

ПАНЧЕНКО В. В., к.т.н.,  
ХАРІН Р. О., аспірант  
(Український державний університет залізничного транспорту)

## Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції

У статті розраховано щорічну генерацію та щорічні втрати з різними типами трекерів у сонячній електростанції. Проведено порівняльний аналіз доцільного використання трекерів на сонячній електростанції. За експериментальними даними на основі програмного комплексу PVsyst виміряно енергію, що передається до мережі в різних варіантах кріпильних конструкцій (статичних і динамічних). Отримано графіки генерації та втрат у трекерних системах за 25 років експлуатації.

**Ключові слова:** сонячна електростанція, сонячні панелі, статична система, одновісний трекер, двовісний трекер

### Проблема постановки дослідження

Ураховуючи сучасні тенденції розвитку світової енергетики, а також наявний позитивний досвід АТ «Укрзалізниця» у використанні електроенергії генерованої відновлювальних джерел енергії пропонується до схеми живлення власних потреб додати сонячні електростанції як основне джерело живлення, при цьому можливості резервування власних потреб без жодних джерел, у тому числі системи зовнішнього електропостачання, зберігаються. У статті [6] розглянуто тягову підстанцію, на якій встановлено статичну сонячну електростанцію, проведено моделювання та отримано результати втрат системи. Проте впровадження трекерних систем сонячних електростанцій на тягових підстанціях не розглядалось. Запропонована концепція модернізації схеми живлення власних потреб тягової підстанції має підвищити надійність електропостачання споживачів власних потреб за рахунок інтеграції до схеми додаткового незалежного джерела живлення.

### Аналіз останніх публікацій

Багато наукових досліджень присвячено моделюванню і техніко-економічним розрахункам сонячних електростанцій. Ці дослідження є досить актуальними для нашої країни. У роботі [1] розглянуто трансформацію сонячних систем на залізниці, надано методи та потенційні методи оцінювання енергозабезпечення залізниці. Також проведено економічно-екологічні аспекти. У статті [2] проведено

аналіз можливості використання сонячних трекерів у технологіях сонячної енергетики для альтернативи збільшення захоплення сонячної радіації.

### Мета статті

Метою статті є моделювання та проведення техніко-економічного розрахунку роботи сонячної підстанції з різними типами трекерів.

### Викладення основного матеріалу

Введення в експлуатацію сонячних станцій дуже позитивно позначиться на економії ресурсів країни, а також буде помічено поліпшення екологічної обстановки.

Існує кілька типів трекерів для сонячних панелей, що керуються різними алгоритмами вибору орієнтації в просторі і мають різні механізми спрацьовування, два основних типи систем динамічного стеження – одновісні та двовісні. На відміну від статичних систем, це може збільшити продуктивність на 35-50 % протягом року.

Переваги динамічних систем для сонячних електростанцій:

- найбільш ефективно використання сонячної енергії порівняно зі статичною;
  - збільшення вироблення електроенергії до 40 % порівняно зі стаціонарними спорудами;
  - значне збільшення довгострокового прибутку.
- Кошти, вкладені в сонячні трекери, будуть збільшені втричі до кінця періоду дії українського «зеленого тарифу».

Багаторічна практика показала, що використання трекерів на сонячних панелях працює дуже добре, збільшуючи щорічне виробництво електроенергії до 30-35 %.

Очевидно, що жорстко закріплена сонячна батарея, налаштована на полуденне сонце, виробляє найбільшу кількість енергії опівдні, коли сонячні промені падають вертикально на її поверхню. Ураховуючи особливості добової траєкторії Сонця, можна сказати, що ефективний кут повороту панелі становить близько 150 °. Панель, зафіксована в напрямку, рівному середині між точками заходу та сходу сонця, втрачає до 75 % максимально можливого вироблення енергії вранці та ввечері. Тому, якщо кут падіння променів на батарею буде невеликим, кількість виробленої енергії різко зменшується. Також важливо враховувати

географічні координати розташування сонячної станції, оскільки кут оптимального розташування на півночі України буде відрізнятися від кута на півдні та сході. Водночас кожен власник хоче, щоб його сонячна електростанція виробляла однаково багато енергії як протягом усього дня, так і впродовж усього року. Досягти цих параметрів можна за допомогою трекера, який використовує інформацію від спеціальних датчиків, що визначатимуть найкраще положення для сонячних батарей і повертатимуть платформу в потрібний бік і під потрібним кутом [3].

Особливістю такої моделі фотоелектричних модулів є підвищена стійкість до впливу агресивного середовища і мінімальне падіння продуктивності. Виробник дає гарантію, що модуль буде видавати не менше 90 % номінальної потужності через 10 років і не менше 80,7 % через 25 років (рис. 1).

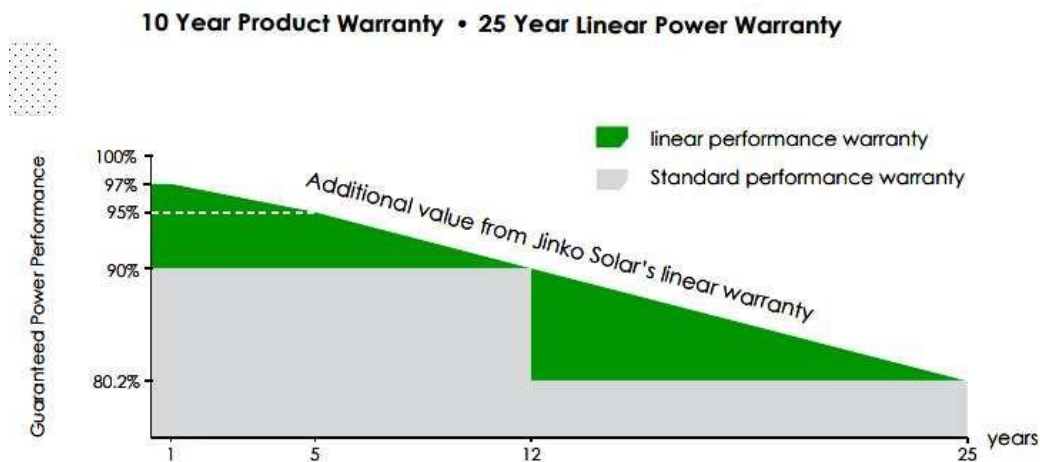


Рис.1. Лінійна гарантія продуктивності

Фотопанелі Jinko Solar Eagle PERC JKM305M-60 можуть бути використані в невеликих і великих сонячних електростанціях для генерації електроенергії в загальну мережу. Гарантія на продукцію, матеріали – 10 років. Гарантія на вироблену потужність: 25 років – не менше 80 %, 12 років – не менше 90 %.

#### *Деградація сонячних панелей*

Продуктивність сонячних модулів зменшується з часом. Як правило, деградація дещо вища в перший рік внаслідок початкового впливу світла, потім стабілізується.

Фактори, що впливають на ступінь деградації, включають такі параметри, як матеріали, що

використовуються при виробництві, технічний процес, якість збірки та пакування елементів у модулі, кваліфікація працівників на місцях. Регулярне технічне обслуговування та прибирання обладнання можуть знизити відсоток деградації, але основний вплив залежить від типу використовуваного елемента. Тому провідні виробники сонячних панелей дуже ретельно відстежують якість продукту і відповідність його міжнародним вимогам і стандартам.

На рис. 2 зображено деградацію сонячних панелей за 20 років з різними типами трекерів.

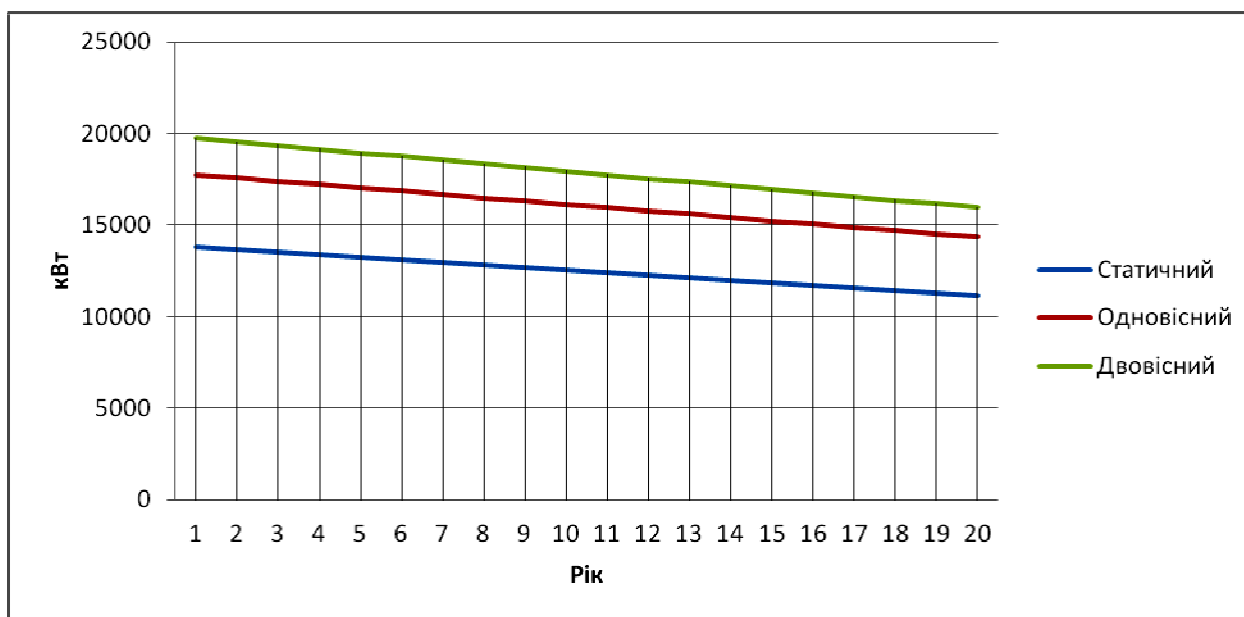


Рис. 2. Деградація сонячних панелей

Сонячні модулі можуть мати довгострокову потужність, швидкість деградації від 0,3 до 1 % на рік.

Ступінь і характер деградації варіює серед різних технологій виготовлення додатків. Для кристалічних модулів елементи можуть страждати від незворотного руйнування, викликаного дією світла. Початкова деградація відбувається через дефекти, що активно проявляють себе при початковому впливі світла [7].

З табл. 1 видно, що загальна генерація сонячних панелей сукупно за 25 років склала:

- статична система – 316680 кВт;
- одновісний трекер – 407882 кВт;
- двовісний трекер – 453770 кВт.

Загальна вироблена потужність різних типів сонячних станцій показана на рис. 3.

Таблиця 1

Щорічна генерація та втрати потужності сонячною електростанцією з різними типами трекерів

Рік експлуатації	Статичний		Одновісний		Двовісний	
	Потужність, кВт/р.	Втрати, кВт/р.	Потужність, кВт/р.	Втрати, кВт/р.	Потужність, кВт/р.	Втрати, кВт/р.
0	13920	0	17929	0	19946	0
1	13781	139	17749	180	19746	200
2	13642	278	17570	359	19547	399
3	13502	418	17391	538	19348	598
4	13363	557	17212	717	19148	798
5	13224	696	17032	897	18949	997
6	13085	835	16853	1076	18749	1197
7	12946	974	16674	1255	18550	1396
8	12806	1114	16495	1434	18350	1596

Продовження таблиці 1

9	12667	1253	16315	1614	18151	1795
10	12528	1392	16136	1793	17951	1995
11	12389	1531	15957	1972	17752	2194
12	12250	1670	15777	2152	17552	2394
13	12110	1810	15598	2331	17353	2593
14	11971	1949	15419	2510	17154	2792
15	11832	2088	15240	2689	16954	2992
16	11693	2227	15060	2869	16755	3191
17	11554	2366	14881	3048	16555	3391
18	11414	2506	14702	3227	16356	3590
19	11275	2645	14522	3407	16156	3790
20	11136	2784	14343	3586	15957	3989
21	10997	2923	14164	3765	15757	4189
22	10858	3062	13985	3944	15558	4388
23	10718	3202	13805	4124	15358	4588
24	10579	3341	13626	4303	15159	4787
25	10440	3480	13447	4482	14959	4987
<b>Сукупна генерація <math>\Sigma</math></b>	<b>316680</b>	<b>45240</b>	<b>407882</b>	<b>58272</b>	<b>453770</b>	<b>64826</b>

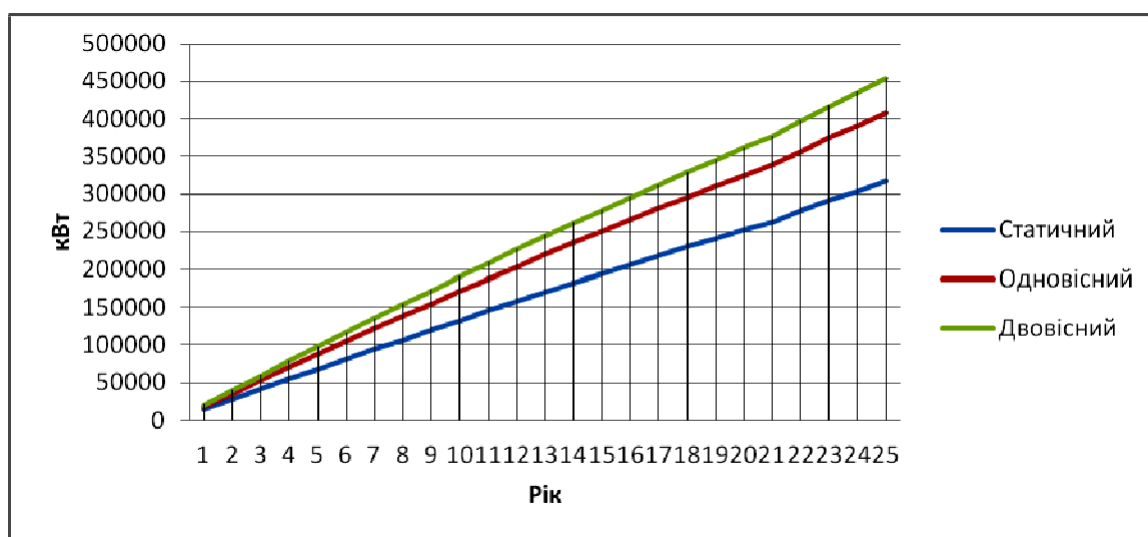


Рис. 3. Загальна вироблена потужність різних типів сонячних станцій

Для оцінювання рівня втрат були проведені математичні розрахунки та розроблена імітаційна модель об'єкта дослідження в програмному середовищі PVsyst з такими вихідними даними: обрані сонячні панелі марки Jinko Solar JKM305M60 Eagle 305 Вт, інвертори марки Ainelec K3 130-350 V/50Hz, задані кліматичні умови Харківської області та площа даху тягової підстанції [6]. Загальні втрати за рахунок

деградаційних процесів у сонячних панелях з різними типами трекерів сукупно за 25 років експлуатації склали (рис. 4):

- втрати статичної системи 45240 кВт;
- втрати одновісного трекера 58272 кВт;
- втрати двовісного трекера 64826 кВт.

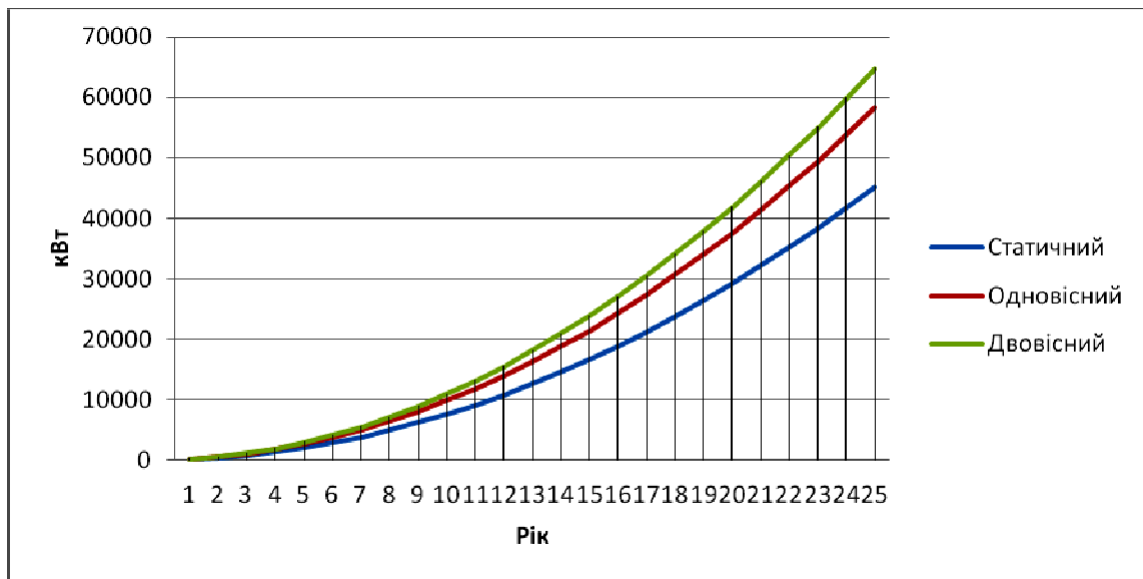


Рис. 4. Втрати потужності трекерів

Для підтвердження розрахунків були розроблені 3D-моделі сонячної електростанції. Проведене попереднє моделювання тягової підстанції (ТП), обладнаної сонячною електростанцією (СЕС) з різними типами трекерів; модель ТП максимально наближена до реального вигляду.

#### Статична система

Моделювання проведено з урахуванням усіх кліматичних умов Харківського регіону. На рис. 4

зображено 3D-модель тягової підстанції, на даху якої розміщено статичну систему СЕС, сонячні панелі розташовані в чотири ряди по 10 панелей загальною потужністю 12,2 кВт і займають загальну площу 65 м<sup>2</sup>. Сонячні панелі встановлено з кутом нахилу 33 ° і направлено на схід для отримання максимальних показників виробництва енергії.

Результати моделювання наведено на рис. 5, генерація потужності статичної системи – рис. 6.

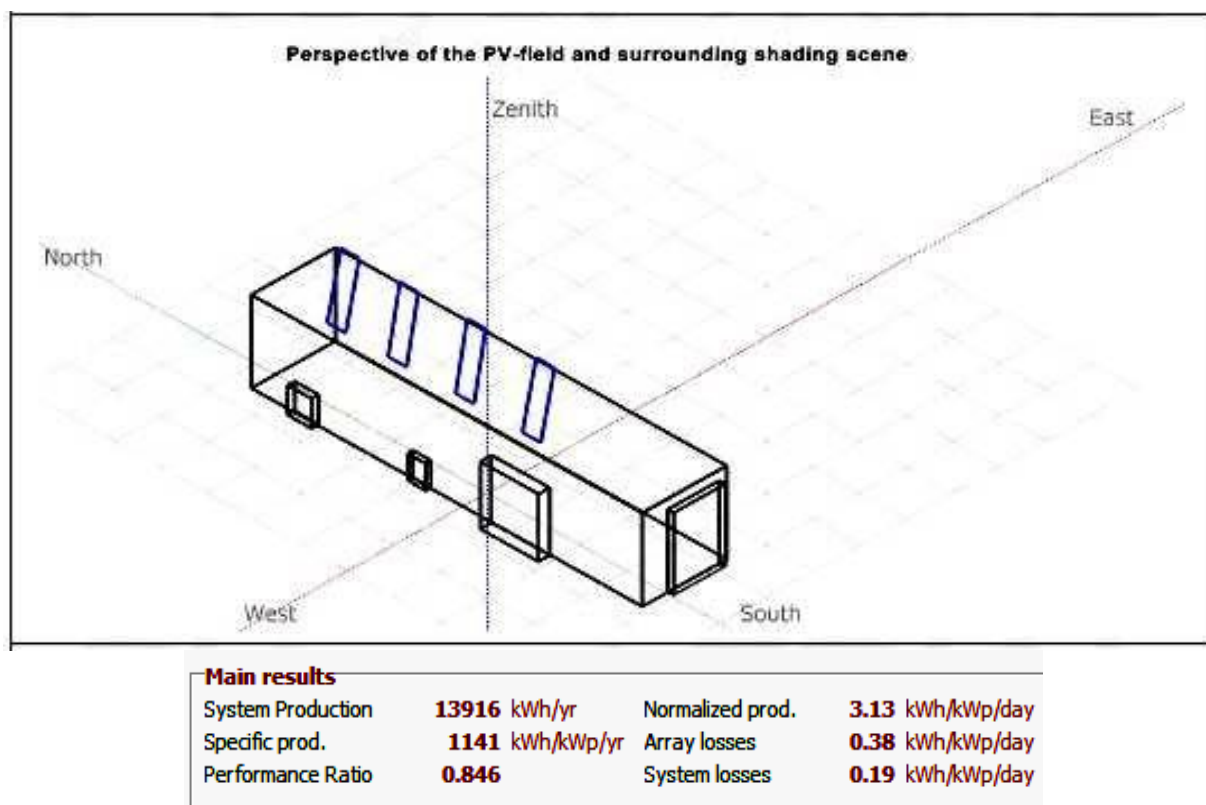


Рис. 5. Результати моделювання статичної системи

З результатів моделювання статичної системи видно, що станція згенерувала 13916 кВт/год електричної енергії за перший рік. Сумарні втрати в масиві та системні втрати складають 0,57 кВт/день.

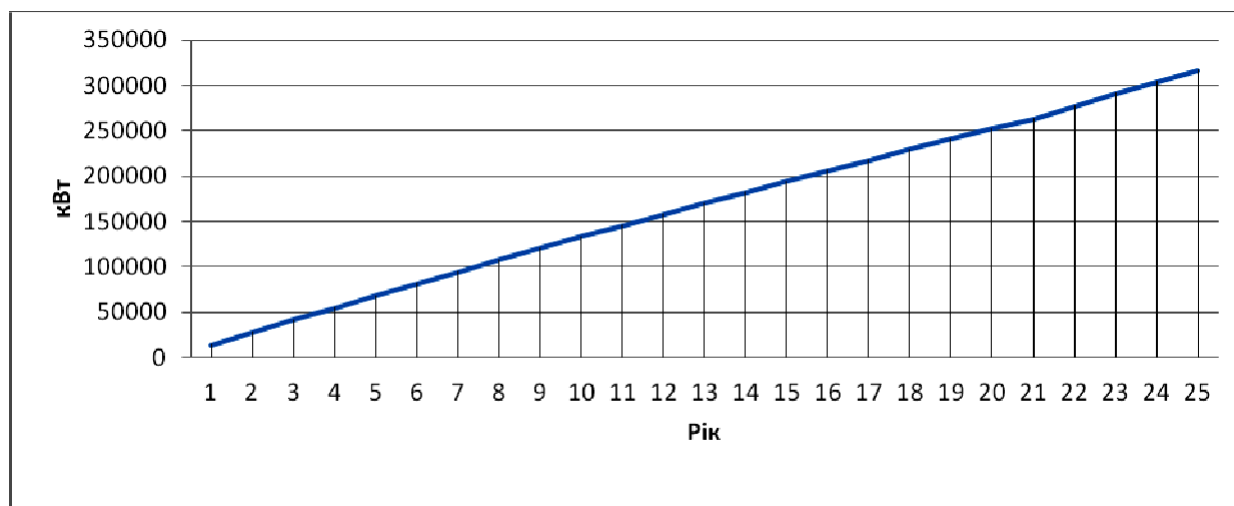


Рис. 6. Генерація потужності статичної системи

*Одновісний сонячний трекер*

Динамічна система кріплення призначена для горизонтальної фіксації. Цінність пристрою – протягом світлового дня він автоматично змінює положення фотомодулів залежно від траєкторії переміщення сонця в одній площині (по вертикалі).

Також така система кріплення корегує кут нахилу батарей виходячи з пори року.

Переваги одновісної трекерної системи:

- надійна стійкість до зовнішніх впливів природи: снігопаду, туману, вітрових навантажень, опадів, граду та ін. При цьому в зимовий сезон не потребує очищення від снігу;
- для встановлення конструкції не потрібно великих часових чи фізичних витрат. Ремонтні роботи також виконуються оперативно і просто;
- положення для сонячних панелей з мінімальним опором повітряним потокам;

- тривалий гарантійний період – 12 років, але експлуатаційний термін при цьому становить 25-30 років;

- рухома установка допомагає збирати на 25-40 % більше енергії, ніж статичні аналоги;

- рівномірне завантаження сонячного інвертора, зниження втрат генерації;

- встановлення на ґрунтових майданчиках з будь-яким рельєфом;

- працює повністю автоматично без втручання людини [4].

На рис. 7 зображено модель одновісного трекера, сонячні панелі розміщені так, як і на статичній системі – у чотири ряди по 10 панелей горизонтальної фіксації і змінюють положення модулів за траєкторією сонця (по вертикалі).

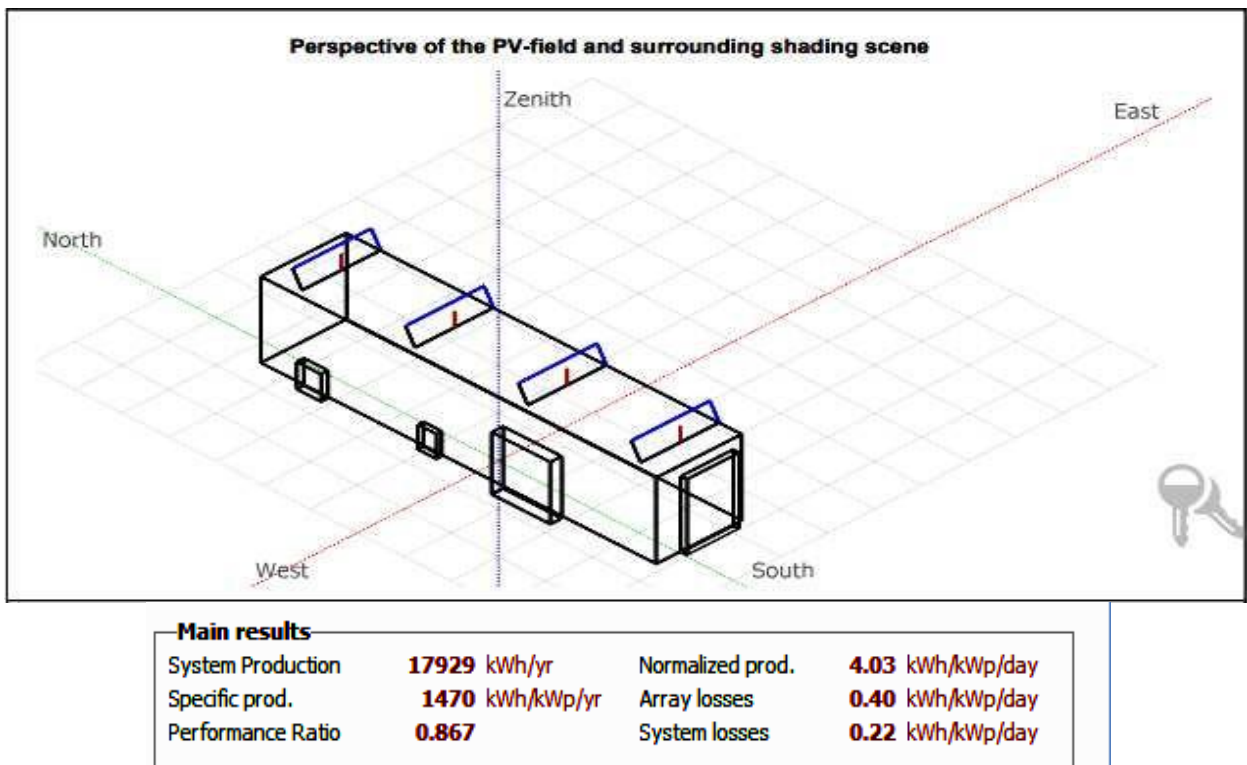


Рис. 7. Результати моделювання одновісного трекера

З результатів моделювання одновісного трекера, розміщеного на даху тягової підстанції, видно, що станція згенерувала 17929 кВт/год електричної енергії

за перший рік. Сумарні втрати в масиві та системні втрати складають 0,62 кВт/день (рис. 8).

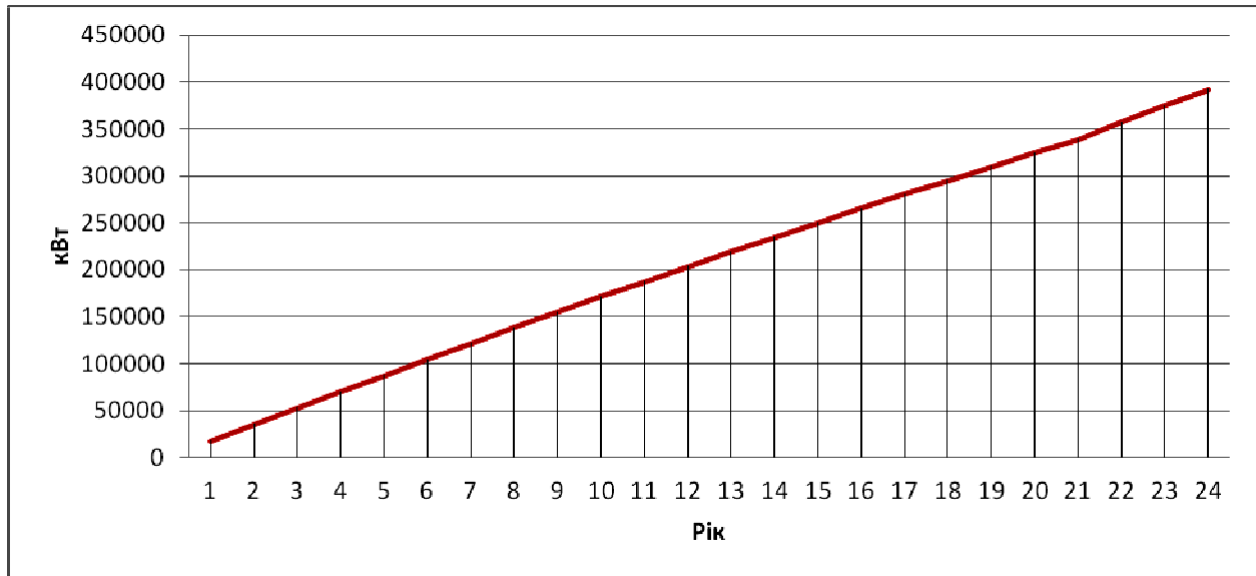


Рис. 8. Генерування потужності одновісного трекера

#### Двовісний сонячний трекер

Рухома установка на двох осях для сонячних електростанцій. Це динамічна система, що відстежує переміщення сонця протягом усього світлового дня, корегує нахил панелей для максимального отримання енергії. Отже, продуктивність об'єкта альтернативної енергії порівняно з аналогічними СЕС на статичних установках збільшується до 45 %. Кріплення також регулює положення сонячних панелей залежно від сезону.

Переваги двовісної трекерної системи:

- вибирає позицію для панелей з мінімальним опором повітряного потоку;
- прийнятність встановлення каркасних і безкаркасних додатків;

- регулювання фотомодулів у двох площинах: горизонтальній, вертикальній;
- усі процеси повністю автоматизовані, тому для керування обладнанням не потрібна участь людини;
- захист від блискавок і перевантажень, наявність датчиків льоду, снігу, граду та вітру;
- збирання сонячної енергії навіть у похмурі дні;
- можливість керувати, моніторити роботу установки дистанційно [5].

На рис. 9 зображено модель двовісного трекера, сонячні панелі розміщені на чотирьох трекерах по 10 панелей (два ряди по п'ять сонячних панелей) на двох осях, система відстежує переміщення сонця і корегує панелі як по горизонталі, так і вертикалі.



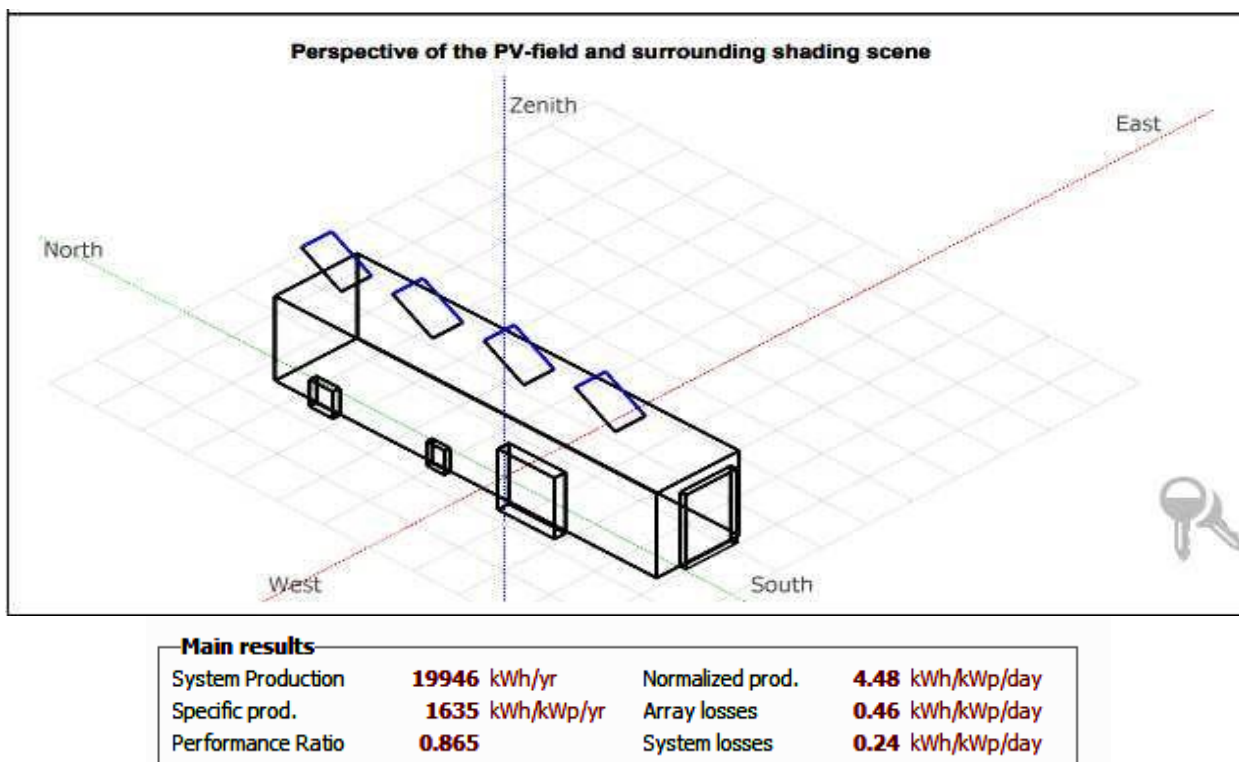


Рис. 9. Результати моделювання двовісного трекера

З результатів моделювання двовісного трекера, розміщеного на даху тягової підстанції, видно, що станція згенерувала 19946 кВт/год електричної енергії

за перший рік. Сумарні втрати в масиві та системні втрати складають 0,70 кВт/день (рис. 10).

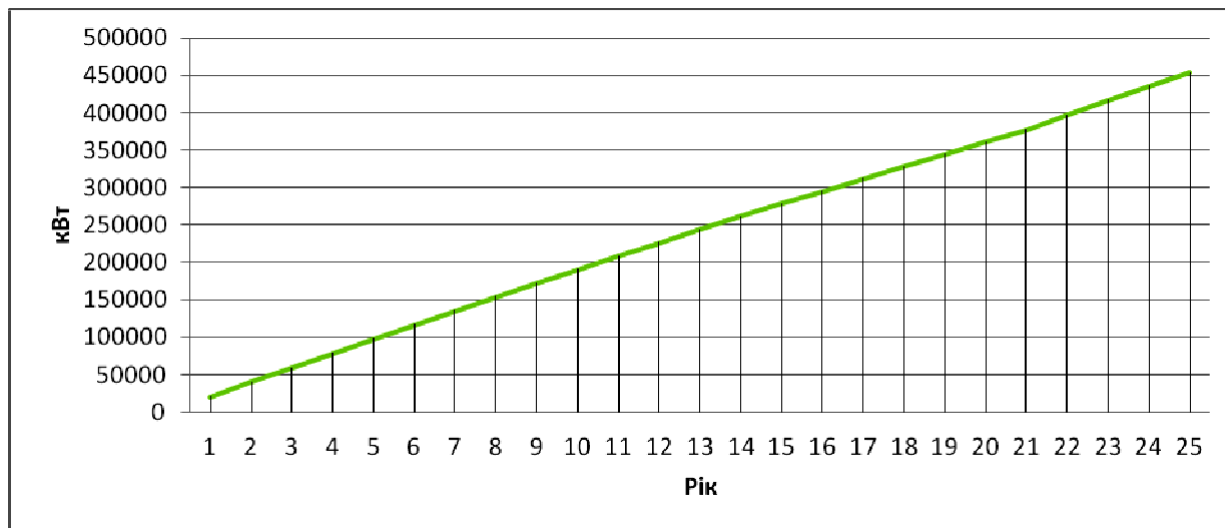


Рис. 10. Генерація потужності двовісного трекера

З табл. 2 видно, що різниця між одновісним трекером і статичною системою складає 4009 кВт за перший рік експлуатації СЕС, вартість одновісного трекера становить 88000 грн [4], а статична система не потребує додаткових затрат. Різниця між одновісним і двовісним трекерами становить 2017 кВт за перший рік експлуатації СЕС, різниця вартості цих трекерів становить 163000 грн [5]. За цими даними можна зробити висновок, що доцільніше встановлювати одновісний трекер на таку СЕС.

Таблиця 2

Порівняльні дані різних типів трекерів

	Потужність, кВт/год	Вартість, грн
Статичний	13920	0
Одновісний	17929	88,000
Двовісний	19946	251,000

### Висновки

У статті розглянуто і проведено техніко-економічний розрахунок і моделювання сонячної підстанції, встановленої на тяговій підстанції, розраховано щорічну генерацію та щорічні втрати з різними типами трекерів.

За допомогою програмного комплексу PVsyst було отримано результати моделювання різних типів трекерів. Встановлено сукупну генерацію СЕС з різними типами трекерів за 25 років експлуатації, де статична система генерує 316680 кВт, одновісний трекер генерує 407882 кВт, двовісний трекер генерує 453770 кВт. З урахуванням вартості трекерних систем найбільш доцільною є станція з одновісною трекерною установкою, оскільки вона генерує на 91202 кВт більше, ніж статична система за 25 років експлуатації, але на 45888 кВт менше, ніж двовісна система за ці роки, різниця в ціні складає 163000 грн.

За рахунок техніко-економічного розрахунку отримано графіки генерації та втрат у трекерних системах за 25 років експлуатації.

### Список використаних джерел

1. The Potential of Photovoltaics to Power the Railway System in China / Li Ji, Zhenwei Yu, Jing Ma, Limin Jia, Fuwei Ning. *Energies*. 2020. 13(15). 3844. URL: <https://doi.org/10.3390/en13153844>.
2. Indexes for the evaluation of a Solar Tracker / Carlos R. Batista-Rodríguez, Rosa I. Urquiza-Salgado, Elio R. Hidalgo-Batista *Ingeniería y Desarrollo*. 2018. Vol. 36. №. 1. P. 172-186. URL: <https://doi.org/10.14482/inde.36.1.10945>.
3. Збільшення продуктивності сонячних панелей. URL: [https://solarsystem.com.ua/ru/\\_zbilshennya-produktyvnosti-sonyachnyh-panelej-sonyachnyj-treker/](https://solarsystem.com.ua/ru/_zbilshennya-produktyvnosti-sonyachnyh-panelej-sonyachnyj-treker/).

4. Трекер слежения за солнцем одноосевой. URL: [https://www.solarstrategia.com/\\_oborudovanie/treker-slezheniya-za-solntsem/the-power-10p-single-60/](https://www.solarstrategia.com/_oborudovanie/treker-slezheniya-za-solntsem/the-power-10p-single-60/).
5. Трекер слежения за солнцем двухосевой. URL: [https://www.solarstrategia.com/\\_oborudovanie/treker-slezheniya-za-solntsem/dvukhosnyy-treker/the-power-10p-60/](https://www.solarstrategia.com/_oborudovanie/treker-slezheniya-za-solntsem/dvukhosnyy-treker/the-power-10p-60/).
6. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 149-160. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242262>.
7. Дюсьмикеев А. Б. Учебная программа по подготовке и переподготовке специалистов в области солнечной энергетики. Минск, 2016.

### Panchenko Vladyslav, Kharin Ruslan. Modeling and technical and economic calculations of the solar power plant work at the traction substation.

**Abstract.** In this study, the task of modeling and making technical and economic calculations of the work of the solar substation with different types of trackers was set.

Commissioning the solar power plants will have a very positive effect on saving the country's resources, as well as improving the environmental situation. Trackers for solar panels come in several types, are controlled by different algorithms when choosing the direction of spatial orientation and have different drive mechanisms.

There are two main types of dynamic tracking systems - uniaxial and biaxial.

Practice has long shown excellent results in the use of trackers for solar panels with the maximum increase in annual electricity production by 30 - 35%.

The efficiency of solar modules decreases over time. As a rule, degradation is slightly higher in the first year due to the initial exposure to light, then it stabilizes.

Factors influencing the degree of degradation include parameters such as materials used in production, technical process, quality of assembly and packaging of the elements in the module, as well as the qualifications of field workers.

The proposed concept of modernization of the traction substation's own power supply scheme should increase the reliability of electricity supply to consumers' own needs by integrating an additional independent power supply into the scheme.

To assess the level of losses, mathematical calculations were performed and a simulation model of the object of study was developed in the PVsyst software environment with the following initial data: selected Jinko Solar JKM305M60 Eagle 305 W solar panels, Ainelec K3 130-350 V / 50Hz inverters, climate conditions of Kharkiv region and the area of the traction substation roof.

To confirm the calculations, 3D models of solar power plant systems were developed.

The results of the static system modeling show that the station generated 13,916 kW / h of electricity in the first year.

The results of the uniaxial tracker modeling, which is located on the roof of the traction substation, show that the station generated 17929 kW / h of electricity in the first year.

The results of the biaxial tracker modeling, which is located on the roof of the traction substation, show that the station generated 19946 kW / h of electricity for the first year.

**Conclusions.** In the article the technical and economic calculation and modeling of the solar substation installed on the traction substation are reviewed and carried out, the annual generation and annual losses with different types of trackers are calculated. The results of modeling different types of trackers were obtained with the help of PVsyst software. The total generation of the solar power plant with different types of trackers during 25 years of operation was determined, where the static system generates 316,680 kW, uniaxial tracker generates 407,882 kW, biaxial tracker generates 453,770 kW. Taking into account the cost of tracker systems, a uniaxial tracker station installation is the most expedient, as it generates 91,202 kW more than a static system during 25 years of operation, but 45,888 kW less than a biaxial system during the same time, the price difference is 163,000 UAH.

On account of the technical and economic calculation, graphs of generation and losses in tracker systems for 25 years of operation were obtained.

**Keywords:** solar power plant, solar panels, static system, uniaxial tracker, biaxial tracker.

Надійшла 14.03.2023 р.

*Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.*

*E-mail: [panchenko\\_vv@kart.edu.ua](mailto:panchenko_vv@kart.edu.ua).*

*Харін Руслан Олександрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>.*

*E-mail: [kharinruslan07@gmail.com](mailto:kharinruslan07@gmail.com).*

*Panchenko Vladyslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.*

*E-mail: [panchenko\\_vv@kart.edu.ua](mailto:panchenko_vv@kart.edu.ua).*

*Kharin Ruslan, postgraduate student, department of department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0747-209X>.*

*E-mail: [kharinruslan07@gmail.com](mailto:kharinruslan07@gmail.com).*