

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ ГЕЛІОУСТАНОВКИ

*Досліджено залежності електричної та теплової потужностей гібридного сонячного модуля при варіації витрати теплоносія та розраховано відповідні значення ефективності модуля. Проведено порівняння двох типів імітаторів сонячного випромінювання.*

*Исследованы зависимости электрической и тепловой мощностей гибридного солнечного модуля при вариации расхода теплоносителя, рассчитаны соответствующие значения эффективности модуля. Проведено сравнение двух типов имитаторов солнечного излучения.*

*The dependence of electric and heat power of hybrid solar module was obtained at variation of heat carrier flow rate. The corresponding efficiencies were calculated. The comparison of two types of solar imitators was conducted.*

**Вступ.** У зв'язку з підвищенням цін на традиційні енергоносії, а також враховуючи їх вплив на оточуюче середовище, одним з першорядних завдань енергетики є пошук джерел енергії, спроможних скласти альтернативу викопному паливу. Однією з основних таких альтернатив є використання сонячної енергії для теплопостачання та електрифікації житлових об'єктів. На даний момент це зазвичай реалізується шляхом використання окремо сонячних колекторів для підігріву води і кремнієвих фотоелектричних батарей для виробництва електроенергії. На даний час ці технології є досить добре відпрацьованими, і подальше підвищення їх ефективності є обмеженим. Саме тому нові системи, що використовують одночасно обидва типи перетворень сонячної енергії, представляють все більший інтерес. Перехід на комбіновані установки дозволить значно підвищити ефективність використання енергії сонячного випромінювання, відповідно можливим стає отримання значно більшої кількості корисно використовуваної енергії без значного підвищення малогабаритних характеристик установок та їх вартості. Як наслідок, такі системи можуть мати значно вищу економічну привабливість, а саме цей фактор визначає обмежене використання сонячної та інших видів відновлюваної енергії на даний час.

**Експериментальна установка.** В даній роботі досліджується комбінований теплофотоелектричний модуль, створений в НТУУ «КПІ» і призначений для одночасного

отримання теплової та електричної енергії за рахунок енергії випромінювання Сонця. За конструкцією модуль нагадує плоский сонячний колектор (рис.1), на верхній поверхні пластин якого встановлено батарею фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), що забезпечують перетворення частини падаючої енергії випромінювання в електричну. З нижнього боку алюмінієвих пластин розміщено трубки, в яких нагрівається рідкий теплоносій, що циркулює в замкнутому контурі. Однією з переваг такої схеми є не лише отримання теплової енергії додатково до електричної, але і підвищення ефективності власне ФЕП внаслідок зниження їх робочої температури. В рамках роботи проведено також порівняльне дослідження імітаторів сонячного випромінювання для розробленого комбінованого модуля. Імітатори створено на базі галогенової лампи потужністю 500 Вт і ртутної лампи високого тиску типу ДРЛ потужністю 1000 Вт з метою проведення навчально-лабораторних досліджень в НТУУ «КПІ». Досліджуваний зразок теплофотоелектричного модуля включає 4 ФЕП з монокристалічного кремнію стороною 150 мм з послідовним електричним з'єднанням, охолодження реалізується регульованим потоком води через 2 паралельних трубки, який створюється циркуляційним насосом.

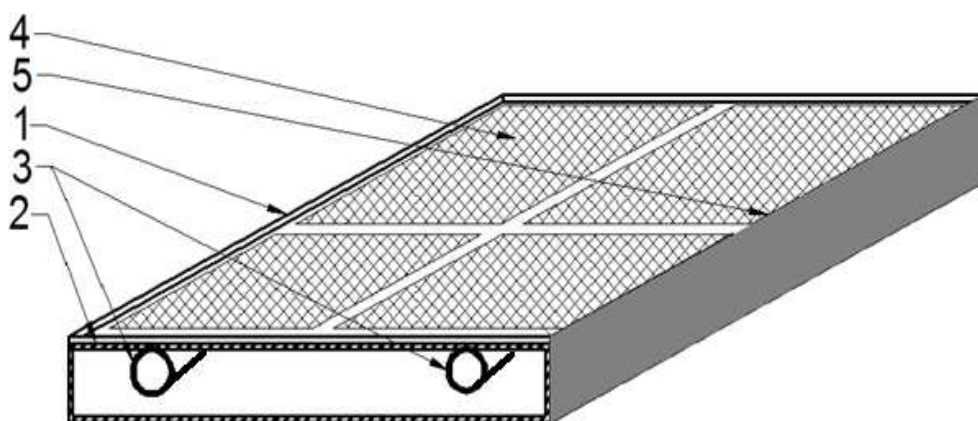


Рис. 1. Елементи комбінованого сонячного колектора з рідким теплоносієм:  
1 – верхнє оскління; 2 – панель з фотоелектричними перетворювачами;  
3 – трубки для рідинного теплоносія; 4 – фотоелектричні перетворювачі; 5 – корпус.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Залежність вихідних електричних характеристик батареї ФЕП від усередненої їх температури представлені на рис.2. Для цих дослідів як імітатор сонячного випромінювання використовувалася галогенна лампа потужністю 500 Вт з дзеркальним світильником.

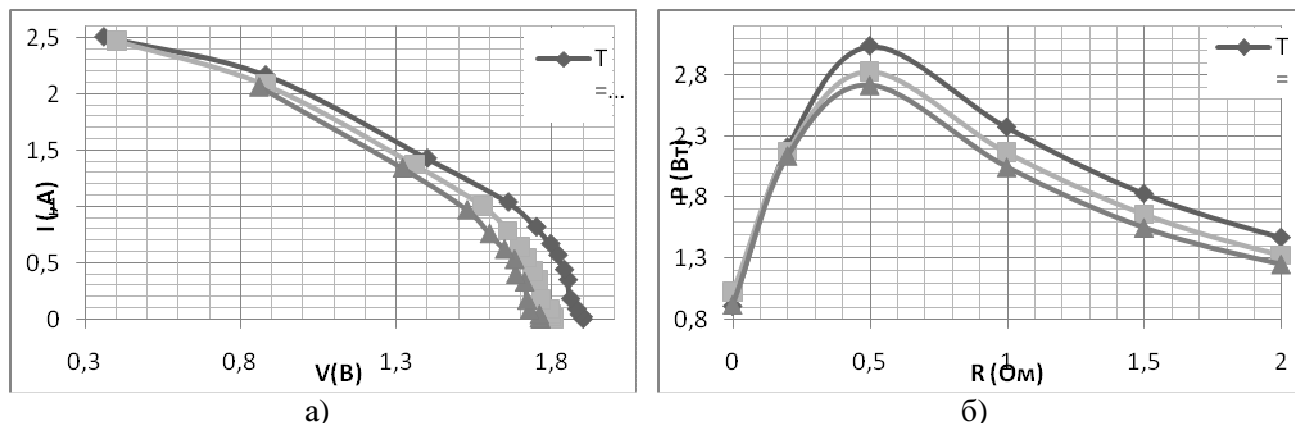


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика (а) та крива потужності (б) модуля в залежності від середньої температури його поверхні(°C)

З отриманих результатів видно, що електрична потужність батареї ФЕП падає з зростанням їх робочої температури, причому в більшій мірі знижується напруга модуля, аніж струм. При зниженні температури ФЕП з  $70^{\circ}\text{C}$  до  $53^{\circ}\text{C}$  вихідна електрична потужність зростає на 18%.

Дослідження установки в комбінованому режимі, тобто при генерації не лише електричної енергії, але і теплової, проведено з метою визначення сумарної ефективності (ККД) модуля, який в загальному випадку включає електричну та теплову складові:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{терм}} + \eta_{\text{ел}}$$

В свою чергу, термічний ККД установки визначається за формулою:

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{пад}}} \cdot 100\% = \frac{G \cdot c_p \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}})}{F \cdot E} \cdot 100\%$$

де  $G$  - питома масова витрата теплоносія, кг/с;  $c_p$  - теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К);  $t_{\text{вх}}$ ,  $t_{\text{вих}}$  - температури теплоносія на вході та виході з колектора, відповідно;  $Q_{\text{пад}}$  - падаюча енергія випромінювання, Вт;  $F$  - площа поверхні колектора,  $\text{м}^2$ ;  $E$  - інтенсивність випромінювання, падаючого на поверхню модуля,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Аналогічно електричного ККД установки визначається як

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{P_{\text{max}}}{F \cdot E} \cdot 100\%$$

де  $S$  - сумарна ефективна площа поверхні ФЕП,  $\text{м}^2$ ;  $P_{\text{max}}$  - максимальна електрична потужність, що виробляється сонячною батареєю, Вт, визначається за кривою потужності (рис.2).

Результати розрахунків сумарного ККД та його складових при варіації витрати теплоносія через модуль представлені рис. 3.

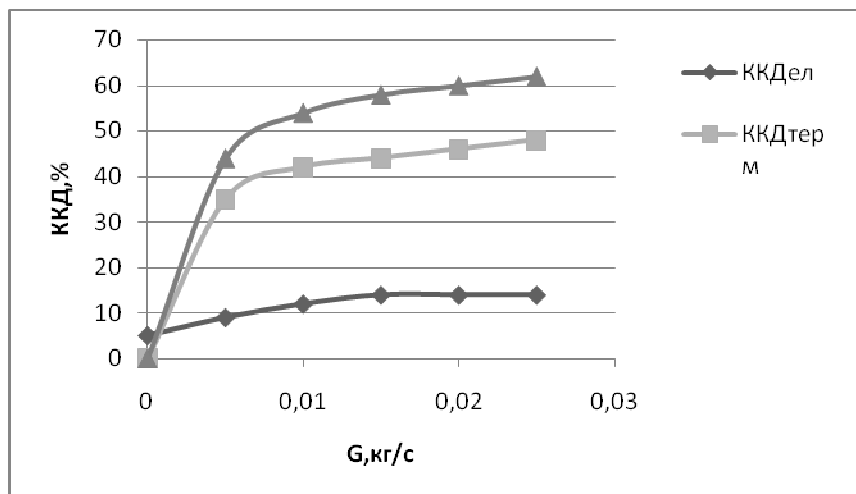


Рис.3. Залежність загального, електричного і термічного ККД від витрати теплоносія

Результати показують, що комбінована ефективність системи значно зростає при використанні теплової енергії, яку отримує колектор. Навіть мала витрата води значно знижує температури ФЕП та підвищує їх електричний ККД. При збільшенні витрати води понад 0,015 кг/с електричний ККД не змінюється, тепловий зростає незначно, однак температура теплоносія на виході знижується, що знижує ексергію води, крім того, різко зростає споживана потужність на циркуляцію теплоносія. Тому для кожної установки необхідно підбирати оптимальне значення витрати теплоносія з урахування всіх цих факторів. Орієнтовно це витрата, при якій стабілізується середня температура ФЕП.

Проблема охолодження ФЕП до кінця не вирішена, на сьогоднішній день існує ряд способів охолодження як поверхні як під перетворювачами, так і самих ФЕП. Однак для кожної системи характерні певні недоліки, серед яких: високий гідравлічний опір, нерівномірне протікання рідини, порушення циркуляції за рахунок повітряних пробок. Також необхідно зазначити, що фотоелектричні перетворювачі працюють в нерівномірному температурному полі, обумовленого конфігурацією трубок та нагрівом теплоносія вздовж них, це призводить до збільшення відмінності електричних характеристик окремих ФЕП між собою та зниження електричного ККД сонячного модуля в цілому. Незважаючи на це, ці системи дозволяють значно підвищити ефективність отримання електричної енергії при охолодженні ФЕП, і додатково отримувати низько потенціальну теплоту, яку можна використовувати для попереднього підігріву, або підвищувати її потенціал у тепловому насосі.

Проведено порівняння електричної потужності батареї ФЕП на імітаторах сонячного випромінювання, оснований на двох типах ламп – галогенній лампі розжарення та дуговій лампі типу ДРЛ. Недоліками лампи ДРЛ є необхідність пуско-регулюючої апаратури і значний час виходу на стаціонарний режим випромінювання (декілька хвилин), а також наявність в спектрі ультрафіолетової складової. На рис. 5 показана схема сонячного імітатора з використанням лампи ДРЛ. Для проведення дослідження встановлювалась рівня для двох імітаторів середня інтенсивність падаючого випромінювання на робочу поверхню сонячних перетворювачів, яка реалізована шляхом їх розміщення на різній висоті над поверхнею і становила  $995 \text{ Вт/м}^2$  згідно вимірювання піранометром Янішевського. Результати представлені на рис. 4. Як видно, при однаковій густині світлового потоку (згідно показів піранометра), максимальні струм і вихідна потужність при освітленні лампою ДРЛ є більшими майже в 1,5 рази. Такий результат пояснюється різними спектрами джерел світла та неоднаковою чутливістю до них кремнієвих ФЕП та датчика піранометра. Спектр

галогенної лампи є неперервним, як і в інших лампах розжарювання, включає практично весь діапазон видимого випромінювання і велику частку інфрачервоного. Лампа ДРЛ характеризується дещо уривчатим спектром, який складається як з окремих смуг видимого і ІЧ-випромінювання, так і значну частку ультрафіолетового випромінювання. Це, як показали досліди, суттєво впливає на вихідний струм перетворювачів, практично не змінюючи вихідну напругу.

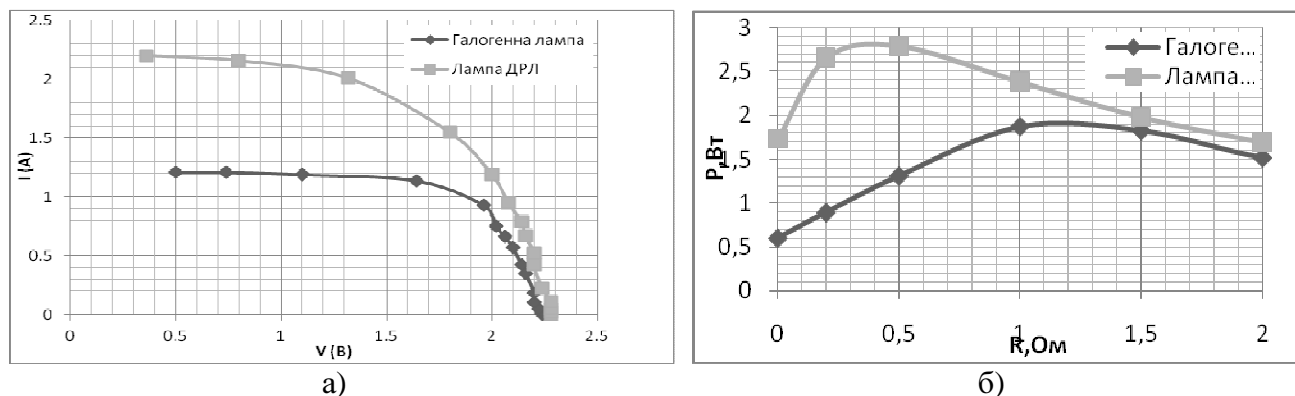


Рис.4. Порівняння ВАХ (а) і кривих потужностей (б) модуля для різних джерел освітлення

Додатково проведено дослідження нерівномірності світлових плям використаних імітаторів. Аналіз отриманих даних показав, що густина світлового потоку в навіть в межах площі використаного сонячного модуля є досить нерівномірною, особливо це помітно для імітатора з лампою ДРЛ (рис.5), що пояснюється недоліками фокусуєчих елементів використаних імітаторів. Нерівномірність освітлення поверхні ФЕП також призводить до збільшення відмінності їх електричних параметрів і зниження електричного ККД модуля.

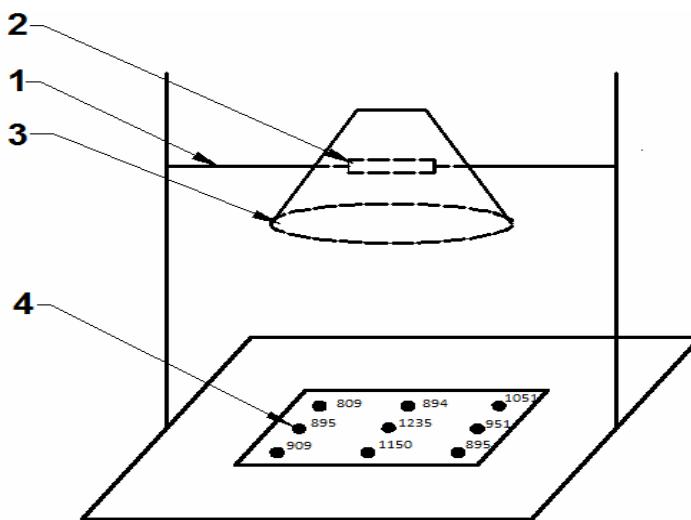


Рис. 5. Схема імітатора сонячного випромінювання з лампою ДРЛ:

1-штатив; 2-лампа ДРЛ; 3- світильник; 4-світлова пляма

**Висновки.** В роботі досліджено залежності електричної та теплової потужностей модуля при різних витратах теплоносія та розраховано відповідні значення ККД, визначено рекомендації до підбору оптимальних значень витрати. Проведено порівняння імітаторів на базі світильників з галогенною лампою та лампою ДРЛ. Аналіз отриманих результатів показав, що примусове охолодження фотоелектричних систем не лише значно підвищує

їхню електричну ефективність, але і дозволяє отримати значну кількість низькопотенційної теплоти, при цьому сумарний ККД установки може досягати 50-60%. Встановлено, що спектр лампи ДРЛ дозволяє отримати значну вищу електричну потужність при однаковому рівні освітленості з галогенною лампою розжарювання, однак виявлено суттєву нерівномірність світлової плями від існуючого імітатора з лампою ДРЛ при освітленні достатньо великих сонячних модулів.