

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

І. Ф. ПОГРЕБНЯК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0935-1168

ОЦІНКА ВИРОБЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ ФАСАДНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ М. ХЕРСОН

В даній роботі розглянуто перспективи застосування фотоелектричних фасадів, інтегрованих в конструкцію будівлі (BIPV-фасадів), в кліматичних умовах м. Херсон. Наведено методику розрахунку надходження сонячної радіації до вертикальних поверхонь фасадів будівель, описано підходи щодо оцінки вироблення енергії BIPV-фасадом.

Розрахунок надходження сонячної радіації до вертикальних поверхонь фасадів будівлі в залежності від їх просторової орієнтації відносно південного напрямку показав, що відхилення орієнтації поверхні фасаду від півдня на кути до 30° на схід та захід є цілком припустимими і не призводять до суттєвого зменшення річного надходження сонячної радіації, що дозволяє не накладати занадто жорстких вимог щодо просторової орієнтації будівель з BIPV-фасадами.

Оцінка вироблення електричної енергії BIPV-фасадом в залежності від його орієнтації відносно сторін світу продемонструвала, що система з фотоелектричними панелями, розташованими на південному фасаді, здатна забезпечити річне вироблення електричної енергії загальним обсягом близько 108 кВт·год/м², в той час як система з панелями на східному або західному фасадах будівлі – близько 84 кВт·год/м², що свідчить про доцільність інтеграції фотоелектричних систем не лише до південних, але й до східних та західних фасадів будівлі.

Розрахунок енергетичних показників фасадної BIPV-системи, проведений на прикладі багатоквартирного чотирьохповерхового будинку, розташованого у м. Херсон, показав потенційну можливість не лише забезпечити власні потреби такого об'єкту в електричній енергії, а й генерувати надлишок енергії в централізовану електромережу. Це свідчить про доцільність впровадження систем з BIPV-фасадами в кліматичних умовах м. Херсон.

Ключові слова: фотоелектричний фасад, сонячна радіація, азимут поверхні, електрична енергія, питоме вироблення.

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

I. F. POGREBNIAK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-0935-1168

EVALUATION OF THE FACADE PHOTOELECTRIC SYSTEMS ENERGY PRODUCTION IN THE CLIMATE CONDITIONS OF KHERSON

In this paper the prospects of photovoltaic facades integrated into the building structure (BIPV-facades) when used in the climatic conditions of Kherson are considered. The method for calculation of solar radiation inflow to the vertical surfaces of the buildings facades is given, and the approaches to the evaluation of BIPV facades energy production are described.

Calculation of the solar radiation inflow to the vertical surfaces of building facades depending on their spatial orientation relative to the south direction showed that deviations in the facade orientation by azimuth angles of up to 30° to the east or west are quite acceptable and do not lead to significant reduction in the annual solar radiation inflow. This fact allows not so hard requirements to the spatial orientation of buildings with BIPV facades.

Evaluation of the electricity generation by BIPV facade depending on its spatial orientation demonstrated that the system with photovoltaic panels on the southern facade of the building is capable to generate of electrical energy with annual amount of about 108 kWh/m², while the system with panels on the eastern or western facades is capable to provide about 84 kWh/m², which indicates the feasibility of photovoltaic systems integration not only to the southern, but also to the eastern and western facades of the building.

Calculation of the facade BIPV system energy output, carried out on the example of a four-floor apartment building located in Kherson, showed the opportunity to generate electricity not only for own needs, but also to supply overplus energy to the centralized power grid. This fact indicates the feasibility of implementing systems with BIPV facades in the climatic conditions of Kherson.

Key words: photovoltaic facade, solar radiation, surface azimuth, electrical energy, specific output.

Постановка проблеми

Територія Херсонської області характеризується значним надходженням сумарної сонячної радіації, що в середньому становить 1300–1325 кВт·год/м² на рік [1, 2]. За оцінками фахівців з Інституту відновлюваної енергії НАН України використання цього сонячного енергетичного потенціалу дозволить щороку отримувати до 4696 млн. кВт·год електричної енергії при досягненні теоретичної встановленої потужності сонячних електростанцій загальним обсягом 3913 МВт [2].

Станом на кінець 2020 року на території Херсонщини діяло близько 50 сонячних електростанцій загальною встановленою потужністю трохи більше 400 МВт [3], що становить лише 10% від теоретичного значення. Це вказує на значний потенціал подальшого розвитку сонячної електроенергетики в даному регіоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційно фотоелектричні модулі сонячних електростанцій встановлюються або на відкритих територіях, або ж монтується на дахах будівель для забезпечення найліпших умов щодо надходження сонячної радіації до приймальних поверхонь [4]. Втім, в умовах міської забудови доступна для такого монтажу площа є вкрай обмеженою і розглядаються альтернативні поверхні, здатні бути задіяними в фотоелектричній генерації, зокрема, фасади багатоповерхових будівель.

Одним з підходів, що дозволяє залучити до фотоелектричної генерації максимальну площу огорожувальних конструкцій будівель, є застосування фотоелектричних систем, інтегрованих в конструкцію будівлі (BIPV-систем). Такі системи складаються зі спеціалізованих багатофункціональних модулів (рис. 1), які є невід'ємною складовою конструкції будівлі і, окрім генерації електричної енергії, одночасно мають виконувати роль оздоблювального або покрівельного матеріалу, утеплювача, світлопрозорого елемента будівлі, тощо [5].

Напрямок BIPV-фотовольтаїки почав активно розвиватися в країнах Європи та Північної Америки в середині 1990-х років, що пов'язано зі значним прогресом, досягнутим на той момент в комерціалізації технології фотоелектричних модулів, і, як наслідок, їх здешевлення, що з часом надало можливість конкурувати за вартістю з традиційними будівельними матеріалами та класичними фотоелектричними системами [6]. Сучасний досвід побудови і експлуатації пілотних BIPV-систем свідчить про їх енергетичну та економічну ефективність, дозволяючи зменшити енергоспоживання будівель від зовнішніх мереж, підвищити термічний опір огорожувальних конструкцій та збільшити рівень комфорту за рахунок стабілізації температури всередині приміщень. У зв'язку з цим, в країнах зі спекотним кліматом вдається зменшити споживання енергії будівлею до рівня 30–65% від загальної енергопотребі об'єкту, головним чином, завдяки зменшенню витрат на підтримку температурного режиму в приміщеннях [8].

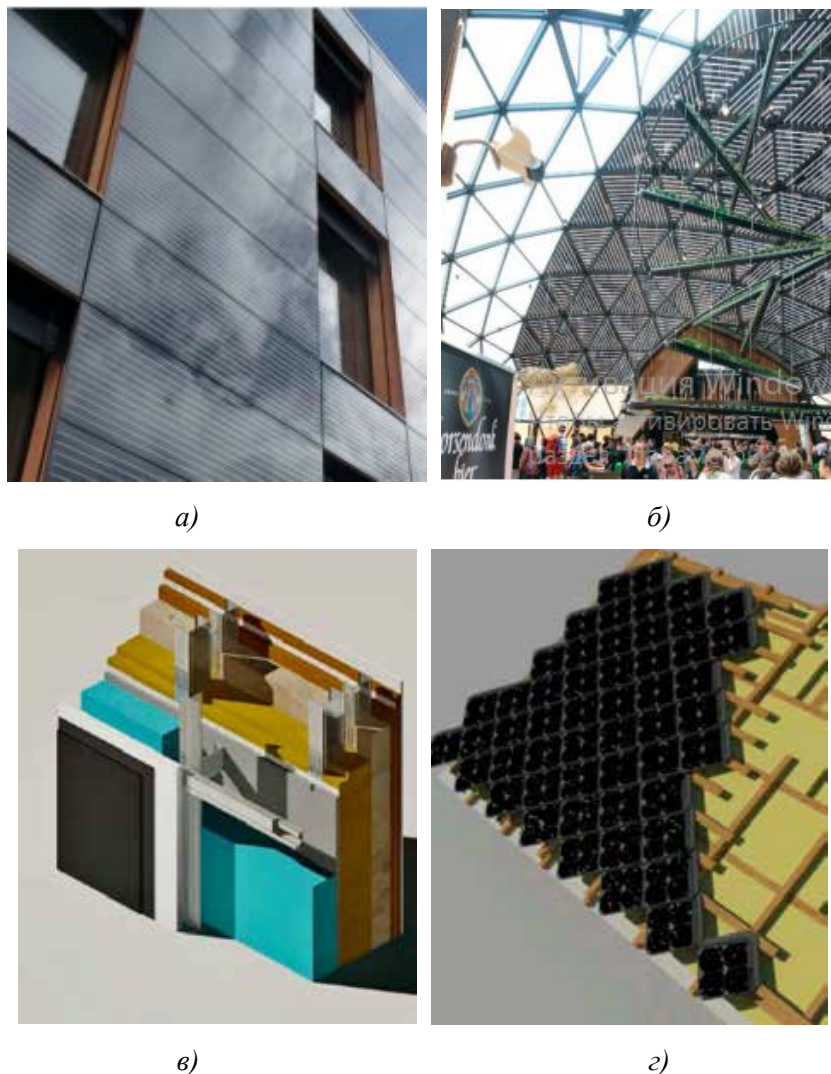


Рис. 1. Приклади практичної реалізації BIPV-систем (а, б) і внутрішня структура фасадної (в) та дахової (г) системи [7]

Важливим моментом є й те, що BIPV-система може бути встановлена не лише на стадії проектування та спорудження нових будівель, але й під час реновації існуючих об'єктів [4, 8]. Ця обставина надає потенційну можливість впровадження таких систем розосередженої генерації екологічно чистої електричної енергії в умовах повного відновлення України, зокрема, Херсонщини, що зазнала значних руйнувань внаслідок агресії з боку Росії. Втім, енергетичний потенціал таких систем під час їх експлуатації в кліматичних умовах Херсонської області, зокрема, й м. Херсон, потребує проведення оцінок, які мають враховувати не лише загальний сонячний потенціал місцевості, а й просторову орієнтацію огорожуючих конструкцій будівлі відносно сторін світу.

В умовах багатоповерхової забудови площа, що припадає на фасад будівлі, як правило, значно перевищує площу даху, а отже, фасадна BIPV-система потенційно може забезпечити значно більшу генерацію електричної енергії, ніж дахова.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є проведення оцінки вироблення енергії фасадною BIPV-системою на прикладі багатоповерхового будинку, розташованого в кліматичних умовах м. Херсона, та визначення доцільності впровадження таких систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розрахунок надходження сонячної радіації до вертикальної поверхні фасаду в залежності від її азимутального кута виконувався за методикою [9], у відповідності до якої миттєве значення потоку сумарної радіації на довільно орієнтовану поверхню визначається формулою:

$$H_T = H_b \cdot R_b + H_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + (H_b + H_d) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1)$$

де H_d і H_b – розсіяна і пряма сонячна радіація, що надходять на горизонтальну поверхню; ρ – альbedo підстилаючої поверхні; β – кут нахилу приймача відносно горизонтальної поверхні; R_b – поправочний коефіцієнт для прямої радіації.

Коефіцієнт R_b в формулі (1) враховує поправку щодо надходження прямої сонячної радіації до поверхні довільно орієнтованого приймача порівняно з горизонтальною поверхнею і визначається, окрім нахилу приймача β , схиленням Сонця δ , широтою місцевості φ , годинним кутом ω та азимутом поверхні θ_n :

$$R_b = \{ \cos \delta \cdot (\sin \beta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta_n \cdot \cos \omega + \sin \beta \cdot \sin \theta_n \cdot \sin \omega) - \sin \beta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta_n + \cos \beta \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \cos \beta \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi \} / \{ \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \}. \quad (2)$$

В якості вхідних використовувались характерні для кліматичних умов м. Херсона дані щодо надходження сумарної та дифузної сонячної радіації на горизонтальну поверхню, а також значення альbedo підстилаючої поверхні [10].

Розрахунок надходження сумарної сонячної радіації до вертикальної поверхні ($\beta = 90^\circ$) для характерного дня кожного місяця проводився в діапазоні азимутальних кутів від 0 (південна орієнтація) до 180° (поверхня, орієнтована на північ) з кроком 10° . Для кожного фіксованого азимуту поверхні визначалось річне надходження енергії.

Результати розрахунку річного питомого надходження сонячної радіації до вертикальної поверхні фасаду в залежності від її азимуту представлено на рис. 2.

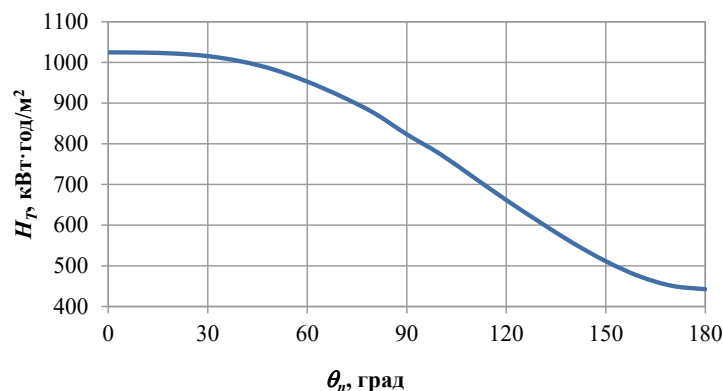


Рис. 2. Залежність річного питомого надходження сонячної радіації до вертикальної поверхні від азимутального кута

Як показує аналіз рис. 2, при азимутальних кутах в діапазоні від 0 до 30° річне надходження сонячної радіації до вертикальної поверхні залишається майже сталим і при $\theta_n = 30^\circ$ зменшується лише на 1% відносно південної орієнтації. При відхиленні поверхні від південного напрямку на кути понад 40° надходження сонячної енергії демонструє стрімке падіння, і для поверхонь, орієнтованих на північ, річне надходження енергії сонячного випромінювання є в $2,3$ рази меншим, ніж для південних.

Таким чином, відхилення поверхні вертикального приймача від південного напрямку на кути $\pm 30^\circ$ є цілком припустимим і не призводить до суттєвого зменшення у надходженні сонячної радіації.

Проведено оцінку вироблення електричної енергії ВІРV-фасадом в залежності від орієнтації фасадної поверхні відносно сторін світу. Оцінка проводилась на прикладі чотирьохповерхового багатоквартирного будинку площею 117 м^2 , що має придатні для монтажу сонячних панелей поверхні, розташовані на східному, південному та західному фасадах будівлі. Річне споживання електричної енергії будинком в середньому становить $21800 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Енергія, яку протягом доби вироблятимуть сонячні панелі номінальною потужністю $P_{ном}^{CB}$ при середньодобовому надходженні сонячної радіації до поверхні фасаду \bar{H}_T , визначалась за формулою:

$$E_m = \frac{k \cdot \bar{H}_T \cdot P_{ном}^{CB}}{1000}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт, який враховує втрату потужності за рахунок нагрівання панелей, і дорівнює відповідно $0,7$ для зимових та $0,5$ для літніх місяців.

Обсяг електричної енергії, що може бути використаний споживачами, має враховувати втрати енергії в інверторі при перетворенні постійного струму на змінний:

$$E_G = \eta \cdot E_M, \quad (4)$$

де η – ефективність інвертора.

Питоме вироблення енергії VIPV-фасадом розраховувалось як відношення генерованої ним енергії до площі фотоелектричних панелей, розташованих на даному фасаді:

$$E_{G0} = E_G / S_M, \quad (5)$$

де S_M – площа фотоелектричних панелей.

Результати розрахунку питомого вироблення енергії VIPV-фасадом, побудованим на основі спеціалізованих сонячних панелей з кристалічного кремнію номінальною потужністю 180 Вт кожна та мережевого інвертора потужністю 20 кВт, представлено на рис. 3.

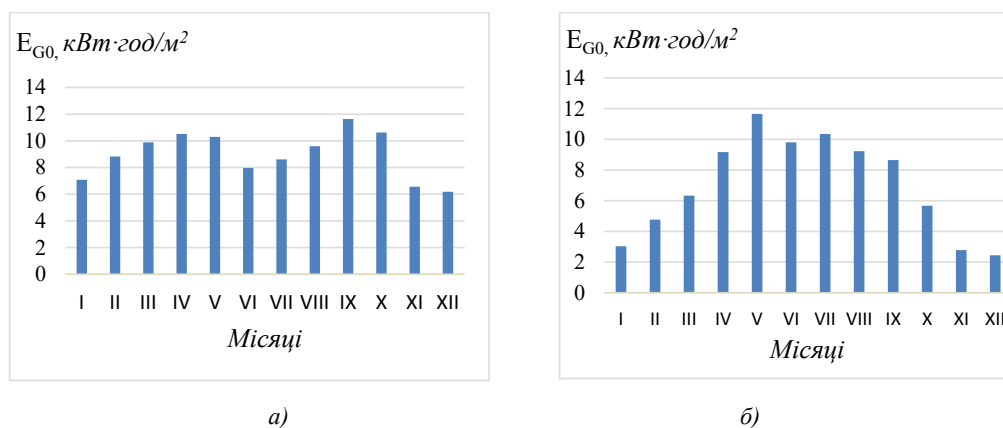


Рис. 3. Розподіл питомого вироблення електричної енергії за місяцями для VIPV-системи з панелями на південному (а) та східному або західному (б) фасадах будівлі

Як слідує з аналізу даних, представлених на рис. 3, VIPV-система з панелями, розташованими на південному фасаді, в розрізі року забезпечує вироблення електричної енергії загальним обсягом близько 108 кВт·год/м², в той час як система з панелями на східному або західному фасадах будівлі – близько 84 кВт·год/м², що лише на 22% менше південного.

З урахуванням площ відповідних фасадів будівлі, які можуть бути покритими фотоелектричними панелями, встановлено, що південний фасад здатен забезпечити річне вироблення енергії на рівні 12000 кВт·год, а східний та західний – близько 9900 кВт·год, що сумарно становить 31800 кВт·год на рік і з надлишком покриває річну потребу будинку в електричній енергії, яка в середньому складає 21800 кВт·год. Таким чином, розглянута фасадна VIPV-система не лише здатна покрити власне споживання електричної енергії будинком, але й спроможна передавати надлишок виробленої енергії в загальну електромережу, зменшивши таким чином навантаження на генеруючі потужності підприємств традиційної енергетики, що особливо важливо в умовах критичного стану енергетичної галузі України.

Висновки

Отже, створення об'єктів з фасадними VIPV-системами є привабливим з енергетичної точки зору рішенням для кліматичних умов м. Херсон. Найбільш доцільним є створення проєктів будівель з фотоелектричними системами, інтегрованими до південного фасаду, які дозволяють генерувати найбільшу кількість електричної енергії – близько 108 кВт·год з 1 м² на рік. При цьому, кількість генерованої фотоелектричним фасадом енергії залишається практично незмінною при його розорієнтації відносно південного напрямку на кут $\pm 30^\circ$, що дозволяє не накладати надто жорсткі вимоги на просторову орієнтацію будівель з VIPV-системами.

Річне вироблення енергії системами з фотоелектричними панелями на східному або західному фасаді є лише на 22% меншим за південний і становить близько 84 кВт·год/м², що свідчить про доцільність інтеграції фотоелектричних систем не лише до південних, але й до східних та західних фасадів будівлі.

Розрахунок енергетичних показників VIPV-системи на прикладі багатоквартирного чотирьохповерхового будинку, розташованого у м. Херсон, показав потенційну можливість не лише забезпечити власні потреби цього об'єкту в електричній енергії, а й генерувати надлишок енергії в централізовану електромережу, що сприятиме зменшенню навантаження на енергосистему.

Список використаної літератури

1. Відновлювані джерела енергії. За заг. ред. С.О. Кудрі. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. За заг. ред. С.О. Кудрі. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
3. Відновлювана енергетика на Херсонщині розвивається шаленими темпами. Херсонська обласна державна адміністрація [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://khoda.gov.ua/v%D1%96dnovljuvana-energetika-na-hersonshhin%D1%96-rozviva%D1%94tsja-shalenimi-tempami> (дата звернення: 24.10.24). Назва з екрану.
4. Kurian J., Karthi L. Building integrated photovoltaics – an overview. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*. Vol. 10. 2022. 9 p. DOI: 10.7770/safer-V10N1-art2495.
5. Eifferd P., Kiss G.J. Building-Integrated Photovoltaics for Commercial and Institutional Structures: A Sourcebook for Architects and Engineers. NREL, 2000. 89 p.
6. James T., Goodrich A., Woodhouse M., Margolis R., Ong S. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in the Residential Sector: An Analysis of Installed Rooftop System Prices. NREL, 2011. 39 p.
7. Bonomo P. Frontini F. Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Analysis of the Technological Transfer Process and Innovation Dynamics in the Swiss Building Sector. *Buildings*. Vol. 14 (6) : 1510. 2024. 22 p. DOI: 10.3390/buildings14061510.
8. Guedouh M.S., Khadraoui M.A., Youcef K., Belmahdi H.S. Energy Efficiency in Building Based on the BIPV Panels System Used as a Double Skin Envelop in a Hot Arid Region. *5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*. July 10-12. 2023. Konya. Turkey. P. 183-187. DOI: 10.59287/icaens.989.
9. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.
10. POWER. Data Access Viewer [Electronic resource]. Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 24.10.2024). Title from the screen.

References

1. Vidnovlyuvani dzherela enerhiyi [Renewable energy sources]. K.: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU, 2020. 392 p. [in Ukrainian].
2. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi Ukrayiny [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine]. K.: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU, 2020. 82 p. [in Ukrainian].
3. Vidnovlyuvana enerhetyka na Khersonshchini rozvyvayet'sya shalenymy tempamy. Khersons'ka oblasna derzhavna administratsiya [Renewable energy in the Kherson region is developing at a rapid pace. Kherson Regional State Administration] [Electronic resource]. Access mode: <https://khoda.gov.ua/v%D1%96dnovljuvana-energetika-na-hersonshhin%D1%96-rozviva%D1%94tsja-shalenimi-tempami> (last access: 24.10.24). Title from the screen.
4. Kurian J., Karthi L. Building integrated photovoltaics – an overview. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*. Vol. 10. 2022. 9 p. DOI: 10.7770/safer-V10N1-art2495.
5. Eifferd P., Kiss G.J. Building-Integrated Photovoltaics for Commercial and Institutional Structures: A Sourcebook for Architects and Engineers. NREL, 2000. 89 p.
6. James T., Goodrich A., Woodhouse M., Margolis R., Ong S. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in the Residential Sector: An Analysis of Installed Rooftop System Prices. NREL, 2011. 39 p.
7. Bonomo P. Frontini F. Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Analysis of the Technological Transfer Process and Innovation Dynamics in the Swiss Building Sector. *Buildings*. Vol. 14 (6) : 1510. 2024. 22 p. DOI: 10.3390/buildings14061510.
8. Guedouh M.S., Khadraoui M.A., Youcef K., Belmahdi H.S. Energy Efficiency in Building Based on the BIPV Panels System Used as a Double Skin Envelop in a Hot Arid Region. *5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*. July 10-12. 2023. Konya. Turkey. P. 183-187. DOI: 10.59287/icaens.989.
9. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.
10. POWER. Data Access Viewer [Electronic resource]. Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 24.10.2024). Title from the screen.