УДК 621.383.51 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.19

В. В. КУРАК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

О. В. АНДРОНОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ МЕРЕЖЕВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ З МОДУЛЯМИ РІЗНИХ ТИПІВ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

В даній роботі проведено розрахунок параметрів трьох варіантів мережевої сонячної електростанції дахового типу для приватного житлового будинку, розташованого в кліматичних умовах Херсонської області. Визначено та проаналізовано енергетичні й економічні показники запропонованих варіантів фотоелектричних станцій, що побудовані на кремнієвих модулях трьох можливих типів: монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових на основі аморфного напівпровідникового шару.

Розглянуто можливі варіанти комплектації фотоелектричної станцій. Показано, що для покриття потреби об'єкту в електричній енергії в місяць з найменшою сонячною інсоляцією достатньо 15 модулів TWMND-72HS570 на основі монокристалічного кремнію номінальною потужністю 570 Вт кожен. При використанні полікристалічних модулів JKM325PP-72 номінальною потужністю 325 Вт необхідна їх кількість збільшується до 26. У випадку комплектації фотоелектричної станції модулями з аморфним фотоактивним шаром Solar Frontier 175 SF номінальною потужністю 175 Вт кожен мінімальна їх кількість становить 49 шт. В якості мережевого інвертора в усіх трьох запропонованих варіантах фотоелектричної станції обрано однофазний інвертор AXIOMA Energy AXGRID, параметри якого узгоджуються як з фотоелектричним генератором, так і з централізованою електричною мережею, до якої підключено об'єкт.

Розрахунок енергетичних параметрів запропонованих варіантів фотоелектричних станцій показав, що обсяги річної генерації електричної енергії (7400–7500 кВт·год), а відповідно, й її надлишку, який може бути переданий в мережу за «зеленим» тарифом (5100–5200 кВт·год), є співставними незалежно від обраного типу фотоелектричних модулів. Це не дозволяє здійснити однозначний вибір оптимального варіанту станції для практичної реалізації і потребує оцінки економічних показників.

Аналіз економічних показників запропонованих систем дозволив встановити, що для даного об'єкту доцільною буде реалізація проекту мережевої фотоелектричної станції, до складу якої входять 15 модулів TWMND-72HS570 з монокристалічного кремнію, оскільки цей варіант потребує найменших капітальних вкладень та має прийнятний термін окупності та рентабельність інвестицій. В той же час, реалізація проекту на основі тонкоплівкових модулів з аморфним фотоактивним шаром з економічної точки зору виявилась недоцільною.

Ключові слова: *фотоелектрична станція, фотоелектричний модуль, генерація, споживання електричної енергії, централізована електромережа, техніко-економічні показники.*

V. V. KURAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-4303-5671

O. V. ANDRONOVA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9597-8068

© Курак В. В., Андронова О. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC STATIONS WITH MODULES OF DIFFERENT TYPES IN CLIMATIC CONDITIONS OF KHERSON REGION

In this work the parameters of three variants of rooftop grid-connected solar power station for residential building located in the climatic conditions of the Kherson region were calculated. The energy and economic parameters of the proposed variants of photovoltaic station built on monocrystalline, polycrystallin and thin-film amorphous silicon modules have been determined and analyzed.

Possible configurations of photovoltaic station are considered. It has been shown that 15 monocrystalline silicon modules TWMND-72HS570 with 570 W nominal power are sufficient to cover the building's electrical energy consumption in the month with the lowest solar insolation. When polycrystalline solar modules JKM325PP-72 with 325 W nominal power are used the required number of such modules increases up to 26. In the case when photovoltaic station equipped by Solar Frontier 175 SF amorphous modules with nominal power of 175 W the minimum amount of such modules required is 49 pcs. The AXIOMA Energy AXGRID single-phase inverter was chosen as the grid inverter for all three variants of proposed photovoltaic station since its parameters correspond with both the photovoltaic generator and the centralized electrical grid in all cases mentioned above.

Calculation of the energy parameters of the proposed variants of photovoltaic station showed that the amounts of annual electricity generation (7400 - 7500 kWh) and, accordingly, its surplus which can be transferred to the grid at a "green" tariff (5100 - 5200 kWh) are comparable between the variants regardless of the selected type of photovoltaic modules. This fact does not allow a clear choice of the optimal station variant for practical implementation and requires additional assessment of economic indicators.

Determination of the economic indicators for the proposed systems made it possible to find out that for the residential building under investigation a grid-connected photovoltaic station based on 15 monocrystalline silicon modules TWMND-72HS570 is preferable, since this variant requires the least capital investment and has an acceptable payback period and return on investment. At the same time, the implementation of the project based on thin-film modules with an amorphous photoactive layer turned out to be inexpedient from an economic point of view.

Key words: *photovoltaic station, photovoltaic module, generation, electrical energy consumption, centralized electrical grid, technical and economic parameters.*

Постановка проблеми

Незважаючи на військовий стан і суттєві руйнування енергетичної інфраструктури України внаслідок постійних обстрілів з боку держави-агресора, представники бізнесу і населення намагаються активно впроваджувати проекти «зеленої» генерації, спрямовані, перш за все, на покриття власних потреб в електричній енергії. Лише у першому півріччі 2024 року бізнес увів в експлуатацію 200 МВт нових потужностей сонячних електростанцій, що еквівалентно близько 1/5 встановленої потужності атомного енергоблоку [1]. Пожвавився і сектор будівництва сонячних електростанцій на об'єктах приватних домогосподарств. Так, у 2024 році державними банками України схвалено кредитів на будівництво фотоелектричних станцій на дахах приватних будинків сумарною потужністю 83 МВт, що є абсолютним рекордом для нашої країни за весь час впровадження подібних проектів [1].

Важливим питанням, що потребує вирішення на стадії проектування сонячної електростанції на тому чи іншому об'єкті, є оптимальний вибір обладнання задля забезпечення мінімального строку окупності проекту. Як показує досвід, однією з головних статей в кошторисі проектів мережевих фотоелектричних систем є витрати на фотоелектричні модулі, у зв'язку з чим до питання вибору саме цієї компоненти слід підходити максимально зважено.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні промисловістю виготовляється ціла низка фотоелектричних модулів, що базуються на різних напівпровідникових матеріалах, як-то: кремній, сполуки $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$ та низка інших [2]. Активно проводяться роботи з пошуку та впровадження у виробництво новітніх більш дешевих та технологічних матеріалів, щоб зменшити собівартість та покращити енергетичні показники фотоелектричних модулів. Такими матеріалами, зокрема, є перовскіти та барвники [3].

Втім, незважаючи на різноманіття матеріалів, що застосовуються для виготовлення фотоелектричних модулів, найбільшого практичного застосування при спорудженні сонячних електростанцій різних типів на даний час отримали модулі на основі кремнію, що обумовлено, передусім, доволі сприятливим співвідношенням між їх електричними параметрами, експлуатаційними показниками та вартістю одиниці потужності [4].

Кремнієві фотоелектричні модулі прийнято поділяти на три великі групи, що відрізняються за кристалічною структурою застосованого напівпровідника: монокристалічні, полікристалічні (мультикристалічні) та тонкоплівкові модулі з аморфного кремнію. Кожна з цих груп модулів має свої переваги і недоліки [2–4]. Так, модулі на основі монокристалічного кремнію мають найбільшу ефективність (близько 20 %), що дозволяє застосовувати меншу площу фотоелектричного генератора для досягнення необхідної встановленої потужності в порівнянні з іншими варіантами кремнієвих модулів, та характеризуються найвищими строками експлуатації, що становлять понад 25 років. Втім, середня вартість одиниці потужності монокристалічного модуля є найвищою.

Найменшу ефективність мають тонкоплівкові модулі з аморфного кремнію (6–8 %). Вони демонструють і найкоротший термін експлуатації, пов'язаний з деградацією структури аморфної плівки внаслідок ефекту Стаблера-Вронського [5]. В той же час, такі модулі є найдешевшими.

Щодо полікристалічних кремнієвих модулів, то їх ефективність є на кілька відсотків меншою за монокристалічні аналоги, але й їх середня вартість дещо менша в порівнянні з модулями на основі монокристалічного кремнію.

Зважаючи на відмінність у технічних параметрах і вартості кремнієвих модулів із зазначених вище груп, вирішення питання щодо застосування модулів того чи іншого типу доцільно проводити на основі попередньої оцінки та аналізу техніко-економічних показників сонячної електростанції, що проектується, індивідуально для кожного конкретного об'єкту та кліматичних умов експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є визначення типу фотоелектричних модулів, найбільш доцільних для застосування в мережевій фотоелектричній станції, на прикладі приватного житлового будинку, розташованого в кліматичних умовах Херсонської області.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості об'єкту для розробки мережевої фотоелектричної станції обрано приватний житловий будинок загальною площею 90 м^2, розташований в Бериславському районі Херсонської області. Будинок підключено до централізованої мережі електропостачання з фазною напругою 220 В. Дах будинку є двоскатним з площею південного скату 64 м^2, що розташований під кутом 45° відносно горизонту. Затінення південного скату оточуючими об'єктами протягом світлового дня не спостерігається.

На рис. 1 представлено розподіл середнього денного споживання електричної енергії об'єктом за місяцями, визначений на основі аналізу рахунків від енергопостачальної компанії за останні три роки.

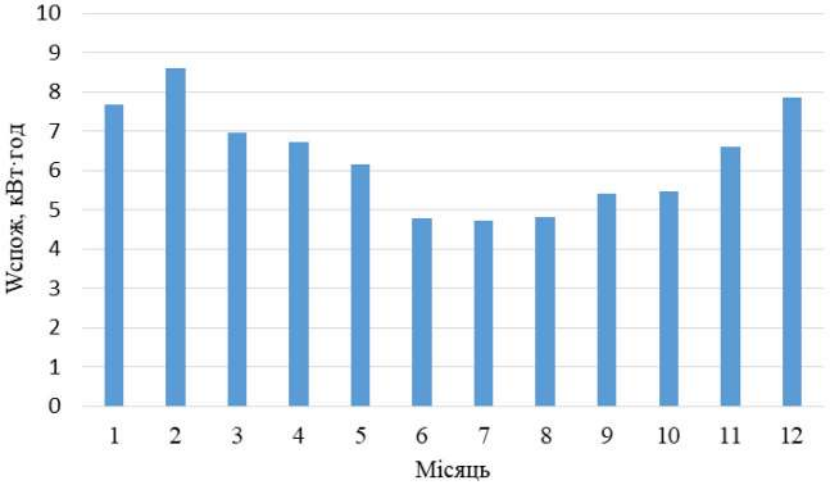

Рис. 1. Розподіл денного споживання електричної енергії будинком за місяцями

Розрахунок параметрів фотоелектричної станції та кількості фотоелектричних модулів виконували за методикою, описаною в [6], виходячи з необхідності покриття потреб об'єкту в електричній енергії в місяць з найнижчим надходженням сонячної радіації (для кліматичних умов Херсонської області – грудень).

Аналізувалась доцільність впровадження на об'єкті трьох варіантів дахових фотоелектричних станцій:

– Варіант А – станція, що складається з однофазного мережевого інвертора AXIOMA Energy AXGRID з номінальною напругою на стороні змінного струму 220/230 В та максимальною ефективністю 97,7 %, а також 15 фотоелектричних модулів TWMND-72HS570 на основі монокристалічного кремнію номінальною потужністю 570 Вт кожен, які формують фотоелектричний генератор сумарною площею 38,7 м^2;

– Варіант Б – станція, побудована на основі сонячного мережевого інвертора AXIOMA Energy AXGRID та фотоелектричного генератора загальною площею 51,5 м^2, що складається з 26 полікристалічних кремнієвих модулів JKM325PP-72 номінальною потужністю 325 Вт кожен;

– Варіант В – станція з мережевим інвертором AXIOMA Energy AXGRID та фотоелектричним генератором площею 59,8 м^2, побудованим на основі 49 модулів з аморфним фотоактивним шаром Solar Frontier 175 SF номінальною потужністю 175 Вт кожен.

В табл. 1 представлено розрахункові енергетичні показники запропонованих варіантів мережевих фотоелектричних станцій.

Таблиця 1

Енергетичні показники дахових фотоелектричних станцій

Місяць	Варіант А		Варіант Б		Варіант В	
	Вироблення, кВт · год	Надлишок, кВт · год	Вироблення, кВт · год	Надлишок, кВт · год	Вироблення, кВт · год	Надлишок, кВт · год
1	352,5	114,8	348,4	110,7	353,5	115,8
2	469,2	228,5	463,7	223	470,6	229,9
3	620,2	404,5	612,9	397,3	622	406,3
4	800,3	598,2	790,9	588,9	802,6	600,6
5	906,5	715,8	895,8	705,2	909,1	718,4
6	743,8	600,2	735,15	591,5	746	602,3
7	781,9	635,9	772,7	626,7	784,2	638,2
8	781,9	632,5	772,7	623,4	784,2	634,8
9	784,9	622,5	775,7	613,4	787,2	624,8
10	604,3	434,6	597,2	427,5	606	436,4
11	338,6	140,6	334,6	136,6	339,6	141,6
12	296,8	53,5	293,4	50	297,7	54,4
Рік	7480,9	5181,9	7393,5	5094,5	7502,9	5203,9

Як показує аналіз даних табл. 1, всі три варіанти фотоелектричних станцій мають близькі енергетичні показники, хоча більш виграшно виглядає варіант В, побудований на основі аморфних модулів, який забезпечує найбільшу генерацію електричної енергії, а отже, і її максимальний надлишок, завдяки дещо вищій сумарній потужності фотоелектричного генератора. Втім, це перевищення в генерації становить близько 1 % і не може вважатись вирішальним при прийняті рішення щодо практичної реалізації на даному об'єкті саме варіанту В. У зв'язку з цим, необхідно провести оцінку економічних показників для кожного із запропонованих варіантів фотоелектричних станцій.

В табл. 2 представлено результати розрахунку економічних показників для запропонованих варіантів мережевих фотоелектричних станцій в цінах на кінець 2024 року. При розрахунку враховували такі статті, як капітальні витрати *К*, експлуатаційні витрати *Е* (приймались на рівні 1 % від капітальних витрат), чистий прибуток *П* за рахунок продажу в мережу надлишку електроенергії за «зеленим» тарифом та економії на оплаті за мережеву електрику завдяки покриттю власних потреб об'єкту, на основі чого оцінювали простий строк окупності проектів *Т* та рентабельність інвестицій R.

Таблиця 2

Економічні показники дахових фотоелектричних станцій

Станція	*К*, грн	*Е*, грн	*П*, грн/рік	*Т*, роки	*R*, %
Варіант А	272 844	2728	41 413	6,59	15,47
Варіант Б	367 389	3674	40 059	9,17	11,05
Варіант В	525 631	5256	39 492	13,31	7,57

Як слідує з табл. 2, найкращі економічні показники демонструє варіант А, побудований на основі фотоелектричних модулів з монокристалічного кремнію, що характеризується найменшими капітальними витратами на реалізацію проекту, головним чином, завдяки мінімальній необхідній кількості модулів такого типу. Цей варіант має найменший строк окупності і найвищу рентабельність інвестицій.

З економічної точки зору найгіршим є варіант В, період окупності якого становить 13,31 роки, що перевищує середній нормативний термін експлуатації модулів з аморфного кремнію (близько 10 років), а отже, такий варіант фотоелектричної станції не може бути рекомендований до реалізації на даному об'єкті.

Висновки

Розроблено три варіанти мережевої фотоелектричної станції для приватного будинку, розташованого в Бериславському районі Херсонської області, що відрізняються між собою типом застосованих фотоелектричних модулів. Розрахунок енергетичних показників розроблених систем показав, що всі варіанти мають близьке вироблення в розрізі типового року, а відповідно, і надлишок генерованої електричної енергії, що не дозволяє здійснити вибір оптимального варіанту для практичної реалізації на об'єкті.

Оцінка економічних показників розроблених систем дозволила встановити, що для даного об'єкту доцільною буде реалізація проекту мережевої фотоелектричної станції, до складу якої входять 15 модулів TWMND-72HS570 з монокристалічного кремнію, оскільки цей варіант потребує найменших капітальних вкладень та має прийнятний термін окупності та рентабельність інвестицій. В той же час, реалізація проекту на основі тонкоплівкових модулів з аморфним фотоактивним шаром є недоцільною за економічними показниками.

Список використаної літератури

1. Ігнатьєв С. Енергетична система України: стан на кінець 2024 року та сценарії на 2025 [Електронний ресурс]. Енергоджерела [Сайт]. Режим доступу: https://enerhodzherela.com.ua/analityka/ (дата звернення 10.09.25). Назва з екрану.

2. Шевчук В. І., Марченко Н. В., Пундєв В. О. Порівняльний аналіз типів сонячних елементів для фотоелектричних модулів. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції*. 20–21 травня 2021 р. Київ. С. 425–429.

3. Новицький С. В., Зур'ян О. В. Фотоелектричні перетворювачі. Види, ефективність. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 1(88). 2024. С. 92–102. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12

4. Як вибрати сонячні фотомодулі [Електронний ресурс]. Avenston [Сайт]. Режим доступу: https://avenston.com/articles/solar-modules/ (дата звернення 10.09.25). Назва з екрану.

5. Косяченко Л. А., Грушко Є. В. Перспективи застосування тонкоплівкового телуриду кадмію в сонячній енергетиці. *Український фізичний журнал. Огляди 2012*. Т. 7. № 1. 2012. С. 3–30.

6. Курак В. В., Андронова О. В., Погребняк І. Ф. Оцінка вироблення енергії фасадними фотоелектричними системами в кліматичних умовах м. Херсон. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 4(91). 2024. С. 85–90. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.10

References

1. Ignatyev S. Energy system of Ukraine: status at the end of 2024 and scenarios for 2025 [Electronic resource]. Energysources [Site]. Access mode: https://enerhodzherela.com.ua/analityka/ (last access: 10.09.25). Title from the screen.

2. Shevchuk V. I., Marchenko N. V., Pundiev V. O. Porivnyal′nyy analiz typiv sonyachnykh elementiv dlya fotoelektrychnykh moduliv [Comparative analysis of solar cells types for PV modules]. *XXIIth International scientific and practical conference "Renewable Energy and Energy Efficiency of the XXIst century"*. May 20–21. 2021. Kyiv. Ukraine. P. 425–429. [in Ukrainian].

3. Novytskyi S. V., Zurian O. V. (2024) Fotoelektrychni peretvoryuvachi. Vydy, efektyvnist′ [Photoelectric converters. Types, efficiency]. *Visnyk of Kherson National Technical University*, no. 1(88), pp. 92-102. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12

4. How to choose solar PV modules [Electronic resource]. Avenston [Site]. Access mode: https://avenston.com/articles/solar-modules/ (last access: 10.09.25). Title from the screen.

5. Kosyachenko L. A., Grushko E. V. (2012) Perspektyvy zastosuvannya tonkoplivkovoho telurydu kadmiyu v sonyachniy enerhetytsi [Prospects for the Use of Thin-Film Cadmium Telluride in Solar Energetics]. *Ukrainian Journal of Physics. Reviews 2012*, vol. 7, no. 1, pp. 3–30. [in Ukrainian].

6. Kurak V. V., Andronova O. V., Pogrebniak I. F. (2024) Otsinka vyroblennya enerhiyi fasadnymy fotoelektrychnymy systemamy v klimatychnykh umovakh m. Kherson [Evaluation of the facade photoelectric systems energy production in the climate conditions of Kherson]. *Visnyk of Kherson National Technical University*, no. 4(91), pp. 85–90. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.10

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025