

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ПЛОСКИМ ДЗЕРКАЛЬНИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ

*В. Гальчак, к. т. н., С. Сиротюк, к. т. н., А. Татомир, к. т. н.,
І. Кузницький*

Львівський національний аграрний університет

Постановка проблеми. Для підвищення продуктивності фотоелектричних панелей часто пропонують використовувати плоскі дзеркальні концентратори. Але в багатьох випадках ефективність реалізованих інсталяцій не збігається з очікуваннями. Причина найчастіше полягає в необґрунтованому виборі розробниками конструктивних рішень, які не враховують особливості генерування фотоелектрики при режимах освітлення, відмінних від природного сонячного потоку. Тому доцільно розглянути характер впливу окремих факторів на поточну потужність сонячної панелі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації [1] наведено результати порівняльного дослідження енергетичних характеристик фотоелектричного модуля ISM-50 номінальною потужністю 50 Вт за двох режимів освітлення – природним потоком сонячної енергії та посиленням плоским двограним дзеркальним фокусином. Але там відсутні кількісні характеристики світлових потоків, лінійних і кутових співвідношень елементів оптичної схеми. Натомість у публікаціях [2; 3] наведено геометричні побудови та математичні співвідношення для лише систем з багаторазовим відбиванням і високим ступенем концентрації, які використовують в обмеженому числі інсталяцій, тоді як пересічний користувач найчастіше використовує одно- або дводзеркальні системи з малим ступенем концентрації.

Постановка завдання. За безхмарної погоди основний вхідний потік складають прямі сонячні промені, а інтенсивність розсіяних небосхилом і відбитих оточенням – на порядок менша. Тому параметри концентратора розраховують тільки відносно прямих сонячних променів, а внесок дифузійної складової у потужність сонячної панелі можна виявити лише експериментально. Загальні принципи розрахунку дзеркальних концентраторів, викладені у кластичній літературі [4 – 7], переважно орієнтовані на реалізацію максимального ступеня концентрації і майже не приділяють уваги додатковому послабленню скісних променів на шляху до світлочутливого покриття фотоелектричної панелі. Відтак метою дослідження є обґрунтування оптимальних геометричних співвідношень з наступною експериментальною перевіркою та пояснення виявлених відхилень від теоретично передбачуваного результату.

Виклад основного матеріалу. Економічною вимогою до ефективності концентратора є максимальне посилення потоку сонячної енергії за мінімальною необхідною площею дзеркала. Найперше це означає, що всі відбиті промені повинні освітлювати лише активну поверхню фотомодуля. Відповідна геометрична

побудова для випадку перпендикулярного падіння прямих сонячних променів на фотомодуль шириною S та відбитими дзеркалом довжиною L наведена на рис. 1. Усі потрібні для побудови концентратора величини зручно визначати через кут відхилення дзеркала від площини приймача α .

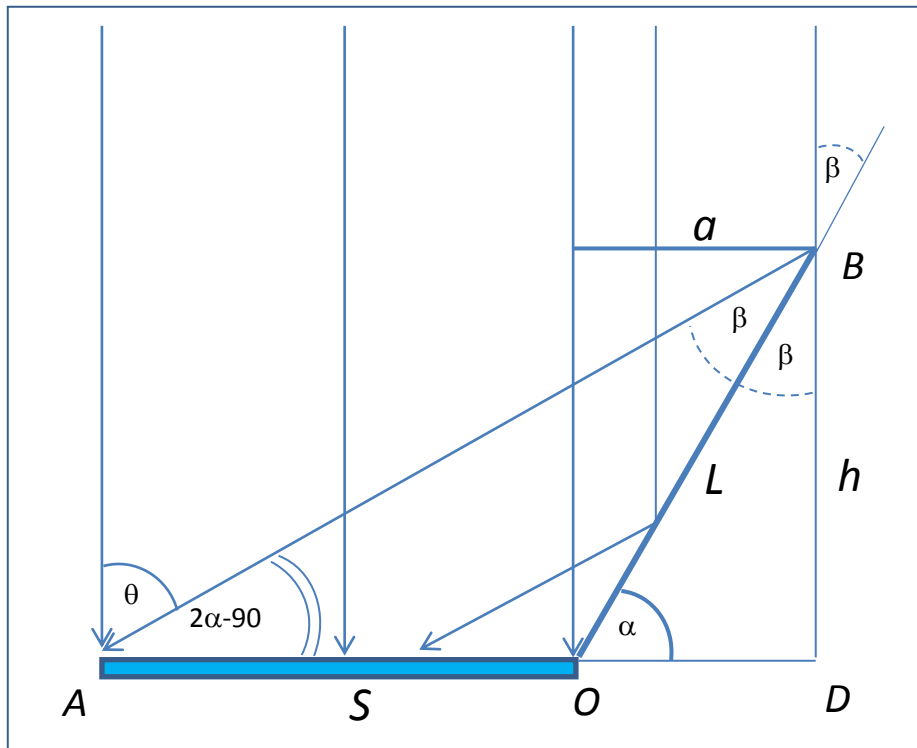


Рис. 1. Геометрична побудова для розрахунку концентратора.

Як видно з побудови, кут α потрібно вибирати таким, щоб промінь, відбитий від верхнього краю дзеркала L (точки B), прийшов у точку A сприймаючої поверхні S . За більшого кута α частина відбитих променів оминає сприймаючу поверхню, а за меншого, навпаки – відбитий потік покриє лише частину фотомодуля. В обох випадках ефективність роботи сонячної установки зменшується. Але за будь-якого співвідношення розмірів фотомодуля і дзеркала кут α не повинен виходити за такі межі:

$$45^\circ < \alpha < 90^\circ \quad (1)$$

Кути, позначені символом β , рівновеликі: одна пара як вертикальні при перетині двох прямих, а інша – через рівність кутів ковзання падаючого і відбитого променів. З трикутника OBD визначаємо, що

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (2)$$

Рівність кутів $\theta = 2\beta$ очевидна, бо вони є внутрішньо відповідними при перетині відрізком BA двох паралельних променів:

$$\theta = 2\beta = 180 - 2\alpha, \quad (3)$$

а доповнювальний до нього кут A трикутника ABD відповідно рівний

$$A = 2\alpha - 90^\circ. \quad (4)$$

Дзеркало розширює апертуру захоплення первинного потоку сонячної енергії на величину, пропорційну довжині відрізка a . Тоді оптичний коефіцієнт посилення енергетичної освітленості фотомодуля можна прийняти рівним відношенню розширеної апертури до початкової з урахуванням коефіцієнта відбивання дзеркала ρ і кута освітлення фотомодуля θ за таким виразом:

$$k_{omn} = \frac{S + \rho a \cdot \cos \theta}{S} = 1 + \frac{\rho a}{S} \cos \theta. \quad (5)$$

Але у випадку проектування енергетичних установок з готових комплектуючих відомі тільки їх лінійні розміри S і L . Відтак рівняння (4) з врахуванням очевидного співвідношення $a = L \cos \alpha$ можна привести до такого вигляду:

$$k_{omn} = 1 + \rho \frac{L}{S} \cos \alpha \cdot \cos(180 - 2\alpha). \quad (6)$$

Коефіцієнт відбивання стандартного дзеркала зі срібним відбиваючим покриттям не перевищує $\rho \leq 0,96$ [7]. У кутовій області від 45° до 90° максимальне значення добутку двох косинусів рівняння (5) досягає 0,271 при $\alpha = 65,91^\circ$. У цьому легко переконатися диференціюванням з наступним прирівнюванням результату до нуля або безпосереднім обчисленням.

Кожному фіксованому куту відношення L/S відповідає цілком певне значення α і навпаки, а взаємозв'язок між ними можна встановити, використовуючи властивості трикутників ABD і OBD :

$$\frac{h}{S + a} = \frac{L \sin \alpha}{S + L \cos \alpha} = \operatorname{tg}(2\alpha - 90^\circ). \quad (7)$$

Якщо у знаменнику середнього дробу винести за дужки L , то після скорочення і простих перетворень отримаємо такий вираз:

$$\frac{S}{L} = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg}(2\alpha - 90^\circ)} - \cos \alpha. \quad (8)$$

Явний розв'язок цього рівняння відносно кута α досить громіздкий, тому для наочності доцільніше побудувати табличну або графічну залежність $L/S = f(\alpha)$, наведені у табл. 1 та на рис. 2. За цією залежністю надалі зручно визначати кут відхилення дзеркала за відомими лінійними розмірами фотомодуля і відбивача або навпаки. Натомість завдяки протилежним залежностям L/S і добутку косинусів у рівнянні (6) коефіцієнт оптичного підсилення зростає майже лінійно.

Лінійне зростання коефіцієнта підсилення з кутом відхилення забезпечується непропорційним збільшенням площі дзеркала та відповідним ускладненням конструктивних рішень. Оптимальним можна вважати рішення, коли приріст коефіцієнта оптичного підсилення Δk забезпечується мінімальним приростом площі дзеркала. Математично це означає мінімізацію відношення $\frac{\Delta L}{S} \rightarrow \min$, графік якого наведено на рис. 3.

$$\Delta k_{opt}$$

Таблиця 1

Результати розрахунку параметрів концентрації плоским дзеркалом

Параметр	Кут нахилу α , град											
	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74
$-\cos\alpha \times \cos 2\alpha$	0,149	0,182	0,209	0,282	0,250	0,263	0,270	0,272	0,269	0,262	0,250	0,234
L/S	0,393	0,526	0,707	0,934	1,00	1,190	1,404	1,645	1,919	2,242	2,618	3,077
k_{opt}	1,056	1,092	1,142	1,263	1,240	1,300	1,379	1,430	1,496	1,564	0,628	1,691

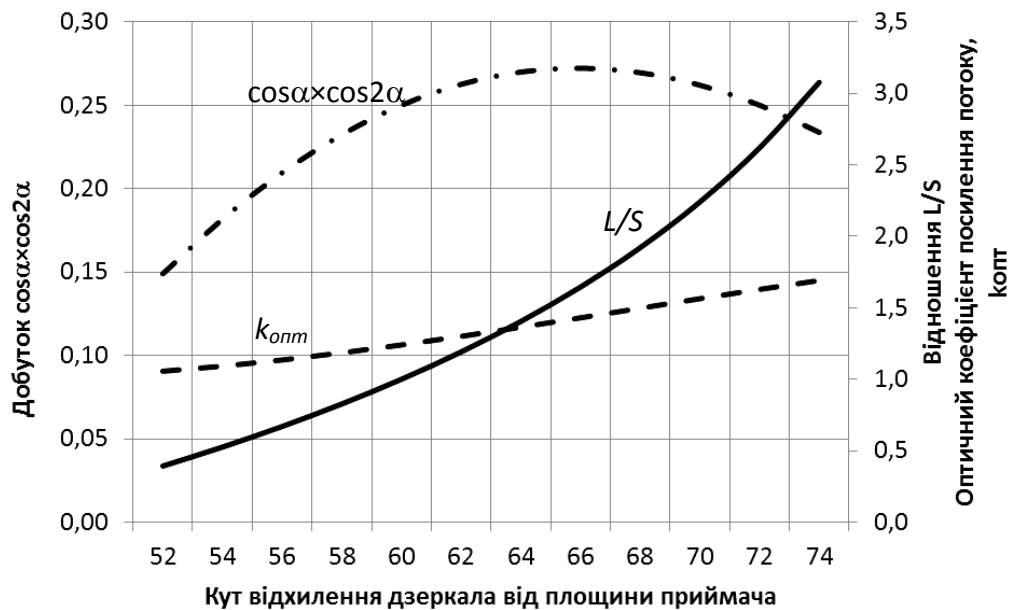


Рис. 2. Кутова залежність добутку косинусів, L/S та оптичного коефіцієнта посилення потоку k_{opt} .

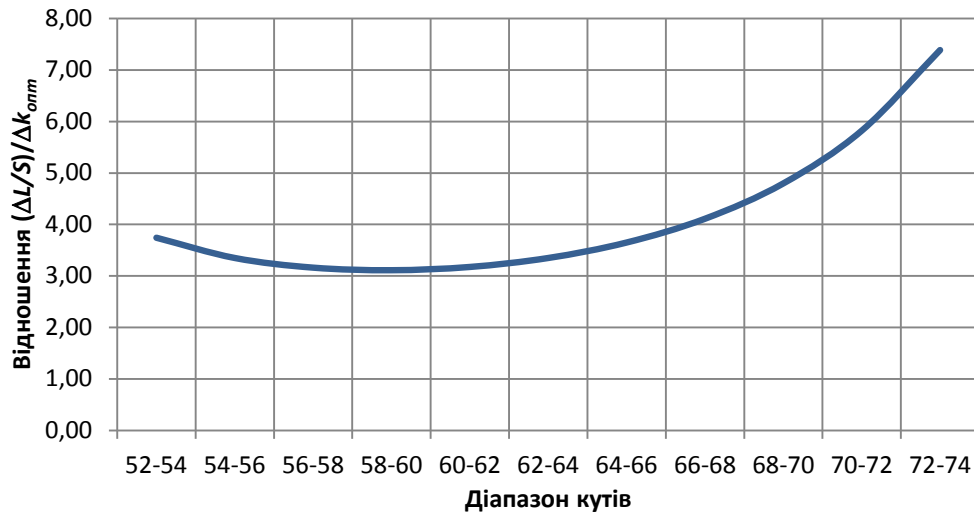


Рис. 3. Кутова залежність відношення $(\Delta L/S)/\Delta k_{omm}$.

З наведеної на рис. 3 графічної залежності випливає, що приріст енергетичної освітленості фотомодуля з найменшими затратами реалізується при $L \leq S$ з кутом нахилу $58-60^\circ$ і коефіцієнтом посилення потоку $k_{omm} = 1,25$.

У першому наближенні поточна потужність фотомодуля повинна зростати пропорційно енергетичній освітленості сприймаючої поверхні. Остання захищена від зовнішніх впливів прозорим покриттям, з коефіцієнтом пропускання τ , залежним від кута освітлення. Але прямі і скісні промені послаблюються покриттям неоднаково, тому теоретичний приріст потужності фотомодуля потрібно розраховувати через відношення приростів енергетичної освітленості під покриттям.

У загальному випадку коефіцієнт пропускання одношарового покриття τ розраховують за такою формулою:

$$\tau = \frac{1 - \rho_c}{1 + \rho_c}. \quad (9)$$

Тут символом ρ_c позначають коефіцієнт відбивання скляної поверхні, який розраховують через кути падіння i та заломлення r за відомою з оптики залежністю:

$$\rho(i) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\text{tg}^2(i-r)}{\text{tg}^2(i+r)} \right]. \quad (10)$$

Обидва кути пов'язані через показник заломлення n таким співвідношенням:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (11)$$

Прямі промені освітлюють фотоелектричний модуль під кутом, рівним нулю, тому для випадку скляного покриття

$$\rho_0 = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{1,5-1}{1,5+1} \right)^2 = 0,04. \quad (12)$$

Для перевірки наведених розрахунків проведено безпосереднє вимірювання піранометром інтенсивності прямого та відбитого потоків у площині фотомодуля, а також відповідних значень пікової потужності. Монтажну вимірювальну схему наведено на рис. 4.

Інтенсивність прямого потоку сонячної енергії становила 1011 Вт/м^2 , а розміри дзеркала і фотомодуля були однаковими: $L/S = 1$; $\alpha = 60^\circ$. Зростання потужності фотоелектричного модуля P/P_0 розраховано відносно потужності P_0 при освітленні тільки прямим потоком. Величина $E(\tau)$ означає енергетичну освітленість сприймаючої поверхні фотомодуля під його світлопрозорим покриттям, де τ – коефіцієнт пропускання прозорого покриття. Результати вимірювань та проведених розрахунків за співвідношеннями (9) – (12) наведено у табл. 2.

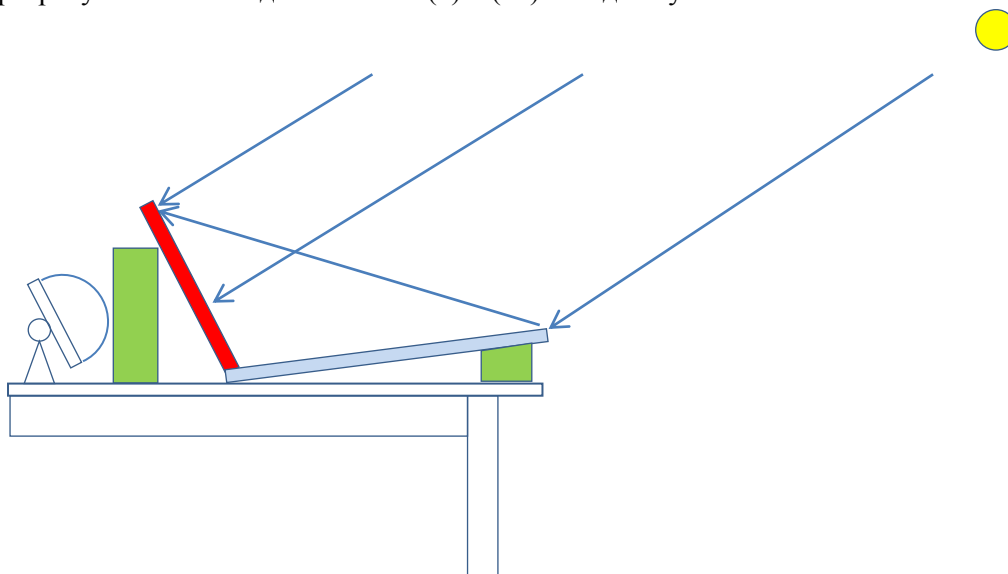


Рис. 4. Монтажна схема вимірювального стенду у складі дзеркала, фотомодуля, піранометра і регулювальних підставок.

Таблиця 2

Результати розрахунків та вимірювань

α	L/S	$\theta = i$	r	ρ_0	τ	E	$E(\tau)$	$(P/P_0)_{\text{теор}}$	$(P/P_0)_{\text{експ}}$
Прямий потік	–	0°	0°	0,04	0,923	1011	933	1,0	1,0
60°	1,0	60°	$35,3^\circ$	0,089	0,837	1326	1134	1,24	1,29

За відсутності дзеркала вимірний піранометром потік сонячної енергії становив 1011 Вт/м^2 , а пікова потужність фотомодуля – 35 Вт. Із концентратором ці величини зросли до рівня 1326 Вт/м^2 і 45 Вт відповідно. Відтак енергетична освітленість зовнішньої поверхні покриття фотомодуля зросла у $1326/1011 = 1,31$ раза, світлочутливого шару – у $1134/933 = 1,22$ раза, натомість пікова потужність фотоелектричного модуля зросла у $45/35 = 1,29$ раза. Перевищення потужності проти розрахованої можна пояснити як похибками вимірювання, так і меншим коефіцієнтом відбивання текстурованого покриття фотомодуля порівняно з розрахунковим для випадку гладкої поверхні.

Висновки. За використання плоского дзеркального концентратора приріст енергетичної освітленості фотоелектричного модуля з найменшими затратами реалізується при $L \leq S$ з кутом нахилу $58-60^\circ$ і коефіцієнтом посилення потоку $k_{opt} = 1,25$.

Бібліографічний список

1. Сафонов В. А. Фотоэлектрические модули с плоскими концентраторами / В. А. Сафонов, В. В. Кувшинов // *Відновлювана енергетика*. – 2008. – № 4. – С. 28-33.
2. Туркленбаева Б. Ж. Математическое моделирование энергетической эффективности плоских концентраторов солнечной энергии на поверхность плоской формы / Б. Ж. Туркленбаева // *Вестник АГТУ*. – 2008. – № 1(42). – С. 36-39.
3. Руденко М. Ф. Фотоконцентраторы судовых энергетических комплексов / М. Ф. Руденко, Ю. В. Шипулина // *Вестник АГТУ*. – 2010. – №2. – С. 109-113. – (Серия «Морская техника и технология»).
4. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии. / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
5. Стребков Д. С. Концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович ; под ред. Д. С. Стребкова. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.
6. Duffie J. A. Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman. – 2-d edition. – New-York : John Wiley & Sons, Inc. – 919 p.
7. Захидов Р. А. Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем / Р. А. Захидов. – Ташкент : ФАН, 1978. – 184 с.

Гальчак В., Сиротюк С., Татомир А., Кузницький І. Ефективність підвищення потужності фотоелектричного модуля плоским дзеркальним концентратором

У роботі подано методику розрахунку геометричних параметрів плоского дзеркального концентратора сонячної енергії та результати експериментальної перевірки його ефективності на прикладі фотоелектричного модуля промислового виробництва.

Ключові слова: сонячна енергія, фотоелектричний модуль, дзеркальний концентратор, кут освітлення, коефіцієнт підсилення, потужність.

Halchak V., Syrotyuk S., Tatomyr A., Kuznickyj I. Efficiency of increase of power of photo-electric module by flat mirror concentrator

This paper presents the methodology for calculating the geometrical parameters flat the mirror of solar energy concentrator and the results of experimental verification of its effectiveness photovoltaic module on the example of.

Key words: solar energy, photo-electric module, mirror concentrator, corner of illumination, amplification factor, power.

Гальчак В., Сиротюк С., Татомир А., Кузницкий И. Эффективность повышения мощности фотоэлектрического модуля плоским зеркальным концентратором

В работе представлены методика расчета геометрических параметров плоского зеркального концентратора солнечной энергии и результаты экспериментальной проверки его эффективности на примере фотоэлектрического модуля промышленного типа.

Ключевые слова: солнечная энергия, фотоэлектрический модуль, зеркальный концентратор, угол освещения, коэффициент усиления, мощность.