



Нові рішення у сучасній техніці та технологіях

Прийнято 28.04.2025. Прорецензовано 14.05.2025. Опубліковано 20.06.2025.

УДК 620.92

DOI: 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-126-137

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ НА БАЗІ ФОТОВОЛЬТАЇКИ

Валентин Миндюк*

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-2926-3157>

e-mail: valentyn.myndiuk@nung.edu.ua

Ірина Ващишак

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-9078-6726>

e-mail: iryna.vashchysyak@nung.edu.ua

Анотація. Ключовим завданням підвищення ефективності функціонування енергетичної системи України є розвиток комплексних систем генерації, що передбачають використання відновлюваних джерел енергії. Найвищим потенціалом відновлюваності володіє сонячна енергія завдяки своєму поширенню. Впровадження комбінованих систем генерування з використанням кількох джерел енергії є досить перспективним для підвищення ефективності енергозабезпечення об'єктів з низьким рівнем споживання. Результати проектування таких систем є вагомими показниками як ефективності роботи станції загалом, так і капіталовкладень. В даній роботі було проведено проєктні розрахунки для побудови фотовольтаїчної станції, яка повинна забезпечувати безперебійне електропостачання групи споживачів індивідуального житлового будинку протягом 6 годин за відсутності зовнішньої електромережі. На основі вихідного плану електроспоживання було визначено необхідний запас електроенергії для забезпечення визначеної групи споживачів за рахунок накопичувачів різних типів, а також необхідну потужність масиву фотомодулів для компенсації розряду акумуляторів. Для перевірки правильності результатів проєктних розрахунків було проведено моделювання роботи станції та акумуляторних блоків різних типів протягом одного року. За результатами моделювання було визначено незначний вплив типів акумуляторів на ефективність роботи станції, а також встановлено значну відмінність накопичувальної ємності різних типів акумуляторів для однакового рівня потреби електроенергії. В процесі подальшого виконання роботи було визначено переваги модульних фотоелектричних станцій для резервного енергопостачання, їх компонентний склад. Методикою розрахунків параметрів компонентів

Запропоноване посилання: Миндюк, В., & Ващишак, І. (2025). Особливості проектування систем енергозабезпечення споживачів на базі фотовольтаїки. Нафтогазова енергетика, 1(43), 126-137. doi: 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-126-137.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

станції відображено особливості підбору обладнання для технічної реалізації фотоелектричних станцій. Запропоновано ряд технічних рішень для побудови станцій на основі результатів проектування.

Ключові слова: фотоелектрична станція, резервне електропостачання, акумуляторний блок, фотомодуль, стрінг фотомодулів.

Вступ

Сучасна електроенергетична галузь є комплексною системою, ефективність функціонування якої залежить від величини втрат в передавальних ланках, які станом на сьогоднішній є значними. Це зумовлено старінням основних фондів та погіршенням технічного стану енергетичного обладнання енергетичних станцій України, що впливає на ефективність використання енергетичних ресурсів у державі [1].

Підвищення ефективності енергозабезпечення кінцевих споживачів, зокрема об'єктів з відносно невисоким рівнем споживання (наприклад, індивідуальні житлові будинки, об'єкти тимчасового електрозабезпечення, аграрні, рекреаційні, туристичні та інші), може бути реалізоване шляхом використання в електричних системах кількох генеруючих об'єктів. Такий підхід дозволяє підвищити надійність енергопостачання шляхом розширення можливостей забезпечення її неперервності. Саме тому одним із ключових стратегічних напрямків удосконалення енергоефективності є модернізація існуючих та будівництво нових систем електрозабезпечення, які використовують відновлювані джерела енергії. Україна має значний природний потенціал відновлюваних джерел енергії, тому керування енергетичними системами на базі відновлюваної енергетики є актуальним та досяжним завданням для реалізації політики енергоефективності.

У більшості сучасних розвинених країн активно впроваджується концепція розподіленого виробництва та споживання енергоресурсів. Її суть полягає в тому, що енергетична система здебільшого складається з генеруючих систем малої та середньої потужності, які розташовані безпосередньо біля кінцевих споживачів енергії. Тому відпадає необхідність у створенні й утриманні масштабної інфраструктури для передавання електроенергії. При цьому користувачі самостійно експлуатують і обслуговують такі системи, використовуючи вироблену енергію для власних потреб, а у разі надлишку – «продають» її до загальної енергомережі для можливості використання іншими споживачами [2]. Застосування модульного підходу забезпечує можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії та створення гібридних енергетичних систем.

Однак слід враховувати той факт, що кожен окремий вид відновлюваного джерела енергії має певні обмеження: наявна потужність, погодні умови і просторове розташування. Тому наявність в системі електропостачання кількох генеруючих джерел збільшує кількість варіантів планування енергозабезпечення, а отже, є актуальною потреба в дослідженні технології проектування автономної та гібридної енергетичної системи з метою раціонального планування її складових частин.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Станом на сьогодні найперспективнішим джерелом відновлюваної енергії є сонячна енергія. Основними її перевагами є практично невичерпність та відсутність негативного впливу на навколишнє середовище при використанні. В той же час практичне використання сонячної енергії ускладнене малою поверхневою щільністю та нестабільністю потужності сонячного випромінювання протягом доби та року [3]. На вирішення цих проблем витрачається багато конструктивних і технологічних зусиль та коштів, що суттєво збільшує частку використання сонячної енергії для вироблення електричної енергії та теплоти для побутових потреб.

Потенціал сонячної енергії в Україні є цілком достатнім для широкого впровадження теплоенергетичного і фотоенергетичного обладнання практично в усіх регіонах. Слід відмітити, що при проектуванні об'єктів генерації на базі сонячної енергетики з метою раціонального вибору типу обладнання (геліоколекторні та фотоелектричні установки) та для встановлення їх оптимальної потужності потрібно враховувати базові енергетичні показники сонячної радіації, значення яких відображено в [4]. Такий підхід забезпечить ефективну експлуатацію обладнання сонячних станцій в конкретній місцевості протягом необхідного терміну.

В процесі проектування при визначенні теоретичної встановленої потужності сонячних електростанцій беруть до уваги не тільки показники сонячної радіації, а й доступну площу для їх розміщення, а також коефіцієнт потужності, який залежить від типу та конфігурації

фотоелектричних панелей, відстані між їхніми рядами та інших параметрів. Сонячна електростанція – це інженерна енергетична система, призначена для перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Станом на сьогодні існує два основні типи таких станцій: фотоелектричні, які безпосередньо генерують електроенергію за допомогою фотоелектричних модулів, та термодинамічні, які спочатку перетворюють сонячну енергію в теплову, а потім – у електричну [5]. Залежно від призначення та схеми приєднання сонячні фотоелектричні установки бувають трьох основних типів:

- автономні, які встановлюються у випадках відсутності приєднання об'єктів споживання до централізованого електропостачання;
- мережеві, які встановлюються у випадках, коли об'єкти споживання підключені до мережі централізованого електропостачання. В цьому випадку фотомодулі використовують для генерації енергії на власне споживання, а надлишок електроенергії скидається в електромережу;
- резервні (гібридні), які встановлюються для об'єктів, що приєднані до мереж поганої якості, і використовуються для компенсації пікових навантажень, або в аварійних ситуаціях.

В процесі створення фотоелектричної станції необхідно виконувати проєктні та впроваджувальні роботи як при використанні типового готового технічного рішення, так і при розробці й реалізації фотоелектричної станції індивідуальної потужності. Проєктні роботи повинні здійснюватися відповідно до чинних інженерних норм і стандартів, а також з урахуванням вимог виробників обладнання та комплектуючих для будівництва станцій. З метою забезпечення точності результатів розрахунків та урахування різноманітних факторів, що впливають на ефективність роботи сонячної електростанції, рекомендується застосовувати спеціалізовані програми для моделювання роботи фотоелектричних станцій (наприклад, PVGIS, PVSyst, тощо), а також використовувати так звані «сонячні» калькулятори й статистичні метеорологічні дані: показники сонячної інсоляції, швидкість вітру, температуру повітря та інші кліматичні умови. Крім того, обов'язково слід враховувати географічне розташування об'єкта та кути нахилу панелей.

Типовий процес реалізації проєктно-впроваджувальних заходів при будівництві фотоелектричної станції поділяється на кілька основних етапів [6]:

- проведення аудиту чинної системи електропостачання на об'єкті встановлення фотоелектричної станції;
- виконання проєктних робіт;
- проведення монтажу та пусконалагоджувальних робіт;
- підключення фотоелектричної станції до зовнішньої електромережі;
- здійснення сервісного обслуговування.

Проєктно-технічний розрахунок фотоелектричної станції спрямований на отримання даних, які комплексно характеризують ефективність роботи станції та загальний обсяг капіталовкладень. Такий розрахунок завжди виконується індивідуально відповідно до конкретного замовлення та з урахуванням усіх особливостей об'єкта.

Висвітлення невирішених раніше питань

Модульна конструкція та високий потенціал генерації енергії дозволяє будувати фотоелектричні станції різної потужності з урахуванням наявних географічних і кліматичних умов. Такий підхід сприяє зростанню частки енергії, виробленої для задоволення споживчих потреб на тлі суттєвого зменшення забруднення довкілля. В той же час електростанції на базі фотовольтаїки мають ряд недоліків і потребують удосконалення:

- нестабільність генерації, яка залежить від інтенсивності сонячного випромінювання;
- висока вартість систем накопичення енергії для автономних та гібридних фотоелектричних станцій, що зумовлена наявністю високовартісних акумуляторних батарей;
- невисока ефективність (ККД) фотомодулів.

З урахування вищенаведеного, автором публікації пропонуються результати технічного проєктування системи резервного електропостачання на базі фотовольтаїки з використанням комплексних технічних рішень для забезпечення безперебійної роботи станції.

Мета та завдання досліджень

Метою подальшої роботи є проєктно-технічний розрахунок системи резервного електропостачання індивідуального житлового будинку на базі сонячної фотоелектричної станції.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- на основі даних величини електроспоживання та розташування об'єкта визначити базові техніко-енергетичні показники резервної системи електрозабезпечення на визначений час автономної роботи;



Рисунок 1 – Розташування житлового об'єкта за даними програми web-додатку Google Earth

- провести моделювання продуктивності та ефективності круглорічної роботи проєктної фотоелектричної станції з визначеними технічними показниками і різними типами пристроїв акумулювання електроенергії;
- обґрунтувати вибір типу та обладнання для фотоелектричної станції.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Збір вихідних даних для проєктування автономних та гібридних фотоелектричних станцій має свої специфічні особливості порівняно з мережевими станціями. Це пояснюється тим, що такі системи є невід'ємною частиною системи електропостачання об'єкта. Процес проєктування автономних і гібридних станцій є схожим, оскільки вихідні дані для розрахунків заданої потужності є однаковими, однак підхід до їх опрацювання для кожного типу станцій має свої особливості.

Для проєктування фотовольтаїчної системи резервного електропостачання для індивідуального житлового будинку недостатньо лише інформації про його географічне розташування. Щоб отримати коректні результати розрахунків і моделювання роботи станції, необхідно оперувати даними про потужність усіх електроспоживачів, наявність обладнання з великими пусковими струмами (наприклад, електродвигуни, насоси), потужність необхідної резервної групи споживачів, потрібну тривалість автономної (за відсутності зовнішньої мережі) роботи станції, кількість фаз та ступінь їх завантаження, а також визначити потребу в дублюючому джерелі живлення. За наяв-

ності бензинового або дизельного генератора у замовника, їх можна використати як резервне (дублююче) джерело електроенергії.

Проєктування фотовольтачної станції з даховим монтажем фотомодулів в даній роботі проводилось для приватного житлового будинку, що знаходиться в селищі Горохолина Івано-Франківської області. Об'єкт розташований на східній околиці селища на малозабудованій відкритій місцевості (рис. 1).

За наявними розмірами дахового перекриття будинку було побудовано плоску проєкцію поверхні даху (рис. 2).

Загальна площа поверхні даху для монтажу фотомодулів (з вирахуванням площі затінення від димоходу та балконного даху від загальної площі поверхні), становила 203 м². Це теоретично дозволяло здійснити монтаж від 72 до 109 фотомодулів різної потужності на даху.

Система електропостачання в будинку – однофазна і приєднана до зовнішньої промислової мережі з напругою 220 В і частотою 50 Гц. За даними замовника переважаючими споживачами електроенергії даного житлового будинку були побутові прилади та освітлювальне обладнання, причому більшість електроспоживачів працювали періодично, вмикаючись на певний час. Це значно ускладнювало визначення окремого споживача або групи споживачів із найбільшим навантаженням на мережу в конкретний момент. Тому для розрахунку потужності та величини електроспоживання резервної групи споживачів в будинку було використано паспортні дані про номінальну потужність кожного окремого пристрою.

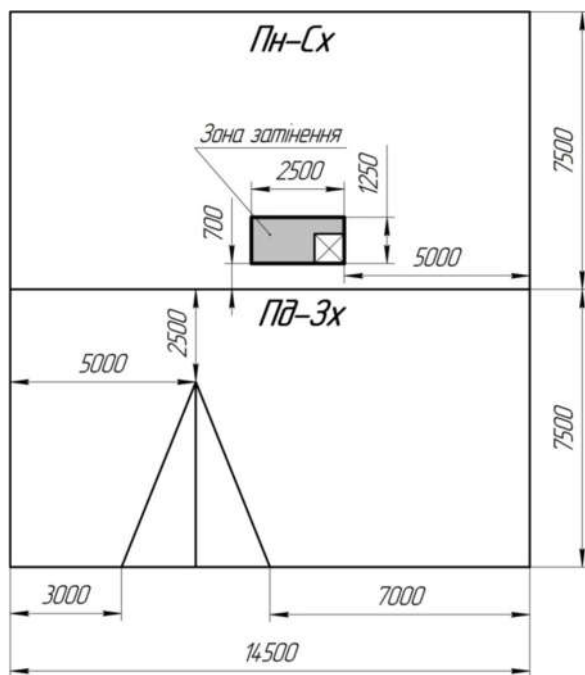


Рисунок 2 – Проекція покрівлі даху житлового об'єкта

Обладнання з приводом від електричних двигунів (холодильники, водяні насоси, електроінструменти тощо), під час запуску споживають значно більше енергії через високі пускові струми. Тому при розрахунках було враховано коефіцієнти пускових струмів [7], які показують, якою буде потужність пристрою у перші доли секунди після запуску.

На наступному етапі необхідно було передбачити групи споживачів з різним пріоритетом, оскільки це не лише дозволяло ефективно збалансувати систему резервного живлення, але й гарантувало підвищення загального рівня комфорту в умовах аварійного чи планового відключення мережі.

Зокрема, перша група включає обладнання з максимальним пріоритетом: освітлення, системи охорони, опалення, зв'язку тощо. Ці прилади повинні працювати навіть у разі відключення напруги в мережі, забезпечуючи безперервне функціонування умовно важливих систем.

Друга група охоплює обладнання другої за важливістю. Їх робота не настільки критична, як у першій групі. У випадку відсутності зовнішньої мережі живлення прилади цієї групи можна вимкнути вручну або за допомогою дистанційного керування. Це дозволяє коректно завершувати їх роботу або оптимізувати використання резервного живлення.

Третя група включає споживачів із низьким пріоритетом, без яких можна обійтися під час відключення електроенергії.

При виборі пріоритетної групи споживачів та складання плану електроспоживання обладнання цієї групи було прийнято час повністю автономної роботи фотоелектричної станції (час резерву) за відсутності зовнішньої мережі в межах шести годин.

Зведені дані плану споживання резервної групи для подальшого розрахунку параметрів станції наведені в таблицях 1 і 2.

Децентралізована система електропостачання повинна забезпечувати електроенергією споживачів, навіть за несприятливих погодних умов і під час тимчасової відсутності напруги у зовнішній мережі. Тому така система повинна передбачати можливість накопичення енергії і у разі недостатньої ємності накопичувачів можуть виникати перебої з постачанням електроенергії в резервний період. Розрахунок потрібної ємності накопичувачів (акумуляторних батарей (далі – АКБ)) було здійснено з урахуванням обсягу резервного споживання пріоритетної групи споживачів (табл. 2) для двох найпоширеніших типів АКБ, що використовуються в сонячних електростанціях: літєвих та свинцево-кислотних. Зауважимо, що їх технічні характеристики істотно відрізняються.

Встановлення акумуляторів із ємністю, рівною фактичному електроспоживанню, є неефективним рішенням, тому оптимальним був вибір акумуляторів із запасом ємності.

З урахуванням ККД інвертора в режимі «charger» (для більшості моделей інверторів ККД в цьому режимі становить 96 %) [8], кількість енергії E , яку потрібно накопичувати в акумулятор, становила:

$$E_{\text{заг. АКБ}} = E_{\text{спож}} : \eta_{\text{інв}} = 8,573 : 0,96 = 8,93 \text{ (кВт}\cdot\text{год)}. \quad (1)$$

За відомого значення номінальної напруги АКБ (в нашому випадку вона становила 48 В, оскільки загальна потужність навантаження перевищувала 1500 Вт) та кількості необхідної енергії акумулятора на заданий період часу розраховували необхідну ємність АКБ:

$$C_{\text{АКБ}} = E_{\text{заг. АКБ}} : U_{\text{АКБ}} \text{ (А}\cdot\text{год)} = 8930 : 48 = 186 \text{ (А}\cdot\text{год)}. \quad (2)$$

На наступному етапі розрахункового проектування необхідно було врахувати коефіцієнт температурного зменшення ємності акумуляторів $k_{t, C}$ для визначеної робочої температури акумуляторних батарей. Для літєвих акумуляторів він становить 1, а для свинцево-кислотних – відчутно залежить від температури і вибирався з таблиці 3.

В більшості випадків експлуатація АКБ передбачається в закритому затемненому і прохолодному приміщенні, тому для свинцево-

Таблиця 1 – План електроспоживання пристроїв пріоритетної групи

Споживач	Номи- нальна потуж- ність, Вт	Кіль- кість	Коефіц. пускових струмів	Загальна номінальна потуж-ність, Вт	Загальна пікова потуж- ність, Вт	Час резерву, год	Величина споживання, Вт·год
Світлодіодне освітлення	24	2	1	48	48	6	288
Освітлювальна лампа «9»	9	10	1	90	90	6	540
Освітлювальна лампа «15»	15	12	1	180	180	6	1080
Ноутбук	120	2	1	240	240	6	1440
Мережевий роутер	15	1	1	15	15	6	90
Холодильник	80	1	3	80	240	2,5	200
Телевізор	120	2	1	240	240	2	480
Електрообладнання газового котла	120	1	1	120	120	4	480
Насос для водопостачання	750	1	3	750	2250	3	2250
Мікрохвильова піч	850	1	2	850	1700	1	850
Зарядний пристрій	70	5	1	350	350	2,5	875

кислотних акумуляторів приймалося значення коефіцієнта температурного зменшення ємності 1,14. З урахуванням коефіцієнта температурного зменшення ємності акумулятора необхідна ємність АКБ визначалась:

$$C_{AKB} = C_{AKB} \cdot k_{t,C} (A \cdot год), \quad (3)$$

- для літєвих АКБ:

$$C_{AKB} = 186 \cdot 1 = 186 (A \cdot год);$$

- для свинцево-кислотних АКБ:

$$C_{AKB} = 186 \cdot 1,14 = 212 (A \cdot год).$$

Врахування коефіцієнту температурного зменшення ємності акумулятора дозволило визначити необхідний запас ємності з компенсацією саморозряду батареї.

Наступним параметром, який було враховано у розрахунку запасу енергії накопичувальних АКБ, була дозволена глибина розряду (DOD). Для свинцево-кислотних акумуляторів допускається DOD = 50 %, а для літєвих DOD = 90 %. Дані параметри, як правило, зазначаються в технічній документації на акумулятори.

З урахуванням дозволеної глибини розрядування АКБ необхідна ємність АКБ визначалась:

$$C_{AKB_необх} = C_{AKB_ном} \cdot DOD (A \cdot год), \quad (4)$$

- для літєвих АКБ:

$$C_{AKB_необх} = 186 : 0,9 \approx 206,7 (A \cdot год);$$

- для свинцево-кислотних АКБ:

$$C_{AKB_необх} = 212 : 0,5 \approx 424 (A \cdot год).$$

Таблиця 2 – План електроспоживання пристроїв пріоритетної групи

Споживання обладнання резервної групи за час резерву, кВт·год	8,573
Загальна номінальна потужність споживачів резервної групи, кВт	2,963
Загальна пікова потужність споживачів резервної групи, кВт	5,123

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів температурної втрати ємності для свинцево-кислотних акумуляторів [9]

Температура, °C	Коефіцієнт температурного зменшення ємності АКБ, $k_{t,C}$
25	1
20	1,04
10	1,14
0	1,28
-10	1,47
-20	1,79
-30	2,27

Для літєвих акумуляторів в технічній документації ємність зазначається в кВт·год, то ж отримані значення ємності накопичувальних акумуляторів було переведено кВт·год:

- для літєвих АКБ:

$$C_{AKB_необх} = (206,7 \cdot 48) : 1000 = 9,92 (кВт \cdot год);$$

- для свинцево-кислотних АКБ:

$$C_{АКБ_необх} = (424 \cdot 48) : 1000 = 20,35 \text{ (кВт}\cdot\text{год)}.$$

Як видно з результатів розрахунку, для забезпечення однієї і тієї ж резервної групи споживачів на заданий час резерву потрібна у два рази більша ємність свинцево-кислотних акумуляторів, ніж літєвих.

За відсутності мережі для поповнення запасу енергії АКБ та живлення споживачів в фотоелектричних станціях служать фотомодулі. Від правильності їх підбору залежить стабільність роботи станції загалом. Вихідними даними для розрахунку необхідної потужності масиву фотомодулів для заряду акумуляторних батарей була енергія запасу, визначена на попередньому етапі. Необхідна кількість енергії, яка потрібна для накопичення ємності в розряджених акумуляторах з урахуванням глибини їх розряду DOD, становила:

- для літєвих АКБ:

$$E_{ЗАР_АКБ} = 9,92 \cdot 0,9 = 8,93 \text{ (кВт}\cdot\text{год)};$$
- для свинцево-кислотних АКБ:

$$E_{ЗАР_АКБ} = 20,35 \cdot 0,5 = 10,18 \text{ (кВт}\cdot\text{год)}.$$

Для визначення потужності генерації масиву фотомодулів потрібно було враховувати показники сезонності роботи станції, оскільки сонячна енергія є неоднорідною і залежить від пори року. На основі даних величини сонячної інсоляції в різні періоди року [10] емпіричні коефіцієнти такі значення: для зимового періоду $K_2 = 1$, для осінньо-весняних періодів $K_2 = 2,5$, для літнього періоду він найвищий і становить $K_2 = 4,5$. Режим роботи станції передбачався цілорічним, то ж коефіцієнт генерації для станції вибирався, виходячи з найгірших умов генерації, тобто $K_2 = 1$.

З урахуванням ККД контролера заряду (для більшості моделей контролерів для автономних та гібридних фотоелектричних станцій він становить 98 – 99 %) та коефіцієнта генерації було визначено необхідні потужності масиву фотомодулів:

- для літєвих АКБ:

$$P_{PV} = E_{ЗАР_АКБ} : K_2 : \eta_{контр} \text{ (кВт)}, \quad (5)$$
- для свинцево-кислотних АКБ:

$$P_{PV} = 8,93 : 1 : 0,98 = 9,11 \text{ (кВт)};$$
- для свинцево-кислотних АКБ:

$$P_{PV} = 10,18 : 1 : 0,98 = 10,39 \text{ (кВт)}.$$

Отримані значення необхідної потужності масиву фотомодулів для заряджання акумуляторних блоків різних типів близькі, що зумовлено різними значеннями допустимих розрядів акумуляторів.

Для перевірки коректності отриманих результатів розрахункового проектування необхідних параметрів фотоелектричної станції

було змодельовано роботу станції окремо для різних типів акумуляторних батарей з використанням веб-додатку PVGIS [11]. Моделювання продуктивності станції здійснювалось на основі геоданих будівлі та розрахованих на попередньому етапі показників необхідної енергії.

Результати моделювання наведено на рис. 3 і 4.

З наведених діаграм продуктивності різних типів АКБ однієї і тієї ж станції для забезпечення необхідного рівня забезпечення електроенергією споживачів споживання видно, що вони знаходяться практично на однаковому рівні при практично однакових значеннях продуктивності станції. Основна відмінність – кількість акумуляторних блоків, їх ресурс та вартість.

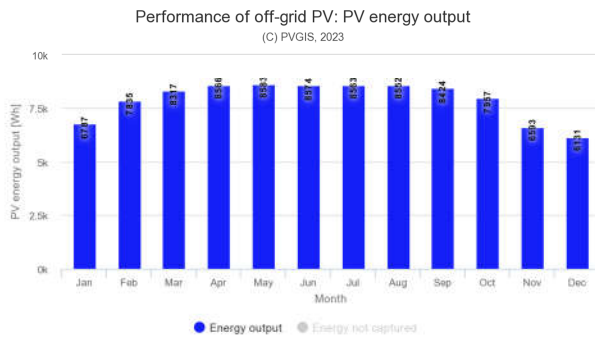
Для технічної реалізації системи безперебійного електропостачання на базі фотовольтаїки було рекомендовано побудову резервної (гібридної) станції, оскільки такий тип станції стабільно працюють на будь яких об'єктах, що мають доступ до електромережі, і застосовуються не тільки як резервне джерело електропостачання, а і забезпечують енергоефективність будинку. Принципова схема станції наведена на рис. 5.

Принцип роботи такої фотоелектричної станції полягає в наступному: коли виробленої фотомодулями електроенергії недостатньо, а рівень заряду акумуляторних батарей знижується до допустимого мінімуму, дефіцит енергії автоматично компенсується за рахунок підключення зовнішньої мережі через інвертор. Паралельно відбувається заряджання акумуляторів до заданого рівня. Деякі моделі гібридних інверторів також дозволяють підключати додатковий генератор, що підвищує надійність і безперервність енергопостачання.

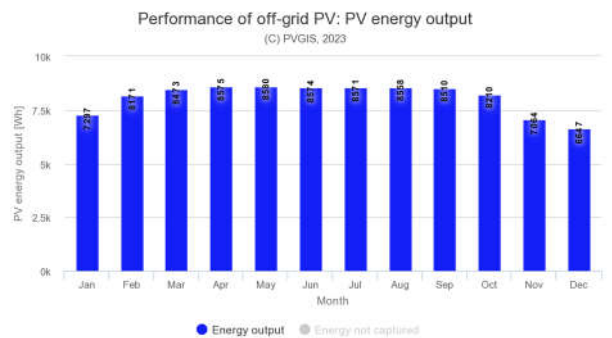
При виборі інвертора потрібно відштовхуватися від сумарної номінальної та пікової потужностей резервної групи споживачів (табл. 2). Потужність інвертора є визначальною проектною потужністю фотоелектричної станції. В нашому випадку вимогам стабільного енергезабезпечення повинен відповідати гібридний або автономний інвертор з номінальною потужністю не менше 3 кВт та значенням пікової потужності – не менше 6 кВт.

Кількість АКБ для системи накопичення визначається з урахуванням номінальної ємності для визначеного типу акумуляторів. В нашому випадку її доцільно було визначати за формулою:

$$N_{АКБ} = C_{АКБ_необх} : C_{АКБ_ном} \quad (6)$$

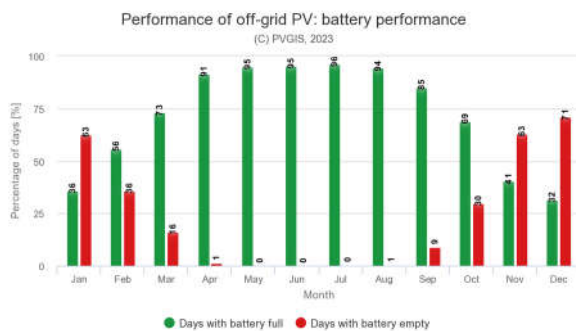


а) автономна станція
з літійовими акумуляторами

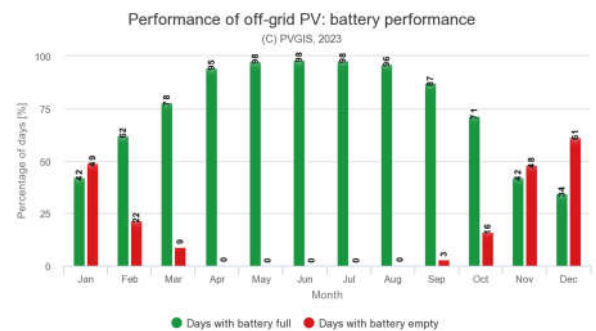


б) автономна станція
зі свинцево-кислотними акумуляторами

Рисунок 3 – Середньомісячна продуктивність автономної станції
з різними типами акумуляторів



а) літійові акумулятори



б) свинцево-кислотні акумулятори

Рисунок 4 – Середньомісячна продуктивність різних типів акумуляторів станції

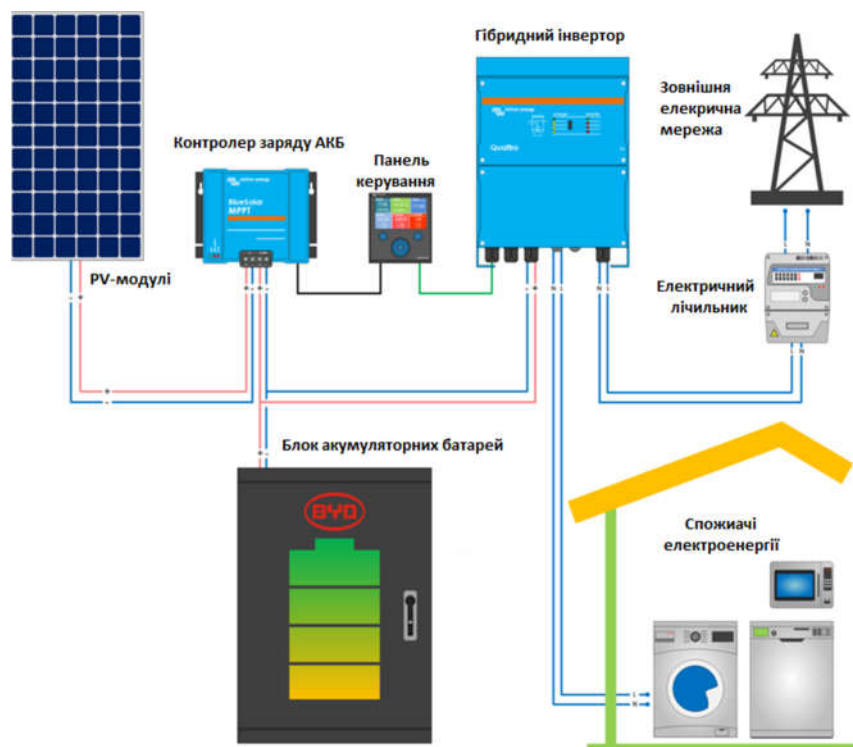


Рисунок 5 – Загальна принципова схема резервної (гібридної)
фотоелектричної станції

За умови використання літєвих акумуляторів з номінальною ємністю 2,4 кВт·год їх кількість для потреби стабільної роботи станції становила 4 блоки.

Необхідна кількість фотомодулів для забезпечення потрібної потужності генерації визначалася співвідношенням:

$$N_{PV} = P_{\Sigma PV} : P_{PV \max}. \quad (7)$$

Як видно з наведеного співвідношення, необхідна кількість фотомодулів для забезпечення потрібної потужності генерації залежить від потужності окремого фотомодуля. Для забезпечення потреб проєктованої станції з використанням, наприклад, фотомодулів з номінальною потужністю 365 Вт необхідна кількість фотомодулів становила б:

$$N_{PV} = P_{\Sigma PV} : P_{PV \max} = 9110 : 365 \approx 25.$$

З урахуванням габаритних розмірів окремого фотомодуля (1765x1048) було розроблено схему рекомендованого їх розміщення на південно-західному скаті даху у кількості 25 штук (рис. 6).

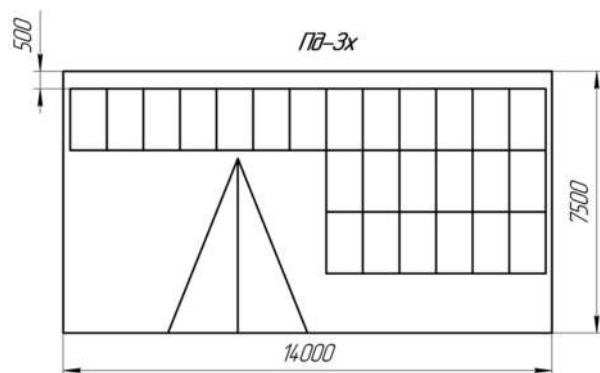


Рисунок 6 – Рекомендована схема розташування фотомодулів на даху заданого житлового будинку

За відомих значень потужності фотомасиву та кількості фотомодулів, достатньої для забезпечення необхідної потужності накопичення акумуляторних батарей, обирається контролер заряду. Цей пристрій регулює процес заряджання акумуляторів правильними значеннями струму і напруги, що дозволяє запобігти як перезаряду, так і надмірному розрядженню акумуляторних батарей. Контролери заряду можуть бути як інтегрованими в гібридний інвертори пристроями, так і окремими пристроями. Тому на наступному етапі проєктування формуються стріни фотомодулів для окремих контролерів або їх входів. При формуванні стрінгів потрібно відштовхуватись від базових характеристик контролерів, а також струмових, напругових і температурних параметрів фотомодулів.

Першочергово розраховується максимальна кількість послідовно з'єднаних в стрінг фотомодулів для кожного контролера, виходячи з максимальної напруги холостого ходу вхідного контуру. При цьому потрібно враховувати вплив температури фотомодуля на зміну його напруги холостого ходу.

Максимально можлива кількість фотомодулів у стрінгу повинна становити:

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\max}}{U_{PVt}} = \frac{250}{47,43} = 5,3 \approx 5 \text{ (фотомодулів)}. \quad (7)$$

Далі розраховується максимальна кількість паралельно з'єднаних стрінгів фотомодулів для кожного контролера, виходячи з їх максимального струму короткого замикання:

$$n_{\text{пар}} = \frac{I_{\max}}{I_{SC}} = \frac{70}{11,3} = 6,2 \approx 6 \text{ (стрінгів)}. \quad (8)$$

Оскільки перевищення допустимого навантаження на контролери без погодження з виробником неприпустиме, необхідно формувати фотомасиви таким чином, щоб сумарна потужність фотомодулів не перевищувала максимально допустиме значення для обраного контролера.

У разі інтеграції резервної фотоелектричної системи в електричну мережу житлового будинку, її робота має бути узгодженою з існуючою інфраструктурою як єдиної системи. Тому вибір захисних пристроїв повинен здійснюватися з урахуванням особливостей наявної електромережі. Використання стандартизованих рішень для типових систем, зокрема резервних фотоелектричних станцій, значно полегшує процес підбору відповідних засобів захисту. Прикладом таких рішень є застосування стандартних комплектних щитів захисту для фотоелектричних станцій, які забезпечують безпеку, надійність та стабільну роботу системи навіть за умов коливань напруги та інших електричних перешкод.

Фотомасиви для фотоелектричних станцій, що використовуються для індивідуальних домогосподарств, передбачає даховий монтаж. При цьому фотомодулі встановлюють паралельно до площини скатного даху, тож вони мають максимально заповнювати доступну площу покрівлі, за винятком зон навколо димарів, вентиляційних виходів та інших елементів, що створюють затінення. Основними перевагами дахового монтажу є його відносно низька вартість і наявність стандартизованих систем кріплення, що значно полегшує процес встановлення. Водночас варто враховувати, що скати даху не завжди орієнтовані на південь (як у нашому випадку) і не завжди мають оптималь-

ний кут нахилу. У таких ситуаціях системи кріплень повинні передбачати можливість додаткового регулювання в одній площині для компенсації відхилення кута встановлення фотомодулів.

Висновки

У ході проведених в роботі досліджень було визначено необхідність впровадження програм децентралізації енергопостачання шляхом розвитку розподіленого виробництва та споживання електроенергії, зокрема через перенесення систем генерації ближче до кінцевих споживачів, що дозволяє зменшити навантаження на мережі транспортування електроенергії. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності використання енергоносіїв є інтеграція відновлюваних джерел енергії в системи генерації. В Україні найбільший потенціал має сонячна енергія, яку ефективно перетворюють на електричну за допомогою фотоелектричних систем. Для реалізації фотовольтаїчної енергії використовуються спеціалізовані інженерні системи перетворення, проєктування яких базується на даних про рівень сонячної інсоляції в конкретному регіоні та параметрах електроспоживання об'єктів. У межах роботи було здійснено розрахунково-технічне проєктування фотовольтаїчної станції для індивідуального користувача. Для перевірки достовір-

ності результатів розрахунків енергетичних показників було проведено моделювання роботи станції за допомогою програмного забезпечення PVGIS, що підтвердило відповідність отриманих характеристик потребам споживачів. Також встановлено, що вибір типу акумуляторних батарей для резервування енергії практично не впливає на загальну продуктивність станції. Проте використання свинцево-кислотних акумуляторів, на відміну від літєвих, вимагає резервування удвічі більшої ємності. Крім того, за умов планових або аварійних відключень електроенергії у промислових мережах та з урахуванням низької якості електропостачання в приватних житлових будинках, найбільш ефективним рішенням є впровадження резервних (гібридних) фотоелектричних станцій. Такі системи не лише забезпечують безперебійне енергопостачання, але й дозволяють скоротити витрати на оплату електроенергії за рахунок генерації власної енергії сонячними панелями.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Кицкай Л. І. Енергоефективність в Україні: аналіз, проблеми та шляхи підвищення. *Інноваційна економіка*. 2013. №3. С. 32–37.
2. Бойко О. В. Моделі та інформаційна технологія планування енергозабезпечення будівель з використанням відновлювальних джерел енергії. *Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології»*. Сумський державний університет, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. Харків, 2017.
3. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М., Трач І. В. Проблеми інтеграції відновлювальних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі. *Технічна електродинаміка*. 2012. №3. С. 25–26.
4. Кудря С. О., Яценко Л. В., Душина Г. П. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2008. 55 с.
5. Відновлювані джерела енергії. За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
6. Bogdan Szymanski. Instalacje fotowoltaiczne: teoria i praktyka. Krakow: GLOBENERGIA SP.Z O.O. 2018.
7. Як правильно розрахувати потужність генератора. URL: <https://sea-tools.com.ua/ua/blog/kak-pravilno-rasschitat-moshchnost-generatora> (дата звернення: 17.11.2023)
8. Кудря С.О., Головка В.М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навчальний посібник. Київ: НТУ КПІ, 2019. 196с.
9. Solar Photovoltaic Installation. Course Handbook for a 160-hours training course for technicians 3rd Edition • March 2017.
10. Колонтаєвський Ю. П. Фотоенергетика: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 160 с.

11. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en (дата звернення: 11.12.2023 р.)

References

1. Kytskai L. I. Enerhoefektyvnist v Ukraini: analiz, problemy ta shliakhy pidvyschennia. *Innovatsiina ekonomika*. 2013. No 3. P. 32–37. [in Ukrainian]
2. Boiko O. V. Modeli ta informatsiina tekhnolohiia planuvannia enerhozabezpechennia budivel z vykorystanniam vidnovliuvalnykh dzherel enerhii. *Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk za spetsialnistiu 05.13.06 «Informatsiini tekhnolohii»*. Sumskyi derzhavnyi universytet, Kharkivskyi natsionalnyi universytet miskoho hospodarstva imeni O.M. Beketova. Kharkiv, 2017. [in Ukrainian]
3. Kyrylenko O. V., Pavlovskiy V. V., Lukianenko L. M., Trach I. V. Problemy intehtratsii vidnovliuvalnykh dzherel elektroenerhii v «slabki» elektrychni merezhi. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. P. 25–26. [in Ukrainian]
4. Kudria S. O., Yatsenko L. V., Dushyna H. P. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy. Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy, 2008. 55 p. [in Ukrainian]
5. Vidnovliuvani dzherela enerhii. Za zah. red. S.O. Kudri. Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020. 392 p. [in Ukrainian]
6. Bogdan Szymanski. Instalacje fotowoltaiczne: teoria i praktyka. Krakow: GLOBENERGIA SP.Z O.O. 2018. [in Poland]
7. Iak pravylno rozrakhuvaty potuzhnist heneratora. URL: <https://sea-tools.com.ua/ua/blog/kak-pravilno-rasschitat-moshchnost-generatora> (data zvernennia: 17.11.2023) [in Ukrainian]
8. Kudria S.O., Holovko V.M. Osnovy konstruiuvannia enerhoustanovok z vidnovliuvanykh dzherelamy enerhii: navchalnyi posibnyk. Kyiv: NTU KPI, 2019. 196 p. [in Ukrainian]
9. Solar Photovoltaic Installation. Course Handbook for a 160-hours training course for technicians 3rd Edition • March 2017.
10. Kolontaievskiy Yu. P. Fotoenerhetyka: navch. posibnyk. Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova, 2019. 160 p. [in Ukrainian]
11. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en (Accessed: 2023-12-17)

THE DESIGNING FEATURES FOR CONSUMER ENERGY SUPPLY SYSTEMS BASED ON PHOTOVOLTAICS

Valentyn Myndiuk

Candidate of Technical Sciences, associate professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2926-3157>
e-mail: valentyn.myndiuk@nung.edu.ua

Iryna Vashchyshak

Candidate of Technical Sciences, associate professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9078-6726>
e-mail: iryna.vashchyshak@nung.edu.ua

Abstract. The key task of improving the efficiency of Ukraine's energy system is to develop integrated generation systems that use renewable energy sources, among which solar energy has one of the highest potentials, and to expand it. The introduction of combined generation systems using multiple energy sources is quite promising for improving the efficiency of energy supply to low-consumption facilities. The results of the design of such systems are significant indicators of both the efficiency of the plant as a whole and the investment. In this article design calculations were carried out for the construction of a photovoltaic station, which should provide uninterrupted power supply to a group of consumers of an individual residential building for 6 hours in the absence of an external power grid. The required power reserve to supply a certain group of consumers with various types of storage devices was determined, which based on the initial power consumption plan, as well as the required power of the PV module array to compensate for battery discharge. To verify the correctness of the design calculations the operation of the plant and battery packs of different types for one year were simulated. The modeling results showed a slight impact of battery types on the efficiency of the plant, and a significant difference in the storage capacity of different types of batteries for the same level of electricity demand. In the course of further work, the advantages of modular photovoltaic power plants for backup power supply and their component composition were determined. The methodology for calculating the parameters of the station components reflects the peculiarities of selecting equipment for the technical implementation of photovoltaic stations. A number of technical solutions for the construction of stations based on the design results are proposed.

Keywords: photovoltaic power plant; backup power supply; battery pack; PV module; PV module string.