

Нікітін Віктор Олексійович, кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, E-mail: hicmop@ukr.net

Зайцев Роман Валентинович, д.т.н., кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; E-mail: Roman.Zaitsev@khpi.edu.ua

Хримова Тетяна Іванівна, к.ф.-м.н., кафедра фізики; E-mail: Tatiana.Khramova@khpi.edu.ua, тел. 0675753006

Хрипунова Аліна Леонідівна, к.п.н., кафедра природничих наук, E-mail: Alina.Khrypunova@khpi.edu.ua
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61001, м. Харків, Україна

РОЗРОБКА ФАСЕТНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Анотація. У статті досліджені особливості концентраторів сонячної енергії. Надана характеристика нині існуючих типів систем концентрації сонячної енергії: система слабкої концентрації та система високої концентрації. Наведено їх конструктивні особливості та недоліки. Зазначено, що одними з найбільш застосовуваних концентраторів є лінзи Френеля, але оптична їх ефективність обмежена низькими або високими температурами, оскільки внаслідок теплового розширення спостерігається зміна показника заломлення або деформація структури лінзи Френеля. Лінзи Френеля, які фокусують сонячне випромінювання на площі до 1 cm^2 , не дають можливості утилізації надлишкової теплової енергії. Складна геометрична форма параболічних концентраторів обумовлює кошову технологію їх виготовлення, що, в свою чергу, суттєво збільшує собівартість виробленої ними електричної енергії. Люмінесцентні сонячні концентратори мають низький коефіцієнт концентрації сонячної енергії. Проведений аналіз показав, що існуючі концентратори сонячного випромінювання не дозволяють створювати конкурентноздатні у порівнянні з традиційними джерелами електричної енергії фотоенергетичні установки, які працюють при високих ступенях концентрації сонячного опромінення та утилізують надлишкову теплову енергію. З метою вирішення зазначених проблем, авторами розроблено фасетний концентратор сонячного випромінювання, наведено його характеристики та представлено лабораторний зразок. Досліджено питання оптимізації налаштування концентратора. Оприлюднено звіт щодо проведених натурних випробувань макету.

Ключові слова: фасетний концентратор, сонячна енергія, лінзи Френеля, оптична ефективність, сонячні модулі.

Nikitin Victor, Department of Physical Materials Science for Electronics and Solar Energy, E-mail: hicmop@ukr.net

Zaitsev Roman, DScTech., Department of Physical Materials Science for Electronics and Solar Energy; E-mail: Roman.Zaitsev@khpi.edu.ua

Khramova Tatiana, Ph D, Department of Physics; E-mail: Tatiana.Khramova@khpi.edu.ua; tel. 067 575 30 06

Khrypunova Alina, Ph D, Department of Natural Sciences; E-mail: Alina.Khrypunova@khpi.edu.ua

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova str., 61001, Kharkiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF A FACETED CONCENTRATOR FOR A COMBINED PHOTOVOLTAIC PLANT

Abstract. This article examines the features of solar energy concentrators. The characteristics of the currently existing types of solar energy concentration systems are given: a weak concentration system and a high concentration system. Their design features and shortcomings are given. It is noted that Fresnel lenses are one of the most widely used concentrators, but their optical efficiency is limited by low or high temperatures, as a change in the refractive index or deformation of the Fresnel lens structure is observed due to thermal expansion. Fresnel lenses, which focus solar radiation on an area of up to 1 cm^2 , do not allow the utilization of excess thermal energy. The complex geometric shape of parabolic concentrators determines the expensive technology of their manufacture, which, in turn, significantly increases the cost of the electric energy produced by them. Luminescent solar concentrators have a low coefficient of concentration of solar energy. The conducted analysis showed that the existing concentrators of solar radiation do not allow to create competitive compared to traditional sources of electrical energy photo-energy installations that work at high levels of concentration of solar radiation and utilize excess thermal energy. In order to solve the mentioned problems, the authors developed a faceted concentrator of solar radiation, gave its characteristics and presented a laboratory sample. Questions of optimization of the adjustment of the concentrator are investigated. A report on the mock-up tests conducted has been published.

Keywords: faceted concentrator, solar energy, Fresnel lenses, optical efficiency, solar modules.

Никитин Виктор Алексеевич, кафедра физического материаловедения для электроники и гелиоэнергетики; E-mail: hicmor@ukr.net
Зайцев Роман Валентинович, д.т.н., кафедра физического материаловедения для электроники и гелиоэнергетики; E-mail: Roman.Zaitsev@khpi.edu.ua
Храмова Татьяна Ивановна, к.ф.-м.н., кафедра физики; E-mail: Tatiana.Khramova@khpi.edu.ua; тел. 0675753006.
Хрипунова Алина Леонидовна, к.п.н., кафедра естественных наук; E-mail: Alina.Khrypunova@khpi.edu.ua
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, 61001, г. Харьков, Украина

РАЗРАБОТКА ФАСЕТНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

***Аннотация.** В статье исследованы особенности концентраторов солнечной энергии. Приведены характеристики существующих типов систем концентрации солнечной энергии: система слабой концентрации и система высокой концентрации. Рассмотрены их конструктивные особенности и недостатки. Отмечено, что одними из наиболее широко применяемых концентраторов являются линзы Френеля, но их оптическая эффективность ограничена низкими либо высокими температурами, поскольку вследствие теплового расширения наблюдается изменение показателя преломления или деформация структуры линзы Френеля. Линзы Френеля, фокусирующие солнечное излучение на площади до 1 см^2 , не позволяют утилизировать излишки тепловой энергии. Сложная геометрическая форма параболических концентраторов обуславливает удорожание технологии изготовления, что, в свою очередь, существенно увеличивает себестоимость выработанной ими электрической энергии. Люминесцентные солнечные концентраторы дают низкий коэффициент концентрации солнечной энергии. Проведенный анализ показал, что существующие концентраторы солнечного излучения не позволяют создавать конкурентоспособные, по сравнению с традиционными источниками электрической энергии, фотоэнергетические установки, работающие при высоких ступенях концентрации солнечного излучения и утилизирующие излишки тепловой энергии. С целью решения данных проблем, авторами разработан фасетный концентратор солнечного излучения, приведены его характеристики и представлен лабораторный образец. Исследованы вопросы оптимизации настройки концентратора. Обнародован отчет о проведенных натурных испытаниях макета.*

***Ключевые слова:** фасетный концентратор, солнечная энергия, линзы Френеля, оптическая эффективность, солнечные модули.*

Вступ. Основною проблемою широкомасштабного використання фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії в Україні є висока собівартість виробленої ними електричної енергії [1]. Тому уряд України ввів спеціальну ціну на фотоелектричну енергію [2]. Одним з напрямків зниження собівартості фотоелектричного перетворення сонячної енергії є застосування фотоенергетичних установок (ФЕУ), які працюють на концентрованому сонячному випромінюванні [3]. В таких установках зниження собівартості електричної енергії досягається за рахунок зменшення активної площі приладової напівпровідникової структури шляхом використання концентратора сонячного випромінювання. Якщо в таких концентраторних фотоенергетичних установках забезпечити утилізацію надлишкової теплової енергії шляхом нагрівання води, це також значно підвищить їхні економічні показники.

Нині існують два типи систем концентрації сонячної енергії: система слабкої концентрації та система високої концентрації [4]. Традиційно для найбільш поширених сонячних модулів на основі кремнію використовують системи слабкої концентрації, в яких коефіцієнт концентрації сонячного опромінення не перевищує 2 [5].

В якості сонячних елементів у фотоенергетичних установках, які працюють при високих концентраціях сонячного випромінювання, використовують напівпровідникові структури на основі арсеніду галію [6].

В системах з високою концентрацією сонячної енергії використовують лінзи Френеля, параболічні дзеркала або люмінесцентні концентратори [7].

Одними з найбільш застосовуваних є лінзи Френеля, легкі і здатні досягати короткої фокусної відстані та великої діафрагми. Вони можуть бути використані в конструкції у формі кола, що фокусує світло в точці або у циліндричній формі, яка фокусує світло в лінію. Недоліком таких систем є те, що оптична ефективність обмежена низькими або високими температурами, оскільки внаслідок теплового розширення спостерігається зміна показника заломлення або деформація структури лінзи Френеля [8]. Лінзи Френеля, які фокусують сонячне випромінювання на площі до 1 см^2 [9], не дозволяють використовувати монолітні сонячні модулі, що в свою чергу робить неможливим утилізацію надлишкової теплової енергії, бо коефіцієнт перетворення сонячної енергії в електричну в промислових зразках сонячних елементів на основі арсеніду галію не перевищує 35%. Таким чином 65% сонячної енергії перетворюється в теплову енергію.

Ще одним дуже популярним типом концентратора є параболічний концентратор [10]. Зазвичай його конструкція складається з двох вигнутих дзеркал. Перше дзеркало більшого розміру служить колектором, а друге є фокусним. Однак існують різні модифікації, в яких фокусна точка вже замінена сонячною батареєю. Як і лінзи Френеля, параболічні концентратори мають високий коефіцієнт концентрації сонячного опромінення - близько 500. Ці концентратори часто використовуються у поєднанні з тепловими колекторами і, таким чином, утворюють гібридну систему, в якій відбувається утилізація теплової енергії [11]. Параболічні концентратори мають складну геометричну форму, що обумовлює кошову технологію їх виготовлення, що, в свою чергу, суттєво збільшує собівартість виробленої ними електричної енергії.

Люмінесцентні сонячні концентратори в основному складаються з однієї або кількох скляних або пластикових пластин. Світло, захоплене цими пластинами, які служать хвилеводом, спрямовується до одного або кількох країв пластин шляхом повного внутрішнього відбиття сонячного елементу. Пластини містять флуоресцентний барвник або квантові точки, тому вони випромінюють поглинене світло на більших довжинах хвиль. Коефіцієнт концентрації люмінесцентних сонячних концентраторів не перевищує 10, і вони зазвичай використовуються в основному як прозорі та напівпрозорі матеріали для покриття будівель, або як сонячні вікна [12].

Проведений аналіз показав, що існуючі концентратори сонячного випромінювання не дозволяють створювати конкурентноздатні у порівнянні з традиційними джерелами електричної енергії фотоенергетичні установки, які працюють при високих ступенях концентрації сонячного опромінення та

утилізують надлишкову теплову енергію, тому розробка та апробація економічних концентраторів є актуальною проблемою.

Основна частина.

1. Макет фотоенергетичної установки з фасетним концентратором.

В якості альтернативи концентраторам, які традиційно застосовувалися в фотоенергетичних установках з високим рівнем концентрації сонячної енергії, в роботі досліджені економічні фасетні концентратори, основною перевагою яких є високий коефіцієнт віддзеркалення, простота виготовлення та економічність.

Для попереднього тестування концепції ФЕУ було виготовлено лабораторний зразок концентратора випромінювання, який у зменшеному вигляді відтворював основні конструктивні ідеї та дозволяв провести їх практичну апробацію.

На етапі виготовлення лабораторного зразка ФЕУ було вирішено виготовити дзеркальний концентратор у вигляді фасетної конструкції, що складається з великої кількості квадратних дзеркал, які розташовані під певним кутом та сфокусовані на теплоприймачі ФЕУ. Такий тип концентратору видавався досить перспективним завдяки легкості виготовлення - використання плоских дзеркал невеликого розміру, відсутність необхідності виготовлення дзеркал складної просторової форми та легкість налаштування дзеркал при налаштуванні ФЕУ.

Зовнішній вигляд виготовленого макету ФЕУ наведено на рис. 1.



Рис.1. Макет фасетного концентратора у складі ФЕУ

З метою визначення базових параметрів концентратора випромінювання в натурних умовах експлуатації було проведено дослідження роботи лабораторного зразка ФЕУ на відкритому сонячному випромінюванні в м. Харкові впродовж вересня. Найбільш типовими на протязі зазначеного місяця виявилися умови, при яких потужність сонячного випромінювання складала 820 Вт/м^2 , а температура повітря дорівнювала $23\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначення вихідних параметрів сонячної батареї проводилося за світловими навантажувальними вольт-амперними характеристиками у випадку послідовної комутації ФЕП. Типова експериментальна ВАХ, виміряна для лабораторного зразка ФЕУ, наведена на рис. 2.

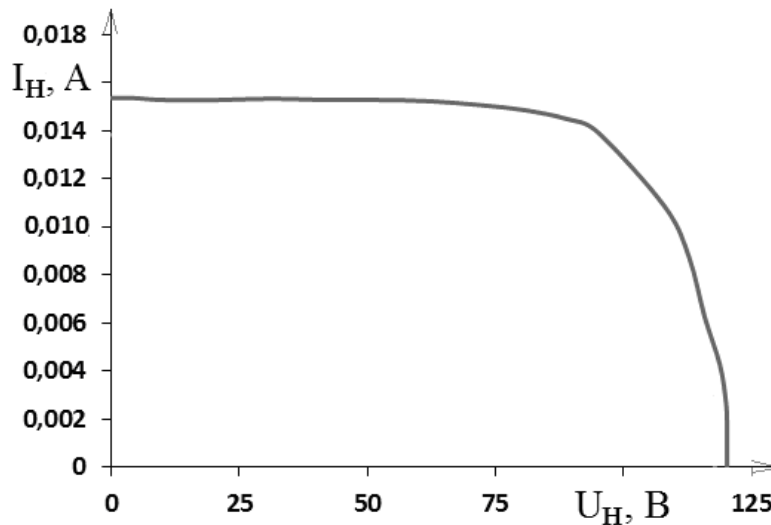


Рис. 2. Навантажувальна світлова вольт-амперна характеристика лабораторного зразка ФЕУ, отримана при натурних випробуваннях

Подальше аналітичне опрацювання виміряних навантажувальних світлових ВАХ дозволило визначити вихідні параметри сонячної батареї, які наведені в таблиці 1, а за ними встановити параметри концентрації випромінювання.

Таблиця 1
Вихідні параметри лабораторного зразка ФЕУ, визначені у ході натурних випробувань

Параметри	Величина
I_{K3} , мА	15,4
U_{XX} , В	120,2
FF , відн. од.	0,71
P_{HM} , Вт	1,31
η , %	2,29

2. Лабораторний зразок фасетного концентратора

Виходячи з заданої максимальної корисної електричної потужності $P_{\text{ФМНГ}}$ на рівні 500 Вт, на етапі розробки лабораторного зразка фотоенергетичної установки (ФЕУ) були проведені прогнозні розрахунки максимальних кількостей електричної і теплової енергії при оптимальній апертурі концентратора сонячного випромінювання, які отримуватиме користувач фотоенергетичної установки за умов:

- 1) використання висококонцентрованого сонячного випромінювання (ВКСВ), що отримується з прямого потоку природного сонячного випромінювання при безхмарності;
- 2) безперервної щоденної роботи з 6.00 до 18.00 годин київського часу при автоматичному позиціонуванні апертури дзеркального концентратора перпендикулярно до вказаного вище потоку.

Було розраховано [13] граничну річну кількість електричної енергії W_1 , яку може отримати користувач від ФЕУ, що має сонячну батарею на основі багатоперехідних кремнієвих ФЕП, яка функціонує в указаних вище умовах експлуатації, а саме: $P_{\text{ФМНГ}} = 500$ Вт, $\eta_1 = 26$ %, коефіцієнту відбиття дзеркал $r_K = 0,85$, що характерно для дзеркал, котрі промислово виготовляються, та при максимальній питомій потужності потоку прямого сонячного випромінювання 808 Вт/м², який надходить до горизонтальної поверхні в Україні (червень місяць, 11.00-13.00 київського часу) [14]. При використанні перелічених числових значень величин, розрахунок оптимальної площі апертури дзеркального концентратора дає $2,75$ м².

Розглядалися наступні варіанти компоновки концентратору:

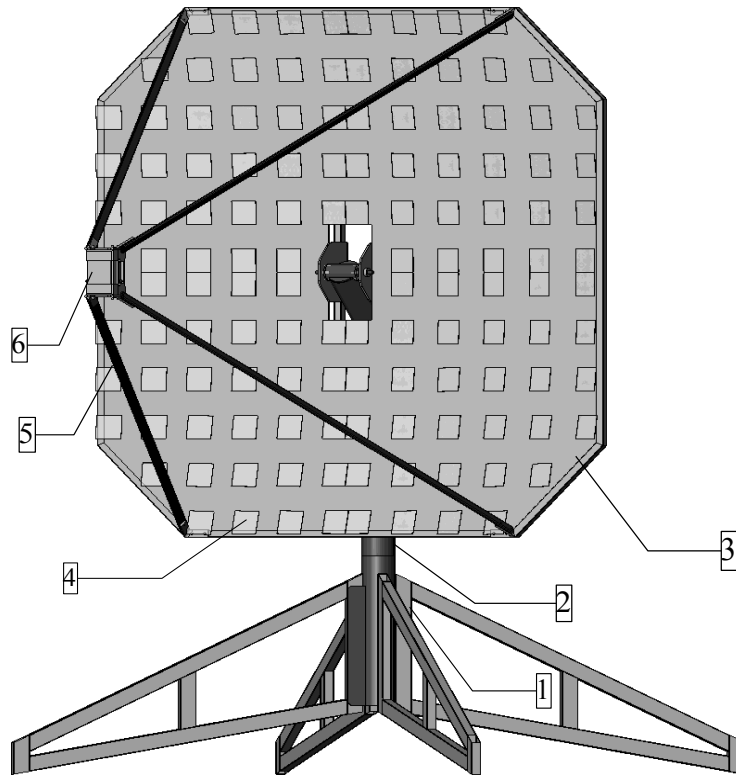
- азимутальна - одна з координатних осей установки вертикальна, інша горизонтальна, наведення концентратора на Сонце здійснюється одночасним переміщенням за двома координатами.
- полярна - координатні осі співпадають з астрономічною системою координат, наведення на Сонце також здійснюється за двома координатами - за однією здійснюється добовий рух, за другою - сезонний. З огляду на невисоку швидкість сезонного переміщення (15 кутових хвилин за добу) корекцію положення за цією координатою можна проводити раз на добу.

Приймаючи до уваги, що в реальних умовах розміщення установки забезпечити точність орієнтації установки на місцевості менше $3-5^\circ$ технічно складно, а компенсувати цю похибку доведеться додатковою роботою приводів системи орієнтації, за основу компоновки взята азимутальна компоновка як більш проста в реалізації. Проектний вигляд розробленого експериментального зразка концентратору показано на рис. 3.

Конструкція основи та поворотної частини виконується з тонкостінних зварних труб круглого ($\text{Ø}104$ мм) та прямокутного перерізу (50×30 мм). Осі обертання встановлені на підшипниках промислових серій: вертикальна - на 256907, горизонтальна - на 180902 виробництва заводу ХАРП.

Конструкція концентратора виконана з труб прямокутного перерізу (25x25 мм) і листового оцинкованого металу с елементами з OSB плити на яких розташовані елементи концентратору.

Кожен елемент концентратору (дзеркало) має регульоване гвинтове кріплення для юстировки, за допомогою якої здійснюється налаштування розташування елемента за двома осями.



1 - основа з 4 опорами, підшипниковими вузлами для вертикальної осі обертання, редуктором та азимутальним приводом; 2 - поворотна частина з механізмом нахилу, підшипниковими вузлами для горизонтальної осі обертання; 3 - несуча конструкція концентратора; 4 - елемент концентратора - орієнтоване дзеркало (показано приблизно 30% усіх дзеркал); 5 - стрижні підвісу фотоенергетичного блоку; 6 - фотоенергетичний блок

Рис. 3. Загальний вигляд експериментального зразка фотоенергетичної установки

Просторове розташування дзеркальних елементів схематично показано на рис. 4.

Орієнтування кожного елемента виконано наступним чином:

- вся поверхня концентратора розбита на чотири квадранта, а кожен квадрант на напівквадранти. Кожен з трьох квадрантів відтворює структуру першого квадранта.

- в кожному напівквadrанті відбиваючі елементи прив'язані ближчим до центру кутом до координатної сітки 75x75 мм, а стороною, ближчою до вертикальної (горизонтальної) сторони напівквadrанта, паралельно цій стороні. Нормалі до центру відбиваючих елементів перетинаються в точці, розташованій на подвійній фокусній відстані по осі концентратора. Тим самим плоский фронт сонячного випромінювання перетворюється у сферичний.

- такий спосіб фокусування забезпечує кривизну поля зображення у фокусі $\sim \pm 10$ мм та аберації $\sim \pm 4$ мм, що значно менше розміру дзеркального елемента (та фокусної плями).

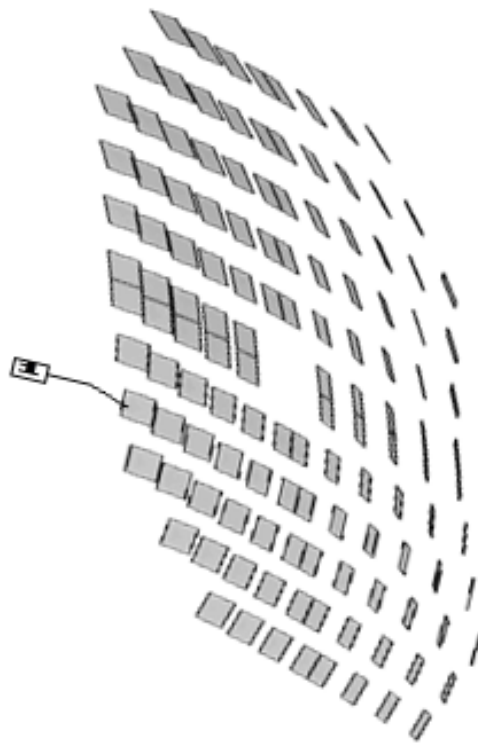


Рис. 4. Ескіз масиву дзеркальних елементів, що демонструє орієнтацію окремих елементів. (Показано 30 % всіх дзеркальних елементів)

Для виготовлення дзеркальних елементів було використано акриловий пластик із дзеркальним напиленням, який порівняно зі склом є гнучким та легко піддається різанню, зберігаючи достатню стійкість до механічних та атмосферних пошкоджень. Кріплення кожного дзеркала виготовлялось із оцинкованої жерсті за розробленим шаблоном, що забезпечило їх взаємозамінність. Окремо дзеркало та дзеркало, змонтоване на кріпленні показані на рис. 5.

При виготовленні концентратора монтаж кріплень із дзеркалами здійснювався саморізами на основу з OSB плит, які потім закріплювались на трубчастій основі концентратора.

Після виготовлення концентратор (рис. 6, а) було змонтовано на експериментальному зразку ФЕУ (рис. 6, б) та проведені його налаштування і наступна натурна апробація в умовах м. Харків.



Рис. 5. Дзеркальний елемент фасетного концентратора у регульованому кріпленні з тильної (а) та фронтальної (б) сторони

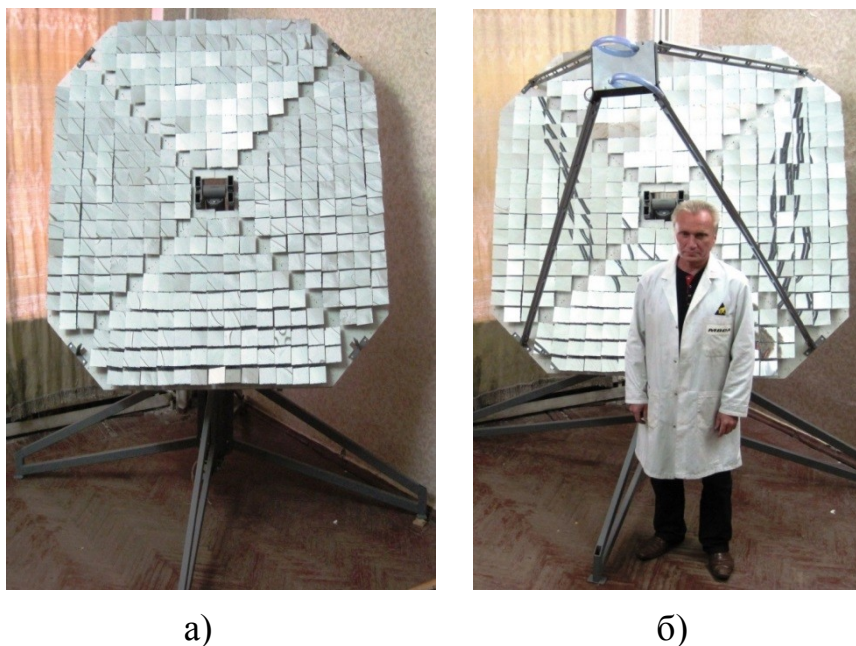
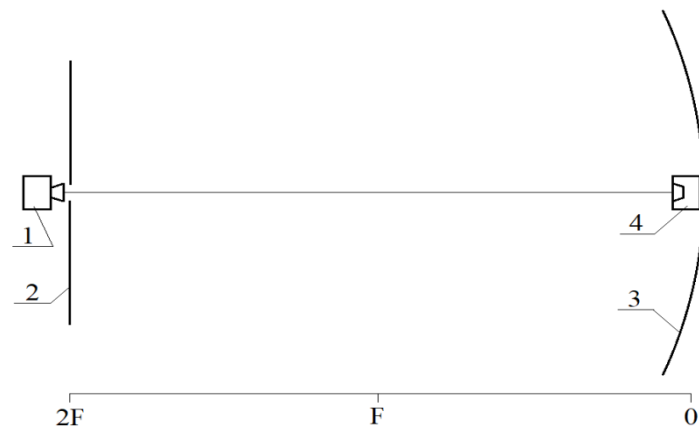


Рис. 6. Фасетний концентратор випромінювання (а) та експериментальний зразок ФЕУ (б)

Для налаштування елементів концентратора у точку фокуса було розроблено спеціальну методику, котра полягала в наступному. На подвійній фокальній відстані від концентратора встановлювався екран, крізь отвір у центрі якого здійснювалось опромінення концентратора точковим джерелом

світла (галогенна лампа). В процесі освітлення здійснювалось налаштування дзеркал концентратора за допомогою гвинтів на кріпленнях дзеркал до одержання фокальної плями з рівномірністю освітлення та розміром, достатніми для повного освітлення фотоприймального блоку. Реєстрація зображення фокальної плями за необхідності здійснювалась за допомогою цифрового фотоапарату, розміщеного у «мертвій» зоні в центрі концентратора. Як було встановлено, матриця фотоапарату не вносить змін та крайових аберацій у зареєстроване зображення по всій його площині, що дало змогу при аналітичній обробці фотознімків фокальної плями використовувати метод визначення потужності випромінення за кольоровою температурою ділянок фокальної плями.

Схема установки для налаштування концентратора та фотознімки фокальної плями наведені на рис. 7 та 8.



1 – точкове джерело світла; 2 – екран; 3 – площина концентратора;
4 – фотореєстратор

Рис. 7. Схематичне зображення оптичної частини установки для налаштування концентратора

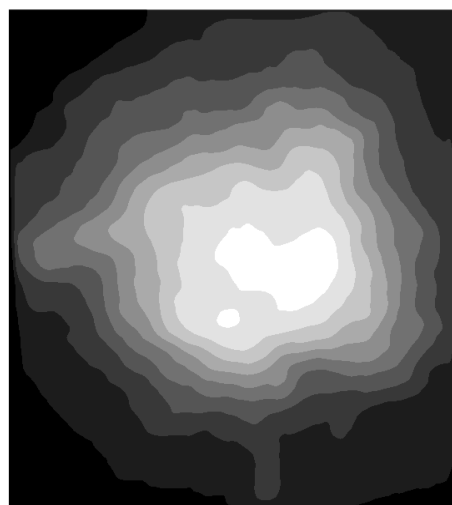


Рис. 8. Експериментальне зображення світлової плями, одержане в ході налаштування фасетного концентратора

Висновки. Проведено виготовлення макету фотоелектричної установки, в склад якої входить фасетний концентратор сонячної енергії та сонячна батарея на основі багатоперехідних кремнієвих ФЕП. В ході натурних випробувань було встановлено, що щільність струму короткого замикання застосованої сонячної батареї досягає 15,4 мА, напруга холостого ходу 120 мВ, фактор заповнення світлової ВАХ 0,71.

Зважаючи на позитивні результати тестування макету ФЕУ, був розроблений та виготовлений лабораторний зразок фасетного концентратора сонячного випромінювання площею 2,75 м², який теоретично забезпечує 400 кратну концентрацію сонячної енергії.

Розроблена і апробована установка для налаштування концентратора та експериментально визначений реальний розмір фокальної плями. Встановлено, що фокусування забезпечує кривизну поля зображення у фокусі $\sim \pm 10$ мм та аберації $\sim \pm 4$ мм, що значно менше розміру дзеркального елемента та фокусної плями.

Спрощена геометрична форма фасетних концентраторів обумовлює економію коштів на їх виготовлення, що, в свою чергу, знижує собівартість виробленої ними електричної енергії. Фасетний концентратор сонячної енергії та сонячна батарея на основі багатоперехідних кремнієвих ФЕП має більш високий коефіцієнт концентрації сонячної енергії порівняно з люмінесцентними сонячними концентраторами, що свідчить про їх енергоефективність у практичному застосуванні.

Список використаної літератури:

- 1.URL: <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tehnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky>.
- 2.Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), від 29.09.2021 № 1637 "Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств".
- 3.Luque A. and Andreev V. Concentrator Photovoltaics, – Springer, Heidelberg, Germany, 2007.
- 4.McConnell R., Kurtz S., and Symko-Davies M. Concentrator photovoltaic technologies // Refocus. – 2005. – Vol. 6, no. 4. – P. 35–39.
- 5.Andrews Rob Pollard, Andrew W., Pearce Joshua M. Photovoltaic system performance enhancement with non-tracking planar concentrators: Experimental results and BDRF based modeling // IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). – 2013. – pp. 0229–0234.
- 6.Sasaki K., Agui T., Nakaido K., Takahashi N., Onitsuka R., Takamoto T. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells // AIP Conference Proceedings. 2013. – Vol. 1556. – pp. 22–25.
- 7.Kasaeian A., Tabasi S., Ghaderian J., Yousefi H. A review on parabolic trough/Fresnel based photovoltaic thermal systems // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2018. – 91. – pp. 193–204. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.114.
- 8.Hornung T., Hornung T. Ph.D. Thesis. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE; Freiburg, Germany: Ein-und Mehrstufige Optische Konzentratoren für Photovoltaische Anwendungen. 2013.
- 9.Steiner M., Bösch A., Dilger A., Dimroth F., Dörsam T., Müller M., Hornung T., Siefer G., Wiesenfarth M., Bett A.W. FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four-junction solar cells // Prog. Photovolt. Res. Appl. – 2015. – 23. – pp. 1323–1329.
- 10.Awan A. B., Zubair M., Praveen R. P., Bhatti A. R. Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants // Sol. Energy. – 2019. – 183. pp. 551–565. doi: 10.1016/j.solener.2019.03.037.

11. Widyolar B. K., Abdelhamid M., Jiang L., Winston R., Yablonovitch E., Scranton G., Cygan D., Abbasi H., Kozlov A. Design, simulation and experimental characterization of a novel parabolic trough hybrid solar photovoltaic/thermal (PV/T) collector // *Renew. Energy*. – 2017. – Vol. 101. – pp. 1379–1389.

12. Slooff L. H., Bende E. E., Burgers A. R., Budel T., Pravettoni M., Kenny R. P., Dunlop E. D., Büchtemann A. A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency // *Phys. Status Solidi RRL Rapid Res. Lett.* – 2008. – 2. – pp. 257–259.

13. Зайцев Р. В. Застосування магнітного поля для підвищення ККД кристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів : дис. канд. техн. наук : 01.04.07 / Р. В. Зайцев; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т", Каф. "Фіз. матеріалознавство для електрон. та геліоенергетики". – Україна, Харків. - 2013.

14. Клімат України // За ред. В. М. Липінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. – К.: Вид-во Раєвського, 2003.

References:

1. Available at: <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky>.

2. Resolution of the National Commission, carrying out state regulation in the spheres of energy and communal services (HKPEKП), 29/09/2021 No 1637 "On the establishment of "green" tariffs for electric energy produced by private household facilities".

3. Luque A. and Andreev V. *Concentrator Photovoltaics*, Springer, Heidelberg, Germany, 2007.

4. McConnell R., Kurtz S., and Symko-Davies M. *Concentrator photovoltaic technologies*. Refocus. 2005. vol. 6, no. 4. P. 35–39.

5. Andrews Rob W., Pollard Andrew, Pearce Joshua M. Photovoltaic system performance enhancement with non-tracking planar concentrators: Experimental results and BDRF based modelling. *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2013. P. 0229–0234.

6. Sasaki K., Agui T., Nakaido K., Takahashi N., Onitsuka R., Takamoto T. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. *AIP Conference Proceedings*. 2013. Volume 1556. P. 22–25.

7. Kasaeian A., Tabasi S., Ghaderian J., Yousefi H. A review on parabolic trough/Fresnel based photovoltaic thermal systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. 91. P. 193–204. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.114.

8. Hornung T., Hornung T. Ph.D. Thesis. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE; Freiburg, Germany. *Ein- und Mehrstufige Optische Konzentratoren für Photovoltaische Anwendungen*. 2013.

9. Steiner M., Bösch A., Dilger A., Dimroth F., Dörsam T., Müller M., Hornung T., Siefert G., Wiesenfarth M., Bett A.W. FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four-junction solar cells. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2015. 23. P. 1323–1329.

10. Awan A. B., Zubair M., Praveen R. P., Bhatti A. R. Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants. *Sol. Energy*. 2019. 183. P. 551–565. doi: 10.1016/j.solener.2019.03.037.

11. Widyolar B. K., Abdelhamid M., Jiang L., Winston R., Yablonovitch E., Scranton G., Cygan D., Abbasi H., Kozlov A. Design, simulation and experimental characterization of a novel parabolic trough hybrid solar photovoltaic/thermal (PV/T) collector. *Renew. Energy*. 2017. 101. P. 1379–1389.

12. Slooff L. H., Bende E. E., Burgers A. R., Budel T., Pravettoni M., Kenny R. P., Dunlop E. D., Büchtemann A. A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency. *Phys. Status Solidi RRL Rapid Res. Lett.* 2008. 2. P. 257–259.

13. Zaitsev R. V. Application of a magnetic field to increase the efficiency of crystalline silicon photoelectric converters: thesis Ph.D. in technical science : 01.04.07 / R.V. Zaitsev; National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Physical Materials Science for Electronics and Solar Energy. Ukraine, Kharkiv. 2013.

14. *Climate of Ukraine*. Edited by V. M. Lipinsky, V. A. Dyachuka, V. M. Babichenko. K. Rajevsky, 2003.

Надійшла до редакції 20.04.2022