

УДК 620.92

Олексій Боднарук, <https://orcid.org/0009-0001-3031-3644>

Алла Босак*, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський просп. 37, Київ, 03056, Україна

*Автор-кореспондент: allabosak@iit.kpi.ua

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ НАСОСІВ У БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЛЯХ

Анотація. В сучасних умовах, що характеризуються руйнуванням критичної інфраструктури та нестабільністю енергопостачання, особливо актуальним стає забезпечення надійного водопостачання у багатоповерхових будівлях. Дана стаття присвячена дослідженню можливостей та проблемам використання фотоелектричних станцій (ФЕС) для живлення насосів водопостачання як альтернативного джерела енергії. Основна мета дослідження полягає у визначенні ключових факторів, що впливають на ефективність та надійність систем живлення насосів водопостачання від ФЕС, а також у розробці рекомендацій щодо їх оптимізації. Детально проаналізовано вплив погодних умов, зокрема сонячної інсоляції та температури повітря, на продуктивність ФЕС. Розглядаються сезонні та добові коливання інсоляції, а також їх залежність від географічного розташування та атмосферних умов. Оцінюється вплив хмарності, опадів та туману на інтенсивність сонячного випромінювання, що досягає поверхні панелей ФЕС. Для аналізу ефективності системи розроблено математичну модель, яка враховує залежність вихідної потужності ФЕС від сонячної інсоляції та температури панелей, потужність насоса від необхідного напору та об'єму води, а також роботу алгоритму максимізації потужності (MPPT) та акумулювання енергії. Оцінюється роль алгоритмів MPPT у підвищенні ефективності використання сонячної енергії. Діаграма Ісікави використовується для систематизації ключових обмежень. Розроблена математична модель дозволяє кількісно оцінити вплив різних факторів на продуктивність системи та розробити оптимальні стратегії керування.

Ключові слова: фотоелектрична станція, живлення насоса, відновлювані джерела енергії, оптимізація.

1. Вступ

В умовах руйнування критичної інфраструктури інтеграція фотоелектричних станцій (ФЕС) для забезпечення живлення насосного обладнання у багатоповерхових будівлях набуває стратегічного значення. Зазначений підхід гарантує безперебійне водопостачання, мінімізуючи залежність від зовнішніх джерел електроенергії та забезпечуючи стабільне задоволення потреб мешканців, незважаючи на наявність електроживлення з централізованої мережі. У контексті воєнного стану, коли зростає ймовірність техногенних катастроф та навмисного виведення з ладу об'єктів критичної інфраструктури, автономне енергозабезпечення стає ключовим фактором стійкості та безпеки житлового фонду. Економічна доцільність впровадження ФЕС зумовлена зниженням операційних витрат на електроенергію, що зменшує обсяг загальних експлуатаційних витрат на обслуговування будівлі та є особливо актуальним в умовах макроекономічної нестабільності. Крім того, використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна енергія, може зменшити антропогенний вплив на навколишнє середовище шляхом скорочення викидів парникових газів [1].

Функціонування насосного обладнання системи водопостачання багатоповерхового житлового будинку характеризується залежністю від динамічних графіків водоспоживання мешканцями [2] та змінної генерації електричної енергії сонячною електростанцією. Традиційний профіль водоспоживання демонструє нерівномірний характер з вираженими піковими навантаженнями у ранкові та вечірні години, зумовленими інтенсифікацією побутової діяльності. Водночас вихідна потужність фотоелектричної генерації підпорядкована добовій кривій інсоляції та досягає максимуму в полуденний період. Диспарат між часовими вікнами пікового водоспоживання та максимальної генерації енергії ускладнює забезпечення стабільного та ефективного водопостачання. Подолання даної проблеми потребує інтеграції систем акумулювання енергії та застосування інтелектуальних алгоритмів керування, що дозволяють оптимізувати використання доступної енергії шляхом її накопичення під час низького водоспоживання та ефективного розподілу під час пікових навантажень, мінімізуючи залежність від зовнішніх джерел електропостачання та підвищуючи енергетичну автономність системи.

Змінні погодні умови впливають на вихідну потужність ФЕС, а отже на стабільність роботи насосів водопостачання. Тому розробка інтелектуальних систем керування, здатних максимізувати ефективність використання енергії, отриманої від ФЕС, є важливою задачею. На сьогоднішній день методи управління ФЕС включають різні підходи, серед яких найпоширенішими є методи максимізації ефективності, такі як метод відстеження точки максимальної потужності (MPPT) [3, 4]. Цей метод дозволяє системі автоматично знаходити оптимальну точку роботи панелі, забезпечуючи максимальну продуктивність за будь-яких погодних умов. Крім того, сучасні технології, такі як штучні нейронні мережі, допомагають покращити точність і адаптивність систем керування [5–8]. Вони можуть надавати точні прогнози сонячної інсоляції та інших погодних умов, дозволяючи системі адаптуватися до змінних умов і забезпечувати стабільне енергопостачання.

Мета роботи. Метою даного дослідження є комплексний аналіз факторів, що впливають на ефективність та надійність системи живлення насоса багатоквартирних житлових комплексів на основі фотоелектричних станцій з урахуванням зміни кліматичних умов та специфіки експлуатації в умовах нестабільної енергетичної інфраструктури. Досягнення поставленої мети передбачає розробку науково обґрунтованих рекомендацій щодо впровадження інтелектуальних систем керування, які забезпечують максимальну ефективність використання енергії, генерованої ФЕС, для стабільного та безперебійного водопостачання, мінімізуючи залежність від централізованої електромережі та знижуючи екологічне навантаження.

2. Аналіз факторів, що впливають на ефективність та надійність системи живлення насоса водопостачання від ФЕС

Оптимізація використання енергії від ФЕС для живлення насосів водопостачання залежить від ряду ключових обмежень, які впливають на ефективність та надійність системи. Врахування цих обмежень є критично важливим для розробки оптимальної моделі. Діаграма Ісікави (рис. 1) допомагає систематизувати та візуалізувати ці обмеження, що сприяє кращому розумінню факторів, які впливають на ефективність та надійність системи.

Розширюючи цю ідею, можна сказати, що ефективна оптимізаційна модель має враховувати не тільки технічні аспекти, але й економічні та екологічні фактори, а також вимоги до стійкості та надійності системи.



Рисунок 1. Ключові фактори, які впливають на ефективність та надійність системи живлення насоса від ФЕС

2.1. Погодні фактори

Сонячна інсоляція – це кількість сонячної енергії, яка досягає поверхні Землі за певний період часу. Вона вимірюється у ватах на квадратний метр ($Вт/м^2$) і залежить від кількох факторів, включаючи географічне розташування, час доби, пору року, атмосферні умови та кут падіння сонячних променів.

Для аналізу впливу кліматичних факторів на роботу ФЕС були використані емпіричні дані, зібрані на станції, розташованій у Київській області України, в період з 1.07.20 р. по 31.12.20 р. Аналіз цих даних дозволив визначити ключові фактори, що впливають на сонячну інсоляцію, серед яких:

- Циклічність та залежність сонячної інсоляції від часу доби, пори року та географічного розташування. Протягом дня інсоляція спочатку зростає, досягає максимуму опівдні, а потім зменшується (рис. 2). Зміна інсоляції протягом року впливає на сезонне виробництво електроенергії ФЕС (рис. 3).

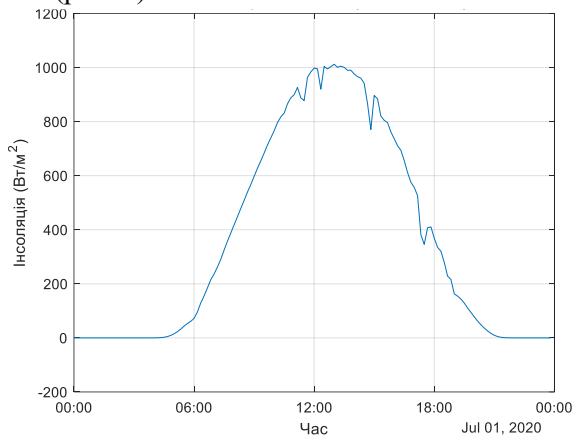


Рисунок 2. Інсоляція протягом дня

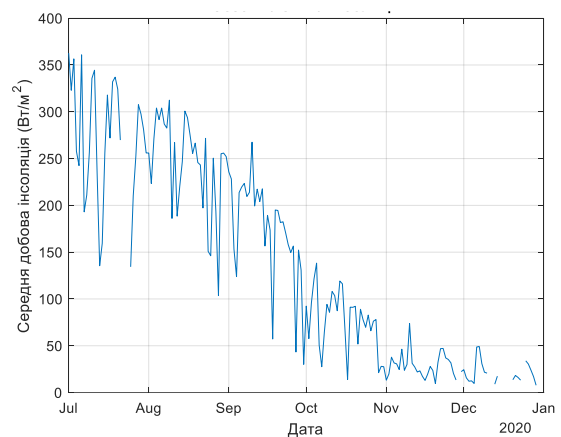


Рисунок 3. Сезонна змінна інсоляції

Залежність від погодних умов, таких як хмарність, опади та туман (рис. 4). Наявність хмар може значно зменшити інтенсивність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню ФЕС, і, крім того, зменшити вихідну потужність.

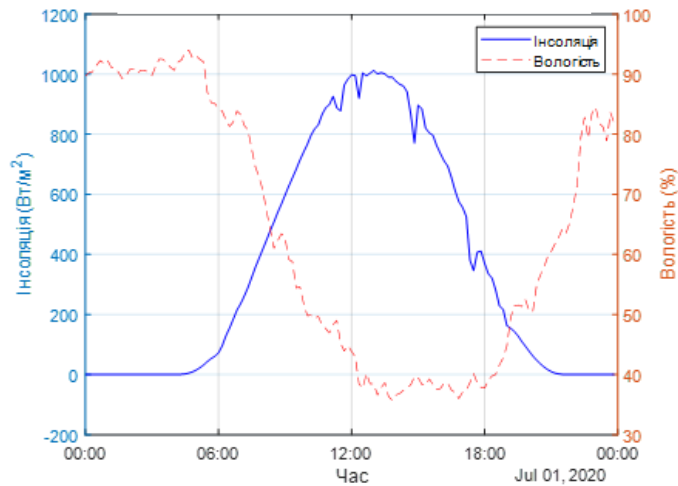


Рисунок 4. Інсоляція та вологість протягом дня

○ Кут нахилу панелей ФЕС впливає на кількість сонячної енергії, що поглинається [9, 10]. Оптимальний кут нахилу залежить від географічного розташування та пори року.

○ Орієнтація сонячних панелей впливає на кількість енергії, яку вони можуть генерувати. Південна орієнтація є оптимальною для Північної півкулі, але це залежить від конкретного розташування.

○ Будь-яке затінення панелей ФЕС (від сусідніх будівель, дерев тощо) може істотно погіршити їхню продуктивність [11]. Також часткове затінення може призвести до значного зменшення виробленої енергії.

○ Вплив аерозолів. Атмосферні аерозолі (пил, дим) можуть також зменшувати інсоляцію, досягаючи поверхні панелей.

Температура повітря.

○ Температура повітря змінюється залежно від пори року (рис. 5). Влітку температура може бути високою, що негативно впливає на продуктивність ФЕС, а взимку низька температура може створити проблеми в роботі інвертора та іншого обладнання.

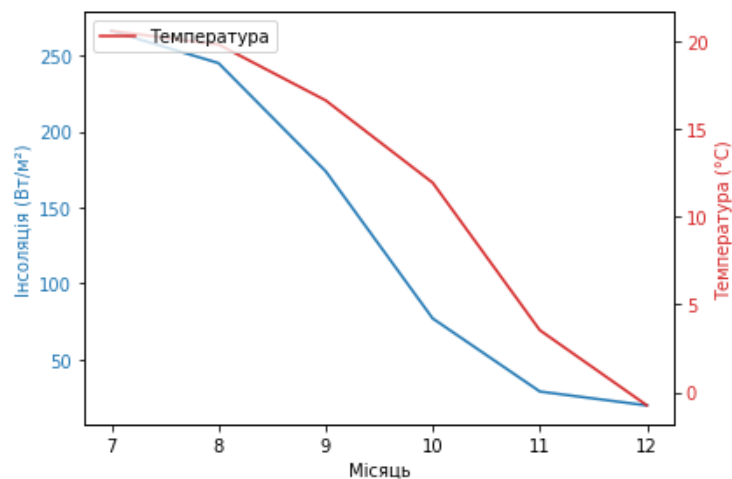


Рисунок 5. Залежність інсоляції та температури від пори року

○ Висока температура повітря нагріває сонячні панелі, що призводить до зменшення їхнього ККД. Для багатьох типів сонячних панелей існує залежність між температурою панелі та її вихідною потужністю. Зазвичай з підвищенням температури продуктивність панелі знижується.

○ Непередбачуваність погодних умов є однією з головних проблем для ефективного функціонування ФЕС. Зміни погоди, такі як раптова хмарність, опади або туман, можуть значно впливати на кількість сонячного випромінювання, що досягає панелей. Хмарність може різко знижувати інтенсивність сонячного світла, що призводить до зменшення вихідної потужності ФЕС. Також опади, туман та інші погодні явища можуть додатково ускладнювати передбачення та управління продуктивністю електростанції.

2.2. Характеристика ФЕС

Залежність потужності ФЕС від інсоляції.

Вихідна потужність ФЕС безпосередньо залежить від рівня інсоляції, що потрапляє на поверхню сонячних панелей (рис. 6). Це означає, що зі збільшенням інсоляції кількість генерованої електроенергії також зростає, і навпаки. Інсоляція є ключовим фактором, що визначає ефективність роботи ФЕС, оскільки вона впливає на електричні параметри системи, такі як напруга та струм, які формують криву IV (струм-напруга) панелі. Ця крива характеризує роботу сонячної панелі і визначає точку максимальної потужності, яку потрібно постійно відстежувати для оптимізації вихідної потужності.

Зміни інсоляції можуть бути досить різкими, особливо в умовах змінної хмарності або під час переходу дня в ніч. ФЕС не здатна миттєво адаптуватися до таких змін, тому система відстеження МРРТ має забезпечувати постійний моніторинг та коригування робочої точки на кривій IV. Це важливо для підтримки максимальної ефективності системи, навіть при швидких коливаннях інсоляції. Належне відстеження МРРТ гарантує, що ФЕС працює в оптимальному режимі, забезпечуючи стабільне та ефективне виробництво електроенергії.

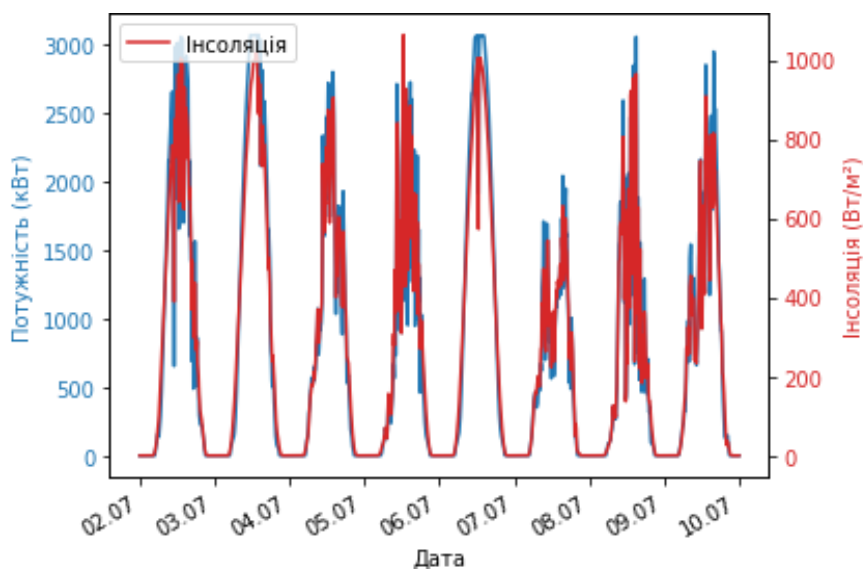


Рисунок 6. Залежність потужності ФЕС від інсоляції протягом літнього періоду

Залежність потужності ФЕС від температури.

Залежність потужності ФЕС від температури є важливим аспектом, який необхідно враховувати під час проектування та експлуатації сонячних енергетичних установок. Відомо, що вихідна потужність сонячних панелей зменшується з підвищенням температури їх поверхні. Цей феномен пояснюється тим, що підвищення температури призводить до збільшення внутрішнього опору панелі, що, своєю чергою, зменшує ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. На рис. 7 видно, що за низьких температур (10–20 °C) потужність може мати широкий діапазон значення, після 22,5 °C зменшується, а за більш високих температур (близько 30 °C) потужність, переважно, має сталі значення.

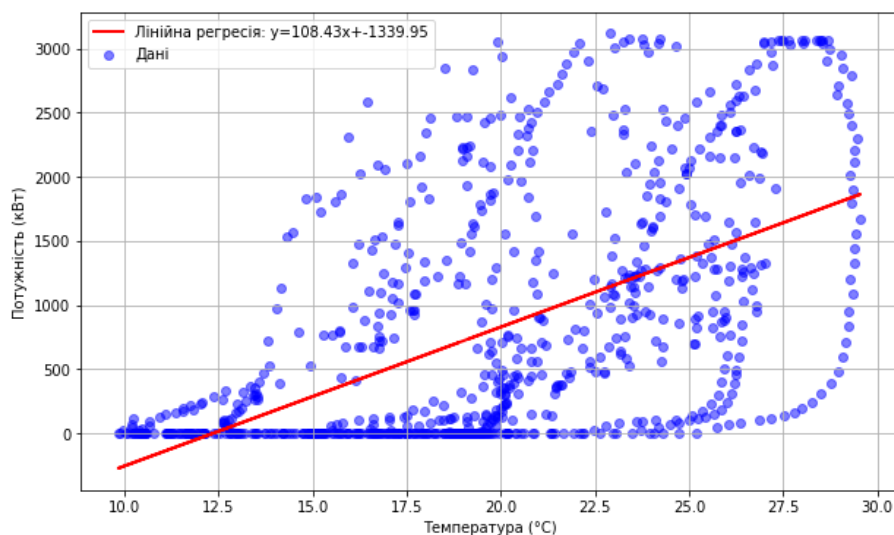


Рисунок 7. Залежність потужності ФЕС від температури

Виробники сонячних панелей надають температурні коефіцієнти, які вказують на відсоток зниження потужності за підвищення температури на 1 градус Цельсія [12]. Ці коефіцієнти є критично важливими для точного моделювання роботи системи в реальних умовах. Наприклад, якщо температурний коефіцієнт панелі становить $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$, це означає, що за підвищення температури на 10°C від номінальної потужності панелі знизиться на 4%. Врахування цих коефіцієнтів дозволяє оптимізувати роботу системи та забезпечити її стабільну продуктивність протягом усього терміну експлуатації. Графік залежності потужності від температури для різних діапазонів інсоляції представлено на рис. 8.

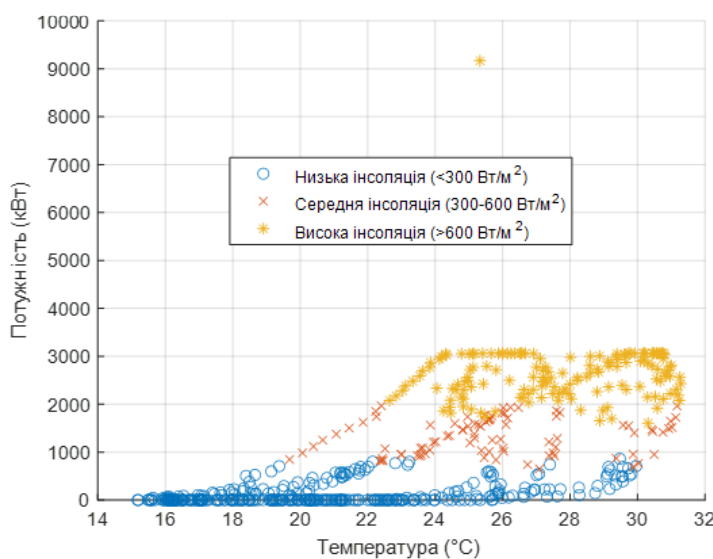


Рисунок 8. Залежність потужності ФЕС від температури для різних діапазонів інсоляції

Температурна залежність потужності може значно відрізнятися для різних типів сонячних панелей, таких як монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Монокристалічні панелі, як правило, мають кращі температурні характеристики, ніж полікристалічні, завдяки більшій чистоті кремнію. Тонкоплівкові панелі, такі як аморфний кремній, кадмій-телурид або мідно-індій-галій-селенід (CIGS), можуть ефективніше працювати в умовах низького освітлення та високих температур, ніж традиційні кремнієві панелі. Це робить вибір на користь тонкоплівкових панелей ефективним для регіонів з екстремальними кліматичними умовами, де температура може значно перевищувати

оптимальні показники для інших типів сонячних панелей. Крім того, гнучкість тонкоплівкових панелей дозволяє встановлювати їх на різноманітні поверхні, включаючи такі, які не є ідеально рівними.

2.3. Вимоги до живлення насосів

Основними чинниками, які впливають на вимоги до живлення насосів, є [13]:

Потужність насоса. Кожен насос має певну номінальну потужність, необхідну для нормального функціонування. Ця потужність залежить від конкретного застосування насоса, яке може варіюватися від перекачування води до роботи з більш в'язкими рідинами. Вибір потужності насоса є критично важливим, оскільки він безпосередньо впливає на розмір та потужність ФЕС, які забезпечують його енергопостачання.

Напір і об'єм води. Напір та об'єм води, які повинні забезпечити насос, залежать від специфічних потреб системи водопостачання. Вимоги до напору та об'єму води визначаються під час проектування системи і впливають на вибір насоса з відповідними технічними характеристиками. Водночас потреби в напорі та об'ємі води можуть змінюватися протягом дня або сезону, що також необхідно враховувати.

Крива навантаження. Насоси мають криву навантаження, яка демонструє залежність споживання енергії від рівня навантаження. Використання насосів з частотним регулюванням дозволяє оптимізувати потужність під час роботи, що сприяє економії енергії. Це є важливим фактором для ефективного функціонування системи водопостачання.

Пускові струми. Пускові струми насосів можуть значно перевищувати їхню номінальну потужність, що вимагає спеціального підходу до проектування електропостачання системи. Система ФЕС повинна забезпечувати ці пускові струми, що є критичним для стабільної роботи насосів.

Режим роботи. Деякі насоси працюють у постійному режимі, тоді як інші можуть мати змінні режими роботи залежно від потреб системи. Графік роботи насосів може змінюватися, що необхідно враховувати під час проектування та експлуатації систем водопостачання.

Ефективність. Насоси мають коефіцієнт корисної дії, який визначає ефективність перетворення електричної енергії на механічну. Важливо обирати насоси з високим ККД для мінімізації енергетичних втрат і забезпечення максимальної продуктивності системи.

2.4. Ефективність МРРТ є критично важливим аспектом у системах сонячної енергетики [14, 15]. МРРТ є технологією, яка дозволяє сонячним інверторам або контролерам заряду максимізувати потужність, що отримується від сонячних панелей, шляхом оптимізації робочої точки системи. Основними критеріями, які впливають на ефективність МРРТ, є:

Точність алгоритму МРРТ. Алгоритми відстеження максимальної потужності повинні з високою точністю і швидкістю визначати точку максимальної потужності (МРР) на кривій струм-напруга (IV) сонячної панелі, щоб забезпечити максимальну вихідну потужність. Неточне відстеження МРР може призвести до значних втрат у вихідній потужності, тим самим знижуючи загальну продуктивність системи.

Швидкодія алгоритму МРРТ є критично важливою для забезпечення максимальної ефективності фотоелектричних систем. Алгоритм повинен оперативно реагувати на зміни інсоляції та температури, щоб постійно відстежувати точку максимальної потужності. Якщо алгоритм є занадто повільним, він не здатний вчасно адаптуватися до швидких змін умов, що може призвести до зниження ефективності всієї системи.

Обмеження алгоритмів МРРТ. Алгоритми максимального відстеження точки потужності стикаються з кількома обмеженнями, що можуть впливати на їх ефективність. По-перше, вони можуть потрапляти в локальні максимуми на кривій потужності сонячних панелей, що призводить до зниження загальної ефективності системи. По-друге, ефективність цих алгоритмів може варіюватися залежно від змінних умов навколишнього середовища, таких як часткове затінення, що ускладнює їх адаптацію до різних ситуацій. Нарешті, вибір параметрів алгоритму також відіграє важливу роль у його

продуктивності, оскільки невідповідні налаштування можуть призвести до неефективного відстеження точки максимальної потужності.

Вплив на систему. Алгоритм MPPT відіграє ключову роль у підвищенні загальної ефективності системи ФЕС з насосом. Постійне відстеження точки максимальної потужності дозволяє MPPT адаптуватися до змінних умов, таких як інтенсивність сонячного світла й температурні коливання, що забезпечує досягнення максимальної ефективності системи.

2.5. Обмежене електропостачання, акумулятори та мережа можуть вплинути на ефективність і надійність енергосистем. Обмежене електропостачання може призвести до частих відключень електроенергії, що ускладнює роботу підприємств та негативно впливає на побутових споживачів. Акумулятори, які використовуються для зберігання енергії, мають обмежену ємність та термін служби, що може зменшити можливості резервного живлення [16, 17]. Обмеження, пов'язані з мережевою інфраструктурою, ускладнюють ефективний розподіл електроенергії. Подолання цих перешкод потребує цільових інвестицій та масштабної модернізації енергетичної інфраструктури з метою забезпечення стабільного та надійного енергопостачання.

3. Математична модель системи

Для формалізації задачі оптимізації та створення ефективної моделі керування системою ФЕС-насос необхідно розробити математичну модель, яка описує взаємодію всіх компонентів системи. Ця модель дозволить аналізувати поведінку системи в різних умовах та розробляти стратегії для її оптимізації. Модель враховує обмеження, описані у попередніх розділах, та цільову функцію, спрямовану на досягнення максимальної ефективності запропонованої системи.

3.1. Математична модель фотоелектричної станції

Вихідна потужність ФЕС (P_{fes}) залежить від сонячної інсоляції (G), температури панелей (T_{pv}) та технічних характеристик сонячних панелей. Для розрахунку залежності потужності від інсоляції та температури будемо використовувати наближену формулу (1).

Вихідна потужність ФЕС може бути розрахована наступним чином:

$$P_{fes} = P_{fes_max} (G/G_{stc}) * (1 + \alpha_p * (T_{pv} - T_{stc})), \quad (1)$$

де P_{fes} – вихідна потужність ФЕС (кВт); P_{fes_max} – максимальна потужність ФЕС в стандартних умовах тестування (STC) (кВт); G – сонячна інсоляція ($\text{Вт}/\text{м}^2$); G_{stc} – інсоляція в стандартних умовах тестування ($1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$); T_{pv} – температура сонячних панелей ($^{\circ}\text{C}$); T_{stc} – температура в стандартних умовах тестування ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$); α_p – температурний коефіцієнт потужності ($\%/^{\circ}\text{C}$).

Температурний коефіцієнт потужності завжди має від'ємне значення, оскільки потужність панелі зменшується з підвищенням температури.

Типові значення для різних типів сонячних панелей:

Кристалічні кремнієві панелі (монокристалічні та полікристалічні) зазвичай мають температурний коефіцієнт потужності в діапазоні від $-0,3 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ до $-0,5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Це означає, що на кожен градус Цельсія вище $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ потужність панелі знижується на $0,3\text{--}0,5 \text{ } \%$.

Тонкоплівкові панелі (CdTe, CIGS, аморфний кремній) зазвичай мають менший температурний коефіцієнт потужності, ніж кристалічні кремнієві панелі, – в діапазоні від $-0,2 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ до $-0,3 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Це робить їх менш чутливими до високих температур.

Температура сонячних панелей T_{pv} залежить від температури навколишнього середовища T_{air} та сонячної інсоляції G , її можна розрахувати за формулою (2):

$$T_{pv} = T_{air} + (G/800) * (NOCT - 20), \quad (2)$$

де: T_{air} – температура навколишнього середовища; $NOCT$ – номінальна робоча температура панелі (Nominal Operating Cell Temperature) за певних стандартних умов, визначених виробником, °C [18]. Зазвичай ці умови включають:

- Інсоляцію – 800 Вт/м²;
- Температуру навколишнього повітря – 20 °C.
- $(G/800)$ – вираз показує, що сонячна інсоляція відрізняється від 800 Вт/м². Якщо інсоляція вище 800 Вт/м², то $G/800 > 1$ і температура панелі буде збільшуватися;
- $(NOCT - 20)$ – цей вираз показує, на скільки температура панелі в стандартних умовах тестування вище за температуру навколишнього повітря. Різниця між $NOCT$ та 20 °C вказує на те, як сильно панель нагрівається під дією сонячного випромінювання за умов, за яких визначено $NOCT$.

3.2. Математична модель насоса

Потужність насоса (P_{pump}) залежить від необхідного напору (H), об'єму води (Q) та ефективності насоса (η_{pump}). Потужність насоса можна розрахувати за формулою (3):

$$P_{pump} = (\rho * g * H * Q) / \eta_{pump}, \quad (3)$$

де: P_{pump} – потужність насоса (Вт); ρ – густина рідини (кг/м³); g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²); H – необхідний напір (м); Q – об'ємний потік води (м³/с); η_{pump} – ефективність насоса (0-1).

Об'єм води, яку накачує насос, V_{pump} пропорційний до часу роботи T та об'єму накачування за одиницю часу Q , представлено формулою (4):

$$V_{pump} = Q * T. \quad (4)$$

3.3. Математична модель алгоритму МРРТ

Алгоритм МРРТ намагається забезпечити роботу ФЕС у точці максимальної потужності (P_{mppt}). Ефективність МРРТ залежить від методу, який використовується для відстеження точки максимальної потужності. Для моделювання припустимо, що є деяка функція (5), яка описує алгоритм:

$$P_{mppt} = m(G, T_{pv}, Panel_{Params}, MPPT_{Params}), \quad (5)$$

де: P_{mppt} – потужність ФЕС після МРРТ (Вт); m – функція, що описує алгоритм МРРТ; $Panel_{Params}$ – технічні характеристики сонячних панелей; $MPPT_{Params}$ – параметри алгоритму МРРТ.

У конкретній реалізації алгоритму МРРТ це буде не просто функція, а сукупність кроків, які залежать від вибраного алгоритму (наприклад, Perturb & Observe, Incremental Conductance).

3.4. Математична модель акумулятора

Заряд акумулятора (E_{batt}) залежить від енергії, що надходить від ФЕС (E_{fes}), втрат при заряді (E_{loss_charge}) та розряді ($E_{loss_discharge}$); при цьому процеси заряду та розряду обмежуються поточним

станом заряду акумулятора (SOC). Поточну енергію акумуляторів можна розрахувати за формулою (6):

$$E_{batt}(t+1) = E_{batt}(t) + E_{fes}(t) - E_{loss_charge}(t) - E_{loss_discharge}(t) - E_{pump_from_battery}(t), \quad (6)$$

де: $E_{batt}(t)$ – енергія в акумуляторах на момент часу (кВт·год); $E_{fes}(t)$ – енергія, що надійшла від ФЕС за проміжок часу (кВт·год); $E_{loss_charge}(t)$ – втрати при зарядці (кВт·год); $E_{loss_discharge}(t)$ – втрати при розрядці (кВт·год); $E_{pump_from_battery}(t)$ – енергія, що надходить з акумуляторної батареї до насоса (кВт·год).

Поточний стан заряду акумуляторів (SOC) представлено формулою (7):

$$SOC(t) = E_{batt}(t) / E_{batt_max}, \quad (7)$$

де: $SOC(t)$ – поточний стан заряду акумуляторів; $E_{batt}(t)$ – поточна енергія акумуляторів (кВт·год); E_{batt_max} – максимальна ємність акумуляторів (кВт·год).

3.5. Математична модель споживання з мережі

Якщо електроенергія надходить з мережі (E_{grid}), то споживана насосом потужність (P_{pump}) визначається потужністю, що надходить з мережі (P_{grid}), і коефіцієнтом ефективності перетворення (η_{grid}), формула (8):

$$P_{pump} = P_{grid} * \eta_{grid}. \quad (8)$$

3.6. Математична модель системи управління енергією

Система управління енергією є важливою частиною математичної моделі ФЕС-насос-мережа. Вона буде використовувати алгоритми керування для перемикання між різними джерелами енергії (ФЕС, акумулятори, мережа) та управління споживанням електроенергії.

Система управління буде:

- Визначати пріоритетність джерела живлення насоса (ФЕС → акумулятори → мережа);
- Керувати зарядом акумуляторів, відстежуючи SOC;
- Забезпечувати баланс між виробництвом та споживанням електроенергії;
- Використовувати алгоритми МРРТ.

3.7. Загальний енергетичний баланс системи ФЕС → акумулятори → насос → мережа

Загальний енергетичний баланс системи можна представити формулою (9):

$$E_{fes}(t) + E_{grid}(t) + E_{discharge}(t) = E_{pump}(t) + E_{charge}(t) + E_{loss}(t), \quad (9)$$

де: E_{fes} – енергія, згенерована ФЕС за проміжок часу (кВт·год); $E_{discharge}$ – енергія, віддана акумуляторами за проміжок часу (кВт·год); E_{grid} – енергія, спожита від мережі за проміжок часу (кВт·год); E_{pump} – енергія, споживана насосом за проміжок часу (кВт·год); E_{charge} – енергія, використана

для заряджання акумуляторів за проміжок часу (кВт·год); E_{loss} – сумарні втрати в системі за проміжок часу (кВт·год).

Розроблена математична модель комплексно описує систему водопостачання багатоповерхового будинку, що інтегрує фотоелектричну станцію, насосне обладнання, акумуляторну батарею та підключення до електромережі, враховуючи залежність генерації ФЕС від сонячної інсоляції та температури, параметри насоса на основі необхідного напору та об'єму води, функціонування алгоритму максимізації потужності та процеси акумуляування енергії, а також визначаючи стратегії керування для оптимізації використання енергії з різних джерел та забезпечення стабільного водопостачання з урахуванням загального енергетичного балансу системи. Ця модель дозволяє аналізувати ефективність системи в різних умовах та розробляти стратегії оптимізації.

4. Висновки

Результати проведеного дослідження підтверджують перспективність інтеграції ФЕС для забезпечення електроживлення насосного обладнання систем водопостачання багатоповерхових житлових комплексів, особливо в умовах нестабільності енергетичної інфраструктури та підвищеної загрози її деградації. Встановлено, що ефективна експлуатація такої системи вимагає комплексного врахування низки факторів, серед яких ключовими є: мінливість метеорологічних умов, технічне обладнання, потреби водопостачання та ефективність алгоритмів максимізації точки потужності. Виявлено, що нестабільність сонячної інсоляції та коливання температури довкілля суттєво впливають на генерацію електроенергії ФЕС, що підкреслює необхідність впровадження адаптивних систем керування, здатних оперативно реагувати на зміни зовнішніх факторів. Правильний вибір типу насосного обладнання, врахування пускових струмів та змінних навантажень є критично важливими для забезпечення стабільної роботи системи. Ефективність алгоритмів МРРТ впливає на максимізацію вихідної потужності ФЕС, що вимагає застосування інтелектуальних алгоритмів, здатних адаптуватися до факторів, що впливають на генерацію ФЕС. Інтелектуальні системи керування, що об'єднують прогнозування метеорологічних умов та адаптивне керування насосним обладнанням, забезпечують оптимальне використання сонячної енергії та мінімізують залежність від централізованого електропостачання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку та впровадження таких інтелектуальних систем керування за умов динамічного водоспоживання. Впровадження отриманих результатів сприятиме підвищенню енергетичної стійкості та безпеки житлового фонду, зменшенню експлуатаційних витрат та зниженню антропогенного навантаження на довкілля.

Внесок авторів

Боднаруку О.Ю. належить аналіз впливу метеорологічних умов (сонячної інсоляції та температури) на продуктивність фотоелектричних станцій; збір та систематизація вихідних даних для моделювання та аналізу роботи систем живлення насосів водопостачання; аналіз літературних джерел щодо інтелектуальних систем керування та методів прогнозування метеорологічних умов; переклад анотації англійською мовою; оформлення списку посилань відповідно до вимог редакції наукового видання.

Босак А.В. належить ідея щодо застосування сонячних електростанцій для живлення насосів водопостачання в умовах деградації критичної інфраструктури; аналіз ключових факторів, що впливають на ефективність та надійність системи, а також розробка математичної моделі запропонованої системи.

Посилання

1. Chahartaghi M., Amirhossein N. Exergy, environmental, and performance evaluations of a solar water pump system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 43. 100933. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100933>
2. Rajkumar S. B., Nielsen A. Water distribution in high rise buildings. URL: <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400727.pdf>. (Last accessed: 27.02.2025).

3. Якушкін Т., Єршов Р., Степенко С. Порівняльний аналіз топологій та алгоритмів для відстежувачів точки максимальної потужності у фотоелектричних системах. *Технічні науки та технології*. 2023. № 2(32). С. 321–339. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339)
4. Sadick A. Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111632>
5. Perveen G., Rizwan M., Goel N., Anand P. Artificial neural network models for global solar energy and photovoltaic power forecasting over India. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2025. Vol. 47. Iss. 1. P. 864–889. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1826017>
6. Natarajan Y., Kannan S., Selvaraj C., Mohanty S. N. Forecasting energy generation in large photovoltaic plants using radial belief neural network. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2021. Vol. 31. 100578. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100578>
7. Hu K., Wang L., Li W., Cao S., Shen Y. Forecasting of solar radiation in photovoltaic power station based on ground-based cloud images and BP neural network. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2022. Vol. 16. P. 333–350. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12309>
8. Matushkin D. Photovoltaic generation forecasting models: conceptual ensemble architectures. *System Research in Energy*. 2024. No. 4(80). P. 56–64. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.056>
9. Božiková M., Bilčík M., Madola V., Szabóová T., Kubík L., Lendelová J., Cviklovič V. The Effect of Azimuth and Tilt Angle Changes on the Energy Balance of Photovoltaic System Installed in the Southern Slovakia Region. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 19. 8998. <https://doi.org/10.3390/app11198998>
10. Alam S., Qadeer A., Afazal M. Determination of the optimum tilt-angles for solar panels in Indian climates: A new approach. *Computers and Electrical Engineering*. 2024. Vol. 119. 109638. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109638>
11. Abdulmawjood K., Alsadi S., Refaat S. S., Morsi W. G. Characteristic study of solar photovoltaic array under different partial shading conditions. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 106856–6866. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142168>
12. Вплив температури на роботу сонячних панелей. URL: <https://onlysolar.in.ua/vplyv-temperatury-na-robotu-soniachnoi-paneli> (дата звернення: 10.02.2025).
13. Krishnappa M., Rajasekar N. A review of various components of solar water-pumping system: Configuration, characteristics, and performance. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2021. Vol. 31. Iss. 9. e13002. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13002>
14. Jalal D., Niroomand M. Optimization methods of MPPT parameters for PV systems: review, classification, and comparison. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021. Vol. 9. Iss. 2. P. 225–236. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000379>
15. Kavaya M., Jayalalitha S. A novel coarse and fine control algorithm to improve maximum power point tracking (MPPT) efficiency in photovoltaic system. *ISA transactions*. 2022. Vol. 121. P. 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.03.036>
16. Li B., Zhongbing L., Wu Y., Wang P., Liu R., Zhang L. Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: Challenges and opportunities. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 61. 106763. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106763>
17. Hassan A., Al-Abdeli Y. M., Masek M., Bass O. Optimal sizing and energy scheduling of grid-supplemented solar PV systems with battery storage: Sensitivity of reliability and financial constraints. *Energy*. 2022. Vol. 238. 121780. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121780>
18. Sun V., Asanakham A., Deethayat T., Kiatsiriroat T. Evaluation of nominal operating cell temperature (NOCT) of glazed photovoltaic thermal module. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 28. 101361. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101361>

References

1. Chahartaghi, M., & Amirhossein, N. (2021). Exergy, environmental, and performance evaluations of a solar water pump system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100933. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100933>
2. Rajkumar, S. B., & Nielsen, A. Water distribution in high rise buildings. Retrieved February 27, 2025, from <https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-6400727.pdf>.
3. Yakushkin, T., Yershov, R., & Stepenko, S. (2023). Comparative analysis of topologies and algorithms for maximum power point trackers in photovoltaic systems. *Technical Sciences and Technologies*, 2(32), 321–339 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339)
4. Sadick, A. (2023). *Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111632>
5. Perveen, G., Rizwan, M., Goel, N., & Anand, P. (2025). Artificial neural network models for global solar energy and photovoltaic power forecasting over India. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(1), 864–889. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1826017>

6. Natarajan, Y., Kannan, S., Selvaraj, C., & Mohanty, S. N. (2021). Forecasting energy generation in large photovoltaic plants using radial belief neural network. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 31, 100578, <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100578>
7. Hu, K., Wang, L., Li, W., Cao, S., & Shen, Y. (2022). Forecasting of solar radiation in photovoltaic power station based on ground-based cloud images and BP neural network. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16(2), 333–350. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12309>
8. Matushkin, D. (2024). Photovoltaic generation forecasting models: conceptual ensemble architectures. *Systems Research in Energy*, 4(80), 56–64. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.056>
9. Božiková, M., Bilčík, M., Madola, V., Szabóová, T., Kubík, L., Lendelová, J., & Cviklovič, V. (2021). The Effect of Azimuth and Tilt Angle Changes on the Energy Balance of Photovoltaic System Installed in the Southern Slovakia Region. *Applied Sciences*, 11(19), 8998. <https://doi.org/10.3390/app11198998>
10. Alam, S., Qadeer, A., & Afazal, M. (2024). Determination of the optimum tilt-angles for solar panels in Indian climates: A new approach. *Computers and Electrical Engineering*, 119, 109638. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109638>
11. Abdulmawjood, K., Alsadi, S., Refaat, S. S., & Morsi, W. G. (2022). Characteristic study of solar photovoltaic array under different partial shading conditions. *IEEE Access*, 10, 6856–6866. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142168>
12. The influence of temperature on the operation of solar panels. Retrieved February 10, 2025, from <https://onlysolar.in.ua/pvlyv-temperatury-na-robotu-soniachnoi-paneli> [in Ukrainian].
13. Krishnappa, M., & Rajasekar, N. (2021). A review of various components of solar water-pumping system: Configuration, characteristics, and performance. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(9), e13002. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13002>
14. Jalal, D., & Niroomand, M. (2021). Optimization methods of MPPT parameters for PV systems: review, classification, and comparison. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 225–236. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000379>
15. Kavya, M., & Jayalalitha, S. (2022). A novel coarse and fine control algorithm to improve maximum power point tracking (MPPT) efficiency in photovoltaic system. *ISA transactions*, 121, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.03.036>
16. Li, B., Zhongbing, L., Wu, Y., Wang, P., Liu, R., & Zhang, L. (2023). Review on photovoltaic with battery energy storage system for power supply to buildings: Challenges and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 61, 106763. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106763>
17. Hassan, A., Al-Abdeli, Y. M., Masek, M., & Bass, O. (2022). Optimal sizing and energy scheduling of grid-supplemented solar PV systems with battery storage: Sensitivity of reliability and financial constraints. *Energy*, 238, 121780. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121780>
18. Sun, V., Asanakham, A., Deethayat, T., & Kiatsiriroat, T. (2021). Evaluation of nominal operating cell temperature (NOCT) of glazed photovoltaic thermal module. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101361>

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE USE OF PHOTOVOLTAIC STATIONS FOR POWERING PUMPS IN MULTI-STOREY BUILDINGS

Oleksii Bodnaruk, <https://orcid.org/0009-0001-3031-3644>

Alla Bosak*, PhD (Engin.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

*Corresponding author: allabosak@lil.kpi.ua

Abstract. *In modern conditions, characterized by the destruction of critical infrastructure and instability of energy supply, ensuring a reliable water supply in multi-storey buildings is becoming especially relevant. This article is devoted to the study of the possibilities and problems of using photovoltaic power plants (PV) to power water supply pumps as an alternative energy source. The main goal of the study is to identify key factors that affect the efficiency and reliability of the PV power supply system for water supply pumps, as well as to develop recommendations for their optimization. The influence of weather conditions, in particular solar insolation and air temperature, on the performance of PV plants is analyzed in detail. Seasonal and daily fluctuations in insolation are considered, as well as their dependence on geographical location and atmospheric conditions. The influence of cloudiness, precipitation and fog on the intensity of solar radiation reaching the surface of PV panels is assessed. To analyze the efficiency of the system, a*

mathematical model has been developed that considers the dependence of the PV output power on solar insolation and panel temperature, the pump power on the required head and volume of water, as well as the operation of the maximum power point tracking (MPPT) algorithm and energy storage. The role of MPPT algorithms in increasing the efficiency of solar energy use is assessed. Ishikawa diagram is used to systematize key constraints. The developed mathematical model allows for a multiple assessment of the impact of various factors on system performance and the development of optimal control strategies.

Keywords: photovoltaic station, pump power supply, renewable energy sources, optimization.

Надійшла до редколегії: 17.02.2025