.growatt.com/upload/file/min_8200-11400tl-xh-us_pro_datasheet_en_202401.pdf.
6. Vanhoudt, D., Geysen, D., Claessens, B., Leemans, F., Jespers, L., van Bael, J. (2014). An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy. *Renewable Energy*, Vol. 63, P. 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.021>.

Література

1. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*, 2015. Vol. 142. P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>.
2. Luthander R., Widén J., Munkhammar J., Lingfors D. Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment. *Energy*. 2016. Vol. 112. P. 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.039>.
3. Abdalla M. A. A., Min W., Bing W., Ishag A. M., Saleh B. Double-layer home energy management strategy for increasing pv self-consumption and cost reduction through appliances scheduling, ev, and storage. *Energy reports*. 2023. Vol. 10. P. 3494–3518. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.019>.
4. ABB solar inverters. Product manual react-3.6/4.6-tl (from 3.6 to 4.6 kw). URL: <https://solaren-power.com/pdf/manuals/abb-inverter-react-3.6tl-4.6tl-manual.pdf>.
5. Growatt MIN 8200-11400 TL-XH-US PRO Datasheet. URL: https://us.growatt.com/upload/file/min_8200-11400tl-xh-us_pro_datasheet_en_202401.pdf.
6. Vanhoudt D., Geysen D., Claessens B., Leemans F., Jespers L., van Bael J. An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 63. P. 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.021>.

7. Pontes Luz, G., Brito, M. C., Sousa, J. M. C., Vieira, S. M. (2021). Coordinating shiftable loads for collective photovoltaic self-consumption: a multi-agent approach. *Energy*, Vol. 229, Art. 120573. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120573>.

8. Casaleiro, Â., Figueiredo, R., Neves, D., Brito, M. C., Silva, C. S. (2017). Optimization of Photovoltaic Self-consumption using Domestic Hot Water Systems. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. November 2017. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0178>.

9. Al Muala, Z. A., Bany Issa, M. A., Sansó-Rubert Pascual, D., Bello Bugallo, P. M. (2023). Realistic home energy management system considering the life cycle of photovoltaic and energy storage systems. *Sustainability*, Vol. 15(14), Art. 11205. <https://doi.org/10.3390/su151411205>.

10. Finn, P., O'Connell, M., Fitzpatrick, C. (2013). Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction. *Applied Energy*, Vol. 101, P. 678–685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.004>.

11. Li, C., Kang, Z., Yu, H. et al. (2024). Research on Optimization Method of Home Energy Management System in Smart Grid. *J. Electr. Eng. Technol.*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-01807-w>.

12. Shavolkin, O. O., Pidhainyi, M. O. (2023). Vykorystannia boileru v systemi elektrozhyvlennia dlia zabezpechennia vlasnykh potreb pryvatnoi oseli z hibrydnoiu fotoelektrychnoju systemoju [Use of an electric boiler in the power supply system to provide the self-consumption of the residential house with a hybrid photovoltaic system]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, Vol. 5, No. 16, P. 60–75. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.5> [in Ukrainian].

13. Shavolkin, O., Shvedchukova, I., Kolcun, M., Medved', D. (2023). Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the Power Consumed from the Grid. *Energies*, Vol. 15, No. 16, P. 5851. <https://doi.org/10.3390/en16155851>.

14. Solcast | Solar Api and Solar Weather Forecasting Tool. Solar API and Weather Forecasting Tool | Solcast™. URL: <https://solcast.com/>

15. Kohl K. Forecast.Solar. URL: <https://forecast.solar/>

7. Pontes Luz G., Brito M. C., Sousa J. M. C., Vieira S. M. Coordinating shiftable loads for collective photovoltaic self-consumption: a multi-agent approach. *Energy*. 2021. Vol. 229, Art. 120573. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120573>.

8. Casaleiro Â., Figueiredo R., Neves D., Brito M. C., Silva C. S. Optimization of Photovoltaic Self-consumption using Domestic Hot Water Systems. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. November 2017. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0178>.

9. Al Muala Z. A., Bany Issa M. A., Sansó-Rubert Pascual D., Bello Bugallo P. M. Realistic home energy management system considering the life cycle of photovoltaic and energy storage systems. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(14). Art. 11205. <https://doi.org/10.3390/su151411205>.

10. Finn P., O'Connell M., Fitzpatrick C. Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction. *Applied Energy*. 2013. Vol. 101. P. 678–685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.004>.

11. Li C., Kang Z., Yu H. et al. Research on Optimization Method of Home Energy Management System in Smart Grid. *J. Electr. Eng. Technol.* 2024. 2024. <https://doi.org/10.1007/s42835-024-01807-w>.

12. Шавьолкін О. О., Підгайний М. О. Використання бойлеру в системі електроживлення для забезпечення власних потреб приватної оселі з гібридною фотоелектричною системою. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5 (16). С. 60–75. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.5>.

13. Shavolkin O., Shvedchukova I., Kolcun M., Medved' D. Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the Power Consumed from the Grid. *Energies*. 2023. Vol. 15, No. 16. P. 5851. <https://doi.org/10.3390/en16155851>.

14. Solcast | Solar Api and Solar Weather Forecasting Tool. Solar API and Weather Forecasting Tool | Solcast™. URL: <https://solcast.com/>

15. Kohl K. Forecast.Solar. URL: <https://forecast.solar/>

16. 12.8V 150Ah Lithium Ion Phosphate Battery for RV, Solar, Marine, Home Storage. Junlee storage energy. URL: <https://www.junleepower.com/products/junlee-12v-150ah-lithium-ion-lifepo-phoshate-battery-with-bms-solar-deep-cycle-for-home-energy-storage>.

16. 12.8V 150Ah Lithium Ion Phosphate Battery for RV, Solar, Marine, Home Storage. Junlee storage energy. URL: <https://www.junleepower.com/products/junlee-12v-150ah-lithium-ion-lifepo-phoshate-battery-with-bms-solar-deep-cycle-for-home-energy-storage>.

SHAVOLKIN OLEXANDER
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3914-0812>
Researcher ID: T-2652-2018
E-mail: shavolkin@gmail.com

PIDHAINYI MYKOLA
PhD student, Department of Computer
Engineering and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4816-902X>
E-mail: pidhainyi.mykola@gmail.com

SHAVOLKIN O. O., PIDHAINYI M. O.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR SELF-CONSUMPTION OF A RESIDENTIAL BUILDING WITH CONSUMPTION REGULATION

Purpose. Improving the management of a hybrid photovoltaic system of a residential building with air conditioning and an adjustable electric boiler for heating water by increasing the degree of use of photovoltaic battery energy for consumption, developing the principles of implementing an energy management system using forecasting.

Methodology. Analysis of using possibilities an air conditioner at different air temperatures and photovoltaic battery generation using statistical data. Analysis of boiler temperature conditions, taking into account the energy consumption of the air conditioner and the nature of its power changes over time. Using computer modeling to evaluate results.

Results. The structure of the boiler power regulation block with consumption equalization in time and the algorithm for controlling the boiler temperature mode based on the photovoltaic battery generation forecast and the air temperature has been developed

Originality. A method for implementing boiler power regulation with leveling the graph of total power consumption over time has been developed. The principle of implementing an energy management system using air temperature forecast and photovoltaic battery generation to set boiler temperature conditions has been developed. This will help to increase the utilization of PV energy and reduce the consumption of electricity from the grid.

Practical value. The obtained solutions are the basis for the design of photovoltaic systems for self-consumption of private houses in the case of using an electric boiler in the providing warm water system and air conditioning.

Keywords: hybrid photovoltaic system; boiler power regulation; power equalization in time; management by forecast; energy processes modeling.