

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.5>

УДК 621.31:  
535.215

ШАВЬОЛКІН О. О., ПІДГАЙНИЙ М. О.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ БОЙЛЕРУ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ПРИВАТНОЇ ОСЕЛІ З ГІБРИДНОЮ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ

**Мета.** Підвищення ефективності гібридної фотоелектричної системи з акумулятором для потреб приватної оселі шляхом регулювання потужності електричного бойлера для максимального використання енергії фотоелектричної батареї на споживання, розвиток принципів реалізації системи управління енергоспоживанням.

**Методика.** Планування енергоспоживання приватної оселі. Аналіз енергетичних процесів в системі забезпечення теплою водою та в електричних колах фотоелектричної системи живлення з використанням комп'ютерного моделювання для оцінювання ефективності енергоменеджменту.

**Результати.** Розроблено структуру регулятора потужності бойлера з забезпеченням близького до синусоїди струму, що споживається, для всього діапазону регулювання. Математична модель бойлера в системі забезпечення оселі теплою водою. Структура фотоелектричної системи з введенням блоку формування ступеню заряду акумулятору та регулятору потужності бойлера.

**Наукова новизна.** Запропоновано формування графіку ступеню заряду акумуляторної батареї з регулюванням потужності, що споживається бойлером, за відхиленням від заданого графіку. Це сприятиме більш повному використанню енергії фотоелектричної батареї та зменшенню споживання електроенергії з мережі. Обґрунтовано можливість використання сценаріїв енергоспоживання з плануванням життєдіяльності родини протягом доби без суттєвих обмежень. Удосконалено модель бойлера в добовому циклі функціонування з графіком споживання теплої води. Розвинуто структуру моделі енергетичних процесів в системі електроживлення оселі для добового циклу функціонування з введенням моделі бойлера, що враховує його температурний режим.

**Практичне значення.** Отримані рішення є основою для проектування фотоелектричних систем для забезпечення потреб приватних осель.

**Ключові слова:** гібридна фотоелектрична система; сценарії енергоспоживання; управління енергоспоживанням бойлера; формування ступеню заряду акумуляторної батареї; моделювання енергетичних процесів.

**Вступ.** Зараз в загальносвітовій практиці визначилася тенденція щодо використання гібридних фотоелектричних систем (ФЕС) з підключенням до мережі для забезпечення власних потреб локальних об'єктів (ЛО). За цього основною проблемою є недостатнє використання на споживання електроенергії, що виробляється у фотоелектричних мікроустановках (<50 кВт) для житлових будинків. Чим більше значення ступеню використання, тим нижчі витрати на електроенергію, що споживається з мережі. Це також приносить інші позитивні аспекти, до яких відносяться: зниження втрат енергії в мережі; підвищення стабільності мережі за рахунок менших коливань навантаження; зниження витрат на електроенергію для споживачів за рахунок самозабезпеченості та зниження ємності накопичувачів електроенергії. Це дозволяє знизити потужність традиційних електростанцій у довгостроковій перспективі та сприяє інтеграції відновлюваних джерел енергії при зменшенні потреби у вдосконаленні інфраструктури енергосистеми. Отже, існує необхідність розробки рішень, які допоможуть максимально використовувати енергію, що виробляється ФЕС. За цього удосконалення ФЕС з управлінням енергоспоживанням для приватних осель виглядає актуальним.

**Аналіз попередніх досліджень.** Застосування ФЕС для власних потреб приватного сектору підкріплено наявністю на ринку широкої гама гібридних інверторів (ГІ) [1, 2], що передбачають застосування фотоелектричної (ФБ) та акумуляторної (АКБ) батарей.

Не простим питанням є визначення параметрів ФЕС (встановлена потужність ФБ  $P_{PVR}$  та енергоємність АКБ  $W_B$ ). Звичайним обмеженням є площа поверхні для розташування ФБ. Вибір  $P_{PVR}$  визначається середнім значенням енергії, що споживається об'єктом. Енергія генерації ФБ для місця розташування об'єкту визначається за значеннями середньомісячної генерації ФБ за архівними даними з веб-ресурсу [3]. Але в разі перевищення генерації ФБ над споживанням маємо надлишкову енергію. Ця енергія не є значною для продажу. За відсутності договору на продаж та двобічного лічильника на вході генерація оплачується як спожита енергія. Ця методика визначення  $P_{PVR}$  є доречною у разі використання генерації зайвої енергії ФБ в мережу. Підвищення ступеню використання енергії ФБ на споживання в ФЕС для власних потреб в роботах [4, 5] пов'язують з оптимізацією вибору параметрів. В роботі [5] для цього використовують архівні дані генерації ФБ за рік (5 років), а алгоритм управління використовує короткочасний прогноз генерації ФБ на поточний день. Проте за цього навіть для середньомісячної генерації ФБ влітку має місце зайва енергія, що не може бути спожита. За відсутності генерації в мережу в роботі [6] розглядається перемикання режиму роботи ФБ з режиму відбору максимальної потужності (MRPT) на регулювання потужності ФБ. В роботі [7] запропоновано перспективне рішення з формуванням графіку ступеню заряду АКБ шляхом регулюванням активної потужності за відхиленням графіку відносно заданого. Це дозволяє виключити вплив відхилень прогнозу і графіка навантаження від розрахованих значень і сприяє зниженню витрат на електроенергію. Але ці рішення передбачають використання багатофункціонального мережевого інвертора. Стандартні рішення ГІ не передбачають цих режимів і управління здійснюється за програмою, що закладена виробником.

Подальші можливості підвищення ступеню використання енергії ФЕС пов'язано з управлінням енергоспоживанням. В певній мірі це можливо [8] за використання сценаріїв, які пов'язують з тарифікацією оплати з урахування постійного, нічного, напівпікового та пікового тарифів. Вибір сценаріїв здійснюється за прогнозом енергії, що генерується ФБ.

Більш ефективними виглядають рішення зі збільшенням енергії на споживання. За цього надлишкову енергію використовують на акумуляцію тепла. В роботі [9] подано аналіз результатів цілорічної експлуатації фотоелектричної гібридної установки з тепловим насосом для нагрівання води у житловому будинку у Кракові. Результати показали, що використання теплового насосу з управлінням часом роботи призводить до збільшення щомісячних значень власного споживання з 7% до 18%, а річних значень до 13%. Але не до 100% і при цьому зберігається генерація надлишку енергії у мережу. Також є певна суперечність. Теплові насоси в системах теплопостачання та опалення зазвичай використовують для зниження споживання електроенергії за рахунок енергії середовища. При відносно невеликому споживанні теплої води в літній період споживання електроенергії тепловим насосом не вистачить для повного використання енергії ФЕС. В роботі [10] розглянуто систему при поєднанні двох видів зберігання енергії: котельня та акумулятор. Котельня система складається з двох частин, які з'єднані послідовно (основний котел та котел попереднього підігріву). Основний котел забезпечує необхідний рівень температури з використанням енергії відновлюваних джерел або мережі. Котел попереднього нагрівання накопичує енергію, яка не використовується на навантаження та живлення для основного котла. Практичне застосування цього рішення недостатньо опрацьовано, а генерація в мережу надлишків енергії зберігається. В роботі [11] наведено експериментальний прототип пристрою з використанням додаткового навантаження змінної середньої потужності (VAPL) та підключеного до мережі інвертора для автономної системи. АКБ підключено до мережі через окремий інвертор. Відзначено, що в якості VAPL може використовуватися електричний бойлер для нагрівання води. Регулювання здійснюється методом ШІМ. Вирішується завдання контролю надмірної потужності відновлювального джерела електроенергії (ВДЕ), не впливаючи при цьому на стан заряду батареї (SOC)

автономної системи. При цьому після перемикання АКБ в режим плаваючого заряду (з постійною напругою) VAPL споживає надмірну енергію, що генерується ВДЕ. Основним завданням є контроль надлишкової потужності без впливу на рівень накопиченої в АКБ енергії. Розглянута система дещо специфічна та дослідження має на меті оцінку можливості такого рішення. Використання електричного бойлера для забезпечення теплою водою є типовим для приватних будинків, тому його застосування для систем з ВДЕ для забезпечення балансу енергії виглядає перспективним.

У роботі [12] представлено інтелектуальну систему управління енергоспоживанням, яка об'єднує контролер енергоспоживання та модуль проміжного програмного забезпечення IoT для ефективного управління попитом. Оскільки на системи кондиціонування повітря в Пакистані припадає понад 50% споживання електроенергії, розглянуто управління енергоспоживанням з регулюванням споживання кондиціонером.

В роботі [13] розглянуто термоелектричні моделі електричного котла та теплового насоса для оцінки їх потужності та гнучкості як активних навантажень для управління попитом. Показано, що гнучкість установок цього типу може бути різко обмежена за рахунок їх безперервної роботи. Проте не розглянуто рішень щодо управління.

Очевидним є той факт, що повне використання енергії ФЕС на споживання потребує забезпечення балансу потужності, що генерується та споживається, або перевищення споживання. За цього для приватної оселі недостатньо вивчено можливості комбінування планування графіку навантаження з використанням регульованого теплоакumuлюючого бойлера. З врахуванням відхилення навантаження від графіку та змінювання витрат на кондиціонування залежно від температури система управління повинна працювати за певним законом. Доречним виглядає формування графіку ступеню заряду АКБ, що сприятиме забезпеченню балансу енергії в системі.

Розв'язання комплексу питань щодо визначення параметрів ФЕС і реалізації управління енергоспоживанням за змінного навантаження та наявності двох акумулюючих елементів є достатньо складним завданням. Зручним під час проектування і дослідження ефективності управління ФЕС є використання математичного моделювання, зокрема, з використанням Matlab. За цього здійснюється аналіз процесів з оцінкою показників в добовому циклі (24h) [14, 15].

**Постановка завдання.** Максимальне використання енергії ФЕС в гібридній системі електроживлення приватної оселі для забезпечення власних потреб без використання генерації надлишкової електроенергії в мережу потребує вирішення питань щодо планування в часі та управління енергоспоживанням з використанням бойлера системи тепловодопостачання оселі.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності гібридної фотоелектричної системи з акумулятором для потреб приватної оселі шляхом регулювання потужності накопичувального бойлера для максимального використання енергії фотоелектричної батареї на споживання, розвиток принципів реалізації системи управління енергоспоживання.

Завдання для вирішення:

- вивчити можливість використання сценаріїв енергоспоживання з плануванням життєдіяльності родини протягом доби без суттєвих обмежень;
- розробити математичну модель бойлера для постачання теплої води та визначити витрати електроенергії для забезпечення прийнятого графіку споживання теплої води;
- обґрунтувати вибір встановленої потужності ФБ та енергоємності АКБ;
- розробити відповідну структуру реалізації управління бойлером з використанням типового гібридного мережевого інвертора;

- розробити модель енергетичних процесів в системі «мережа змінного струму – фотоелектрична батарея – акумулятор – перетворювальний агрегат – бойлер - навантаження» для добового циклу роботи з оцінкою ефективності.

**Основні матеріали роботи.** Розглянуто використання ФЕС для приватного будинку з типовим сучасним електрообладнанням. Ряд споживачів електроенергії використовується постійно. Це забезпечення харчування членів родини, дозвілля в вечірні години. Ряд операцій виконуються за певним графіком часу, наприклад, сніданок, обід, вечеря. В разі, якщо жінка не працює, прання, приготування їжі, вбирання та інше можуть плануватися на певні дні та години. Це дозволяє здійснювати планування навантаження по дням тижня і протягом доби. Отже, є можливість скласти певні сценарії за потужністю, що споживається. Основою всіх сценаріїв є обов'язковий графік денного навантаження: сніданок, обід, робота на ПК (навчання дітей та їхнє дозвілля), вечірнє навантаження (вечеря, освітлення, дозвілля). Звичайним є збільшення споживання електроенергії ввечері, коли збирається вся родина. Енергозатратні операції (електрична піч, пральна машина, відпарювач, праска, пілосос, посудомийка та ін.) заплановано з 9:00 до 11:00.

Оскільки ясна погода може триматись достатньо тривалий час, потрібно мати набір близьких за споживанням в денний час сценаріїв. Аналіз показав, що є можливість формування сценаріїв з відхиленням енергоспоживання 10%. Середнє значення потужності  $P_{LCP}$ , що споживається за інтервалами часу (період літа), наведено в табл. 1, а графік навантаження на рис. 1. В табл. 1 наведені значення середні для обраних сценаріїв. Кондиціонер і бойлер за цього не враховані.

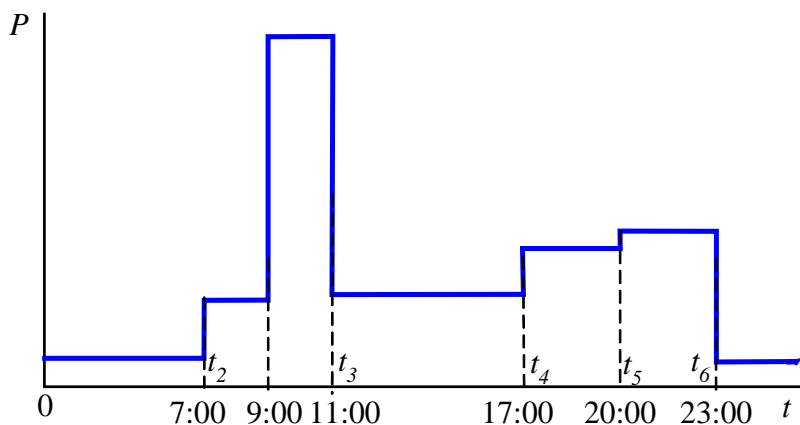


Рис. 1. Графік навантаження з усередненням за інтервалами часу  $P_{LCP}(t)$

Таблиця 1

Середнє значення потужності, що споживається за інтервалами часу

інтервал	7.00:9.00	9.00:11.00	11.00:17.00	17.00:20.00	20.00:23.00	23.00:7.00
$P_{LCP}$ , Вт	512	1480	498	803	815	50

Мета роботи передбачає максимальне (повне) використання енергії, що генерується ФБ на споживання, що стосується днів з високою генерацією ФБ. За низької генерації недостатня енергія споживається з мережі. Отже обмежимося розглядом питання, коли генерація ФБ змінюється від середньомісячної до максимальної влітку. За цього визначення встановленої потужності ФБ  $P_{PVR}$  слід здійснювати для ясного дня влітку (червень, липень), коли має місце максимальна генерація енергії ФБ, згідно максимальному навантаженню будинку в денний час. За цього витрати енергії на кондиціонування та нагрівання води в бойлері є достатньо великими.

Математичну модель бойлеру виконано згідно першому закону термодинаміки. Розглянуто бойлер з ємністю  $V=100$  л. За відносно невеликого розміру ефектом стратифікації (розподілу температури за шарами) можна нехтувати [13]. Сучасні бойлери мають добру теплоізоляцію, тому теплообміном з приміщенням теж можна нехтувати. За цього температура води в бойлері

$$\tau_{in} = \frac{1}{m} \int (Q_E \cdot S - c \cdot v_B (\tau_{in} - \tau_X) dt), \quad (1)$$

де  $m$  – маса води в бойлері, що відповідає об'єму в літрах  $m = V$ ;

$Q_E$  – тепло, що виділяється нагрівачем (ТЕН);

$S$  – функція управління ТЕН (1 – включений та 0 – вимкнута);

$c$  – теплоємність води;

$v_B$  – масове споживання води з бойлеру в л/с;

$\tau_X$  – температура холодної води, що надходить до бойлеру.

Згідно балансу енергії для змішувача води маємо

$$v_{ВИХ} \cdot \tau_{ВИХ} = v_B \cdot \tau_{in} + v_X \cdot \tau_X,$$

де  $v_{ВИХ} = (v_B + v_X)$  – маса води на виході змішувача з температурою  $\tau_{ВИХ}$ ;

$v_X$  – маса холодної води з водопроводу.

Тоді

$$v_B = \frac{v_{ВИХ}}{1 + \frac{\tau_{in} - \tau_{ВИХ}}{\tau_{ВИХ} - \tau_X}} \quad (2)$$

Структура моделі енергетичних процесів в бойлері за рівняннями (1)–(2) наведена на рис. 2. Функцію термостату – відключення підігріву за досягненням заданого значення  $\tau_B$  (або максимального значення) виконує пристрій порівняння К1 та R-S – тригер. На рис. 2 показаний варіант з підтриманням температури  $\tau_B = \tau_{in} = 65$  °С. Графік споживання води (зранку, вдень та ввечері) задається в табличній формі (блок  $v(t)$ ). Початкове значення температури води  $\tau_{B0}$  задається як початкова умова на відповідному вході інтегратора 2.

На рис. 3 наведені осцилограми за прийнятого режиму споживання теплої води за добу з підтриманням заданого значення температури  $\tau_{B0} = 65$  °С ( $V_{ВИХ}$  – об'єм спожитої води за температури  $\tau_{ВИХ} = 37$  °С,  $V_B$  – об'єм води, що витікає з бойлеру. Потужність бойлеру  $P_T = 1500$  Вт. Об'єм споживання теплої води (загальний 151,2 л) задається на визначених інтервалах часу (57,6 л зранку, 36 л вдень, 57,6 л ввечері). За цього загальне споживання електроенергії бойлером становить  $W_T = 3880$  Вт·год.

Цей режим роботи бойлеру є стандартним, коли ТЕН вмикається зі зниженням температури і вимикається за досягненням заданого значення.

Можливість вмикання бойлеру на нагрівання води в визначені моменти часу з регулюванням потужності ТЕН дозволяє використовувати надлишкову енергію ФБ та компенсувати різницю споживання за сценаріями. Прийнятий режим споживання є достатньо економним (за споживанням 4 л/хв.). В разі більшого споживання теплої води і, відповідно, електроенергії можливості використання бойлеру для забезпечення балансу енергії в системі зростають.

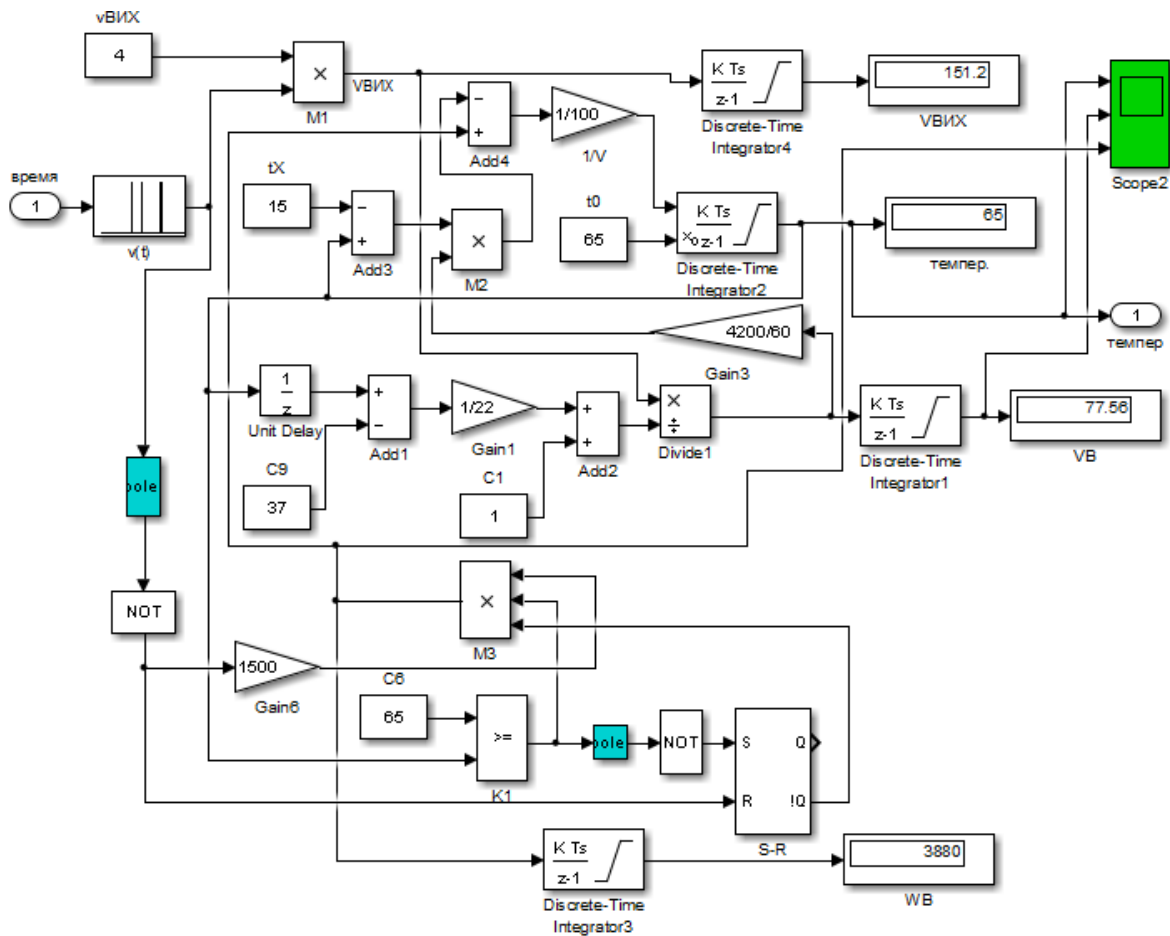


Рис. 2. Структура моделі енергетичних процесів в бойлері

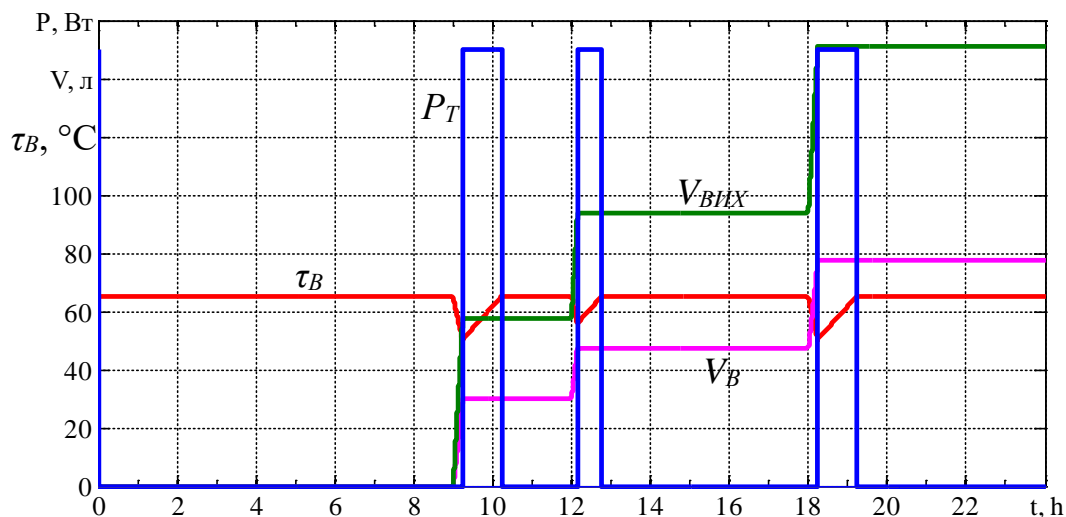


Рис. 3. Осцилограми  $V_{вих}$ ,  $V_B$ ,  $\tau_B$ ,  $P_T$

Розрахунок параметрів ФЕС. Поряд із споживанням електроенергії навантаженням слід забезпечити заряд АКБ, що є можливим в години високої сонячної активності до  $t_4$  (рис. 1).

Ступінь заряду АКБ  $Q^*_{t_4}=100\%$  ( $Q^*=Q/Q_H$ ,  $Q = Q_0 + \int I_B dt$ ,  $I_B$  – струм АКБ,  $Q_H$  – відповідає ємності АКБ) забезпечує можливість зменшення споживання енергії з мережі в вечірні години. Це також важливо для можливості реалізації безперебійного живлення в разі відключення живлення.

Баланс енергії в системі без регулювання потужності ФБ та відсутності генерації енергії в мережу для денного часу:

$$W_{PV24} \cdot \eta_C - W_{L24} + \Delta W_{B24} = 0, \quad (3)$$

де  $W_{PV24}$  – енергія, що генерується ФБ на інтервалі  $(t_2, t_4)$ ;

$W_{L24}$  – енергія, що споживається навантаженням;

$\Delta W_{B24}=0.01\Delta Q^*_{24}W_B/(\eta_B \cdot \eta_C)$  – енергія, що споживається на заряд АКБ;

$\Delta Q^*_{24}=(Q^*_{t_4} - Q^*_{t_2})$  – зміна ступеню заряду АКБ на інтервалі  $(t_2, t_4)$ ;

$W_B=U_B \cdot C_B$  – енергоємність АКБ ( $U_B$  та  $C_B$  – напруга та ємність (А·год));

$\eta_B$  та  $\eta_C$  – ККД АКБ та ККД перетворення енергії (перетворювач напруги на виході ФБ та мережевий інвертор).

Значення енергоємності АКБ  $W_B$  визначимо за умови виключення споживання електроенергії на інтервалі  $(t_4, t_6)$  для дня з середньомісячною генерацією в червні та липні без використання кондиціонування

$$W_B = \frac{W^{L46}}{0.01\Delta Q^*_{46} \cdot \eta_C \cdot \eta_B}, \quad (4)$$

де  $W^{L46}$  – енергія, яку компенсує АКБ з врахуванням генерації ФБ, прийнято  $W^{L46}=0.5W_{L45} + W_{L56}$ ,  $W_{PV56}=0$ ,  $W_{PV45}=0.5W_{L45}$ .

Згідно (3) енергія, що генерується ФБ на інтервалі  $(t_2, t_4)$  в загальному випадку

$$W_{PV24} = \frac{1}{\eta_C} (W_{LC24} + \Delta W_{B24}), \quad (5)$$

де  $W_{LC24} = W_{L24} + W_T + K \cdot W_{K24}$  – загальне значення енергії навантаження з врахуванням споживання бойлеру  $W_T$  та на кондиціонування  $K \cdot W_{K24}$  ( $K$  – ступінь використання енергії кондиціонером відносно значення за номінальної потужності).

З урахуванням того, що за максимальної генерації ФБ не завжди є потреба в максимальному рівні кондиціонування, прийнято  $K = 0,5$ . До речі, в перехідні сезони року (весна, осінь) за високої генерації ФБ кондиціонер може вмикатися на підігрів.

За даними архіву для ФБ з потужністю  $P_{PVR} = 1$  кВт знаходимо енергію на інтервалі  $(t_2, t_4)$   $W_{PVR24}$ . З урахуванням цього встановлена потужність ФБ, що відповідає прийнятому навантаженню:

$$P_{PV} = \frac{W_{PV24}}{W_{PVR24}}.$$

Для розглянутого сценарію значення  $W_B = 5120$  Вт·год,  $P_{PV} = 3,5$  кВт. В разі використання акумулятору типу LiFePO4 [16] за напруги  $U_B = 25,6$  В (послідовне з'єднання 2 АКБ) значення  $C_B = 200$  А·год.

Головною умовою повного використання  $W_{PV24}$  є співвідношення  $W_{PV24} \cdot \eta_B \leq (W_{L24} + \Delta W_{B24})$ . Питання забезпечення балансу потужності в системі без генерації в мережу

ускладнюється тим, що заряд АКБ здійснюється в двох режимах: із заданим струмом заряду  $I_B$  за значення  $Q^* \leq Q^*_d$  та постійної напруги  $U_B$  за  $Q^* > Q^*_d$  [16]. За постійної  $U_B$  струм  $I_B$  значно зменшується та визначається характеристикою  $I_{Bch}(Q^*)$  (в разі  $Q^* = 95\%$ ,  $I_{Bch} = 0,05 C_B$  [16]). Відповідно АКБ здатний приймати лише обмежену енергію. Проблема можна вирішити в разі обмеження  $Q^* \leq Q^*_d$ , коли струм заряду обмежується лише припустимим значенням. Але при  $Q^*_d \approx 90\%$  для АКБ типу LiFePO4 [16] це визначатиме завищення енергоємності АКБ не менше 10%. В разі свинцево-кисневих АКБ  $Q^*_d \approx 80\%$  [17].

За прийнятого сценарію (рис.1) критичним є інтервал  $(t_3, t_4)$ . Формування графіку  $Q^*(t)$  переслідує мету обмеженням швидкості змінювання  $\Delta Q^*/\Delta t$ . За цього відомі значення  $Q^*_3$  в кінці ранкового піку і бажане (максимальне) значення  $Q^*_4 \rightarrow 100\%$ . Щоб мінімізувати  $\Delta Q^*/\Delta t$  на ділянці, де  $Q^* > Q^*_d$  прийнято експоненційний графік  $Q^*_R(t)$

$$Q^*_R = Q^*_S + (Q^*_4 - Q^*_S) \left(1 - e^{-\frac{t-t_S}{\tau}}\right),$$

де  $Q^*_S$  – початкове значення, що відповідає моменту часу  $t_S$ ,  $\tau = (t_4 - t_S)/3.5$  – стала часу.

Забезпечення відповідності графіку  $Q^*(t)$  заданому  $Q^*_R(t)$  можливо корекцією енергії, що споживається бойлером, з дискретністю в часі  $\Delta t$  за відхиленням  $\Delta Q^*_t = Q^*_R - Q^*_M$  ( $Q^*_M$  – вимірне значення). За цього  $Q^*_R(t)$  має східчасту форму з постійним значенням на інтервалі  $\Delta t$ , вимірювання здійснюється на початку інтервалу. Потужність бойлеру  $P_T = K \Delta Q^*_t$ . Значення  $K$  визначається за максимального відхилення  $P_{Tном} = K \Delta Q^*_{imax}$  ( $P_{Tном}$  – потужність нагрівача (ТЕН)). В межах близької до лінійної початкової ділянки  $Q^*_R(t)$  значення прирощення  $\Delta Q^* \leq 10\%$  і можна прийняти значення  $\Delta Q^*_{imax} = 5\%$ .

За фіксованого об'єму спожитої води  $V_{вих}$  значення  $W_{T1}$  є постійним. Значення енергії, що споживається бойлером, в процесі формування  $Q^*(t)$  є змінним в залежності від навантаження. В даному разі це енергія на кондиціонування. Із збільшенням навантаження це призводить до потреби підігріву води вночі. Енергія за цього  $W_{ТД} = W_{T1} - W_{T24}$  ( $W_{T24}$  – енергія спожита вдень на кінець доби 24:00).

На рис. 4 наведена структура моделі регулятора (без вимірювальних приладів), що цілком відповідає його принциповій схемі. Схема містить випрямляч з імпульсним перетворювачем напруги на транзисторі в колі постійного струму, На вході випрямляча з боку мережі живлення (АС) використано LC фільтр (індуктивність  $L_1$  і конденсатор  $C$  з резистором  $R_2$  для зниження добротності і виключення коливальності). Прийняті наступні параметри:  $L_1 = 0,2$  мГн,  $C = 60$  мкФ,  $R_2 = 0,6$  Ом. В моделі також враховано активний опір котушки  $R_2 = 0,6$  Ом. Керування транзистором здійснює генератор ШІМ з частотою модуляції  $f_M = 5$  кГц ( $\gamma$  – коефіцієнт заповнення імпульсів).

Загальна структура ФЕС з управлінням потужністю бойлеру наведена на рис. 5 і містить: гібридний мережевий інвертор (ГМІ); фотоелектричну батарею (PV); АКБ; некероване навантаження (НН). Введено блок управління БУ; датчик струму (ДС) і напруги (ДН) АКБ; блок визначення ступеню заряду АКБ (ВЗ). Схема підключення бойлеру змінена і ТЕН ( $R_B$ ) підключено через регулятор потужності (РП), S – вимикач, St – контакт термостату.

При побудові загальної структури моделі для дослідження енергетичних процесів в системі використано основні принципи, що надані в роботі [8]. Задаються: графік потужності генерації ФБ в режимі відбору максимальної потужності  $P_{PVM}(t)$ ; середнє значення потужності кондиціонеру на інтервалі часу його вмикання  $P_K = C \cdot P_{Kном}$ , середнє значення потужності за інтервалами часу споживачів без врахування бойлеру та кондиціонеру  $P_L(t)$ . За цього загальна потужність навантаження  $P_{LC} = P_L + P_K + P^I_T$  ( $P^I_T$  значення потужності бойлеру, що визначається з врахуванням відключення термостату).

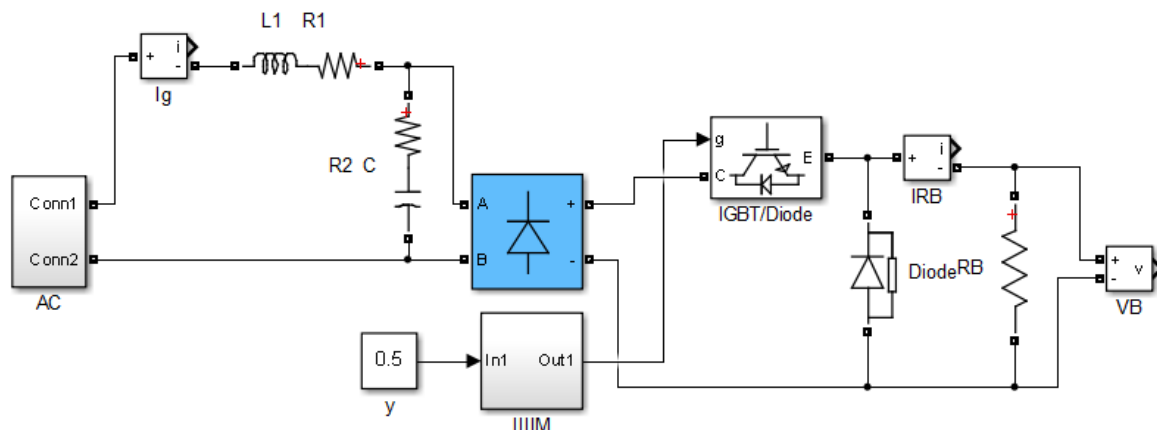


Рис. 4. Структура моделі регулятора

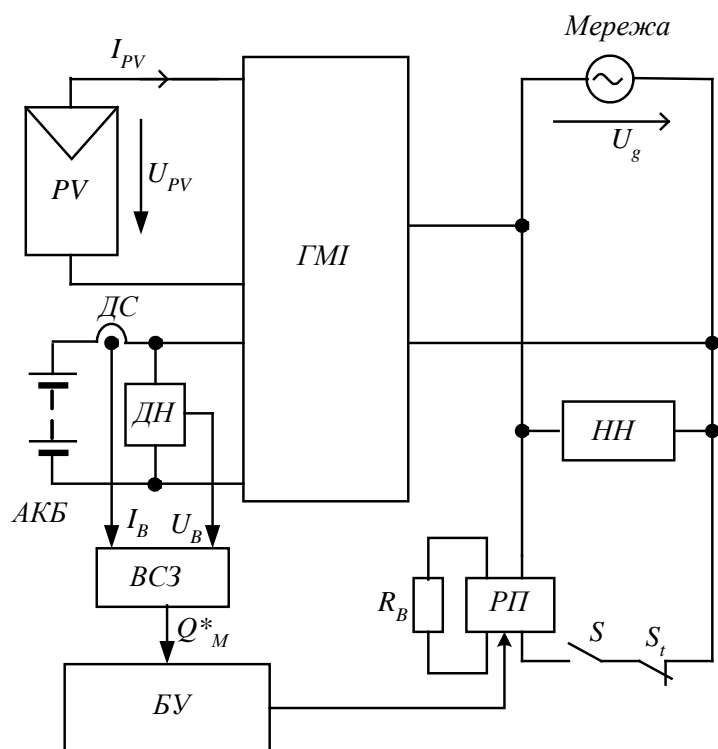


Рис. 5. Структура ФЕС з управлінням потужністю бойлеру

Регулятор потужності ТЕН є лінійною ланкою. З урахуванням цього блок управління реалізовано в спрощеній формі за рівнянням  $P_T = K \cdot \Delta Q^*$  з обмеженням  $P_T \leq P_{MAX} = P_{Tном}$ . Значення  $P_T$  подається до моделі бойлеру, де перетворюється до значення  $P^l_T$ .

Для оцінювання ступеню зниження витрат на спожити з мережі електроенергію передбачено використання коефіцієнта  $k_E = W_L / W_g$  ( $W_L$  – енергія, що споживається навантаженням за добу,  $W_g$  – енергія що споживається з мережі) [5]. За цього прийнято співвідношення тарифів: для трьох тарифів денний (напівпіковий) – 1, нічний – 0,4, піковий – 1,5; для двох тарифів – денний (напівпіковий) – 1, нічний – 0,5. Значення  $W_L$  і  $W_g$  визначаються з врахуванням інтервалів часу та відносних значень тарифів.

**Результати моделювання.** Структура моделі для дослідження електромагнітних процесів в схемі регулювання потужності бойлера наведена на рис.4. За прийнятих параметрів схеми найбільше значення ТНДі для струму бойлеру  $\leq 7\%$  за  $0.5P_{ТНОМ}$ , що є цілком придатним. Залежність  $P_T(\gamma)$  є лінійною.

Результати моделювання роботи ФЕС з регулюванням потужності бойлеру для дня з максимальною генерацією ФБ наведені в табл. 2 ( $W_{LC}$  – загальна енергія, що споживається за добу,  $W_g$  – енергія, що споживається з мережі,  $W_T$  – енергія, що споживається ТЕН,  $k_{E3} – k_{E1}$  значення за трьох, двох і одного тарифів). Температура повітря в будинку може бути різною, відповідно, різними будуть витрати на кондиціювання, що враховано значенням  $C$ .

Таблиця 2

**Показники системи за максимальної генерації ФБ**

C	Регулювання потужності бойлеру						Підтримання температури води в бойлері					
	$W_{LC}$ , Вт·год	$W_g$ , Вт·год	$W_T$ , Вт·год	$k_{E3}$	$k_{E2}$	$k_{E1}$	$W_{LC}$ , Вт·год	$W_g$ , Вт·год	$W_T$ , Вт·год	$k_{E3}$	$k_{E2}$	$k_{E1}$
1	22630	40,5	3880	$\frac{5,76}{5,71}$	$\frac{6,04}{5,98}$	$\frac{5,04}{4,99}$	24530	37	3880	$\frac{4,57}{4,54}$	$\frac{5,22}{5,17}$	$\frac{5,06}{5,02}$
0.8	21910	48,2	3880	$\frac{8,05}{7,92}$	$\frac{8,42}{8,27}$	$\frac{7,18}{7,07}$	22760	888	3880	$\frac{5,31}{4,54}$	$\frac{5,9}{4,8}$	$\frac{5,68}{4,67}$
0.6	21020	191	3902	$\frac{14,66}{13,13}$	$\frac{14,5}{12,8}$	$\frac{13,06}{11,68}$	21000	1917	3880	$\frac{6,17}{4,23}$	$\frac{6,63}{4,14}$	$\frac{6,33}{4,04}$

Для порівняння в табл. 2 за тих же умов наведені дані в разі використання бойлеру з підтриманням заданого значення температури води. За цього розглянуто регулювання потужності ФБ (значення  $k_E$  в чисельнику) для виключення генерації енергії в мережу та генерація надлишкової енергії в мережу з оплатою як за споживання (значення  $k_E$  в знаменнику). Отримані дані свідчать про можливість практично повного використання енергії ФБ ( $W_g/W_{LC} = 191/21020 = 0,009$ ) в разі регулювання потужності бойлеру зі зниженням витрат на енергію спожиту з мережі порівняно з варіантом без регулювання.

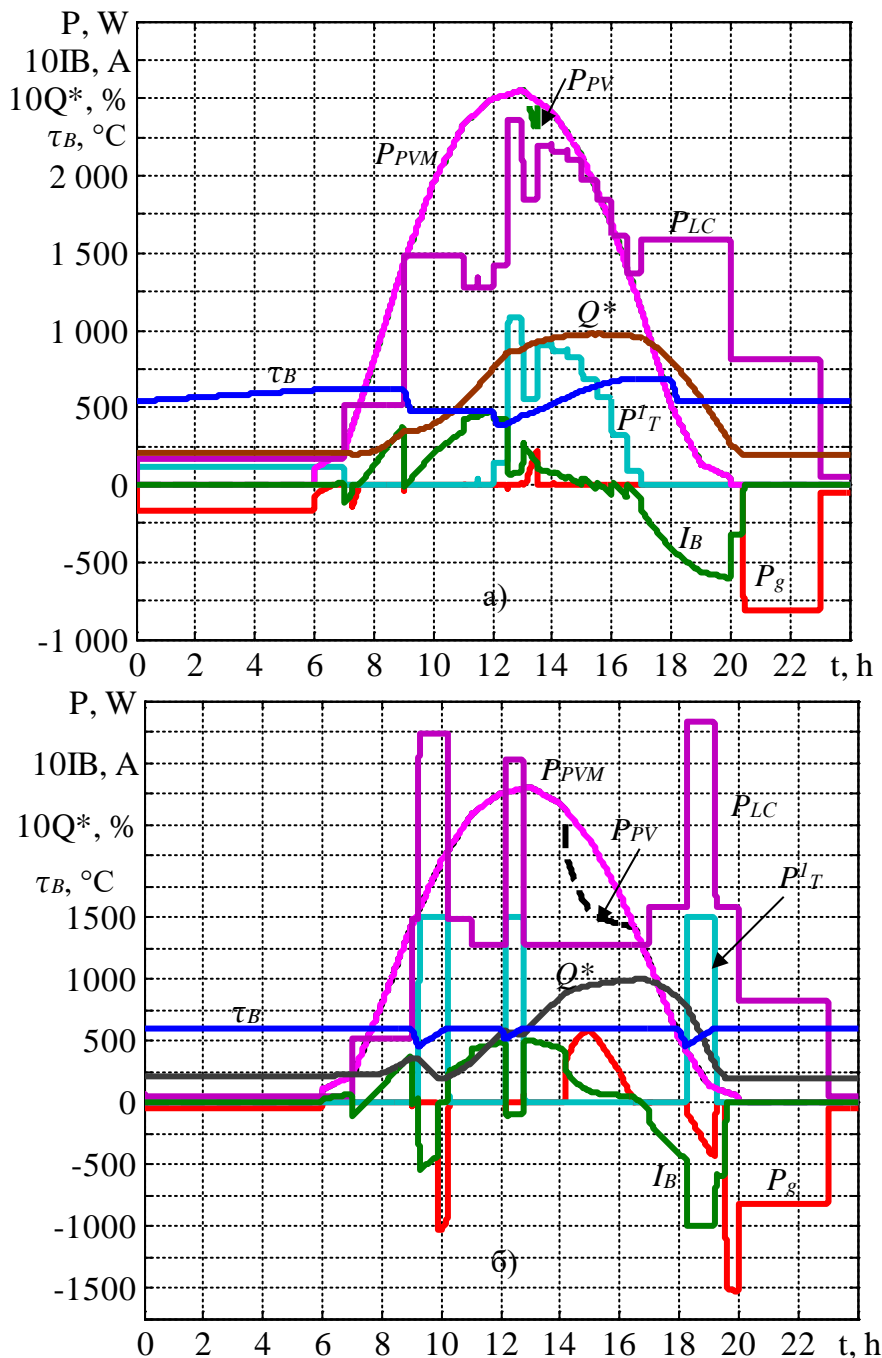
Аналогічні дані наведені в табл. 3 для дня липня з генерацією, що близька до середньомісячної, що свідчать про повне використання енергії ФБ за регулювання потужності бойлеру при змінюванні споживання енергії на кондиціювання.

Таблиця 3

**Показники системи за середньомісячної генерації ФБ**

C	Регулювання потужності бойлеру						Підтримання температури води в бойлері					
	$W_{LC}$ , Вт·год	$W_g$ , Вт·год	$W_T$ , Вт·год	$k_{E3}$	$k_{E2}$	$k_{E1}$	$W_{LC}$ , Вт·год	$W_g$ , Вт·год	$W_T$ , Вт·год	$k_{E3}$	$k_{E2}$	$k_{E1}$
0	14340	0,15	3874	21,57	15,75	9,36	15710	1128	3880	$\frac{6,33}{4,65}$	$\frac{6,25}{4,33}$	$\frac{5,94}{4,19}$
0,2	14980	22,4	3878	9,84	7,57	5,21	17470	122	3880	$\frac{5,11}{4,97}$	$\frac{5,36}{5,16}$	$\frac{5,16}{4,98}$
0,4	15740	1,8	3880	6,12	5,17	3,83	19230	0	3880	3,59	3,99	3,9

На рис. 6 наведено осцилограми загальної потужності навантаження  $P_{LC}$ , потужності, що споживається з мережі  $P_g$ , потужності бойлеру  $P^I_T$ , потужності ФБ в режимі МРРТ  $P_{PVМ}$ , потужності ФБ, що використовується на споживання  $P_{PV}$ , ступеню заряду АКБ  $Q^*$ , струму АКБ  $I_B$ , температури води в бойлері  $t_B$  за максимальної генерації ФБ та  $C = 0,8$ . На рис. 6, а осцилограми відповідають роботі з регулюванням потужності, на рис.6,б робота з підтриманням заданого значення  $t_B$ .



**Рис. 6. Осцилограми процесів в системі за максимальної генерації ФБ:  
 а) в разі регулювання потужності бойлеру; б) без регулювання потужності бойлеру**

На рис. 7 наведено аналогічні осцилограми для дня липня з середньомісячною генерацією за  $C=0$ . В даному випадку також забезпечується виключення споживання електроенергії з мережі в вечірній пік.

За низької генерації формування графіку  $Q(t)$ , коли заряд АКБ до 100% не можливий можна використовувати стандартний режим роботи бойлеру з підтриманням температури води на заданому значенні.

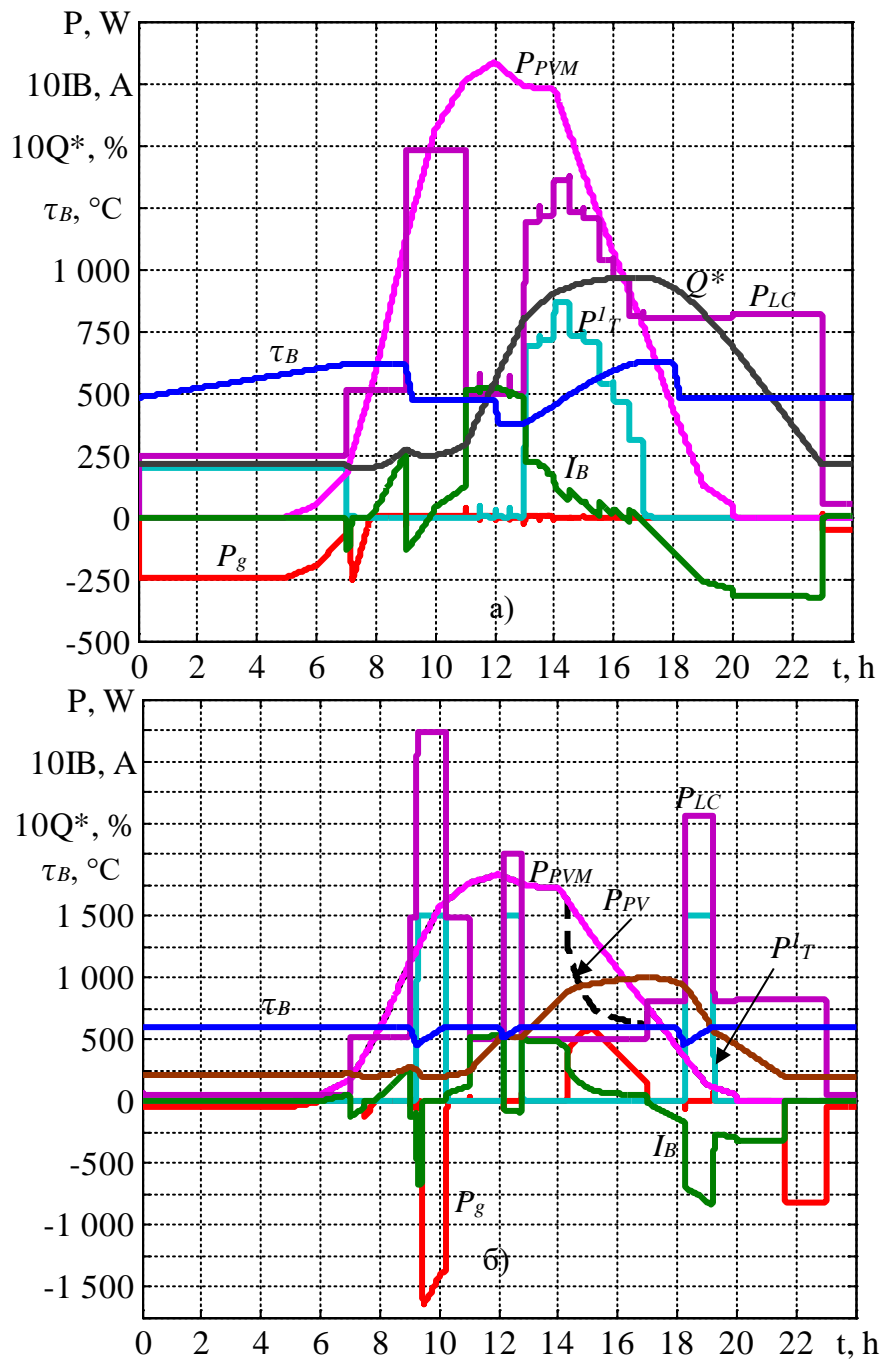


Рис. 7. Осцилограми процесів в системі за середньомісячної генерації ФБ в липні:  
 а) в разі регулювання потужності бойлеру; б) без регулювання потужності бойлеру

Таблиця 3

Результати моделювання для похмурого дня липня

Варіант	$k_{E3}$	$k_{E2}$	$k_{E1}$
1	1,346	1,423	1,416
2	1,775	1,706	1,437
3	2	1,858	1,437

Результати моделювання для похмурого дня липня за генерації ФБ, що становить 0,23 від максимальної наведено в табл. 3: варіант 1 без використання нічного заряду АКБ; варіант 2 з використанням нічного заряду АКБ; варіант 3 з нічним зарядом АКБ та підігрівом води до максимальної температури 75°C та підтримуючим підігрівом вдень. Осцилограми для варіанту 3 наведені на рис. 8.

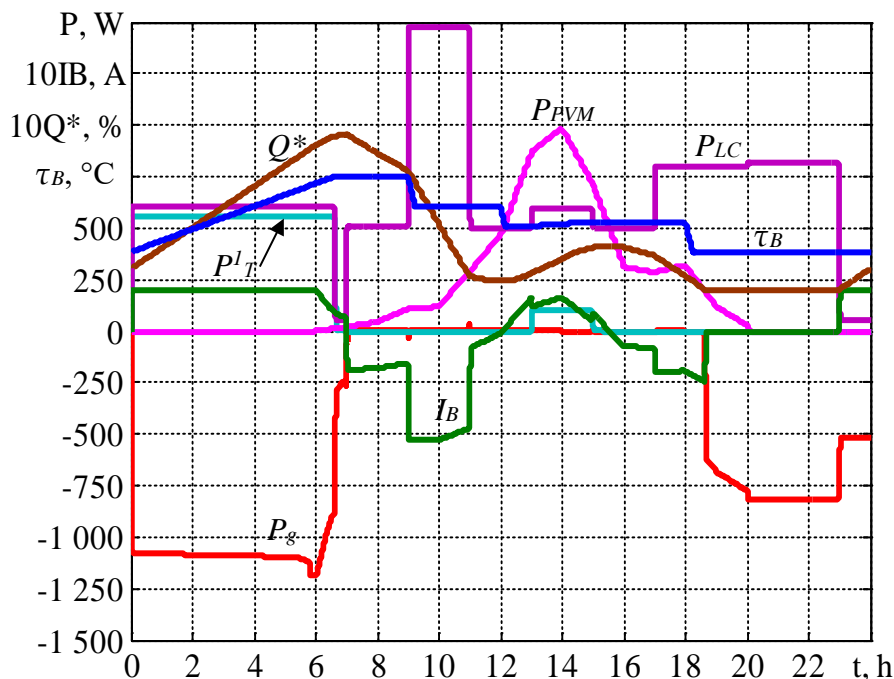


Рис. 8. Осцилограми процесів в системі для похмурого дня липня

**Висновки.** Показана можливість складання 7 рівноцінних сценаріїв енергоспоживання (на тиждень) з плануванням життєдіяльності родини протягом доби. За цього використано планування енерговитратних операцій в часі без введення суттєвих обмежень при відхиленні загального енергоспоживання, що не перевищує 10%.

Запропонована структура передбачає введення блока керування з контролем ступеню заряду АКБ, датчиком температури води бойлера та регулятором потужності. В налаштуванні гібридного мережевого інвертора ФЕС задається обмеження максимального ступеню розряду АКБ. В схемі регулятора потужності використовується випрямляч з ШІМ регулюванням вихідної напруги, що підключається до ТЕНу. Параметри схеми регулятора визначаються за умови забезпечення ТНД струму, що споживається з мережі не вище 7 %.

Встановлена потужність ФБ обирається за умови забезпечення енергоспоживання оселі та заряду АКБ на інтервалі часу (7:00–17:00) для дня влітку з максимальною генерацією ФБ за архівними даними.

Регулювання потужності бойлеру здійснюється на інтервалі (11:00–17:00) з дискретністю в часі  $\Delta t$  за відхиленням графіку ступеню заряду АКБ  $Q(t)$  від заданого  $Q_R(t)$ . Графік  $Q_R(t)$  має східчасту форму з прийнятою дискретністю в часі та визначається за експоненційним законом. Початкове значення встановлюється за вимірним значенням  $Q$ .

Розроблено модель для дослідження енергетичних процесів в бойлері з завданням добового графіку об'єму споживання теплої води заданої температури і функцією термостату. Модель бойлеру та блоку керування введені до складу загальної моделі системи.

За дискретністю  $\Delta t = 0,5$  години і прийнятого графіку споживання теплої води з температурою 37 °C для дня з максимальною генерацією ФБ в разі змінювання відносного

значення енергоспоживання кондиціонера ( $C$ ) значення невикористаної енергії ФБ не перевищує 1% відносно загального споживання. Аналогічна картина за цих же умов має місце для дня влітку з середньою генерацією. За максимальної генерації ФБ для  $C = 0,8$  для однієї ставки тарифу маємо значення  $k_{EI} = 7,18/7,07$ . Для порівняння, за відсутності регулювання і підтриманні заданого значення температури води в бойлері (за того ж споживання теплої води) маємо генерацію енергії в мережу  $W_g=888$  Вт·год і значення  $k_{EI} = 4,66$  (зниження в 1.52 рази). В цьому разі генерація оплачується як споживання. Якщо використовується регулювання потужності ФБ, то маємо невикористану енергію ФБ 888 Вт·год і значення  $k_{EI} = 5,68$  (зниження в 1.26 рази). За середньомісячної генерації ФБ в липні маємо зниження, відповідно, в  $9,36/4,19=2,23$  рази та  $9,36/5,94=1,57$ . Ще більш суттєвий ефект досягається за двох та трьох тарифів.

Подальший напрямок роботи пов'язаний з забезпеченням температурних режимів з врахуванням змінювання споживання та розвитком принципів реалізації запропонованих рішень з використанням даних прогнозу.

### References

1. Conext SW. Hybrid Inverter. URL: <https://www.se.com/ww/en/product-range-presentation/61645-conext-sw/>
2. ABB solar inverters. Product manual REACT-3.6/4.6-TL (from 3.6 to 4.6 kW). URL: <https://www.abb.com/solarinverters>.
3. Photovoltaic geographical information system. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#SA](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA).
4. Nayanatara, C., Divya, S., Mahalakshmi, E. (2018). Micro-Grid Management Strategy with the Integration of Renewable Energy Using IoT. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, Chennai, India, 28–29 March 2018; pp. 160–165.
5. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Romanchenko, J., Marchenko, R., Yakymets, S. (2022). Installed Power of the Grid-Tied Photovoltaic System with Battery for Self-Consumption of the Local Object. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2022; pp. 1–6, DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005628.
6. Shavolkin, O., Shvedchykova, I. (2020). Improvement of the multifunctional converter of the photoelectric system with a storage battery for a local object with connection to a grid. *Proceedings of the IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2020, P. 287–292, DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250096.
7. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Kolcun, M., Medved', D. (2023). Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the

### Література

1. Conext SW. Hybrid Inverter. URL: <https://www.se.com/ww/en/product-range-presentation/61645-conext-sw/>
2. ABB solar inverters. Product manual REACT-3.6/4.6-TL (from 3.6 to 4.6 kW). URL: <https://www.abb.com/solarinverters>.
3. Photovoltaic geographical information system. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#SA](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA).
4. Nayanatara C., Divya S., Mahalakshmi E. Micro-Grid Management Strategy with the Integration of Renewable Energy Using IoT. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, Chennai, India, 28–29 March 2018. P. 160–165.
5. Shavolkin O., Shvedchykova I., Romanchenko J., Marchenko R., Yakymets S. Installed Power of the Grid-Tied Photovoltaic System with Battery for Self-Consumption of the Local Object. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005628.
6. Shavolkin O., Shvedchykova I. Improvement of the multifunctional converter of the photoelectric system with a storage battery for a local object with connection to a grid. *Proceedings of the IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 287–292. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250096.
7. Shavolkin O., Shvedchykova 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

Power Consumed from the Grid. *Energies*, Vol. 15, No. 16, P. 5851, <https://doi.org/10.3390/en16155851>.

8. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Lishchuk, V., Stanovskyi, Y. (2023). Improving a model of the hybrid photovoltaic system with a storage battery for local object's self-consumption involving the setting of power consumed from the grid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 8 (123), No. 3, P. 6–16, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280053/>

9. Pater, S. (2023). Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems with Heat Pumps in Poland. *Energies*, Vol. 10, No. 16, P. 4003, <https://doi.org/10.3390/en16104003>.

10. Andres Annuk, Erkki Jõgi, Heiki Lill, Janar Kalder, Mihkel Härm, Sergei Trashchenkov, Alo All (2018). Augmentation of Self-Consumption of Electricity by Using Boilers and Batteries for Residential Buildings. *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, October 2018, DOI: [10.1109/ICRERA.2018.8566872](https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566872).

11. Zelba, M., Deveikis, T., Barakauskas, J., Baronas, A., Gudžius, S., Jonaitis, A., Giannakis, A. (2022). A Grid-Tied Inverter with Renewable Energy Source Integration in an Off-Grid System with a Functional Experimental Prototype. *Sustainability*, Vol. 2, No. 14, P. 13110, <https://doi.org/10.3390/su142013110>.

12. M. Usman Saleem, Mustafa Shakir, M. Rehan Usman, M. Hamza Tahir Bajwa, Noman Shabbir, Payam Shams Ghahfarokhi and Kamran Daniel (2023). Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids. *Energies*, Vol. 12, No. 16, P. 4835, <https://doi.org/10.3390/en16124835>.

13. Iker Diaz de Cerio Mendaza, Birgitte Bak-Jensen, Zhe Chen (2013). Electric Boiler and Heat Pump Thermo-Electrical Models for Demand Side Management Analysis in Low Voltage Grids. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, Vol. 1, No. 2, P. 52–59, DOI: 10.12720/sgce.2.1.52-59.

14. Simplified Model of a Small Scale Micro-Grid-MATLAB & Simulink. MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html>.

from the Grid. *Energies*. 2023. Vol. 15, No. 16. P. 5851. <https://doi.org/10.3390/en16155851>.

8. Shavolkin O., Shvedchykova I., Lishchuk V., Stanovskyi Y. Improving a model of the hybrid photovoltaic system with a storage battery for local object's self-consumption involving the setting of power consumed from the grid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 8 (123). No. 3. P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280053/>

9. Pater S. Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems with Heat Pumps in Poland. *Energies*. 2023. Vol. 10. No. 16. P. 4003. <https://doi.org/10.3390/en16104003>.

10. Andres Annuk, Erkki Jõgi, Heiki Lill, Janar Kalder, Mihkel Härm, Sergei Trashchenkov, Alo All. Augmentation of Self-Consumption of Electricity by Using Boilers and Batteries for Residential Buildings. *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. October 2018. DOI: [10.1109/ICRERA.2018.8566872](https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566872).

11. Zelba M., Deveikis T., Barakauskas J., Baronas A., Gudžius S., Jonaitis A., Giannakis A. A Grid-Tied Inverter with Renewable Energy Source Integration in an Off-Grid System with a Functional Experimental Prototype. *Sustainability*. 2022. Vol. 2. No. 14. P. 13110. <https://doi.org/10.3390/su142013110>.

12. M. Usman Saleem, Mustafa Shakir, M. Rehan Usman, M. Hamza Tahir Bajwa, Noman Shabbir, Payam Shams Ghahfarokhi and Kamran Daniel. Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids. *Energies*. 2023. Vol. 12, No. 16, P. 4835, <https://doi.org/10.3390/en16124835>.

13. Iker Diaz de Cerio Mendaza, Birgitte Bak-Jensen, Zhe Chen. Electric Boiler and Heat Pump Thermo-Electrical Models for Demand Side Management Analysis in Low Voltage Grids. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2013. Vol. 1, No. 2. P. 52–59. DOI: 10.12720/sgce.2.1.52-59.

14. Simplified Model of a Small Scale Micro-Grid-MATLAB & Simulink. MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html>.

15. Mukul Singh and Omveer Singh (2019). Phasor Solution of a Micro-Grid to Accelerate Simulation Speed 2nd International Conference on Advanced Computing and Software Engineering (ICACSE-2019), P. 546–550. URL: <https://ssrn.com/abstract=3351025>.

16. Data sheet. LITHIUM IRON PHOSPHATE (LIFEPO4) BATTERY 12.8V 150Ah. URL: <https://www.enix-energies.com>.

17. OPzV12-100 (12V100Ah) HENGYANG RITAR POWER CO., LTD. URL: <https://www.ritarpower.com>.

15. Mukul Singh and Omveer Singh. Phasor Solution of a Micro-Grid to Accelerate Simulation Speed 2nd International Conference on Advanced Computing and Software Engineering (ICACSE-2019). 2019. P. 546–550. URL: <https://ssrn.com/abstract=3351025>.

16. Data sheet. LITHIUM IRON PHOSPHATE (LIFEPO4) BATTERY 12.8V 150Ah. URL: <https://www.enix-energies.com>.

17. OPzV12-100 (12V100Ah) HENGYANG RITAR POWER CO., LTD. URL: <https://www.ritarpower.com>.

**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](mailto: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](mailto:pidhainyi.mykola@gmail.com)

**SHAVOLKIN O. O., PIDHAINYI M. O.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

**USE OF AN ELECTRIC BOILER IN THE POWER SUPPLY SYSTEM TO PROVIDE  
THE SELF-CONSUMPTION OF THE RESIDENTIAL HOUSE  
WITH A HYBRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM**

**Purpose.** Increasing the efficiency of a hybrid photovoltaic system with a storage battery for the residential house needs by regulating the power of the electric boiler to maximize the use of photovoltaic battery energy for self-consumption, developing the principles of implementing an energy management system.

**Methodology.** Planning the residential house energy consumption. Analysis of energy processes in the warm water supply system and in the electrical circuits of the photovoltaic power system using computer modeling to assess the effectiveness of energy management.

**Results.** The structure of a boiler power regulator has been developed to ensure a current consumption close to a sinusoid for the entire adjustment range. Mathematical model of a boiler in a system for providing a house with warm water. Photovoltaic system structure with the introduction of a unit for forming the state of the storage battery charge and a boiler power regulator.

**Originality.** Proposed to form the graph of storage battery state of charge with regulation of the power consumed by the boiler according to deviation from the specified graph. This will contribute to more complete utilization of the photovoltaic battery energy and decrease the consumption of electricity from the grid. The possibility of using energy consumption scenarios with planning family life activities during the day without significant restrictions is substantiated. The boiler model has been improved in the daily operating cycle with a warm water consumption schedule. The structure of the model of energy processes in the power supply system of a house for the daily cycle of operation has been developed with the boiler model introduction that takes into account its temperature regime.

**Practical value.** The obtained solutions are the basis for the design of photovoltaic systems to provide the needs of residential homes.

**Keywords:** hybrid photovoltaic system; energy consumption scenarios; boiler energy consumption management; formation the batteries state of charge; modeling of energy processes.