

МАКСИМІЗАЦІЯ ОБСЯГІВ ГЕНЕРАЦІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ, СПОРУДЖУВАНИХ НА ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Отримано 27 січ. 2026 р.; рекомендовано до публікації 23 бер. 2026 р.
Доступно онлайн 31 бер. 2026 р.

Качан Ю. Г.¹, Шрам О. А.²

Автор для кореспонденції: Шрам Олександр,
e-mail: alexshrum@yahoo.com

¹ д-р. техн. наук, професор
<https://orcid.org/0000-0001-9984-3646>

² канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-4206-7716>

^{1, 2} Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

Анотація. Метою роботи є збільшення обсягів електричної енергії, що генерується фотоелектричними панелями, встановленими на виділених ділянках на території промислових підприємств. Максимізація досягається за рахунок вибору оптимального варіанта типів сонячних панелей з урахуванням реальної сонячної інсоляції поверхонь, де вони встановлені. Активне впровадження відновлюваних джерел енергії промисловими підприємствами дає змогу зменшити споживання електричної енергії з загальних мереж, забезпечити безперебійність електропостачання, підвищити енергоефективність тощо. Для розміщення розосереджених джерел енергії можуть бути використані кар'єри, відвали, вільні території між цехами промислових підприємств, а також дахи їх будівель. Останні мають значну площу, зручну для встановлення фотоелектричних панелей форми, меншу зону затінення, ніж земельні ділянки.

Визначення оптимального розташування сонячних панелей під час проектування сонячних електростанцій дає змогу ефективніше використовувати наявну площу для їх встановлення та мінімізувати можливе їх затінення. У роботі запропонований підхід щодо максимізації обсягів генерації сонячних електростанцій, споруджуваних на території промислових підприємств. З використанням запропонованої методики можна вибрати оптимальний варіант СЕС з урахуванням всіх можливих місць для її встановлення та всіх можливих типів фотоелектричних панелей. Застосування такої методики розглянуто на прикладі одного з промислових підприємств, на дахах цехів якого є можливість встановити сонячні панелі. Бібл. 11, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: сонячна електростанція, відновлювані джерела енергії, оптимізаційна задача, затінення, сонячна інсоляція.

Перелік використаних позначень та скорочень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

СЕС – сонячна електростанція

Вступ і постановка завдання. Використання відновлюваних джерел дає змогу зменшити споживання електричної енергії з загальної мережі, забезпечити безперебійність електропостачання, підвищити енергоефективність виробництва тощо. З огляду на це сонячні електростанції як складова розосередженої генерації відіграють дедалі важливішу роль у сучасних електроенергетичних системах завдяки можливості виробництва енергії безпосередньо біля місця її споживання, що забезпечує зниження втрат під час передавання енергії, зменшення експлуатаційних витрат, відсутність шкідливих викидів тощо [1–3].

Незважаючи на численні переваги, залежність обсягів генерації електричної енергії від погодних умов та часу доби може створювати небажані перетоки потужності й коливання напруги, що значно обмежує можливості використання СЕС у власних електричних мережах споживачів без додаткових технічних рішень. До останніх

зазвичай належать системи накопичення енергії та модернізація диспетчерського керування мережею для підтримки її стабільності й надійності після підключення таких розосереджених джерел енергії [4].

На відмінну від комерційних і побутових споживачів, промислові підприємства здебільшого мають рівномірніший та прогнозованіший графік споживання електроенергії. Тож істотна залежність обсягів згенерованої відновлюваними джерелами електроенергії від погодних умов ускладнює їх використання в електричних мережах промислових підприємств. Крім того, підключені довільним способом розосереджені джерела енергії негативно впливають на якість електричної енергії в загальній мережі, порушуючи електромагнітну сумісність [4, 5].

Враховуючи значну кількість потужних споживачів електроенергії, суворі вимоги до її якості та безперебійності

електропостачання технологічного процесу усунування зазначених вище недоліків для промислових підприємств є особливо актуальною задачею. У роботі [6] запропонована інноваційна електрична мережа, яка складається з трьох окремих локальних мереж. А саме мережі змінного струму «якісної» електроенергії, мережі змінного струму «неякісної» електроенергії й мережі постійного струму, що їх об'єднує.

До кожної з трьох локальних мереж під'єднуються приймачі та джерела розосередженої енергії, попередньо розподілені на відповідні групи. Так, до мережі постійного струму безпосередньо підключаються фотоелектричні перетворювачі, приймачі постійного струму та двигуни змінного струму з частотним перетворювачем DC/AC. До мережі неякісної електроенергії під'єднані вітроустановки без окремих блоків забезпечення якості електричної енергії та споживачі, технічні характеристики та режим роботи яких дозволяють відхилення показників якості електроенергії від нормованих значень.

Оскільки значна кількість електричної енергії, згенерованої ВДЕ, споживається безпосередньо в зазначених вище локальних мережах, то зв'язок цих мереж забезпечують два перетворювачі DC/AC та AC/DC уже значно меншої потужності.

Місця підключення ВДЕ і перетворювачів до зазначених вище мереж, а також їх потужності можуть бути визначені при вирішенні відповідної оптимізаційної задачі. У результаті розв'язку останньої формується структура нової електричної мережі промислового підприємства.

Однією з актуальних задач під час проектування СЕС є визначення оптимального розташування сонячних панелей. Конфігурація розміщення панелей та відстані між рядами відіграють ключову роль у запобіганні взаємному затіненню та забезпеченні доступу для обслуговування [7–9]. Нещодавні дослідження двосторонніх фотоелектричних систем показують, що правильно розташовані масиви панелей можуть забезпечити до 10 % додаткової генерації енергії за рахунок отримання випромінювання зворотню стороною при висоті кріплення 0,51,0 м над поверхнею та використанні матеріалів з високою відбивною здатністю [7, 10].

Таким чином, вибір кількості й типів сонячних панелей, розташованих на окремих виділених майданчиках промислового підприємства, які б забезпечили максимальні обсяги генерації СЕС, є окремою проблемою, яка потребує вирішення.

Метою роботи є збільшення обсягів електричної енергії, що генерується фотоелектричними панелями, встановленими на виділених майданчиках на території промислових підприємств. Максимізація досягається за рахунок вибору оптимального варіанта типів сонячних панелей та урахування реальної інсоляції поверхонь, де вони встановлені.

Матеріал і результати досліджень. Сонячна інсоляція, що потрапляє на поверхню геліоперетворювачів, залежить від багатьох факторів і може істотно відрізнитися від середніх значень, які надаються інформаційними системами або довідниками. Крім того, вона може варіюватися і в межах окремої ділянки, де встановлені сонячні панелі, оскільки наявні поруч споруди та зелені насадження затінюють певні зони СЕС. Одним з найточніших методів визначення сонячної інсоляції на ділянці, де буде розташована СЕС, є безпосередній її вимір за допомогою соляриметрів. За допомогою таких приладів можна вимірювати сонячне випромінювання повного спектра з кутом огляду 180°. У табл. 1 та на рис. 1 представлені отримані соляриметром Fisher 461105 значення сонячної інсоляції на одній з виділених для встановлення СЕС ділянок промислового підприємства м. Запоріжжя.

Нехай підприємство має множину $\alpha = \{1, \dots, N\}$ виділених ділянок для розміщення $\beta = \{1, \dots, M\}$ різних типів фотоелектричних панелей. Розіб'ємо кожну з ділянок α на дискретні зони, де буде виміряна сонячна інсоляція E .

Масив даних сонячної інсоляції окремої виділеної ділянки на території промислового підприємства можна представити в такому вигляді:

$$E^{(\alpha)} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & \dots & E_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{m1} & E_{m2} & E_{m3} & \dots & E_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де α – номер виділеної ділянки;

E_{ij} – сонячна інсоляція окремої зони ij , кВт·год/м².

На першому етапі розв'язання оптимізаційної задачі щодо максимізації обсягу генерації електроенергії СЕС необхідно визначити масив можливих комбінацій розташування M типів сонячних панелей на N виділених для цього ділянках на території підприємства. Така задача розглянута в [11], де вищезгаданий масив формується за допомогою рекурсивної функції.

Обсяг електричної енергії, згенерованої окремою сонячною панеллю β -го типу, може бути визначений за допомогою такого виразу:

$$W_h^\beta = E_{ij}^{(\alpha)} \cdot S_\beta \cdot P_{rated}^\beta \cdot \eta_{solar}^\beta \cdot \eta_{temp}^\beta, \quad (2)$$

де W_h^β – обсяг електричної енергії, що генерується однією сонячною панеллю β -го типу, кВт·год;

$E_{ij}^{(\alpha)}$ – значення сонячної інсоляції в ij -й зоні виділеної ділянки α , кВт·год/м²;

S_β – площа сонячної панелі β -го типу, м²;

P_{rated}^β – номінальна потужність сонячної панелі β -го типу, кВт;

η_{solar}^β – коефіцієнт корисної дії панелі β -го типу;

η_{temp}^{β} – тепловий коефіцієнт сонячної панелі β -го типу, який враховує зниження її ефективності під час її нагріву.

Критерієм оптимізації в задачі, що розглядається, є максимум згенерованої сонячною електростанцією енергії за проміжок часу T . Тож цільова функція може бути записана в такому вигляді:

$$W = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot W_h^j \rightarrow \max, \quad (3)$$

де T – проміжок часу, на якому оптимізується СЕС, що розглядається;

x_{ij} – кількість панелей типу j , встановлених на ділянці i .

Для кожної ділянки $i = \{1, \dots, N\}$ площа панелей не може перевищувати площу ділянки. Тож обмеження для функції (3) може бути записане в такому вигляді:

$$\sum_{j=1}^M (s_j \cdot x_{ij}) \leq S_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}. \quad (4)$$

Оптимізаційна функція (3) містить $N \cdot M$ змінних x_{ij} , які відповідають різним комбінаціям сонячних панелей на виділених ділянках, що впливає на загальну генерацію фотоелектричної станції.

Таблиця 1. Виміряні значення сонячної інсоляції (Вт·год/м²) станом на 20 серпня 2025 року

Відстань, м	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
2	600	600	500	500	500	700	700	650	800	800	800	300	600	400	400
4	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	700	600	500	500
6	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
8	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
10	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
12	800	800	800	800	800	800	800	800	600	800	800	800	800	800	800
14	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
16	700	700	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
18	500	500	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
20	400	500	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800

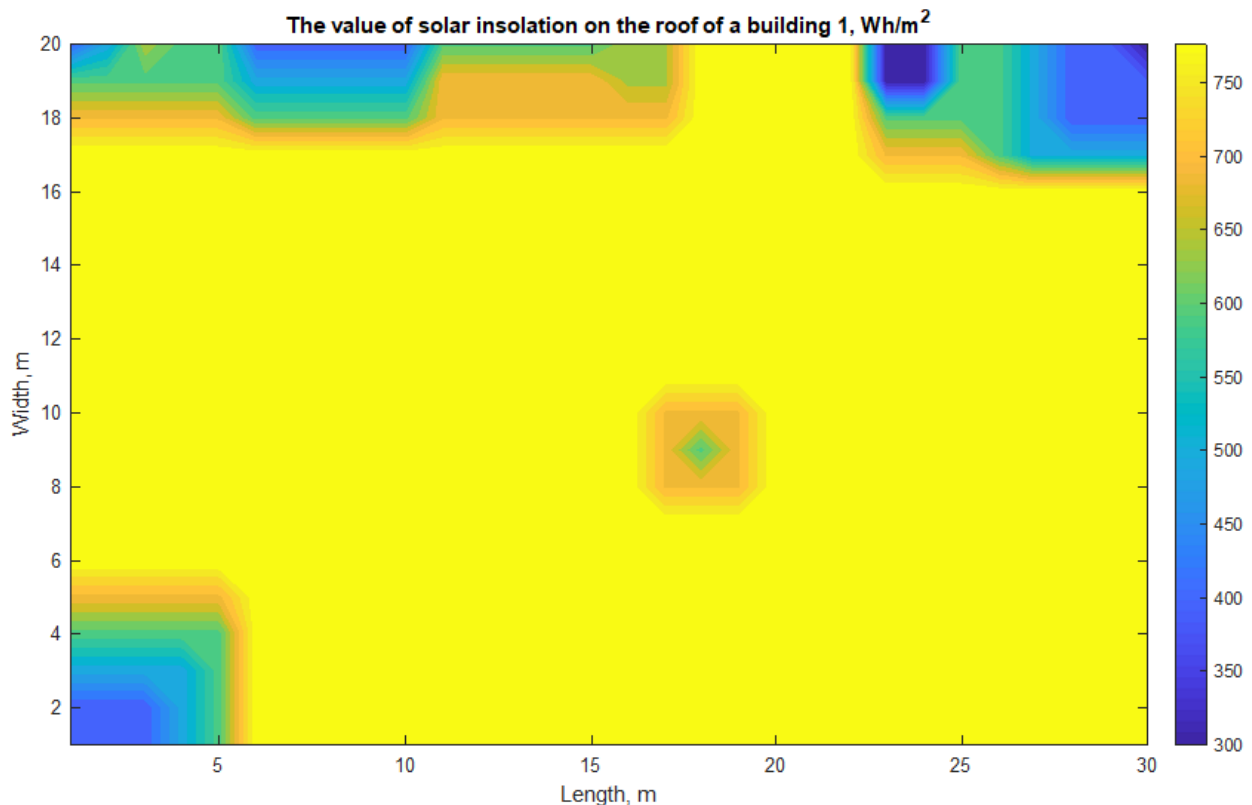


Рис. 1. Сонячна інсоляція на одній з виділених для встановлення СЕС ділянок

Використаємо запропонований підхід для визначення оптимальної конфігурації СЕС, яка може бути побудована на дахах п'яти цехів одного розглянутого раніше промислового підприємства м. Запоріжжя. Зазначені вище дахи мають площу 3600 м², 5200 м², 3150 м², 4100 м², 3850 м², відповідно. При цьому наявні сонячні

панелі п'яти типів, технічні характеристики яких наведені в табл. 2. Всі можливі варіанти розташування вибраних панелей на зазначених вище дахах сформовані у вигляді матриці за допомогою рекурсивної функції [11]. Загальна кількість таких варіантів для задачі, що розглядається, становить 3125.

Таблиця 2. Технічні характеристики сонячних панелей

Сонячна панель	Потужність, Вт	Тип основності фотомодуля	Коефіцієнт корисної дії фотомодуля, %	Орієнтовна вартість, дол. США	Габаритний розмір, мм
Ulica Solar UL-610M-132DDGN	610	монокристал.	22.58	90	2382*1134
Longi Solar LR7-72HVN-645M	645	монокристал.	23.9	102	2382x1134
TW Solar TWMNH-66HD625 Bifacial	625	монокристал.	23.1	90	2382x1134
Vertex Bifacial TSM-DEG18MC.20(II)	490	монокристал.	20.3	110	2187×1102
Jinko Solar JKM435N-54HL4R	435	монокристал.	21.77	66	1762×1134

З практичного погляду врахування реальних значень сонячної інсоляції для кожної зони визначених майданчиків може бути ускладнено. Тому в подальших розрахунках використовуються усереднені погодинні значення сонячної інсоляції E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 по кожному з п'яти майданчиків, які представлені в табл. 3.

Внаслідок проведених розрахунків були отримані обсяги добової генерації усіх можливих варіантів дахової

сонячної електростанції (рис. 2). Мінімальне значення активної енергії відповідає варіанту 2344 з використанням сонячних панелей четвертого типу (табл. 3) і становить 20,49 МВт·год. Максимальне значення відповідає 782-му варіанту (сонячні панелі другого типу) і становить 24,10 МВт·год. Отже, різниця між зазначеними вище варіантами виконання дахової сонячної електростанції підприємства становить 3,61 МВт·год на добу або 17,63 %.

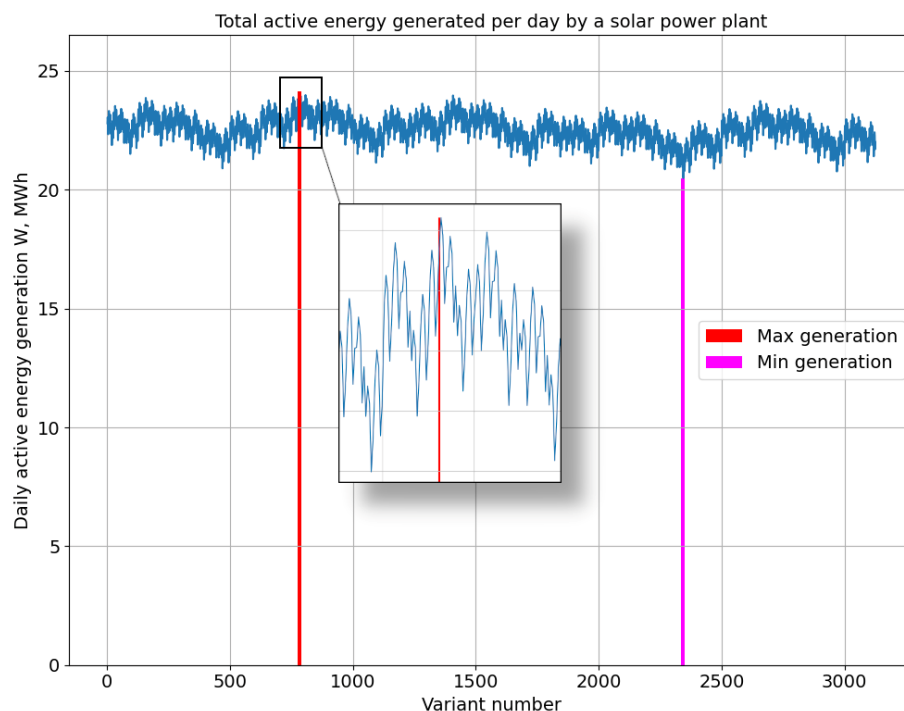


Рис. 2. Обсяги добової генерації активної енергії дахової сонячної електростанції

Таблиця 3. Усереднені погодинні значення сонячної інсоляції станом на 20 серпня 2025 року

Час, год	E_1 , Вт·год/м ²	E_2 , Вт·год/м ²	E_3 , Вт·год/м ²	E_4 , Вт·год/м ²	E_5 , Вт·год/м ²
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	63	59,22	68,04	68,04	65,52
6	214,07	192,663	226,9142	235,477	196,9444
7	382,48	382,48	386,3048	344,232	397,7792
8	539,5	485,55	588,055	544,895	496,34
9	668,22	654,8556	654,8556	601,398	608,0802
10	755,67	778,3401	755,67	831,237	755,67
11	793,35	769,5495	714,015	817,1505	769,5495
12	781,7	773,883	844,236	742,615	805,151
13	717,17	724,3417	666,9681	767,3719	717,17
14	607,45	552,7795	619,599	558,854	613,5245
15	461,05	507,155	437,9975	442,608	461,05
16	291,92	280,2432	297,7584	277,324	283,1624
17	127,15	137,322	115,7065	136,0505	120,7925
18	13,68	13,4064	12,7224	13,2696	14,364
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0

Висновки

1. Сонячні електростанції, що підключаються довільним способом до електричних мереж промислових підприємств, створюють небажані перетоки потужності, коливання напруг, негативно впливають на якість електричної енергії. Це значно ускладнює їх інтеграцію, вимагає додаткових технічних рішень та збільшує собівартість згенерованої електроенергії.
2. Обсяги електричної енергії, що генерується фотоелектричними панелями, встановленими на території промислових підприємств можуть бути збільшені за рахунок вибору оптимального варіанта типів сонячних панелей та врахування реальної інсоляції поверхонь, де вони розташовані.
3. Найкращим варіантом розв'язання задачі максимізації обсягів генерації активної енергії сонячними електростанціями, споруджуваних на території промислових підприємств, є окреме вирішення задач формування масиву всіх можливих комбінацій розташування доступних типів сонячних панелей на виділених для цього ділянках та розрахунку добового обсягу згенерованої електричної енергії з урахуван-

ням реальної сонячної інсоляції на кожній ділянці для всіх сформованих комбінацій.

4. Вибір типів сонячних панелей та їх кількості за запропонованою методикою дає змогу збільшити добову генерацію активної енергії СЕС, що розташована на дахах цехів промислового підприємства, більше ніж на 3 МВт·год, або на 17 % порівняно з найгіршим варіантом, можливим при довільному виборі типів та розташування сонячних панелей.

ПОСИЛАННЯ

1. Golub G., Tsyvenkova N., Yaremenko O., Marus O., Omarov I., Holubenko A. Determining the efficiency of installing fixed solar photovoltaic modules and modules with different tracking options. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Volume 4. No. 8(124). 2023. Pp. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286464>
2. Meriläinen A., Puranen P., Kosonen A., Ahola J. Optimization of rooftop photovoltaic installations to maximize revenue in Finland based on customer class

- load profiles and simulated generation. *Solar Energy*. Volume 240. 2022. Pp. 422–434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.057>
3. Keiner D., Bogdanov D., Krauter S., Breyer C. Assessing Yield Disparities: Anticipated versus Optimal Rooftop Photovoltaic Systems and Implications for Prosumer Viability. *Solar RRL*. Volume 8(24). 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/solr.202400435>
 4. Awan A. B., Alghassab M., Zubair M., Bhatti A. R., Uzair M., Abbas G. Comparative Analysis of Ground-Mounted vs. Rooftop Photovoltaic Systems Optimized for Interrow Distance between Parallel Arrays. *Energies*. Volume 13(14): 3639. July 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13143639>
 5. Galevien A. P., Ridwan M. K., Wardana A. N. I. Assessing the Viability of Rooftop Solar PV in Energy-Intensive Industries: A Techno-Economic and Safety Framework for the Indonesian FMCG Sector. *Energies*. Volume 18(21): 5859. November 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18215859>
 6. Kachan Yu. G., Shram O.A., Mishchenko V. Yu. Comparative assessment of the advantages of an innovative power grid for industrial enterprises with renewable energy sources. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No. 6. Pp. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/105>
 7. Abdelsalam E., Alnawafah H., Almomani F., Mousa A., Qandil H. Enhancing the Efficiency of Bi-Facial Photovoltaic Panels: An Integration Approach. *Sustainability*. Volume 15(20): 14786. October 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014786>
 8. Ричка Р. Ю. Оптимізація розташування сонячних панелей для досягнення максимальної виробничої потужності. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2024. № 1(281). С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-281-1-76-84>
 9. Кирисов І.Г., Михайлов Б.К., Лосенко Є.В. Вплив затінення та пошкоджень сонячних батарей на їх параметри. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73). No 1. С. 180–185. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/27>
 10. Хотян А. А., Розен В. П., Чермалих О. В. Аналіз ефективності використання фотоелектричних модулів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 4. С. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175615>
 11. Качан Ю. Г., Шрам О. А. Щодо можливості створення ефективних сонячних електростанцій на території промислових підприємств. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 1(76). С. 22–31. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).22-31)

MAXIMIZING THE GENERATION VOLUMES OF SOLAR POWER PLANTS BUILT ON THE TERRITORY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Received Jan. 27, 2026; accepted Mar. 23, 2026
Available online Mar. 31, 2026

Kachan Yu. ¹, Shram O. ²

Author for correspondence: Shram Oleksandr,
e-mail: alexshrum@yahoo.com

¹ Dr. of Sciences (Tech.), Professor
<https://orcid.org/0000-0001-9984-3646>

² Cand. of Sciences (Tech.), Associate Professor
<https://orcid.org/0000-0003-4206-7716>

Abstract. *The aim of the work is to increase the amount of electrical energy generated by photovoltaic panels installed in designated areas within the territory of industrial enterprises. Maximization is achieved by selecting the optimal type of solar panels, taking into account the actual solar insolation at the surfaces where they are installed.*

^{1,2} National University "Zaporizhzhia Polytechnic",
Zaporizhzhia, Ukraine

The active integration of renewable energy sources by industrial enterprises enables a reduction in electricity consumption from the general grid, ensures an uninterrupted power supply, improves energy efficiency, etc. Distributed energy sources can be installed in quarries, waste dumps, vacant areas between industrial buildings, and on the roofs of industrial buildings. The rooftops have a large area, a shape that is convenient for installing photovoltaic panels, and less shade than land plots.

Determining the optimal location of solar panels when designing solar power plants allows for more efficient use of the available space for their installation and minimizes potential shading. The paper proposes an approach to maximizing the generation volume of solar power plants built on industrial enterprise territory. The proposed methodology enables the selection of the optimal solar power plant option by considering all possible installation locations and photovoltaic panel types. The proposed methodology is applied using the example of an industrial enterprise whose workshops have rooftops suitable for installing solar panels. Ref. 11, Fig. 2, Tables 3.

Keywords: solar power plant, renewable energy sources, optimization problem, shading, solar insolation.

List of Symbols and Abbreviations

RES – renewable energy sources

SPP – solar power plant

Introduction and problem statement. The use of renewable sources allows for reducing electricity consumption from the general grid, ensuring an uninterrupted power supply, increasing energy efficiency of the production process, etc. In turn, solar power plants, as a component of distributed generation, play an increasingly important role in modern power systems due to their ability to produce energy directly at the point of consumption, thereby reducing transmission losses, lowering operating costs, and eliminating harmful emissions [1–3].

Despite its many advantages, the dependence of electricity generation on weather conditions and the time of day can result in unwanted power outflows and voltage fluctuations. This significantly limits the use of solar power plants in consumers' electrical grids without additional technical solutions. The latter typically involves energy storage systems and modernizing grid dispatch control to ensure stability and reliability when connecting distributed energy sources [4].

Unlike commercial and residential consumers, industrial enterprises typically exhibit a more consistent and predictable electricity consumption pattern. Therefore, the

significant dependence of renewable energy generation on weather conditions makes it difficult to use in industrial power grids. Additionally, randomly connected distributed energy sources negatively affect the quality of electrical energy in the overall grid, violating electromagnetic compatibility standards [4, 5].

Due to the large number of electricity consumers and strict requirements for quality and uninterrupted power supply, eliminating the aforementioned shortcomings is an important task for industrial enterprises. In [6], the authors propose an innovative electrical grid consisting of three separate local networks. Specifically, there is an alternating-current grid of "high-quality" electricity, an alternating-current grid of "low-quality" electricity, and a direct-current grid that connects them.

Consumers and distributed energy sources are pre-assigned to groups and connected to one of three local grids. Thus, photovoltaic converters, DC consumers, and AC motors with only DC/AC frequency converters connect directly to the DC grid. Wind turbines that do not have separate power quality assurance units, as well as consumers whose technical characteristics and operating modes allow for

deviations in power quality indicators from standard values, are connected to the low-quality power grid.

Since a significant portion of the electricity generated by RES is consumed directly in the aforementioned local networks, these grids are connected via two DC/AC and AC/DC converters with significantly lower power ratings.

The connection points for RES and converters to the aforementioned grids, as well as their capacities, can be determined by solving the corresponding optimization problem. The solution to this problem entails the design of a new electrical grid for an industrial enterprise.

One of the most important tasks in designing a solar power plant is determining the optimal location for the solar panels. The configuration of the panels and the spacing between rows are crucial for preventing mutual shading and ensuring access for maintenance [7–9]. Recent studies of bilateral photovoltaic systems indicate that correctly positioned panel arrays can generate up to 10% more energy by receiving radiation from the reverse side when mounted 0.5–1.0 m above the surface and using high-reflectivity materials [7, 10].

Thus, determining the number and type of solar panels to be installed in designated areas of an industrial enterprise

to maximize SPP generation is a separate issue that must be addressed.

Objective of the work is to increase the amount of electricity generated by photovoltaic panels installed in designated areas on the territory of industrial enterprises. Maximization is achieved by selecting the optimal type of solar panels and taking into account the actual insolation of the surfaces where they are installed.

Material and research results. The amount of solar insolation that hits the surface of solar converters depends on multiple factors and can differ significantly from the average values provided by information systems or reference books. Additionally, it can vary within a single installation site, as nearby buildings and green spaces can shade certain areas of the solar power plant. One of the most accurate methods for determining solar insolation at the site where the solar power plant will be located is to measure it directly using solar meters. These devices measure full-spectrum solar irradiance with a 180° field of view. Table 1 and Fig. 1 display the solar irradiation values measured by the Fisher 461105 solarimeter at one of the sites chosen for installing a solar power plant at an industrial enterprise in Zaporizhzhia.

Table 1. Measured values of solar insolation (Wh/m²) as of August 20, 2025

Distance, m	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
2	600	600	500	500	500	700	700	650	800	800	800	300	600	400	400
4	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	700	600	500	500
6	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
8	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
10	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
12	800	800	800	800	800	800	800	800	600	800	800	800	800	800	800
14	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
16	700	700	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
18	500	500	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
20	400	500	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800

Let the enterprise have a set $\alpha = \{1, \dots, N\}$ of allocated areas for placing $\beta = \{1, \dots, M\}$ different types of photovoltaic panels. Then, let us divide each area into discrete zones in which solar insolation, E , will be measured.

The solar insolation data array for a separate allocated area on the territory of an industrial enterprise can be presented as follows:

$$E^{(\alpha)} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & \dots & E_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{m1} & E_{m2} & E_{m3} & \dots & E_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where α – the number of the allocated area;

E_{ij} – the solar insolation of a separate area ij , kWh/m².

The first step in solving the optimization problem of maximizing the volume of electricity generation by solar power plants is to determine the array of possible combinations of M types of solar panels located in N allocated areas on the enterprise's territory. This problem is considered in [11], where the aforementioned array is formed using a recursive function.

The amount of electricity generated by a single solar panel of type β can be determined using the following expression:

$$W_h^\beta = E_{ij}^{(\alpha)} \cdot S_\beta \cdot P_{rated}^\beta \cdot \eta_{solar}^\beta \cdot \eta_{temp}^\beta, \quad (2)$$

where W_h^β – the amount of electricity generated by one solar panel of type β , kWh;

$E_{ij}^{(\alpha)}$ – the value of solar insolation in the ij -th zone of the allocated area α , kWh/m²;

S_{β} – the area of a type β solar panel, m²;

P_{rated}^{β} – the rated power of a type β solar panel, kW;

η_{solar}^{β} – the efficiency coefficient of a type β panel;

η_{temp}^{β} – the thermal coefficient of a solar panel of type β , which takes into account the decrease in its efficiency during heating.

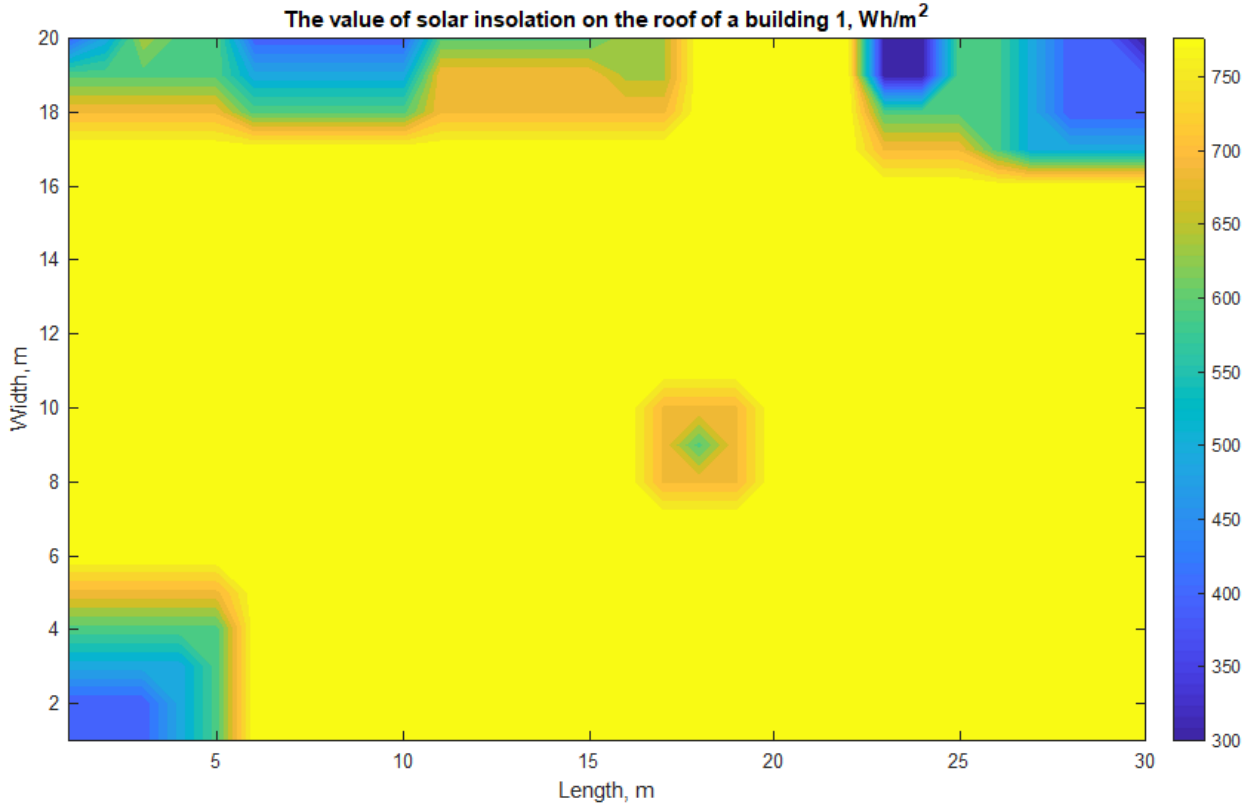


Fig. 1. Solar insolation at one of the sites selected for the installation of a solar power plant

The optimization criterion for this problem is the maximum amount of energy that a solar power plant can generate within a time period T . Thus, the target function can be written as follows:

$$W = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot W_h^j \rightarrow \max, \quad (3)$$

where T – the time interval over which the SPP is optimized;

x_{ij} – number of panels of type j installed in area i .

For each location $i = \{1, \dots, N\}$, the area of the panels cannot exceed the area of the location. Therefore, the constraint for function (3) can be written as follows:

$$\sum_{j=1}^M (s_j \cdot x_{ij}) \leq S_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}. \quad (4)$$

The optimization function (3) contains $N \cdot M$ variables x_{ij} , which correspond to different combinations of solar panels in allocated areas, affecting the total generation of the photovoltaic power plant.

Let us use the proposed approach to determine the optimal configuration of a solar power plant that can be built on the

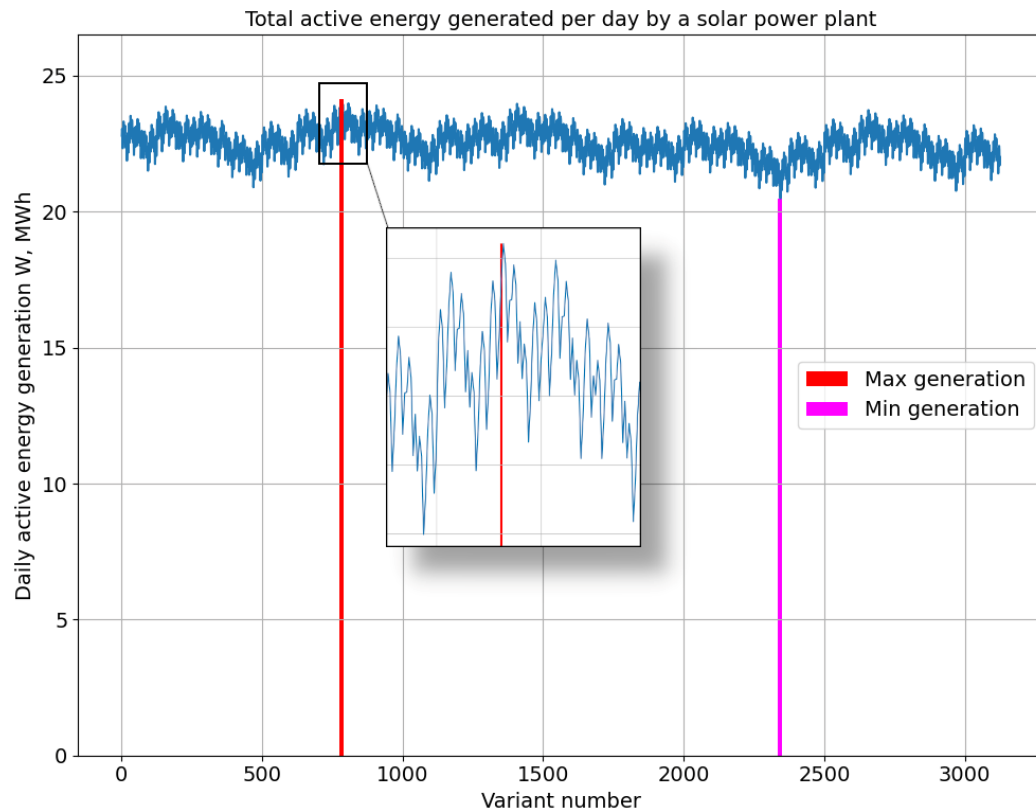
roofs of five workshops belonging to the same industrial enterprise in Zaporizhzhia, as discussed earlier. The roofs' respective areas are 3600 m², 5200 m², 3150 m², 4100 m², and 3850 m². There are five types of solar panels available, the technical characteristics of which are given in Table 2. All possible combinations of the selected panels on the above-mentioned roofs are formed in the form of a matrix using a recursive function [11]. The total number of such combinations for the problem under consideration is 3125.

From a practical standpoint, it may be difficult to account for the actual solar insolation values in each zone of the specified areas. Therefore, the average hourly solar insolation values (E_1, E_2, E_3, E_4 , and E_5) for each of the five areas presented in Table 3 are used in further calculations.

The daily generation volumes for all possible roof solar power plant configurations were obtained from the calculations (Fig. 2). The minimum active energy value corresponds to variant 2344, which uses fourth-type solar panels (Table 3), and amounts to 20.49 MWh. The maximum value corresponds to variant 782 (the second type of solar panel) and amounts to 24.10 MWh. Thus, the difference between the options for the enterprise's rooftop solar power plant is 3.61 MWh per day, or 17.63%.

Table 2. Technical characteristics of solar panels

Solar panel	Power, W	Photovoltaic module type	Photovoltaic module efficiency, %	Approximate cost, USD	Dimensions, mm
Ulica Solar UL-610M-132DDGN	610	monocrystalline	22.58	90	2382*1134
Longi Solar LR7-72HVH-645M	645	monocrystalline	23.9	102	2382x1134
TW Solar TWMNH-66HD625 Bifacial	625	monocrystalline	23.1	90	2382x1134
Vertex Bifacial TSM-DEG18MC.20(II)	490	monocrystalline	20.3	110	2187x1102
Jinko Solar JKM435N-54HL4R	435	monocrystalline	21.77	66	1762x1134

*Fig. 2. Daily active energy generation volumes of the rooftop solar power plant***Table 3. Average hourly values of solar insolation as of August 20, 2025**

Time, hour	$E_1, \text{Wh/m}^2$	$E_2, \text{Wh/m}^2$	$E_3, \text{Wh/m}^2$	$E_4, \text{Wh/m}^2$	$E_5, \text{Wh/m}^2$
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	63	59.22	68.04	68.04	65.52
6	214.07	192.663	226.9142	235.477	196.9444
7	382.48	382.48	386.3048	344.232	397.7792
8	539.5	485.55	588.055	544.895	496.34
9	668.22	654.8556	654.8556	601.398	608.0802
10	755.67	778.3401	755.67	831.237	755.67
11	793.35	769.5495	714.015	817.1505	769.5495
12	781.7	773.883	844.236	742.615	805.151
13	717.17	724.3417	666.9681	767.3719	717.17
14	607.45	552.7795	619.599	558.854	613.5245

15	461.05	507.155	437.9975	442.608	461.05
16	291.92	280.2432	297.7584	277.324	283.1624
17	127.15	137.322	115.7065	136.0505	120.7925
18	13.68	13.4064	12.7224	13.2696	14.364
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0

Conclusions

1. Randomly connecting solar power plants to industrial enterprises' power grids creates unwanted power overflows and voltage fluctuations, negatively affecting electricity quality. These issues significantly complicate integration, require additional technical solutions, and raise the cost of generated electricity.
2. The amount of electricity generated by photovoltaic panels installed on the territory of industrial enterprises can be increased by selecting the optimal type of solar panels and considering the actual insolation of the surfaces where they are installed.
3. The best option for solving the problem of maximizing the volume of active energy generated by solar power plants built on the territory of industrial enterprises is to separately address the problems of forming an array of all possible combinations of the locations of available types of solar panels on the areas allocated for this purpose and calculating the daily volume of generated electricity, taking into account the actual solar insolation at each location for all formed combinations.
4. The selection of solar panel types and their quantity according to the proposed methodology allows increasing the daily generation of active energy by the solar power plant located on the roofs of the industrial enterprise by more than 3 MWh or 17% compared to the worst-case scenario possible with random selection of solar panel types and locations.

REFERENCES

1. Golub G., Tsyvenkova N., Yaremenko O., Marus O., Omarov I., Holubenko A. Determining the efficiency of installing fixed solar photovoltaic modules and modules with different tracking options. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Volume 4. No. 8 (124). 2023. Pp. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286464>
2. Meriläinen A., Puranen P., Kosonen A., Ahola J. Optimization of rooftop photovoltaic installations to maximize revenue in Finland based on customer class load profiles and simulated generation. *Solar Energy*. Volume 240. 2022. Pp. 422–434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.057>
3. Keiner D., Bogdanov D., Krauter S., Breyer C. Assessing Yield Disparities: Anticipated versus Optimal Rooftop Photovoltaic Systems and Implications for Prosumer Viability. *Solar RRL*. Volume 8(24). 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/solr.202400435>
4. Awan A. B., Alghassab M., Zubair M., Bhatti A. R., Uzair M., Abbas G. Comparative Analysis of Ground-Mounted vs. Rooftop Photovoltaic Systems Optimized for Interrow Distance between Parallel Arrays. *Energies*. Volume 13(14): 3639. July 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13143639>
5. Galevien A. P., Ridwan M. K., Wardana A. N. I. Assessing the Viability of Rooftop Solar PV in Energy-Intensive Industries: A Techno-Economic and Safety Framework for the Indonesian FMCG Sector. *Energies*. Volume 18(21): 5859. November 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18215859>
6. Kachan Yu. G., Shram O.A., Mishchenko V. Yu. Comparative assessment of the advantages of an innovative power grid for industrial enterprises with renewable energy sources. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2025. No. 6. Pp. 105-112. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/105>
7. Abdelsalam E., Alnawafah H., Almomani F., Mousa A., Qandil H. Enhancing the Efficiency of Bi-Facial Photovoltaic Panels: An Integration Approach. *Sustainability*. Volume 15(20): 14786. October 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014786>
8. Rychka R.Yu. Optimization of solar panel placement for maximum production capacity. *Visnyk of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 2024. No. 1(281). Pp. 76-84. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-281-1-76-84> . [in Ukr]
9. Kyrsov I.G., Mykhailov B.K., Losenko Ye.V. Influence of shading and damage of solar batteries on their parameters. *Scientific notes of V. I. Vernadsky Taurida National University, Series: Technical Sciences*. 2023. Volume 34 (73). No 1. Pp. 180-185. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/27> . [in Ukr]
10. Khotian A.A., Rozen V.P., Chermalykh O.V. Analysis of the efficiency of the use of photoelectric modules. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*. 2018. No 4. Pp. 14-19. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175615> . [in Ukr]
11. Kachan Yu. H., Shram O. A. On the possibility of creating efficient solar power plants on the territory of industrial enterprises. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2024. No. 1(76). Pp. 22-31. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).22-31) . [in Ukr]