

УДК 515.2

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОСКОГО ФОКУСАТОРА ІЗ ФРАГМЕНТІВ СІМ'Ї СПІВФОКУСНИХ ПАРАБОЛ

Шевченко С.М.

Національний університет цивільного захисту України (м. Харків)

Розглянуто комп'ютерну графічну модель розрахунку плоского параболічного фокусатора, нормальний переріз якого складається з фрагментів сім'ї співфокусних парабол.

Ключові слова: плоский фокусатор, параболічний фокусатор, концентратори сонця, PlanarSun і Sun Simba

Постановка проблеми. Добре відомо доцільність застосування концентраторів сонячного випромінювання [1]. Французький вчений Бюффон у середині 18 століття вперше перевінив на практиці ідею концентрації сонячної енергії. До останнього часу дзеркальні системи, які концентрують сонячну енергію, мало чим принципово відрізняються від конструкції Бюффона. Вони складаються з набору окремих дзеркал (або одного великого дзеркала), що перенаправляють «сонячний зайчик» в одну спільну точку. Значну популярність останнім часом одержали концентратори у вигляді лінз Френеля, які мають вигляд квазіплоскої рельєфної структури із прозорих легких пластикових матеріалів. Функціонально лінза Френеля розв'язує задачу фокусування - аналогічно традиційним скляним лінзам. Квазіплоскі рельєфні структури концентраторів мають плоску просторову форму, яка у багатьох випадках є набагато технологічною порівняно з параболічною формою. Відомі два різновиди плоских концентраторів сонця - PlanarSun і Sun Simba [2, 3]. Але їх реалізація на практиці пов'язана зі значними витратами, які не дозволяють їх широке використання у побуті. Тому доцільними будуть розробки плоских концентраторів, орієнтовані на повсякденне використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі два типи «сонячних кристалів» для високоефективного перетворення світлової енергії в електричну (з ККД більше 15%). А саме: монокристалічний кремній (mono-Si) та гетероструктури на основі арсеніду галію (GaAs). При цьому економіка питання тісно пов'язана з питомою вартістю осередків «сонячних кристалів». Питома вартість осередку арсеніду галію перебуває на рівні 3-15 \$/см², а кристалічного кремнію 0,01-0,02 \$/см². Тобто питома вартість арсеніду галію на одиницю площі приблизно на три порядки більше. Тобто що для досягнення ціни сонячної панелі на основі арсеніду галію,

порівнянню зі звичайною сонячною батареєю, його корисну площу можна зменшити на п'ять порядків. Тому доцільно використовувати оптичні концентратори.

Створення «сонячних кристалів» дозволило розробити плоский концентратор мінімальної товщини, або планарний концентратор. При цьому ступінь концентрації досяглася достатньою для серйозного економічного ефекту. Елементарний осередок сонячної батареї PlanarSun із планарним концентратором являє собою пластину оргскла (скла) зі спеціальною поверхневою й внутрішньою структурою з прикріпленими до торців фотоелектричними перетворювачами (рис. 1).

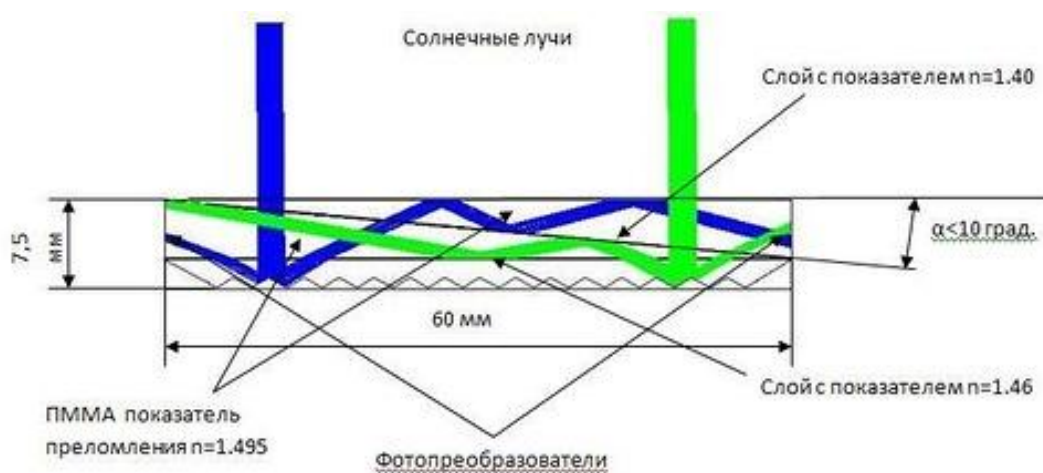


Рис. 1. Схема концентратора PlanarSun (запозичене з роботи [2])

Падаючі поблизу нормалі сонячні промені з усією плоскої поверхні планарного концентратора направляються у два протилежних торці, за рахунок однократного відбиття від задньої поверхні й багаторазових повних внутрішніх відбиттів від зовнішньої й внутрішньої поверхні. У безпосередній близькості від вивідного випромінювання торців планарного концентратора розташовані фотоелектричні перетворювачі, які мають геометричний розмір, що відповідає торцю. Дана конструкція планарного концентратора дозволяє створювати пристрої з товщиною в 10-20 разів менше його ширини поверхні, з якої збирається сонячна енергія.

Більш цікавим і перспективним вважають проект плоского сонячного концентратора Sun Simba (у який, до речі, вкладено десятки мільйонів доларів [3]) запропонований компанією Morgan Solar. Розроблено декілька варіантів фокусування сонячного випромінювання з використанням 1-3 асферичних поверхонь. Найпростіша з них наочно представлена на рис. 2, яка складається з асферичних бороздок, розташованих по колу. Принцип дії концентратора Sun Simba полягає у наступному.

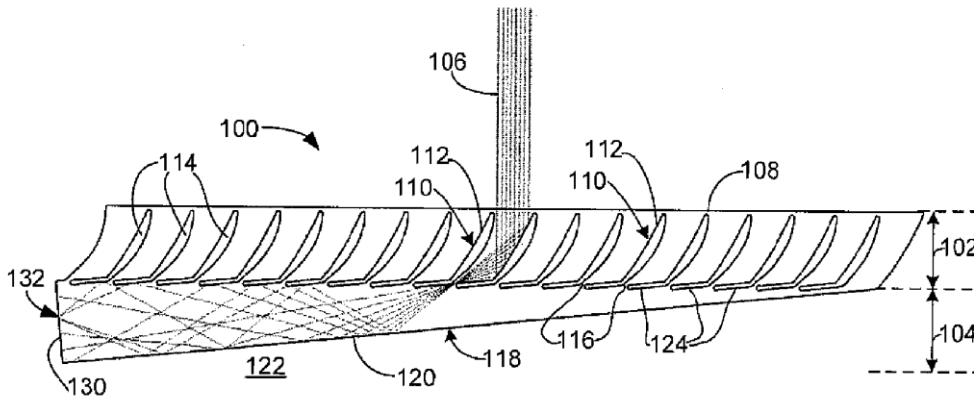


Рис. 2. Схема концентратора Sun Simba (запозичене з роботи [3])

Бороздки фокусують паралельно падаюче випромінювання у невеликі «проміжки» (рис. 2). Далі випромінювання попадає в клин, з якого не може вибратися, і поширюється до «сонячного кристалу».

У порівнянні з PlanarSun система Sun Simba забезпечує більшу концентрацію випромінювання - практично в точку, а не у дві протилежні площини. З іншого боку, в PlanarSun більше кутове поле за однієї координати, що полегшує слідкування за напрямком сонця. Але головна їх перевага полягає у плоскій геометричній формі, яка у багатьох випадках впровадження є набагато технологічно зручнішою порівняно з параболічною формою.

Формулювання цілей статті. Розробити комп'ютерну графічну модель розрахунку плоского концентратора у вигляді параболічного фокусатора, нормальний переріз якого складається з фрагментів сім'ї співфокусних парабол.

Основна частина. Розглянемо формування складової поверхні оптичного елемента, що фокусує випромінювання з плоским фронтом у точку. Нехай на відбивальну поверхню падає пучок паралельних променів, направлених в зворотному напрямку відносно осі Oz [4]. Необхідно це випромінювання сфокусувати у точку з координатами (0,0,f), причому, фронт відбитої хвилі повинний бути сферичним. В цьому випадку ейконал відбитого поля можна виразити формулою [5]:

$$\Phi_1(x, y, z) = -\sqrt{x^2 + y^2 + (z - f)^2}.$$

Позначимо через λ довжину хвилі випромінювання і запишемо рівняння еквівалентних фокусуєчих поверхонь обертаня у вигляді:

$$z - \sqrt{x^2 + y^2 + (z - f)^2} = C + m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Розв'яжемо рівняння (1) відносно z як функції x, y; тоді одержуємо:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{2(f - C - m\lambda)} + \frac{f + C + m\lambda}{2}. \quad (2)$$

Всі поверхні, що описуються виразами (2), являють собою параболоїди обертання з фокусами в точці $(0,0,f)$. Далі нас будуть цікавити лише фрагменти поверхні, які розташовані поблизу площини $z = 0$. Тому покладемо $C = -f$ і проведемо дослідження сім'ї поверхонь

$$z_m(x, y) = \frac{1}{2} \left[\frac{x^2 + y^2}{2\left(f - \frac{m\lambda}{2}\right)} + m\lambda \right].$$

Кожна з цих поверхонь (на рис. 3 показано їх центральний перетин) створює ідентичне хвильове поле, що фокусується в точці $(0,0,f)$, де розташовано осередок «сонячного кристалу». Таке ж хвильове поле буде створювати і кускова неперервна дзеркальна поверхня, що складена з фрагментів поверхонь, які розташовані поблизу площини $z = 0$ (на рис. 3 перетин цієї поверхні показано товстою лінією). Але висота гребенів складової поверхні є неоднакова. Коли $\frac{m\lambda}{2} \ll f$, то вирази для поверхонь спрощуються

$$z_m(x, y) \approx \frac{1}{2} \left[\frac{x^2 + y^2}{2f} + m\lambda \right].$$

І тоді рівняння складової поверхні можна записати у вигляді:

$$z(x, y) = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{x^2 + y^2}{2f\lambda} \right]. \quad (3)$$

В цьому випадку висота кожного гребеня рельєфу буде однакою і складатиме половину довжини хвилі λ .

На практиці фазовий оптичний елемент, який діє на відбиття, конструктивно виготовляють у вигляді плоского параболічного фокусатора. Переріз січною центральною площиною його активної поверхні показано на рис. 4. Конструктивно фокусатору можна надати (рис. 5, а,б) прямокутну форму (з фокальною прямою), або форму поверхні обертання (з точковим фокусом). Такі форми порівняно легко виготовити на фрезерних чи токарних станках.

Для енергетичного розрахунку плоского параболічного фокусатора необхідно визначити параметр p параболі з рівнянням

$$y = f + \frac{x^2}{2p} - \frac{p}{2}, \quad \text{йому оптично еквівалентної (тут } f \text{ - фокусна}$$

відстань) [6]. В роботі створено відповідне програмне забезпечення у середовищі математичного процесора Maple.

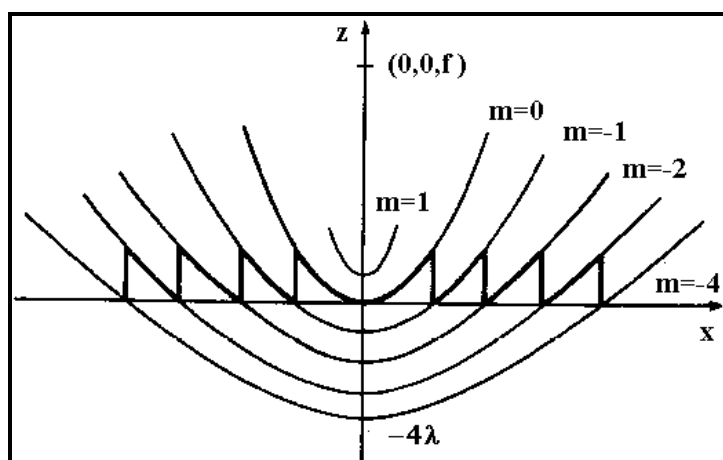


Рис. 3. Схема утворення плоского оптичного елемента із сім'ї співфокусних парабол

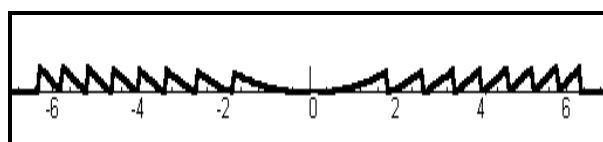


Рис. 4. Нормальний переріз плоского фокусатора

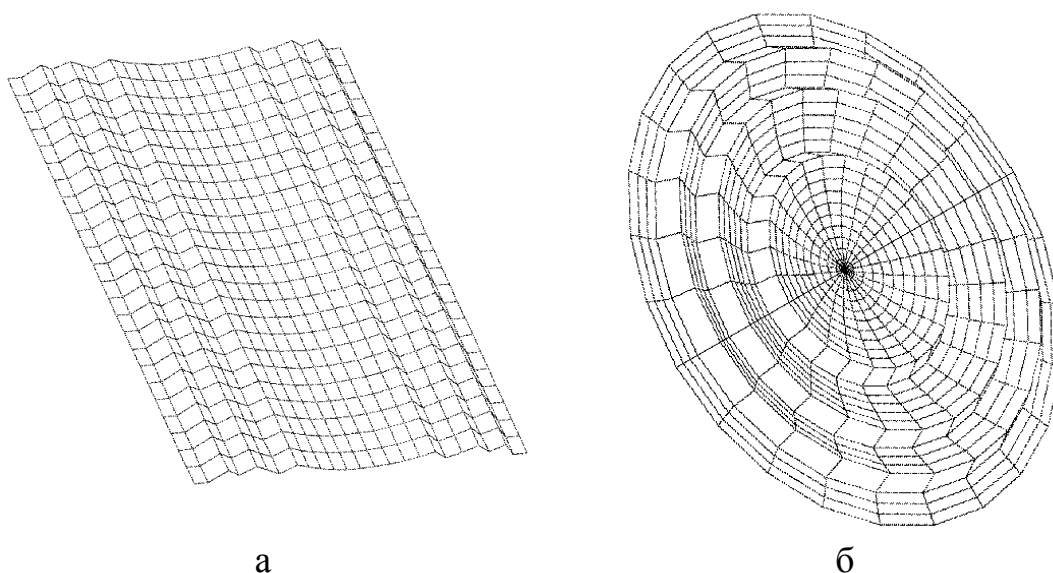


Рис. 5. Схеми конструкцій плоского параболічного фокусатора

Висновки. Розроблена графічна модель розрахунку плоского концентратора дозволяє описати параболічний фокусатор з перерізом у вигляді фрагментів сім'ї співфокусних парабол. Їх реалізація на практиці не пов'язана зі значними витратами.

Література

1. Бавин М. Р. Разработка и исследование преломляющих фотоэлектрических установок: дисс. ... канд.техн.наук: 05.14.08 Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии. – Москва: НИУ МЭИ. – 2014. – 139 с.
2. Солнечная батарея PlanarSun [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sohabr.net/post/195528/>.
3. Солнечный концентратор Sun Simba [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sohabr.net/post/200140/>.
4. Гончарский А.В. Математические модели в задачах синтеза плоских оптических элементов / А.В. Гончарский // Компьютерная оптика. – М.: МЦНТИ, 1987. – С.19–31.
5. Гончарский А.В. Введение в компьютерную оптику / А.В. Гончарский, В.В. Попов, В.В. Степанов. – М.: МГУ, 1991. – 312 с.
6. Серета Н.І. Геометричне моделювання перебігу променів в еліптичних та параболічних відбивальних системах: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня к.т.н.: 05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка. – Київ: КНУБА, 1999. – 18 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО ФОКУСАТОРА ИЗ ФРАГМЕНТОВ СЕМЕЙСТВА СОФОКУСНЫХ ПАРАБОЛ

Шевченко С.Н.

Рассмотрено компьютерную графическую модель расчета плоского параболического фокусатора, нормальное сечение которого состоит из фрагментов семейства софокусных парабол.

Ключевые слова: плоский фокусатор, параболический фокусатор, концентраторы солнца, PlanarSun и Sun Simba.

SIMULATION OF PLANE FOCUSER FROM FRAGMENTS OF THE FAMILY OF SOFOCUS PARABOLS

Shevchenko S.

A computer graphic model for calculating a plane parabolic focuser is considered, the normal section of which consists of fragments of the family of confocal parabolas.

Keywords: flat focuser, parabolic focuser, sun concentrators, PlanarSun and Sun Simba.