

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.311

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300061

© Чорна В.О.¹, Кудряшов О.О.², Біленко С.С.³

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА МІСТ

Використання альтернативних джерел енергії в житлово-комунальному секторі господарства України є актуальним питанням сьогодення. Живлення побутових споживачів або об'єктів життєзабезпечення від фотоелектричної станції дозволяє досягти енергетичної автономії, знизити витрати на електричну енергію, зменшити негативний вплив на оточуюче середовище. За останні десять років спостерігається значне зниження вартості елементів сонячних енергетичних станцій з одночасним підвищенням якісних характеристик устаткування. Це впливає на швидкість переходу різних груп споживачів, від побутових до промисловості, на альтернативні джерела енергоживлення або використання гібридної енергетичної системи. На ефективність та продуктивність фотоелектричних станцій впливають тип використовуваних технологій та фактори оточуючого середовища. В процесі перетворення сонячної енергії можуть виникати втрати, які пов'язані з ефективністю сонячних панелей, інверторів та інших компонентів системи. Під час проектування фотоелектричної станції необхідно враховувати широту місцевості, де планується її встановлення, та можливі зміни погодних умов, через які може зменшитись виробництво сонячної енергії. Для підвищення надійності енергоживлення устаткування в житлово-комунальному секторі господарства запропоновано виконати оснащення насосної станції підвищення тиску в водопровідній мережі дев'ятиповерхового житлового будинку сонячними панелями. Розрахунок кількості генерованої сонячною електростанцією енергії проведений з урахуванням кута встановлення панелей, обраним відповідно до широти регіону. Для розрахунків необхідної кількості панелей обрано метод, що враховує кількість прямої та розсіяної сонячної радіації, що поступає на поверхню сонячної панелі. За результатами розрахунків порівняно потенційний обсяг годинної генерованої потужності протягом року та споживаної годинної потужності. Встановлено, що потенційно високою є продуктивність станції в весняно-літній та літньо-осінній період, але забезпечити зростаючий в вечірній час попит на електроенергію вона не в змозі. У весняно-літній період ранковий максимум споживання енергії можливо забезпечити за рахунок фотоелектричної станції. За сприятливих погодних умов обсяг генерованої потужності буде більшим, ніж потужність споживання, а надлишок генерованої енергії може бути накопичений в акумуляторі та використаний у вечірній час. Розрахунок терміну окупності інвестицій в сонячну станцію розрахований за методом дисконтування та становить 1,6 роки.

Ключові слова: сонячна енергетика, сонячні панелі, енергія, потенціал, генерація, дисконтування, термін окупності.

¹ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3641-4152, chornajav@gmail.com

² магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, menetors@gmail.com

³ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, sofibelyj@gmail.com

V.O. Chorna., O.O. Kudryashov, S.S. Bilenko. Assessment of the potential of solar energy to power municipal utilities. The use of alternative energy sources in the housing and utilities sector of Ukraine is a pressing issue today. Powering household consumers or life-support facilities from a photovoltaic power plant allows achieving energy autonomy, reducing electricity costs, and reducing the negative impact on the environment. Over the past ten years, there has been a significant reduction in the cost of solar power plant elements while improving the quality characteristics of the equipment. This affects the speed of transition of various consumer groups, from households to industry, to alternative energy sources or the use of a hybrid energy system. The efficiency and productivity of photovoltaic power plants are affected by the type of technology used and environmental factors. In the process of converting solar energy, losses may occur that are related to the efficiency of solar panels, inverters, and other system components. When designing a photovoltaic power plant, it is necessary to take into account the latitude of the area where it is planned to install it and possible changes in weather conditions that may reduce solar energy production. To increase the reliability of power supply to equipment in the housing and communal sector, it is proposed to equip the pumping station for increasing the pressure in the water supply network of a nine-story residential building with solar panels. The calculation of the amount of energy generated by the solar power plant is based on angle of panel installation, chosen in accordance with the latitude of the region. To calculate the required number of panels, a method was chosen that takes into account the amount of direct and scattered solar radiation received by the solar panel surface. Based on the results of the calculations, the potential amount of hourly generated power during the year and the consumed hourly power were compared. It was found that the potentially high productivity of the station is in the spring-summer and summer-autumn periods, but it is not able to meet the growing demand for electricity in the evening. In the spring and summer, the morning peak in energy consumption can be met by a photovoltaic plant. Under favorable weather conditions, the amount of generated power will be greater than the power consumption, and the excess energy can be accumulated in the battery and used in the evening. The payback period of the investment in the solar station was calculated using the discounted cash flow method and is 1,6 year.

Key words: solar energy, solar panels, energy, potential, generation, discounting, payback period.

Постановка проблеми. Насосні станції підвищення тиску (НСПТ) відіграють важливу роль в системах водопостачання. Вони забезпечують безперебійне водопостачання, підтримання необхідного тиску в водопровідній мережі та оптимальний розподіл води на ділянках мережі. Зазвичай, НСПТ мають високий ступінь надійності при належному технічному обслуговуванні та за умови дотримання вимог експлуатації устаткування. З енергетичної точки зору такі станції залежні від енергопостачальних організацій, тому при виникненні аварійної ситуації в енергетичній системі НСПТ залишаються знеструмленими до моменту ліквідації наслідків аварії. Використання альтернативних джерел електричної енергії або гібридної системи електропостачання спроможне зробити систему більш надійною та енергетично незалежною.

Метою даної роботи є дослідження технічної можливості та економічної доцільності використання потенціалу сонячної енергії для живлення технологічного обладнання підвищувальної насосної станції багатоповерхового житлового будинку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Численні наукові дослідження свідчать про те, що Україна має значний потенціал для розвитку альтернативної енергетики [1-3]. Середньорічний потенціал сонячної енергії в Україні є досить високим (1000-1350 кВт·год/м²). На території України є можливість ефективного використання фотоелектричного обладнання як на території північної частини (7 місяців протягом року), так і в південних регіонах (9 місяців). В зимовий період фотоелектричні станції (ФЕС) залишаються працездатними, хоч їх ефективність і зменшується. В [4-6] наведено результати порівняльного аналізу особливостей сонячних батарей, приведена оцінка різних фотоелектричних технологій в реальних умовах експлуатації. Як свідчать результати досліджень, серед монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових

систем найбільш продуктивними є монокристалічні модулі, вони ж мають найбільший ККД. В [7] описано перспективи використання сонячного потенціалу в системах, розміщених на фасадах будинків, що дозволить інтенсифікувати процес виробництва електроенергії нетрадиційними джерелами. В [8] подані результати досліджень точності моделювання невеликих сонячних енергосистем з використанням різних вибірок даних. В [9] наведені порівняльна характеристика різних типів сонячних модулів та методика розрахунків сонячних елементів. В [10] проведені дослідження, націлені на з'ясування максимально можливих обсягів генерації електричної енергії з використанням фотоелектричного устаткування в межах Полтавської області. В статті показано, що використання сонячної енергії для електроживлення побутових приладів цілком можливе та економічно вигідне за умови встановлення в приватному секторі двозонного лічильника електричної енергії. Крім того, проведені дослідження свідчать про можливість та економічну доцільність реалізації генерованої енергії в мережу електропостачання. В [11] наведено методику розрахунків сонячного потенціалу для генерації енергоресурсів. Вона використана в представленій науковій роботі, проведеній в рамках підготовки випускної кваліфікаційної роботи магістра, в якості базової для розрахунків сонячної енергоустановки.

Виклад основного матеріалу. Загальновідомим є факт суттєвого зниження вартості елементів сонячних енергетичних установок протягом останнього десятиліття. Наприклад, зниження вартості сонячних модулів з 1,5-2 доларів за 1 Вт до 20-40 центів за 1 Вт обумовлено високою конкуренцією на ринку фотоелементів, вдосконаленням технічних та енергетичних якостей сонячних модулів, збільшенням обсягів їх виробництва. Вартість інверторів та акумуляторних батарей для фотоелектричних станцій за цей час знизилась в середньому вдвічі. І така тенденція буде спостерігатись надалі. Зниження вартісного показника ФЕС та покращення їх ефективності робить дану технологію привабливою для більш широкого кола споживачів. Крім того, суттєвою перевагою сонячної енергетики є доступність та екологічність. Останнє набуває особливої актуальності в контексті глобальних кліматичних змін.

З метою вивчення питання можливості та доцільності використання потенціалу сонячної енергії для підвищення надійності енергоживлення устаткування в житлово-комунальному секторі господарства в якості об'єкта дослідження було обрано насосну станцію підвищення тиску в водопровідній мережі дев'ятиповерхового житлового будинку м. Кременчук. З технічних даних станції відомо, що до складу технологічного устаткування входять два відцентрові насоси (основний та резервний) типу K20/30 з асинхронними електричними двигунами АІР100S2 потужністю 4 кВт та трубопровідна мережа з запірною-регулюючою апаратурою. Також відомий графік споживання води абонентами протягом доби (рис. 1).

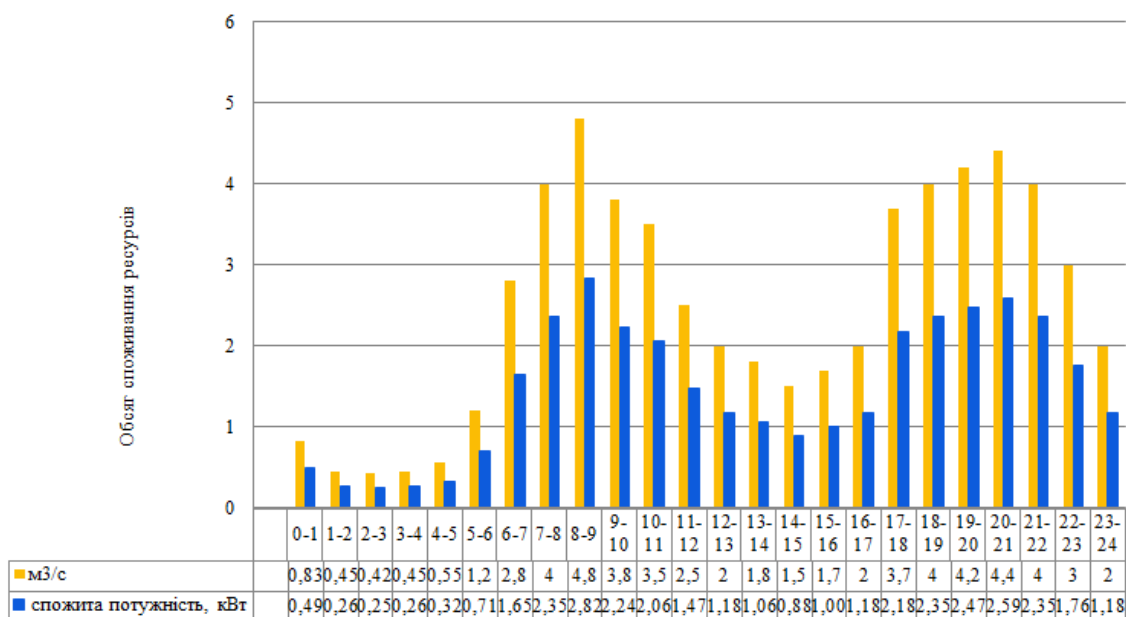


Рис. 1 – Добовий графік водопостачання та споживання електроенергії

Як видно з рисунку, графік споживання води має два пікові періоди – ранковий (з 6:00 до 11:00) та вечірній (з 17:00 до 22:00). Регулювання продуктивності насосного агрегата здійснюється в автоматичному режимі за допомогою частотного перетворювача, в результаті чого забезпечується не тільки підтримання на потрібному рівні тиску в трубопроводній мережі споживача, але й максимальна економія енергоносіїв. З точки зору надійності станція працює стабільно протягом року і повністю виконує свої функції, за винятком зупинки з причини виникнення аварійних ситуацій в системі енергопостачання. Так, протягом 2022 року таких випадків було 6, у 2023 році – 3. Для того, щоб уникнути знеструмлення основного технологічного устаткування станції при аварійному відключенні енергопостачання запропоновано оцінити можливість встановлення автономної системи енергоживлення на базі альтернативних джерел енергії, а саме сонячної енергоустановки.

Серед існуючих методів розрахунку ФЕС був обраний метод, в якому для визначення необхідної кількості фотоелектричних модулів враховується кількість сонячної радіації (прямої та розсіяної), що поступає на модулі, встановлені під певним кутом відносно горизонтальної поверхні.

Згідно методики, кількість енергії, яка надходить на горизонтальну поверхню, залежить від висоти Сонця над горизонтом:

$$h = \arcsin(\sin\mu \cdot \sin\sigma + \cos\mu \cdot \cos\sigma \cdot \omega), \quad (1)$$

де μ – широта місцевості, для якої планується встановлення ФЕС;

σ – значення кута сонячного відмінювання, визначається згідно формули Купера:

$$\sigma = 23,5 \cdot \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right), \quad (2)$$

де n – порядковий день року; ω – часовий кут руху сонця в певній точці в певний момент часу:

$$\omega = 15^\circ(t - t_c) + (\psi - \psi_{\text{зона } i}), \quad (3)$$

де t – фактичний місцевий час (розрахунок ведеться для сонячного півдня);

t_c – сонячний полудень обраного часового поясу;

ψ – фактична довгота точки;

$\psi_{\text{зона } i}$ – середня довгота регіону.

Кут падіння сонячних променів на поверхню, встановлену під кутом β до поверхні Землі:

$$\cos\theta = \cos(\mu - \beta) \cdot \cos\sigma \cdot \cos\omega + \sin\sigma \cdot \sin(\mu - \beta). \quad (4)$$

Інтенсивність прямого сонячного випромінювання на поверхню, перпендикулярну напрямку променів:

$$E_{\text{пр}} = \frac{1360h}{\sin h + \frac{1-P_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}}} \quad (5)$$

де $P_{\text{пр}}$ – коефіцієнт прозорості атмосфери.

Інтенсивність прямого сонячного випромінювання, що поступає на плоску горизонтальну поверхню:

$$E_{\text{пр } \Gamma} = E_{\text{пр}} \cdot \sin h. \quad (6)$$

Енергія, яка поступає на похилу поверхню, орієнтовану на південь:

$$E_c = 0,96(K_{\text{пр}}E_{\text{пр}}A + K_pE_pA), \quad (7)$$

де A – оптична характеристика сонячного модуля;

$K_{\text{пр}}$, K_p – сталі величини, що враховують спосіб встановлення фотоелектричних модулів.

$$K_p = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (8)$$

Площа СЕС, яка дозволить отримати необхідну кількість енергії, розраховується за виразом:

$$S = \frac{E}{E'_c}, \quad (9)$$

де E – кількість енергії, яка виділяється при спалюванні палива;

E'_c – потенціал сонячної енергії, яку можна отримати з одиниці площі фотоелектричної установки.

$$E'_c = P_c \frac{q}{100}, \quad (10)$$

де P_c – сумарний річний потенціал;
 q – ККД сонячної панелі.

$$E = Nn, \quad (11)$$

де n – кількість енергії, що виділяється при спалюванні паливних ресурсів;
 N – обсяг споживання палива.

Знаючи добові витрати електроенергії (відповідно до графіка водопостачання), яку споживає основне обладнання НСПТ, отримано величину річного споживання енергії. За відомими показниками питомої теплоти згоряння природного палива (вугілля чи природного газу) обчислюється кількість палива, необхідна для виробництва електроенергії для забезпечення покриття попиту досліджуваним об'єктом.

Вихідними даними для розрахунків прийнято наступні: широта місцевості, для якої проводиться дослідження, 49°34' південної широти, орієнтація південна, кут встановлення сонячних модулів попередньо обраний рівним 40° (є найбільш розповсюдженим кутом орієнтації фотоелектричних станцій даного регіону), монокристалічні сонячні панелі Jinko Solar ЖКМ-570N (обрані за критерієм високих енергетичних показників, оскільки заявлений виробником ККД становить 22,07%). Розрахунки проводяться для періоду найменшої сонячної активності в регіоні – для грудня.

Результати розрахунків для грудня представлені в табличній формі на рис. 2. Згідно розрахунків, кількість сонячних модулів обраного типу, необхідних для покриття попиту на електроенергію досліджуваним об'єктом, становить 14, площа ФЕС – 36,17 м², встановлення сонячних панелей – на даху станції.

Грудень, 21									
Час, год	n	σ	ω	cos θ	h	Епр	Кр	Сумарна теплова енергія на поверхні, орієнтованій під певним кутом на південь, Вт/м.кв	Генерована потужність, Вт
	Порядковий номер дня року	Схилення сонця	Годинний кут	Кут падіння сонячних променів	Висота Сонця над горизонтом	Інтенсивність дії прямої сонячної енергії	Коефіцієнт, що враховує орієнтацію СП відносно розсіяної радіації		
6	355	-23,50	90	-0,06	-14,660	-1961,3	1,383	-792,12	-6302,45
7		-23,50	75	0,17	-5,520	-393,6		-117,87	-937,82
8		-23,50	60	0,39	2,690	134,2		109,14	868,36
9		-23,50	45	0,58	9,610	381,3		215,38	1713,63
10		-23,50	30	0,72	14,790	507,7		269,75	2146,26
11		-23,50	15	0,81	17,820	566,6		295,08	2347,75
12		-23,50	0	0,84	18,410	577,0		299,56	2383,45
13		-23,50	-15	0,81	16,500	542,1		284,54	2263,88
14		-23,50	-30	0,72	12,270	450,8		245,30	1951,74
15		-23,50	-45	0,58	6,110	270,6		167,77	1334,88
16		-23,50	-60	0,39	-1,550	-91,6		12,01	95,52
17		-23,50	-75	0,17	-5,240	-368,3		-106,99	-851,25
18		-23,50	-90	-0,06	-13,210	-1553,5		-616,74	-4907,05

Рис. 2 – Приклад розрахунків потенціалу сонячної енергетики для грудня

На наступному етапі досліджень визначається потужність ФЕС, модулі якої встановлені під кутом до горизонту. Для цього використана наступна формула:

$$P = SqE_c, \quad (11)$$

де S – площа ФЕС.

В даній формулі відсутня складова величини кута нахилу сонячних модулів, оскільки вона врахована при обчисленні енергії E_c .

Розрахунки проведені для обраного дня кожного місяця року, під час розрахунків важливим було визначити потенціал сонячної енергетики згідно обраної методики в досліджуваному регіоні протягом року. Отримані результати, наведені на рис. 3, порівнюються з добовим графіком роботи системи водопостачання. Як видно з таблиці, найменше енергії можна отримати від ФЕС в грудні, що пояснюється значно меншою інтенсивністю сонячного випромінювання в цей період. Тривалість ефективного часу роботи установки протягом доби найнижча у січні та грудні, максимальна – в липні. Тобто взимку генерація енергії спостерігається не раніше 8 години ранку та завершується о 16 годині, що пов'язано з найменшою тривалістю світлового дня в році. В грудні захід Сонця відбувається в період між 15:00 та 16:00, чим пояснюється найменше значення годинної генерованої потужності в календарному році. Максимальне вироблення електроенергії фотоелектричними модулями, згідно проведених розрахунків, можливе опівдні в червні (з 12:00 до 13:00). Потенційно високою є продуктивність ФЕС в весняно-літній та літньо-осінній період. Але, незважаючи на це, забезпечити зростаючий попит на електроенергію в вечірній час вона не в змозі. Разом з тим, у весняно-літній період ранковий максимум споживання енергії цілком можливо забезпечити за рахунок ФЕС. При цьому з таблиці видно, що за сприятливих погодних умов обсяг генерованої потужності буде більшим, ніж потужність споживання. Надлишок генерованої енергії може бути накопичений в акумуляторі та використаний у вечірній час на електроживлення основного устаткування або, наприклад, на роботу системи освітлення прибудинкової території. Отже, можна зробити попередні висновки про доцільність застосування фотоелектричної установки в якості системи електроживлення насосного обладнання підвищувальної станції. Отже, для більшої ефективності та надійності ФЕС запропоновано оснащення станції інвертором та акумулятором. В якості інвертора може бути застосований гібридний інвертор (з перспективою підключення системи до мережі електропостачання та генерації енергії в мережу на умовах «зеленого» тарифу) LuxPower та акумулятори li-ion Pylontech us3000c (3,5 квт·год, 48 В).

Місяць	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень	Споживана годинна потужність, Вт
Час доби													
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	490
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	260
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	250
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	260
5	0	0	409	771	1547	1722	1416	0	0	0	0	0	320
6	0	0	605	1916	2334	2427	2252	1436	1155	0	0	0	710
7	0	727	1844	2566	2557	2881	2772	2283	2122	1425	290	0	1650
8	1027	1837	2503	2962	3141	3178	3107	2780	2659	2190	1488	868	2350
9	1862	2419	2882	3207	3343	3373	3322	3084	2974	2609	2094	1714	2820
10	2298	2740	3102	3353	3467	3493	3456	3267	3154	2837	2410	2146	2240
11	2514	2905	3215	3426	3529	3557	3527	3366	3239	2936	2547	2348	2060
12	2576	2956	3245	3436	3540	3571	3546	3397	3246	2931	2542	2383	1470
13	2502	2905	3198	3388	3500	3537	3515	3366	3177	2821	2383	2264	1180
14	2270	2740	3065	3271	3405	3453	3430	3267	3017	2578	2065	1952	1060
15	1809	2419	2818	3068	3239	3305	3279	3084	2732	2135	1431	1335	880
16	924	1837	2394	2737	2977	3074	3039	2780	2247	1320	172	96	1000
17	0	727	1650	2199	2573	2721	2252	2283	1388	0	0	0	1180
18	0	0	0	1282	1933	2182	2086	1436	0	0	0	0	2180
19	0	0	0	0	881	1335	1143	0	0	0	0	0	2350
20	0	0	0	0	0	0	409	0	0	0	0	0	2470
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2590
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2350
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1760
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1180
Годинна генерована потужність, Вт													

Рис. 3 – Результати розрахунків генерованої ФЕС протягом року

Слід зауважити, що крім географічного розташування ФЕС та сезонних змін в регіоні на ефективність та продуктивність установки впливають технічні фактори (тип фотоелектричних модулів, кут їх нахилу) та фактори оточуючого середовища (погодні умови, наявність об'єктів,

що можуть затіняти сонячні панелі). В процесі перетворення сонячної енергії можуть виникати втрати, які пов'язані з ефективністю сонячних панелей, інверторів та інших компонентів системи. Нові розробки в галузі сонячних панелей та інших компонентів системи генерації енергії мають високі вихідні показники і загальну продуктивність установки. Погодні умови, такі як хмарність, дощ, вітер, можуть зменшити виробництво сонячної енергії. Врахувавши перелічені фактори та проаналізувавши їх взаємодію, можна визначити потенціал сонячної енергії в конкретній місцевості. В представленій роботі питання впливу погодних умов на рівень генерації електроенергії не проводився.

Для оцінки економічної доцільності застосування фотоелектричних модулів в комунальному господарстві міст застосована методика оцінки ефективності інвестиційного проекту. Суть даної методики полягає в порівняльному аналізі обсягів капіталовкладень і майбутніх грошових надходжень [12]. Оскільки доходи та витрати відносяться до різних часових періодів, то важливо їх порівнювати з урахуванням зміни вартості первинних капіталовкладень. Необхідність проведення такого аналізу пояснюється процесом інфляції, небажаною динамікою інвестицій, падінням промислового виробництва, різними горизонтами прогнозування, змінами в податковій системі та ін.

Найбільш повно оцінити проект дозволяють методи, засновані на дисконтованих оцінках [12]. Як показують численні дослідження, методи дисконтованих оцінок є достатньо високоточними, що пояснюється врахуванням в їх методиках розрахунків різних показників. До них відносять: метод індексу рентабельності (PI), чистий дисконтований дохід (NPV) і внутрішню норму прибутковості (IRR).

Величина NPV є чистим дисконтованим доходом і визначається як сума поточних ефектів за весь розрахунковий період. При цьому величина дисконту може бути постійною або змінною.

$$NPV = \sum_{n=0}^N (R_n - S_n) \frac{1}{(1+r)^n}, \quad (12)$$

де R_n – результат, що досягається на n -му кроці розрахунку, тобто величина фінансового потоку, приведеного до теперішньої вартості, за весь період експлуатації проекту;

S_n – витрати, здійснювані на тому ж кроці, тобто капіталовкладення, використані для впровадження запропонованого рішення;

r – ставка (норма) дисконту, якій відповідає додатне розрахункове значення NPV.

Дисконтування можна пояснити нестабільною ціною фінансових активів. Різницю між поточною та майбутньою цінністю грошових коштів можна виразити у вигляді процентної ставки, що характеризує відносні зміни в їх оцінці за певний період [12]. Норма дисконту (або мінімальний коефіцієнт окупності) має бути рівною фактичній ставці відсотку за довгостроковими позичками на ринку капіталу.

Ставка дисконтування в Україні змінюється в залежності від багатьох факторів, включаючи економічні умови, монетарну політику та рівень інфляції. Цю ставку встановлює Національний банк України і вона може періодично змінюватись з метою регулювання фінансової системи країни. Станом на 01.12.2023 встановлена Нацбанком ставка дисконту дорівнює 15%. Через те, що протягом поточного року ця величина змінювалась декілька разів, прийнято рішення виконати розрахунки для поточного її значення та для величини 25%.

Під поняттям «дисконтований період окупності інвестицій» (PBP) прийнято розуміти час, протягом якого величина отриманих від реалізації проекту фінансів досягає значення вкладених у проект грошових коштів. Цей показник обчислюється згідно виразу:

$$PBP = (t_0 - 1) + \frac{IC - \sum PV_{(t_0-1)}}{PV_{t_0}}, \quad (13)$$

де t_0 – номер року, у якому дисконтований грошовий потік стає більшим за інвестиції $\sum PV \geq IC$; IC – сума інвестицій в проект; PV – дисконтовані грошові потоки.

Для порівняння були проведені розрахунки для двох значень ставки дисконту – 0,1 та 0,15. Результати розрахунків зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахунок чистого дисконтованого доходу

Рік реалізації проєкту	Інвестиційні кошти, грн	Грошовий потік CF, грн	Чистий грошовий потік, грн	Чистий дисконтований NPV, грн	Дисконтований період окупності інвестицій PBP,р
Ставка дисконту 0,15					
2022	269500	222796	193 735,65	- 75 764,35	
2023		222796	168 465,78	92 701,44	
2024		222796	146 491,99	239 193,42	
2025		222796	127 384,34	366 577,76	
2026		222796	110 768,99	477 346,75	
					1,37
Ставка дисконту 0,25					
2022	269500	222796	178 236,80	- 91 263,20	
2023		222796	142 589,44	51 326,24	
2024		222796	114 071,55	165 397,79	
2025		222796	91 257,24	256 655,03	
2026		222796	73 005,79	329 660,83	
					1,64

З таблиці видно, що окупність інвестицій в обох варіантах відбувається на другому році роботи проєкту, швидше при ставці дисконту 0,15 і повільніше при ставці, рівній 0,25.

Висновки

Використання технологій сонячної енергетики в житлово-комунальному господарстві є доцільним з екологічних, економічних та стратегічних поглядів. Проведені дослідження підтверджують технічну можливість та економічну доцільність застосування сонячної енергії для живлення технологічного устаткування насосної станції підкачки води в багатоповерхову будівлю. Термін окупності витрат на встановлення ФЕС, згідно розрахунків, становить півтора роки, що є відмінним показником для сфери комунального господарства міст.

Перелік використаних джерел:

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
2. Дослідження можливостей використання сонячної енергії для автономного живлення об'єкту / Казіміров О.О., Власов К.В., Куртов А.І., Потіхенський А.І. *Системи обробки інформації*. 2017. № 1(147). С. 58-61. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.11>.
3. The solar API Toolkit. URL: <https://toolkit.solcast.com.au> (дата звернення: 11.08.2023).
4. Стрельцов О.А. Аналіз особливостей сонячних батарей. *Collection of Students' Scientific Paper. Automation and Development of Electronic Devices ADED-2022*. Kharkiv, 2022. Part 2. Pp. 89-94.
5. Experimental comparison between Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film solar systems under sunny climatic conditions / O. Ayadiab, R. Shadid, A. Bani-Abdullah, M. Alrbai, M. Abu-Mualla, N. Balah. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Supplement 9. Pp. 218-230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.121>.
6. Evaluation of the Performance of Polycrystalline and Monocrystalline PV Technologies in a Hot and Arid Region: An Experimental Analysis / M. Benganem, S. Haddad, A. Alzahrani, A. Mellit, H. Almohamadi, M. Khushaim, M.S. Aida. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(20). Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014831>.
7. Solar potential on facades at urban scale: an integrated approach combining solar and digital building modeling / Desthieux G., Gressin A., Raybaud B., Ingensand J. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2600. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/4/042004>.
8. Browne M.H., Williams A.A. The effect of time resolution on the modelling of domestic solar energy systems. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 2023. Vol. 8. Pp. 1-29. DOI: <https://doi.org/10.1051/rees/2023003>.

9. Риндюк Д.В., Шелешей Т.В., Беднарська І.С. Нетрадиційні джерела енергії. Практичні заняття : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 81 с.
10. Shokarov D., Chorna V., Bogodist K. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2017. № 31(1253). С. 87-92.
11. Форкун Я.Б., Шкурпела О.О. Сонячна теплоенергетика : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 88 с.
12. Майорова Т.В. Інвестиційна діяльність: навч. посіб. Київ : «Центр навчальної літератури», 2004. 376 с.

References:

1. *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy* [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine], S.O. Kudria, Ed., Kyiv, Ukraine: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2020, 82 p. (Ukr.)
2. О.О. Kazimirov, K.V. Vlasov, A.I. Kurtov, and A.I. Potikhenskyi, «Дослідження можливостей використання сонячної енергії для автономного живлення об'єкту» [«Study the possibility of using solar energy for autonomous power supply facility»], *Systemy obrobky informatsii – Information processing systems*, № 1(147), pp. 58-61, 2017. doi: [10.30748/soi.2017.147.11](https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.11). (Ukr.)
3. The solar API Toolkit [Online]. Available: <https://toolkit.solcast.com.au>. Accessed on: August 11, 2023.
4. O.A. Streltsov, «Analiz osoblyvostei soniachnykh batarei» [«Analysis of features of solar batteries»], *Collection of Students' Scientific Paper. Automation and Development of Electronic Devices ADED-2022*, part 2, pp. 89-94, 2022. (Ukr.)
5. O. Ayadiab, R. Shadid, A. Bani-Abdullah, M. Alrbai, M. Abu-Mualla, and N. Balah, «Experimental comparison between Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film solar systems under sunny climatic conditions», *Energy Reports*, vol. 8, supplement 9, pp. 218-230, 2022. doi: [10.1016/j.egyrs.2022.06.121](https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2022.06.121).
6. M. Benganem, S. Haddad, A. Alzahrani, A. Mellit, H. Almohamadi, M. Khushaim, and M.S. Aida, «Evaluation of the performance of polycrystalline and monocrystalline PV technologies in a hot and arid region: an experimental analysis», *Sustainability*, vol. 15(20), pp. 1-24, 2023. doi: [10.3390/su152014831](https://doi.org/10.3390/su152014831).
7. G. Desthieux, A. Gressin, B. Raybaud, and J. Ingensand, «Solar potential on facades at urban scale: an integrated approach combining solar and digital building modeling», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2600, pp. 1-7, 2023. doi: [10.1088/1742-6596/2600/4/042004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/4/042004).
8. M.H. Browne, and A.A. Williams, «The effect of time resolution on the modelling of domestic solar energy systems», *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 8, pp. 1-29, 2023. doi: [10.1051/rees/2023003](https://doi.org/10.1051/rees/2023003).
9. D.V. Ryndiuk, T.V. Sheleshei, and I.S. Bednarska, *Netradytsiini dzherela enerhii. Praktychni zaniattia: navch. posib.* [Non-traditional sources of energy. Practical classes: study guide]. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ., 2022. (Ukr.)
10. D. Shokarov, V. Chorna, and K. Bogodist, «Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, № 31(1253), pp. 87-92, 2017.
11. Ya.B. Forkun, and O.O. Shkurpela, *Soniachna teploenerhetyka: konspekt lektsii* [Solar thermal energy: lecture notes]. Kharkiv, Ukraine: XNUMG named after O. M. Beketov Publ., 2020. (Ukr.)
12. T.V. Maiorova, *Investytsiina diialnist: navch. posib.* [Investment activity: study guide]. Kyiv, Ukraine: Tsentr navchalnoi literatury Publ., 2004. (Ukr.)

Рецензент: В.В. Прус
д-р техн. наук, проф., КрНУ ім. Михайла Остроградського

Стаття надійшла 16.09.2023
Стаття прийнята 07.10.2023