

УДК 620.92

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В СОНЯЧНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ТЯГОВІЙ ПІДСТАНЦІЇ

Канд. техн. наук В. В. Панченко, аспірант Р. О. Харін

RESEARCH OF ENERGY LOSS IN A SOLAR POWER PLANT AT A TRACTION SUBSTATION

PhD (Tech.) V. Panchenko, postgraduate student R. Kharin

***Анотація.** Проведено аналіз втрат в сонячній електростанції постійного струму № 18 м. Зміїв Харківського регіону зі всіма кліматичними умовами даного регіону. Проаналізовано показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях. Згідно з експериментальними даними на основі програмного комплексу PVsyst виміряно втрати енергії та проведений розрахунок зменшення викидів CO₂ в сонячній електростанції.*

***Ключові слова:** сонячна електростанція, інвертори, втрати енергії, тягова підстанція, фотоелектрична система.*

***Abstract.** An analysis of losses in a solar power plant of direct current № 18 c. Zmiiv, Kharkiv region with all climatic conditions of this region. The energy efficiency indicators of inverters used*

in these solar power plants are analyzed. According to experimental data based on the software package PVsyst measured energy losses generated by a solar power plant. Connecting the SES to the mains can improve the voltage levels at the system nodes, but it is necessary to provide a power reserve in the system to cover the power deficit in the event of a sudden shutdown due to natural factors.

To analyze the energy losses of solar energy, the software package PVsyst was used, which allows you to analyze the parameters of electricity losses with the display of loss diagrams for the year and the dependence of the amount of losses in electricity generation by solar panels. PVsyst software is used to calculate the output power, performance, and total loss of a station connected to the network. Losses calculated by PVsyst software include two types: PV array loss and System loss.

After analyzing research conducted in Ukraine and other European countries, it is possible to conclude that the impact of poor quality electricity on electrical equipment is quite significant, and the study of the impact of unconventional generation sources on electricity quality indicators will identify ways to reduce electricity losses and increase electricity life equipment. The efficiency of solar energy conversion is greatly reduced due to reflections from the surface of the photovoltaic system. Also due to the peculiarities of the construction of photovoltaic converters there is a decrease in the efficiency of solar panels with increasing temperature.

Keywords: solar power plant, inverters, energy losses, traction substation, photovoltaic system.

Вступ. Електрифікований залізничний транспорт є базовою складовою транспортного сектора України. Забезпечуючи функціонування і сталий розвиток економіки держави, він є однією з найбільш енергоємних галузей, що має високий потенціал з енергозбереження. Приєднання СЕС до мережі може покращити рівні напруг у вузлах системи.

Проаналізувавши дослідження, які проводилися в Україні [1] та в інших європейських країнах, можна зробити висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим, а дослідження проблеми впливу джерел нетрадиційної генерації на показники якості електроенергії дозволить визначити шляхи зменшення втрат електроенергії та збільшити термін роботи електричного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання про дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції є досить актуальним для нашої країни. На території України зміна умов надання послуг з електропостачання стала причиною стрімкого збільшення та розвитку відновлювальних джерел електроенергії. Огляд існуючих досліджень

втрат енергії в сонячній електростанції показує, що обсяг виконаних досліджень невеликий. У зв'язку з чим аналіз і можливість зменшення втрат енергії в сонячній електростанції є актуальним завданням.

У дослідженні таких науковців, як Т. Н. Нгуен, В. Д. Сізов, М. Ф. Ву, Т. Х. Ку [2], подано результати моделювання з використанням програми PVsyst сонячної електростанції потужністю 26 кВт на даху комерційної будівлі в місті Ханой, результати даного дослідження відобразили потенціал сонячної енергії, кількість виробленої енергії та ефективність сонячної електростанції, під'єднаної до мережі.

H. Vidal, M. Rivera, P. Wheeler and N. Vicencio у своєму дослідженні [4] аналізують поведінку під'єднаної до мережі фотоелектричної системи 8.2 кВт для живлення електричного навантаження на місці або для живлення електричної мережі. Розглядалися кількість виробленої енергії та продуктивність фотоелектричної системи.

У дослідженнях не було вирішено питання дослідження та аналізу втрат енергії в сонячній електростанції.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даної статті є

проведення аналізу та дослідження закономірностей втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції постійного струму № 18 м. Зміїв Регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» протягом календарного року.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: провести аналіз втрат енергії в сонячних панелях та системі сонячної електростанції; проаналізувати показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях; провести моделювання енергетичних втрат сонячних батарей та продуктивності фотоелектричної системи.

Для аналізу та моделювання енергетичних втрат сонячної енергії застосуємо програмний комплекс PVsyst, який дозволяє проаналізувати параметри втрат електроенергії з відображенням діаграм втрат за рік та залежність величини втрат при виробленні електроенергії сонячними панелями.

Основна частина дослідження.

Аналіз джерел [2, 3, 5, 7] свідчить про те, що загальні втрати енергії при перетворенні сонячного випромінювання у фотоелектричній системі включають до себе:

- втрати в проводах – 1 %;
- втрати в інверторах – 3–7 %
- втрати, пов'язані зі зростанням температури фотоелементів, – 4–8 %
- втрати в процесі роботи сонячної батареї в період низького рівня сонячного випромінювання – 1–3 %;
- втрати, пов'язані з затінюванням і забрудненням сонячних батарей, – 1–3 % (у разі неоптимального орієнтування ці втрати можуть бути значно вище);
- втрати шунтуючих діодів – 0,5 %.

На практиці можливі випадки, коли загальні втрати можуть досягати 25–30 % через погану якість обладнання або неправильний підбір компонентів системи та інших факторів. Зокрема зі збільшенням температури фотоелектричного елемента на

1 °С його ефективність падає в середньому на 0,5 %. Ця залежність нелінійна і підвищення температури елемента на 10 °С призводить до зниження ефективності майже в два рази.

Фотоелектричні системи слід встановлювати з урахуванням втрат, а вироблену енергію слід споживати у максимально наближеній до джерела зоні [3, 8].

Інвертор і відповідні електричні компоненти, необхідні для під'єднання до мережі, є факторами, що генерують ці втрати [4], а параметр називається втрат L_s і показує різницю між виходом масиву Y_a та кінцевим виходом системи Y_F :

$$L_s = Y_a - Y_F. \quad (1)$$

Втрати від затінення. Одним з найважливіших факторів, що впливає на експлуатаційні характеристики фотоелектричних панелей, є затінення [7]. Факторами, які можуть спричинити затінення, є сусідні будівлі, чагарники та вежі для передачі енергії тощо. Як правило, будівлі будуються дуже близько одна до одної, особливо в центрах міста, і це спричиняє затінення фотоелектричних модулів, тим більше встановлених на дахах. Іноді через неправильну конструкцію проектування масиву фотоелектричної системи можливе також самозатінення [3].

Втрати від пилу. Ці втрати спричинені забрудненням поверхні фотоелектричного модуля з будь-якої причини, або зменшенням надходження сонячної радіації через скупчення снігу на поверхні модуля. Результати досліджень, зроблені щодо втрат, спричинених запиленням, показують, що в районах, де мало опадів, ці втрати досягають 15 %. Для підвищення ефективності системи модуль потрібно регулярно очищати [7]. Але на великій сонячній електростанції, особливо в районах з нестачею води, цей процес може бути дуже дорогим [3].

Втрати на відбиття. Поки фотомодуль поглинає частину сонячної радіації, певна кількість сонячної радіації відбивається назад від поверхні модуля. Цей процес характеризується втратами на

$$p(\theta_1) = (1/2) \left[\left(\frac{\sin^2(\theta - \theta_1) + \sin^2(\theta + \theta_1)}{2} + \frac{tg^2(\theta^2 - \theta_1^2) + tg^2(\theta^2 + \theta_1^2)}{2} \right) \right] \quad (2)$$

Для зменшення відбиття поверхні модуля вкривають антивідбиваючою плівкою [3].

Теплові втрати. Сонячні панелі випробовуються в стандартних умовах випробувань, що відповідають 25 °C, 1000 Вт/м² сонячної радіації та АМ 1,5 (маса повітря). Ефективність панелі розраховується відповідно до стандартних умов випробування. Частина падаючого

відбиття через зворотне відбите випромінювання. Здатність скла віддзеркалювати промені, які падають на нього під кутом θ_1 , визначається за формулою

сонячного випромінювання перетворюється в електричну енергію, а частина сонячної радіації – на теплову енергію. Ефективність фотоелектричної батареї зменшується зі збільшенням температури панелі [3]. Теплова поведінка поля, яка сильно впливає на електричні характеристики, визначається енергетичним балансом між температурою навколишнього середовища і нагріванням елемента через сонячне випромінювання:

$$U \cdot (T_{cell} - T_{amb}) = Alpha \cdot G_{inc} \cdot (1 - Effic) \quad (3)$$

$$T_{cell} = T_{amb} + 1/U \cdot (Alpha \cdot G_{inc} \cdot (1 - Effic))$$

де T_{amb} – температура навколишнього середовища, відповідно до метеоданих;

G_{inc} – випромінювання модуля або PV-масиву (в моделюванні використовується GlobEff, ефективне випромінювання з урахуванням забруднень і відтінків);

$Alpha$ – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання (віддзеркалення). Звичайне значення коефіцієнта поглинання $Alpha$ становить 0,9;

$Effic$ – коефіцієнт корисної дії (пов'язаний з площею модуля), тобто енергія, що відводиться від модуля. За можливості коефіцієнт корисної дії PV обчислюється відповідно до умов роботи модуля. В інших випадках його значення приймається на рівні 10 %.

Втрати від невідповідності модуля. Одним з основних джерел втрат у фотоелектричній системі є те, що різна

кількість енергії виробляється двома або більше масивами в модулі. Ця невідповідність викликана такими факторами, як часткове затінення та забруднення певного модуля, які можуть спричинити ці втрати. Значна частина системних втрат відбувається в кабелях та інверторах [3].

Втрати в кабелях. Як правило, втрати в кабелях для добре спроектованої станції не перевищують 2 %, і ця величина не повинна зростати з часом. Також причиною втрат, що відбуваються в кабелях, є корозія та перегрів. Кабелі використовуються для під'єднання модулів PV та інверторів. Втрати кабелю живлення визначаються за виразами:

$$P_{loss}(t) = 2 \cdot I_{DC_cable}^2 \cdot r_{DC} \quad (4)$$

$$P_{loss}(t) = 2 \cdot \left(\frac{P_{DC_cable}(t)}{V_{DC}} \right)^2 \cdot r_{DC} \quad (5)$$

де I_{DC}^2 – постійна стійкість кабелю;
 V_{DC} – напруга між кінцями кабелю;
 P_{loss} – втрати постійного струму;
 r_{DC} – опір постійного струму кабелю.

Втрати енергії через резистивні навантаження пропорційні збільшенню стійкості до проводу.

Спосіб під'єднання. Всі сонячні панелі з'єднуються послідовно для підвищення напруги відповідно до діапазону робочих напруг інвертора, під'єданого до мережі. Після стійкого з'єднання з сонячною панеллю інвертор під'єднується до трифазної електричної мережі всередині будівлі.

Моніторинг системи. Сонячна електростанція, під'єднана до мережі з

використанням інвертора, має здатність працювати стабільно, точно, довго і функцію безпроводного дистанційного моніторингу. Таким чином, всі технічні характеристики станції можуть віддалено контролюватися портативними електронними пристроями.

Об'єктом дослідження є тягова підстанція № 18 м. Зміїв (рис. 1), площа даху 378 м², на якій змонтовано чотири масиви, кожен з яких складається з десяти послідовно з'єднаних сонячних панелей марки Jinko Solar JKM305M-60 Eagle потужністю 305 Вт. Запропонована система загальною площею 65 м² під'єднується до чотирьох інверторів трифазного струму потужністю 2,9 кВт, на кожен з яких припадає по масиву.



Рис. 1. Загальний вигляд тягової підстанції № 18 м. Зміїв

Для оцінювання рівня втрат була розроблена імітаційна модель об'єкта дослідження в програмному середовищі PVsyst з такими вихідними даними: обрані сонячні панелі марки Jinko Solar JKM305M-60 Eagle 305 Вт, інвертори марки Ainelec K3 130-350 V/50Hz, задані кліматичні умови Харківської області та площа даху тягової підстанції. Обрані сонячні панелі даної

марки мають невисоку вартість і високий ККД, витримують суворі умови експлуатації, що робить їх ідеальними для установлення на дахах тягових підстанцій та мінімізує можливості розриву сітки струмопровідних доріжок.

Обраний інвертор має максимальну ефективність 98 %.

Рівні втрат змодельовані за допомогою програмного забезпечення PVsyst, включають два типи: втрати PV array loss (втрати в масиві) і System loss (втрати в системі).

Результати досліджень. Результати модулювання, подані на рис. 2, вказують на те, що втрати електроенергії сонячних батарей, пов'язані з температурним режимом, становлять близько 4,18 %. При стандартній робочій температурі сонячних панелей (25 °C) різниця з сезонними температурами в цій місцевості досить висока: влітку температура повітря може досягати 40 °C, а взимку знижуватися до

-20 °C. Найменші втрати, відповідні значенням 0,1 %, спостерігаються в електричних з'єднувальних кабелях, оскільки їх довжина не перевищує 5 м, як показано на рис. 2. Втрати потужності можуть коливатися від 10 до 70 % залежно від різних причин, що впливають на продуктивність фотоелектричної системи (табл. 1).

У табл. 2 відображено детальні втрати в інверторі протягом року. Найбільші втрати відзначаються у період з травня по серпень, а сумарні втрати за рік складають 829,98 кВт·год.

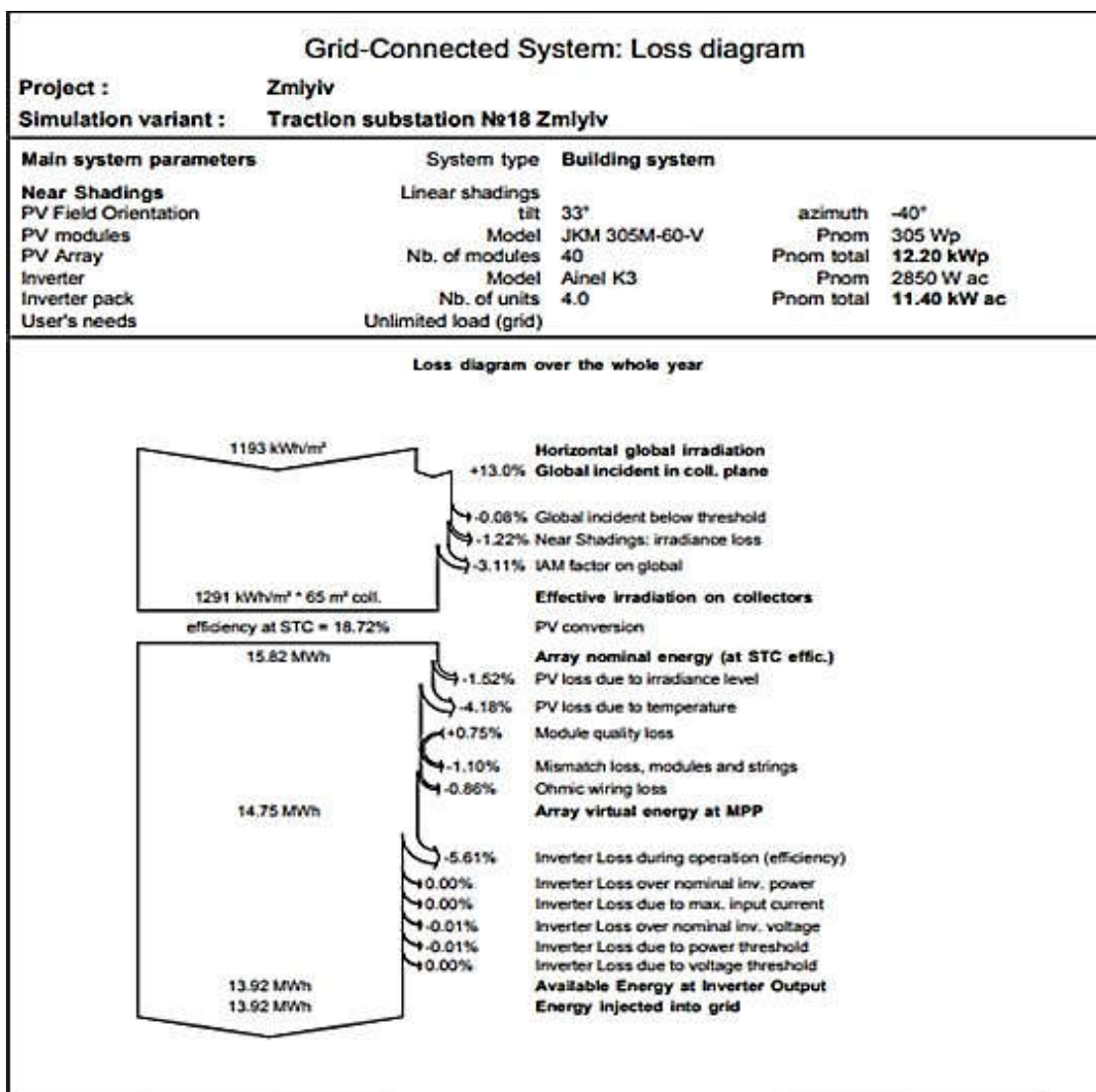


Рис. 2. Втрати фотоелектричної системи

Таблиця 1

Діаграма втрат «Тягова підстанція № 18 м. Зміїв» за рік

Параметр	Значення
Горизонтальна енергетична експозиція сумарного сонячного випромінювання	1193 кВтгод/м ²
Сумарне падіння випромінювання на поверхні	+ 13,0 %
Сумарне падіння нижче порогового рівня	-0,08 %
Поряд із зонами затінення: втрати освітлення	-1,22 %
Вплив кута падіння на сумарне значення	-3,11 %
Ефективне сонячне випромінювання на колекторах	1291 * 65 кВтгод/ м ² * м ² кол.
Фотоелектричний перетворювач, ККД при STC	18,72 %
Номинальна енергія батареї (ефективність за стандартних тестових умов)	15,82 МВтгод
Втрати фотоелемента, пов'язані з рівнем освітлення	-1,52 %
Втрати фотоелемента, пов'язані з температурними показниками	-4,18 %
Втрати, пов'язані з якістю модуля	+ 0,75 %
Схемні втрати, модулі та з'єднувальні елементи	-1,10 %
Омічні електромонтажні втрати	-0,86 %
Віртуальна енергія батареї за максимально можливої потужності	14,75 МВтгод
Втрати інвертора під час роботи (ефективність)	-5,61 %
Втрати інвертора через захист від понадрозрахункової потужності	0,00 %
Втрати інвертора через максимальний вхідний струм	0,00 %
Втрати інвертора через захист від понадрозрахункової напруги	-0,01 %
Втрати інвертора через порогове значення рівня потужності	-0,01 %
Втрати інвертора через порогове значення рівня напруги	0,00 %
Енергія, доступна для використання на виході з інвертора	13,92 МВтгод
Енергія, передана до мережі	13,92 МВтгод

Таблиця 2

Детальні втрати в інверторах

	EOutInv kWh	EffInvR %	InvLoss kWh	IL Oper kWh	IL Pmin kWh	IL Pmax kWh	IL Vmin kWh	IL Max kWh
January	640	94.1	40.29	39.71	0.056	0.000	0.526	0.000
February	902	94.6	51.70	51.15	0.238	0.000	0.305	0.000
March	1262	94.7	70.78	70.66	0.122	0.000	0.000	0.000
Aprile	1312	94.3	79.88	79.70	0.180	0.000	0.000	0.000
May	1731	94.6	99.12	98.89	0.234	0.000	0.000	0.000
June	1584	94.3	95.07	94.87	0.198	0.000	0.000	0.000
July	1719	94.6	98.35	98.28	0.078	0.000	0.000	0.000
August	1618	94.7	90.91	90.71	0.199	0.000	0.000	0.000
September	1220	94.5	71.45	71.14	0.307	0.000	0.000	0.000
October	879	93.9	57.04	56.99	0.052	0.000	0.000	0.000
November	573	93.5	40.09	39.90	0.190	0.000	0.000	0.000
December	475	93.1	35.31	35.08	0.042	0.000	0.182	0.000
Year	13916	94.4	829.98	827.07	1.896	0.000	1.013	0.000

Втрати знижують кількість енергії, переданої до мережі, та ефективність роботи електростанції, під'єднаної до мережі. Як показано на рис. 3, втрати потужності, пов'язані з сонячними панелями, складають $\sim 0,38$ кВт·год/кВт·доб на добу, в той час, як втрати в системі – близько $0,19$ кВт·год/кВт·доб.

При цьому корисна вихідна потужність інвертора – близько $3,13$ кВт·год/кВт·доб. На рис. 4 показана

продуктивність сонячної електростанції, ККД якої в середньому становить $84,6\%$.

Потужність, що була передана до мережі сонячною електростанцією, відповідає кількості сонячної радіації (рис. 4). З травня по вересень виробляється найбільша кількість електроенергії, в січні і лютому – найменше.

На рис. 5 показана залежність втрат та вироблення енергії в сонячній електростанції за місяцями.

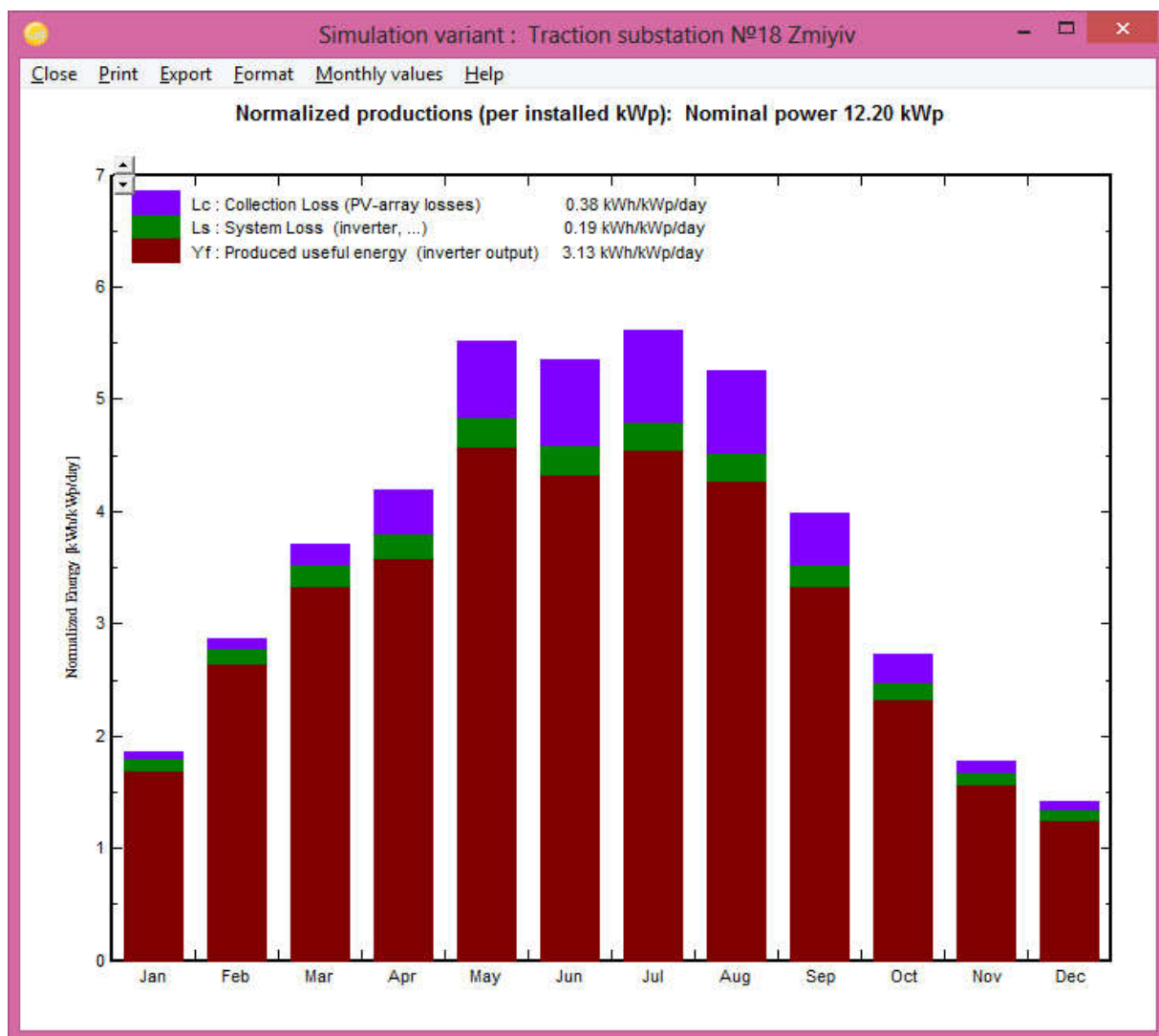


Рис. 3. Розподіл втрат потужності за місяцями

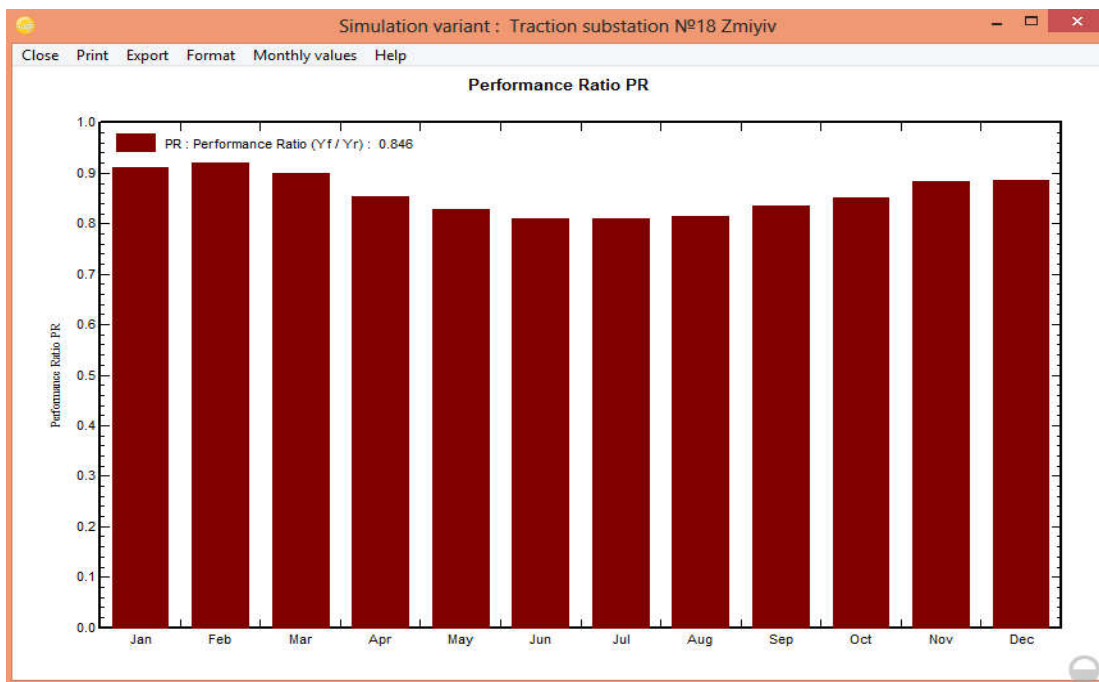


Рис. 4. Продуктивність досліджуваної сонячної електростанції

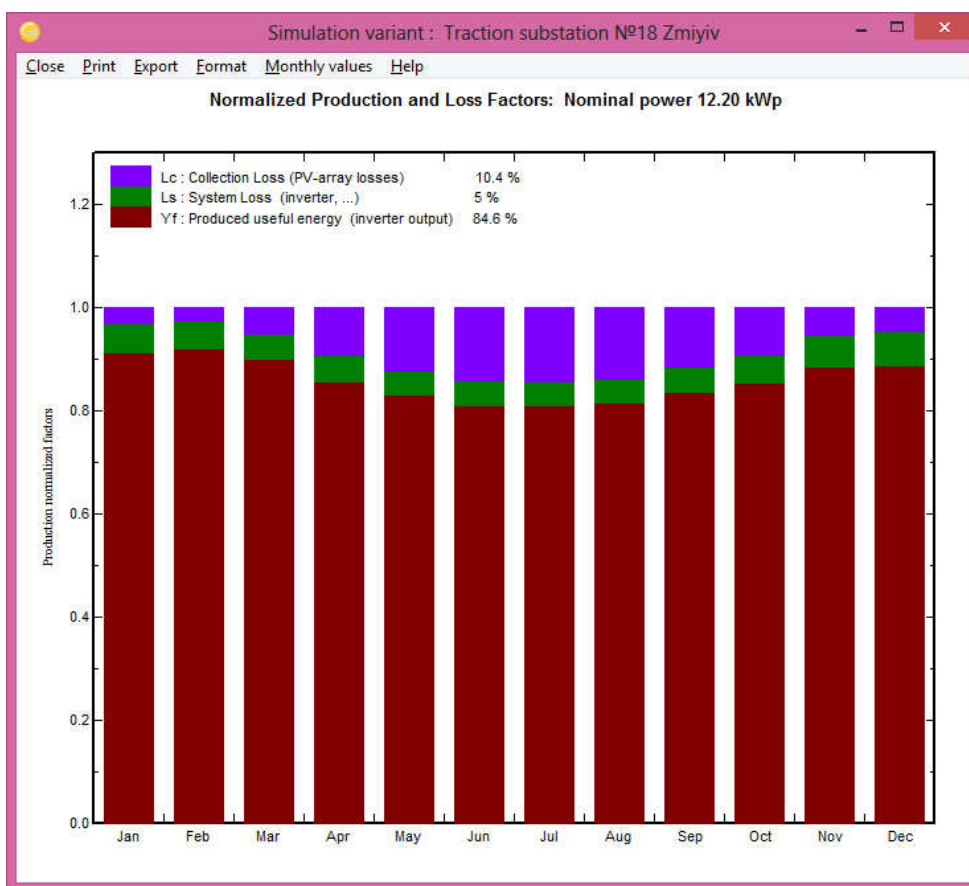


Рис. 5. Нормалізоване вироблення та фактори втрат при номінальній потужності сонячної електростанції

Найбільші втрати в електростанції обумовлені втратами у фотоелектричній системі, а в період з травня по серпень спостерігається падіння виробітку продуктивності енергії приблизно на

10,4 %, що зумовлено нагріванням сонячних панелей. Системні втрати, до яких входять такі фактори, як затінення, пил, опади, температури та втрати у кабелях, інверторах та акумуляторах, складають 5 % (табл. 3).

Таблиця 3

Кількість електроенергії, отриманої від під'єднаної до мережі сонячної електростанції

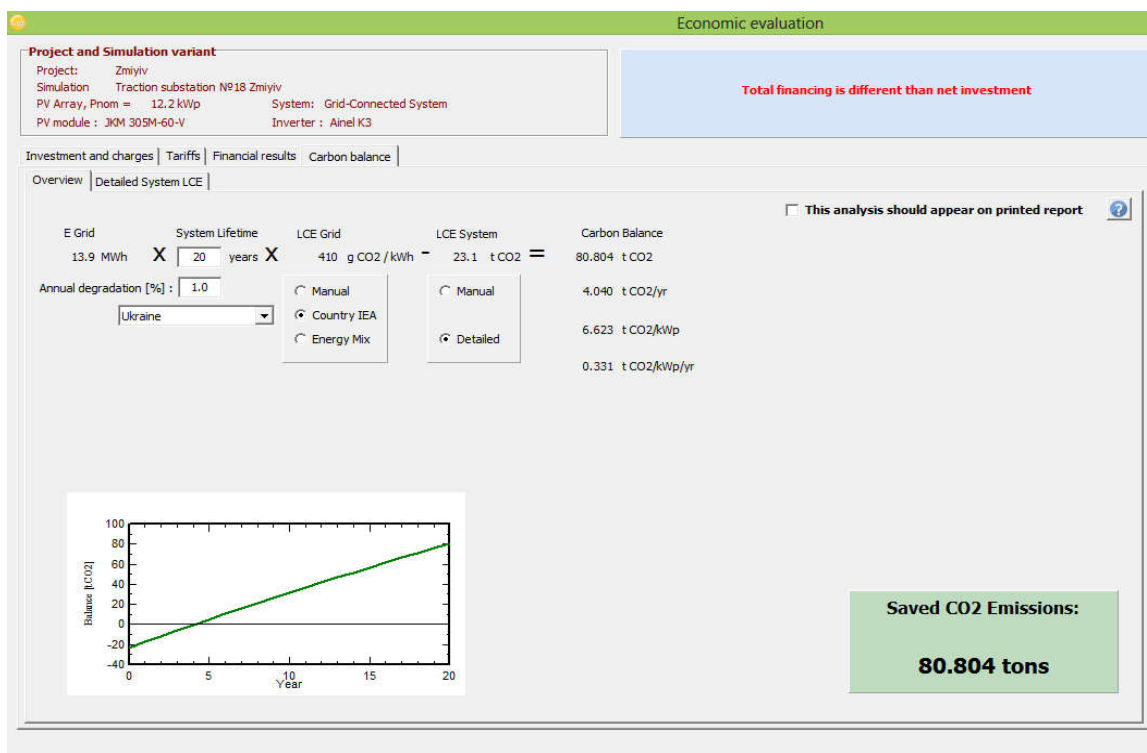
	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb°C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR
January	36.9	22.32	-5.24	57.5	54.3	680	640	0.912
February	56.8	30.52	-4.86	80.4	76.6	953	902	0.920
March	94.6	50.22	0.72	115.1	110.4	1333	1262	0.899
Aprile	117.6	63.30	9.83	125.9	120.9	1392	1312	0.854
May	166.8	77.50	16.58	171.2	164.4	1830	1731	0.829
June	163.8	80.70	20.21	160.4	153.7	1679	1584	0.810
July	172.4	79.98	22.71	174.1	167.1	1818	1719	0.809
August	151.3	69.13	22.13	162.9	156.7	1709	1618	0.814
September	104.7	51.60	16.21	119.7	114.9	1291	1220	0.836
October	65.1	35.03	9.06	84.5	80.6	936	879	0.852
November	35.7	22.20	0.55	53.2	50.3	613	573	0.883
December	27.9	17.98	-4.57	43.9	41.1	510	475	0.886
Year	1193.5	600.48	8.69	1348.8	1290.9	14745	13916	0.846

Примітка: GlobHor – горизонтальне глобальне випромінення;
 T_Amb – середні температури навколишнього середовища;
 GlobInc – глобальне інцидент випромінення в площині колектора;
 GlobEff – ефективна глобальна корекція затінь;
 EArray – ефективна енергія на виході масиву;
 T_Amb – середні температури навколишнього середовища;
 E_Grid – енергія, що вводиться до мережі

Також була розрахована енергія, генерована PV-масивом, та енергія, що вводиться до мережі, включаючи втрати в електричних компонентах та PV-масиві. Щорічне глобальне випромінення на горизонтальній площині – 1193,5 кВт·год/м², 1348,8 кВт·год/м² – для глобальної спадної енергії на колекторі без оптичних поправок і 1290,9 кВт·год/м² – для ефективного глобального випромінення після оптичних втрат, які були розраховані для конкретного місця розташування. При цьому випромінена річна енергія постійного

струму, що генерується з фотоелектричної решітки, становила 14745 кВт·год, а річна енергія змінного струму, що вводиться до мережі, становила 13916 кВт·год.

Відповідно до поточного графіка підвищення цін на електроенергію в Україні інвестиції в будівництво на дахах будівель сонячних електростанцій, під'єднаних до мережі, можуть бути економічно доцільними, роблячи при цьому позитивний вклад у захист довкілля і боротьбу зі зміною клімату за рахунок зменшення викидів CO₂ (рис. 6).

Рис. 6. Зменшення викидів CO₂

Висновки. У статті розглянуто і проведено аналіз втрат в сонячній електростанції встановленій на тяговій підстанції постійного струму № 18 м. Зміїв Харківського регіону зі всіма кліматичними умовами даного регіону.

Проаналізовано показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях. За допомогою програмного комплексу PVsyst були виміряні втрати енергії, які генерує сонячна електростанція. Встановлено, що втрати потужності у розглянутій сонячній електростанції, пов'язані з сонячними панелями, склали $\sim 0,44$ кВт·год/кВт·доб, у той час як втрати в системі – близько

0,19 кВт·год/кВт·доб.

Втрати електроенергії сонячних батарей, пов'язані з температурним режимом, становлять близько 4,18 %. Найменший рівень втрат 0,1 %, спостерігається в електричних з'єднувальних кабелях, оскільки їх довжина не перевищує 5 м.

Отримано залежність вихідної потужності, кількості переданої до мережі електроенергії та ефективності роботи сонячних електростанцій від різних типів втрат. Втрати знижують кількість енергії, переданої до мережі, та ефективність роботи електростанції, тому для подальшого дослідження є актуальним пошук варіантів зменшення втрат енергії в сонячній електростанції.

Список використаних джерел

1. Бацала Я. В., Гладь І. В., Николин У. М. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 4. С. 81-90. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rnogr_2013_4_11.
2. Нгуен Т. Н., Сизов В. Д., Ву М. Ф., Ку Т. Т. Х. Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое. *Энергетика. Известия высших учебных*

заведений и энергетических объединений СНГ. 2020, 63(1). С. 30-41. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>.

3. Ekici S. and Kopru M. A. Investigation of PV System Cable Losses. *International journal of renewable energy research*. 2017, Vol. 7, No. 2. P. 807–815.

4. Vidal Humberto, Rivera Marco, Wheeler Patrick and Vicencio Nicolás. The Analysis Performance of a Grid-Connected 8.2 kWp Photovoltaic System in the Patagonia Region Sustainability. 2020, № 12 (21), 9227. URL: <https://doi.org/10.3390/su12219227>.

5. Кожем'яко В. П., Маліновський В. І., Ярославський Я. І. Застосування технологій фотоелектричних перетворювачів в моделі інформаційних мереж із розподіленими джерелами енергії. *Опт-ел. інф-енерг. техн.* 2014. № 26. Вип. 2. С. 96–108.

6. Shiva Kumar B., Sudhakar K. Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India. November 2015. P. 184–192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.10.001>.

7. Maghami M. R., Hizam H., Gomes C., Radzi M. A., Rezadad M. I. and Hajighorbani S. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1307–1316.

8. Salema F., Awadallah M. A. Detection and assessment of partial shading in photovoltaic arrays. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2016. Vol. 3 (1). P. 23–32.

Панченко Владислав Вадимович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Тел.: +38(057)730-10-04. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Харін Руслан Олександрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X. Тел.: +38(057) 730-10-76. E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

Panchenko Vladislav, PhD (Tech). Associate Professor, department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Tel.: +38(057)730-10-04. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Kharin Ruslan, postgraduate student, department of department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X. Tel.: +38(057)730-10-76. E-mail: kharinruslan07@gmail.com.

Статтю прийнято 10.06.2021 р.