

М. В. КІРІЧЕНКО, В. О. НІКІТИН, Р. В. ЗАЙЦЕВ, Г. С. ХРИПУНОВ, А. В. МЕРІУЦ, Д. С. ШКОДА

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КОНЦЕНТРАТОРУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ АУТОНОМНИХ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Суттєве зростання потужності завдяки використанню концентраторів сонячного випромінювання підтверджує доцільність використання концентрованого випромінювання, а розробку концентраторів робить окремою задачею оптичної фізики. Особливої уваги заслуговують концентратори для отримання високого ступеню концентрації випромінювання, їх розробка потребує цілої низки інноваційних технічних рішень. В роботі проведені комплексні дослідження з оптимізації концентраторів сонячного випромінювання для використання у складі висококонцентраційних фотоенергетичних систем шляхом дослідження оптичних властивостей та особливостей деградації фасетного, вакуумного та сегментного концентраторів. За результатами натурної апробації експериментального зразка фасетного концентратора було виявлено, що процедура налаштування концентратора пов'язана із індивідуальним коректуванням положення кожного із 400 дзеркал, що є вкрай складно. А внаслідок недостатньої жорсткості конструкції концентратор потребує корекції в налаштуваннях після операцій по переміщенню чи збиранню-розбиранню експериментального зразка концентратора. Оскільки концентратор потребує регулярного очищення внаслідок природнього забруднення від пилу, дощу та інших природніх факторів дана операція пов'язана із механічним впливом на дзеркала, що призводить до порушення їх налаштувань. За результатами апробації концентратора вакуумного типу було встановлено, що такі концентратори є дуже чутливими до якості виготовлення основи оскільки внаслідок особливостей конструкції практично не піддаються налаштуванню після виготовлення також вони мали занадто великий розмір фокальної плями яка перевищує розмір теплоприймача. За результатами натурної апробації встановлено, що перспективним для використання у складі фотоенергетичних систем є конструкція концентратора сегментного типу, що являє собою круговий масив сегментів виготовлених з дзеркального матеріалу, інтегральний коефіцієнт відбиття якого сягає 95% та виготовлено експериментальний зразок площею 3,6 м², що дозволяє отримати фокусну пляму діаметром 120 мм з трапецієвидним розподілом освітленості із коефіцієнтом концентрації випромінювання на рівні 360 од.

Ключові слова: концентратор, сегмент, освітлення, фокус, конструкція.

M. V. KIRICHENKO, V. A. NIKITIN, R. V. ZAITSEV, G. S. KHRIPUNOV, A. V. MERIUTS, D. S. SHKODA

RESEARCH OF THE DESIGN OF A SOLAR RADIATION CONCENTRATOR FOR AUTONOMOUS PHOTOENERGY INSTALLATION

Significant increase in power due to the use of concentrators of solar radiation confirms the feasibility of using concentrated radiation, and the development of concentrators makes a separate task of optical physics. Hubs deserve special attention to obtain a high degree of radiation concentration, their development requires a number of innovative technical solutions. The complex researches on optimization of concentrators of solar radiation for use as a part of high-concentration photovoltaic systems by research of optical properties and features of degradation of facet, vacuum and segment concentrators are carried out in the work. According to the results of field testing of the experimental sample of the facet concentrator, it was found that the procedure of adjusting the concentrator is associated with individual adjustment of the position of each of the 400 mirrors, which is extremely difficult. And due to the insufficient rigidity of the structure, the concentrator needs to be adjusted in the settings after the operations of moving or assembling-disassembling the experimental sample of the concentrator. As the concentrator needs regular cleaning due to natural pollution from dust, rain and other natural factors, this operation is associated with mechanical impact on the mirrors, which leads to a violation of their settings. According to the results of testing the vacuum type concentrator, it was found that such concentrators are very sensitive to the quality of the base because due to design features cannot be adjusted after manufacture and they had too large a focal spot larger than the heat sink. According to the results of field testing, it is established that the design of a segment-type concentrator is promising for use in the high-concentration photovoltaic systems, which is a circular array of segments made of mirror material, the integrated reflection coefficient of which reaches 95% and made an experimental sample with an area of 3.6 m², which allows to obtain a focal spot with a diameter of 120 mm with a trapezoidal light distribution with a radiation concentration factor of 360 units.

Keywords: concentrator, segment, lighting, focus, design.

Вступ. Зважаючи на важливість впровадження відновлюваних джерел енергії у економік та енергетику України [1, 2] та за результатами попередніх розробок системи слабкої концентрації сонячного випромінювання для фотоенергетичного модуля на основі поширених кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) було запропоновано систему концентрації типу плаского фокліну [3, 4], яка дозволила отримати ступінь концентрації на рівні 2. Експериментальне дослідження модуля із зазначеним концентратором [5, 6] показало, що використання такого концентратора дозволило збільшити потужність модуля з 255 Вт до 441 Вт. Суттєве зростання потужності підтверджує доцільність використання концентрованого випромінювання, а розробку

концентраторів робить окремою задачею оптичної фізики. Особливої уваги заслуговують концентратори [7–9] для отримання високого ступеню концентрації випромінювання, їх розробка потребує цілої низки інноваційних технічних рішень.

На етапі розробки лабораторного зразка фотоенергетичної установки (ФЕУ) [10] було проведено, виходячи з заданої максимальної корисної електричної потужності РФМНГ на рівні 500 Вт, прогнозні розрахунки максимальних кількостей електричної і теплової енергії при оптимальній апертурі концентратора сонячного випромінювання, які отримуватиме користувач фотоенергетичної установки за умов:

- використання висококонцентрованого сонячного випромінювання (ВКСВ), що отримується з

© М. В. Кіріченко, В. О. Нікітин, Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунів, А. В. Меріуц, Д. С. Шкода, 2022

прямого потоку природного сонячного випромінювання при безхмарності;

- 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 [10] граничну річну кількість електричної енергії W_1 , яку може отримати користувач від ФЕУ, що має сонячну батарею на основі багатоперехідних кремнієвих ФЕП і функціонує в указаних вище умовах експлуатації. У випадку РФМНГ = 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) [11]. При використанні перелічених числових значень величин, розрахунок оптимальної площі апертури дзеркального концентратора за цією формулою дає 2,75 м². Були вперше означені базові параметри концентраторів, що мають використовуватися.

Для попереднього тестування концепції ФЕУ та з урахуванням попередніх досліджень [12–17] було виготовлено [18] лабораторний зразок концентратора випромінювання, який у зменшеному вигляді відтворював основні конструктивні ідеї та дозволяв провести їх практичну апробацію.

Мета статті. Провести комплексні дослідження з оптимізації концентраторів сонячного випромінювання для використання у складі висококонцентраційних фотоенергетичних систем шляхом розробки та дослідження оптичних властивостей та особливостей деградації фацетного, вакуумного та сегментного концентраторів.

Концентратор фацетного типу. На етапі виготовлення лабораторного зразка ФЕУ було вирішено виготовити дзеркальний концентратор у вигляді фацетної конструкції із великої кількості квадратних дзеркал, що розташовані під певним кутом та сфокусовані на теплоприймачі ФЕУ. Такий тип концентратора 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.

Зважаючи на позитивні результати тестування лабораторного зразка концентратора ФЕУ було вирішено перейти до виготовлення тестового зразка концентратора із раніше розрахованими параметрами (площею 2,75 м²). При цьому враховуючи легкість масштабування концентратора фацетного типу було вирішено використати концентратор саме такого типу.

Розглядалися наступні варіанти компоновки концентратора:

- 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, по другій – 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° 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 концентратора у складі фотоенергетичної установки показано на рис. 1.

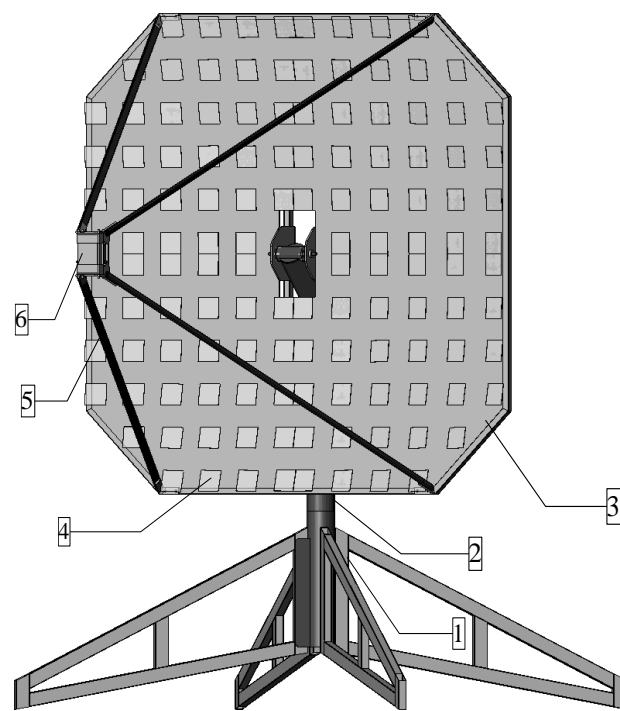


Рисунок 1 – Загальний вигляд експериментального зразка фотоенергетичної установки:

- 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

Конструкція основи та поворотної частини виконується з тонкостінних зварних труб круглого ($\varnothing 104$ мм) та прямокутного перерізу (50×30 мм). Осі обертання встановлені на підшипниках промислових

серій: вертикальна – на 256907, горизонтальна – на 180902 виробництва Харківського підшипникового заводу НАРП.

Конструкція концентратора виконана з труб прямокутного перерізу (25×25 мм) і листового оцинкованого металу з елементами з орієнтовано-стружкової плити, на яких розташовані елементи концентратора.

Кожен елемент концентратора (дзеркало) має регульоване гвинтове кріплення для юстування, за допомогою якого здійснюється налаштування розташування елемента за двома осями. Зовнішній вигляд дзеркального елемента із регульованим кріпленням показано на рис. 2.



а



б

Рисунок 2 – Дзеркальний елемент фацетного концентратора у регульованому кріпленні з тильної (а) та фронтальної (б) сторони

Орієнтування кожного елемента виконано наступним чином:

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

- в кожному напівквадранті відбиваючі елементи прив'язані ближчим до центру кутом до координатної сітки 75×75 мм, а стороною, ближчою до вертикальної (горизонтальної) сторони напівквадранта 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).

Для виготовлення дзеркальних елементів було використано акриловий пластик із дзеркальним напленням, який порівняно із 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.

Після виготовлення концентратор (рис. 3) було змонтовано на експериментальному зразку ФЕУ та проведені його налаштування та наступна натурна апробація в умовах м. Харків.



Рисунок 3 – Виготовлений фацетний концентратор випромінювання

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 із 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 випромінювання за кольоровою температурою ділянок фокальної плями. Схема установки для налаштування концентратора та фотознімки фокальної плями наведені на рис. 4 та 5, відповідно.

За результатами натурної апробації експериментального зразка фасетного концентратора було виявлено, що фасетному концентратору притаманні істотні недоліки, вплив яких був непомічений при тестуванні лабораторного зразку внаслідок проведеного при виготовленні ФЕУ масштабування усіх елементів концентратора. Зокрема було встановлено, що процедура налаштування концентратора пов'язана із індивідуальним коректуванням положення кожного із 400 дзеркал, що є вкрай складно.

А внаслідок недостатньої жорсткості конструкції концентратор потребує корекції в налаштуваннях після операцій по переміщенню чи збиранню-розбиранню експериментального зразка концентратора. Також в ході апробації встановлено, що концентратор потребує регулярного очищення внаслідок природнього забруднення від пилу, дощу та інших природніх факторів. Проте проведення очищення пов'язане із механічним впливом на дзеркала, що призводить до порушення їх налаштувань та викликає необхідність проведення складної та вельми витратної за часом процедури корегування їх положення.

Враховуючи означені обставини, при подальшому вдосконаленні експериментального зразка концентратора було проведено пошук більш оптимальної конструкції концентратора.

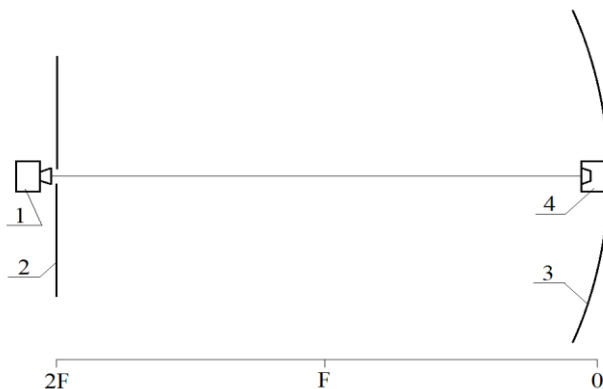


Рисунок 4 – Схематичне зображення оптичної частини установки для налаштування концентратора:
1 – точкове джерело світла; 2 – екран;
3 – площина концентратора; 4 – фотореєстратор.

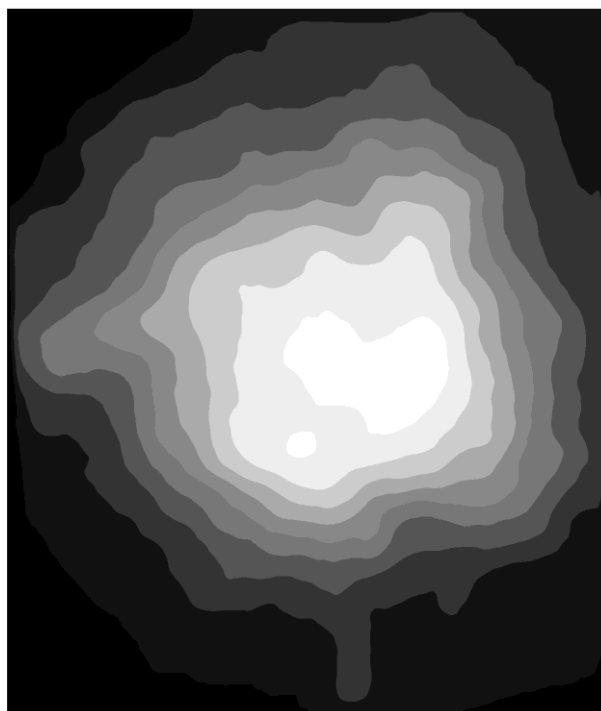


Рисунок 5 – Експериментальне зображення світлової плями, одержане в ході налаштування фасетного концентратора

Вакуумний концентратор сонячного випромінювання. В попередніх конструкціях ФЕУ було розроблено та широко застосовано звичайні параболічні концентратори сонячного випромінювання з формою параболоїду обертання, котрі протягом тривалого часу забезпечували виконання всіх необхідних умов для роботи ФЕУ, а саме створення необхідного рівня концентрації сонячного випромінювання та забезпечення точного фокусування світової плями на поверхні фотоприймального модуля ФЕУ із фотоелектричних перетворювачів. Поряд із цим, параболоїд це форма з двома радіусами кривизни, тому таку поверхню неможливо отримати без деформації матеріалу, що призводить або до втрати коефіцієнту відбиття наявного дзеркального покриття на його поверхні або

до необхідності створення дзеркального покриття на поверхні деформованого матеріалу. Створення дзеркального покриття на завершальному етапі виготовлення параболічного концентратора виключає можливість використання економічної дзеркальної фольги, що випускається серійно, і обумовлює необхідність використання операції механічної обробки або хімічного травлення деталей площею понад 3 м².

Враховуючи викладене було вирішено застосувати для виготовлення концентратора параболоїдної форми перспективну технологію вакуумного формування. Основа концентратора являє собою просторову конструкцію, що утворює форму параболоїду обертання та виготовляється з орієнтовано-стружкових плит чи пластику.

В якості дзеркального матеріалу використано гнучкий акриловий пластик із дзеркальним покриттям, який за допомогою клею було закріплено на верхній частині основи концентратора. Надання дзеркалу параболічної форми здійснювалось притисканням гнучкого дзеркала до ребр основи за рахунок створення у об'ємі концентратора вакууму. Для цього у основі було закріплено штуцер із зворотнім клапаном, крізь який проводилось відкачування повітря стандартним насосом типу 2НВР-5Д.

Виготовлений таким чином концентратор показано на рис. 6. Для комплектації експериментального зразка концентратора було виготовлено 4 таких концентратори діаметром 1 м кожен, що із запасом перекривало потрібну, згідно до розрахунків, площу.

Експериментальний зразок ФЕУ, оснащений концентраторами такого типу в період натурної апробації, показано на рис. 7.



Рисунок 6 – Зовнішній вигляд параболічного дзеркала діаметром 1 м із вакуумним притиском дзеркального матеріалу



Рисунок 7 – Експериментальний зразок ФЕУ, обладнаний концентратором вакуумного типу

Таке конструктивне рішення було прийняте з урахуванням того, що концентратор діаметром 3 м мав би занадто велику вагу для його переміщення в ході монтажу.

За результатами апробації ФЕУ з концентратором вакуумного типу було встановлено, що такі концентратори є дуже чутливими до якості виготовлення основи оскільки внаслідок особливостей конструкції практично не піддаються налаштуванню після виготовлення. В ході апробації було виявлено, що при виготовленні таких концентраторів не вдалося досягти необхідного рівня точності виготовлення, що знайшло своє відображення у занадто великому розмірі фокальної плями яка перевищує розмір теплоприймача. Це призводило до неефективного використання сонячної енергії та ризику пошкодження частин ФЕУ концентрованим випромінюванням. Крім того на недостатньому рівні виявилась герметичність конструкції концентратора, що призводило до втрати вакууму, а як наслідок до втрати оптичних властивостей.

Сегментний концентратор сонячного випромінювання. За результатами попереднього аналізу даних у [19–21] в основу сегментного концентратора випромінювання покладена модель концентратора (рис. 8) з максимальною ефективністю збирання світла за рахунок використання вигнутих за параболо-циліндричною формою світловідбиваючих сегментів концентратора у вигляді кругового масиву з довгою фокусною відстанню.

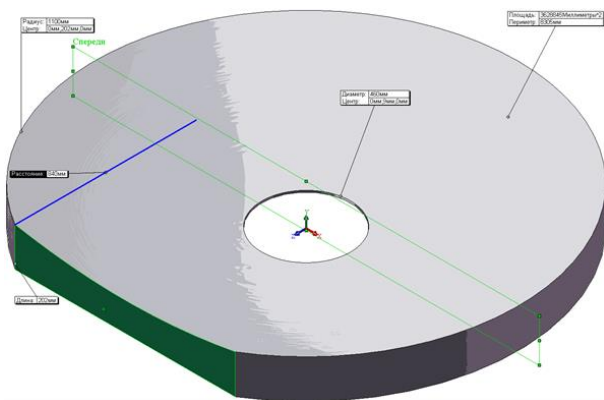


Рисунок 8 – Зображення моделі сегментного концентратора випромінювання з довгою фокусною відстанню

Концентратор включає основу концентратора та світловідбиваючі сегменти вигнуті за формою параболи з короткою фокусною відстанню. Основу концентратора виконано у вигляді кругового масиву профільованих ребер, котрі задають профіль вигину світловідбиваючих сегментів за параболо-циліндричною формою. Світловідбиваючі сегменти виконано у вигляді трапецієподібних сегментів параболічного циліндру з довгою фокусною відстанню та багатошаровим відбиваючим покриттям.

Зниження собівартості концентратора при забезпечення технічних характеристик для використання в конструкції ФЕУ (рівень концентрації, діаметр концентратора, кут надходження випромінювання, діаметр фокусної плями) досягається за рахунок заміни металевих масивних ребер і металевих параболічних сегментів на легкі ребра з полістиролу та змонтовані на їх поверхні сегменти параболо-циліндричної форми з тонкої металевої фольги у якості відбиваючого покриття.

Для практичної реалізації концентратора були обрані наступні параметри:

- концентратор має площу – 3,5 м²;
- фокусна відстань – 1,5 м;
- розмір фокальної плями – 0,121 м;
- геометричний ступінь концентрації – 360.

Концентратор являє собою круговий масив (вісь симетрії співпадає з головною оптичною віссю) сегментів у кількості 92 од., виготовлених з дзеркального матеріалу ALANOD® MIRO®, інтегральний коефіцієнт відбиття якого сягає 95 % (за стандартом DIN 5036), та розміщених на основі з орієнтовано-стружкової плити. Кількість сегментів обрано виходячи з розміру фокальної плями, геометричного ступеня концентрації й вірогідного відхилення фокуса окремого сегмента від заданого. Величина вірогідного відхилення фокуса окремого сегмента була визначена при створенні технологічної моделі для використаної технології монтажу й складає ~3,7 мм/сегмент.

Сегменти являють собою трапецієподібні сегменти параболічного циліндра. З метою спрощення розкрою матеріалу форма сегмента спрощена: бокові сторони замінено прямими. Така заміна можлива,

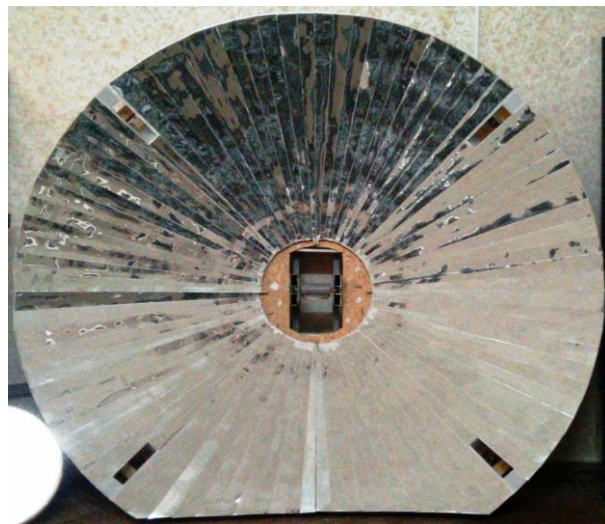
оскільки відхилення сторони від прямої усього 0,3 мм. Втрата корисної площі з-за стиків складає 0,0243 м², що менше ніж неточність суміщення двох пелюсток. Розроблений сегмент при довжині 1100 мм має вигин 202 мм, точність відхилення радіуса кривизни сегменту при радіусі 3000 мм складає 50 мм, точність суміщення сегментів 1 мм на довжині 1100 мм, точність суміщення фокусів окремих сегментів складає 5 мм.

Для зберігання параболо-циліндричної форми сегменти приклеювалися до профільованих ребер із полістиролу, що додатково забезпечувало жорсткість конструкції. Профільовані ребра було змонтовано на орієнтовано-стружковій плиті-основі з додатковими ребрами жорсткості та зварному металевому каркасі з елементами кріплення.

З розглянутих сегментів та основи виготовлено концентратор площею 3,6 м², апертура концентратора складає 3,7, подвійний кут апертури не перевищує 60°, що забезпечує низький коефіцієнт відбиття від поверхні фотоприймаючого модуля. Вигляд основи та концентратора наведено на рис. 9.



а



б

Рисунок 9 – Зображення основи концентратора у вигляді кругового масиву профільованих ребер (а) та світловідбиваючі сегменти у вигляді трапецієподібних сегментів параболічного циліндру з довгою фокусною відстанню (б)

Найбільш важливим випробуванням виготовленого концентратора було дослідження коефіцієнту концентрації випромінювання, який створюється ним в межах фокальної плями.

За результатами натурних випробувань під прямим сонячним випромінюванням наведені геометричні параметри концентратора дозволили отримати фокусну пляму діаметром 120 мм з трапецієвидним розподілом освітленості (рис. 10). Безпосереднє вимірювання інтегральної потужності випромінювання у фокальній плямі концентратора за допомогою еталонних приладів дозволило встановити, що коефіцієнт концентрації випромінювання становить близько 360.

Існує можливість зменшення у два рази площі фокальної плями і, як наслідок, збільшення вдвічі концентрації сонячного випромінювання, при відповідному зменшенні наведених вище відхилень у 2 рази.

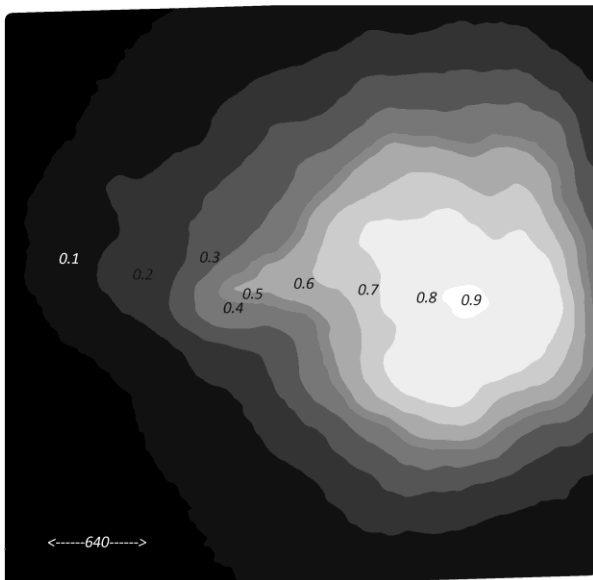


Рисунок 10 – Експериментальне зображення світлової плями, одержане в ході налаштування сегментного концентратора

За результатами апробації, сегментний концентратор виявився найбільш стабільним за своїми оптичними параметрами з плином часу та досить простим у виготовленні. Виходячи з наведеного, для подальшої розробки ФЕУ з високою концентрацією сонячного випромінювання було використано концентратор саме такого типу.

Висновки. Проведені комплексні дослідження з оптимізації концентраторів сонячного випромінювання для використання у складі висококонцентраційних фотоенергетичних систем. Для цього створено та проведено дослідження оптичних властивостей та особливостей деградації фасетного, вакуумного та сегментного концентраторів.

За результатами натурної апробації встановлено, що концентратори фасетного типу та із вакуумним принципом формування відбиваючої поверхні не

відповідають вимогам поставленим при виготовленні ФЕУ, зокрема концентратор фасетного типу є занадто складним у виготовленні і налаштуванні не забезпечуючи при цьому одержання заданої форми фокальної плями, а концентратору вакуумного типу притаманна низька стабільність коефіцієнту відбиття у оптичному та інфрачервоному діапазонах та фокусної відстані, пов'язана із неможливістю забезпечити абсолютну герметичність об'єму корпусу концентратора.

Розроблено перспективну для використання у складі ФЕУ конструкцію концентратора сегментного типу, що являє собою круговий масив сегментів виготовлених з дзеркального матеріалу, інтегральний коефіцієнт відбиття якого сягає 95 % (за стандартом DIN 5036) та виготовлено експериментальний зразок площею 3,6 м², апертура концентратора складає 3,7, подвійний кут апертури не перевищує 60°, що забезпечує низький коефіцієнт відбиття від поверхні фотоприймаючого модуля та проведено його натурну апробацію у складі експериментального зразка ФЕУ. За результатами натурної апробації виготовленого сегментного концентратора встановлено, що досягнуті геометричні параметри дозволяють отримати фокусну пляму діаметром 120 мм з трапецієвидним розподілом освітленості із коефіцієнтом концентрації випромінювання на рівні 360 од.

Список літератури

1. Когут У. І., Романишин С. Б., Садовник С. С. Альтернативна енергетика в Україні: стан, фінансово-інституційне забезпечення та перспективи розвитку. *Науковий вісник НЛТУ України. Серія економічна*. 2017. Вип. 27, № 2. С. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.15421/40270201>.
2. Кудря С. О. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні. *Вісник національної академії наук України*. 2015. № 12. С. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/vism2015.12.100>.
3. Renno C. Optimization of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system used for a domestic application. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 67, no. 1–2. P. 396–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.026>.
4. Mrocza J., Plachta K. Modelling and simulation of Λ -ridge concentrator system using commercial. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2014. P. 145–149. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj12.265>.
5. Зайцев П. В., Кіріченко М. В., Сокол Є. І., Хрипунов Г. С., Прокопенко Д. С. Підвищення ефективності фотоелектричної станції на основі гібридних фотоенергетичних модулів. *Електротехніка та електромеханіка. Спеціальний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2016. № 4(1). С. 25–30.
6. Кіріченко М. В., Зайцев П. В., Сокол Є. І., Хрипунов Г. С., Прокопенко Д. С. Концепція гібридного фотоенергетичного модуля у складі високоєфективної фотоелектричної станції. *Електротехніка та електромеханіка. Спеціальний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2016. № 4(1). С. 37–42.
7. Ramos A., Chatzopoulou M. A., Guarracino I., Freeman J., Markides C. N. Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 150. P. 838–850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.024>.
8. Herrando M., Markides C. N. Hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heat and power provision in the UK: Techno-economic

- considerations. *Applied Energy*. 2016. Vol. 161. P. 512–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.025>.
9. Sater B. L., Sater N. D. High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities. *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002*, New Orleans, LA, USA, 19–24 May 2002. P. 1019–1022. DOI: <https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190778>.
 10. Сокол Е. И., Копач В. Р., Зайцев Р. В., Кириченко М. В., Мериуц А. В., Хрипунов Г. С. Физико-технические особенности и предельные практические возможности фотоэнергетического модуля нового поколения на территории Украины. *Відновлювана енергетика*. 2011. № 2(25). С. 18–28.
 11. Клімат України / ред.: В. М. Ліпінський, В. А. Дячук, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєв., 2003. 342 с.
 12. Khan F., Singh S. N., Husain M. Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010. Vol. 94, no. 9. P. 1473–1476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.03.018>.
 13. Savin H., Repo P., von Gastrow G., Ortega P., Calle E., Garin M., Alcobilla R. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency. *Nature Nanotechnology*. 2015. Vol. 10, no. 7. P. 624–628. DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.89>.
 14. Lee K., Lee J., Mazor B. A., Forrest S. R. Transforming the cost of solar-to-electrical energy conversion: Integrating thin-film GaAs solar cells with non-tracking mini-concentrators. *Light: Science & Applications*. 2015. Vol. 4, no. 5. e288. DOI: <https://doi.org/10.1038/lsa.2015.61>.
 15. Dimroth F., Grave M., Beutel P. et al. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2014. Vol. 22, no. 3. P. 277–282. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.2475>.
 16. Pozner R., Segev G., Sarfaty R., Kribus A., Rosenwaks Y. Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2011. Vol. 20, no. 2. P. 197–208. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.1118>.
 17. Braun A., Katz E. A., Ekins-Daukes N. J., Gordon J. M. Multiple-bandgap vertical-junction architectures for ultra-efficient concentrator solar cells. *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5, no. 9. P. 8523. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2ee22167e>.
 18. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Khrypunov G. S. Stand alone thermo-photovoltaic power plant with solar radiation concentrator. *IV Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доп., м. Кременчук, Україна, 26–28 трав. 2016. С. 83–85.*
 19. Andreev V. M., Grilikhes V. A., Romyantev V. D. Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. Chichester: John Wiley, 1997. 294 p.
 20. Gray J. L. The Physics of the solar cell. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2nd ed. New York, 2011. P. 82–129.
 21. Давидюк Н. Ю., Ионова Е. А., Малевский Д. А., Румянцев В. Д., Садчиков Н. А. Исследование влияния вторичных линзовых концентраторов на выходные параметры солнечных модулей с фотоэлектрическими преобразователями каскадного типа. *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80, № 7. С. 90–95.
- ### References
1. U. I. Kohut, S. B. Romanyshyn, and S. S. Sadovnyk, “Alternative energy in Ukraine: State, financial and institutional support and development prospects,” *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 27, no. 2, pp. 11–16, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.15421/40270201>. (in Ukrainian)
 2. S. O. Kudria, “State and perspectives of renewable energy development in Ukraine,” *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*, no. 12, pp. 19–26, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.15407/vishn2015.12.100>. (in Ukrainian)
 3. C. Renno, “Optimization of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system used for a domestic application,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, no. 1–2, pp. 396–408, Jun. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.026>.
 4. J. Mroczka and K. Plachta, “Modelling and simulation of Λ -ridge concentrator system using commercial,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, pp. 145–149, 2014, doi: <https://doi.org/10.24084/repqj12.265>.
 5. R. V. Zaitsev, M. V. Kyrychenko, E. I. Sokol, G. S. Khrypunov, and D. S. Prokopenko, “Improving efficiency photovoltaic station based on hybrid photoenergy modules,” *Electrical Engineering & Electromechanics. Special Issue “Power Electronics and Energy Efficiency”*, no. 4(1), pp. 25–30, 2016. (in Ukrainian)
 6. M. V. Kyrychenko, R. V. Zaitsev, E. I. Sokol, G. S. Khrypunov, and D. S. Prokopenko, “Conception of hybrid photoenergy module for the high-efficiency photovoltaic energy station,” *Electrical Engineering & Electromechanics. Special Issue “Power Electronics and Energy Efficiency”*, no. 4(1), pp. 37–42, 2016. (in Ukrainian)
 7. A. Ramos, M. A. Chatzopoulou, I. Guarracino, J. Freeman, and C. N. Markides, “Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment,” *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 838–850, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.024>.
 8. M. Herrando and C. N. Markides, “Hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heat and power provision in the UK: Techno-economic considerations,” *Applied Energy*, vol. 161, pp. 512–532, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.025>.
 9. B. L. Sater and N. D. Sater, “High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities,” *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002*, New Orleans, LA, USA, May 19–24, 2002, pp. 1019–1022, doi: <https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190778>.
 10. E. I. Sokol, V. R. Kopach, R. V. Zaitsev, M. V. Kirichenko, A. V. Meriuts, and G. S. Khrypunov, “Fizikotekhnicheskiye osobennosti i predel'nyye prakticheskiye vozmozhnosti fotoenergeticheskogo modulya novogo pokoleniya na territorii Ukrainy” [Physicotechnical features and ultimate practical capabilities of a new generation photovoltaic module in Ukraine], *Vidnovlyuvana Energetika*, no. 2(25), pp. 18–28, 2011. (in Russian)
 11. V. M. Lipinskyi, V. A. Diachuk, and V. M. Babichenko, Eds., *Klimat Ukrainy [Climate of Ukraine]*. Kyiv: Vydavnytstvo Raievskoho, 2003.
 12. F. Khan, S. N. Singh, and M. Husain, “Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 9, pp. 1473–1476, Sep. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.03.018>.
 13. H. Savin, P. Repo, G. von Gastrow et al., “Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency,” *Nature Nanotechnology*, vol. 10, no. 7, pp. 624–628, May. 2015, doi: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.89>.
 14. K. Lee, J. Lee, B. A. Mazor, and S. R. Forrest, “Transforming the cost of solar-to-electrical energy conversion: Integrating thin-film GaAs solar cells with non-tracking mini-concentrators,” *Light: Science & Applications*, vol. 4, no. 5, May. 2015, Art. no. e288, doi: <https://doi.org/10.1038/lsa.2015.61>.
 15. F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel et al., “Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, no. 3, pp. 277–282, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.2475>.
 16. R. Pozner, G. Segev, R. Sarfaty, A. Kribus, and Y. Rosenwaks, “Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 20, no. 2, pp. 197–208, May. 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.1118>.
 17. A. Braun, A. Vossier, E. A. Katz, N. J. Ekins-Daukes, and J. M. Gordon, “Multiple-bandgap vertical-junction architectures for ultra-efficient concentrator solar cells,” *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 9, p. 8523, 2012, doi: <https://doi.org/10.1039/c2ee22167e>.
 18. M. V. Kirichenko, R. V. Zaitsev, and G. S. Khrypunov, “Stand alone thermo-photovoltaic power plant with solar radiation concentrator,” *IV International Scientific and Practical Conference “Semiconductor Materials, Information Technologies and Photovoltaics”*, Kremenchuk, Ukraine, Ukraine, May 26–28, 2016. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2016, pp. 83–85.
 19. V. M. Andreev, V. A. Grilikhes, and V. D. Romyantev, *Photovoltaic conversion of concentrated sunlight*. Chichester: John Wiley, 1997.

20. J. L. Gray, "The physics of the solar cell," in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2011, pp. 82–129.
21. N. Y. Davidiuk, E. A. Ionova, D. A. Malevskij, V. D. Romyancev, and N. A. Sadchikov, "Issledovanie vliyaniya vtorichnyh linzovyh koncentratorov na vyhodnye parametry solnechnykh modulej s fotoelektricheskimi preobrazovatelnyami kaskadnogo tipa [Investigation of the effect of secondary lens hubs on the output parameters of cascade-type photovoltaic converter solar modules]," *Technical Physics*, vol. 80, no. 7, pp. 90–95, 2010. (in Russian)

Надійшло (received) 18.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Кіріченко Михайло Валерійович (Mykhailo Kirichenko) – кандидат технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4847-506X>; e-mail: kirichenko.mv@gmail.com.

Нікітін Віктор Олексійович (Viktor Nikitin) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри мікро та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2646-5210>; e-mail: mesc@khp.edu.ua.

Зайцев Роман Валентинович (Roman Zaitsev) – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри мікро та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-8452>; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

Хрипунов Геннадій Семенович (Gennadiy Khrypunov) – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», проректор з науково-педагогічної роботи; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: khrip@ukr.net.

Меріуц Андрій Володимирович (Andriy Meriuts) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізики металів та напівпровідників; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4176-2530>; e-mail: meriuts@ukr.net.

Шкода Дмитро Сергійович (Dmytro Shkoda) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри мікро та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-9755>; e-mail: mesc@khp.edu.ua.