

---

---

## ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

---

---

УДК 631.371

В.П. КОЖЕМ'ЯКО<sup>1</sup>, О.Г. ДОМБРОВСЬКИЙ<sup>2</sup>, В.Ф. ЖЕРДЕЦЬКИЙ<sup>3</sup>,  
В.І. МАЛНОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, Г.В. ПРИТУЛЯК<sup>1</sup>

### АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

<sup>1</sup> *Вінницький національний технічний університет,  
21021, вул. Хмельницьке шоссе, 95, м.Вінниця, Україна,  
Тел.: (0432)598-492, E-mail: tirexlink@mail.ru*

<sup>2</sup> *Інститут світової економіки і міжнародних відносин  
Національної Академії Наук України,  
01030, вул. Леонтовича, 5, м. Київ, Україна*

<sup>3</sup> *ТОВ „Агробудтехнології”,  
21037, вул. Пирогова, 156, м.Вінниця, Україна,*

**Анотація.** Стаття присвячена аналізу та підвищенню енергетичної ефективності технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики. Представлено переваги та недоліки використання сучасних фотоелектричних систем, як основних компонентів фотовольтаїки. В роботі також запропоновано шляхи підвищення ефективності виходу електроенергії напівпровідникових фотоелементів та проведено експериментальні дослідження використання додаткових дзеркал на макетах сонячних фотопанелей, що показало додаткове збільшення виходу енергії на 60%.

**Аннотация.** Статья посвящена анализу и повышению энергетической эффективности технологий фотоэлектрических преобразователей для солнечной энергетики. Представлены преимущества и недостатки использования современных фотоэлектрических систем, как основных компонентов фотовольтаики. В работе также предложены пути повышения эффективности выхода электроэнергии полупроводниковых фотоэлементов и проведено экспериментальное исследование использования дополнительных зеркал на макетах солнечных фотопанелей, которое показало дополнительное увеличение выхода энергии на 60%.

**Abstract.** The article is devoted for analyzes and energy efficiency technologies of photovoltaic solar energy. In paper presents the advantages and disadvantages of the use photovoltaic systems, as the main components of photovoltaic systems. The paper also suggested ways to improve the power output of semiconductor solar cells and also considered an experimental study of the use of additional mirrors for the sun photovoltaic panels, which showed a further increase of energy power output by 60%.

**Ключові слова:** фотоелектричний перетворювач (ФЕП), інтенсивність світлового випромінювання, сонячний модуль, сонячна енергетика, фотовольтаїка, оптичне випромінювання, ККД.

#### ВСТУП

XXI століття стало віком інформації, про що свідчить значний розвиток обчислювальної техніки, персональних мобільних пристроїв, різноманітних методів та систем оперативної обробки даних, телекомунікацій та мережевих інформаційних технологій в середовищі Internet. Також прогнози експертів світового ринку щодо щорічного збільшення на 10-15% споживання енергоресурсів в

сукупності із значним подорожанням вартості енергоресурсів свідчать і про те, що XXI-ше століття стає епохою енергозбереження та енергоощадних технологій, що дозволяють не тільки заощаджувати природні ресурси і забезпечувати енергетичну автономність і стабільність, але й також дозволяють значно зменшити негативний вплив індустріалізації на навколишнє середовище і його екосистеми. Підходячи до межі вичерпання природних енергетичних ресурсів людство стало замислюватись над використанням відновлювальних джерел енергії з метою забезпечення стабільності розвитку світової економіки та уникнення енергетичної кризи, прогнозованої у найближчі 50-70 років, коли природні запаси вуглеводів в світі закінчаться.

Одним із перспективних напрямів відновлювальних джерел енергії, що в останні роки дуже активно впроваджуються в світову промисловість і побут – є сонячна енергетика [1]. Завдяки «зеленим» технологіям сонячні енергетичні системи і пристрої дозволяють здійснювати ефективний виробіток електричної і теплової енергії, завдяки природнім, практично не вичерпним можливостям світлового випромінювання Сонця із найменшим впливом на екологічний стан довкілля. Розробки і промислова продукція в цій області на сьогодні дуже активно розвиваються в таких країнах як Німеччина, США, Великобританія, Японія, Корея та Китай і становлять вагомий відсоток енергетичного виробітку в світі [1, 2]. Зважаючи на останні події в секторі ядерної енергетики – техногенну катастрофу в Японії на АЕС Фукусіма, майже всі світові країни приймають програми скорочення ядерних потужностей і віддають перевагу альтернативним джерелам. Україна та Росія на цьому фоні також представляються дуже перспективними ринками на найближчі 30-50 років для «зелених» технологій, ключове місце в яких займе сонячна енергетика [5].

Сонячна електроенергетика – один з найбільш швидкозростаючих секторів альтернативної енергетики, які активно розвиваються у світі. Великий потенціал зростання сонячної енергетики обумовлений необхідністю забезпечення національної та екологічної безпеки та також стійким подорожанням традиційних джерел енергії. Сучасна сонячна енергетика ділиться на дві галузі:

1) сонячна теплоенергетика [1, 4], що передбачає використання теплового випромінювання енергії безпосередньо від сонця для нагрівання теплоносія та подальшої подачі його на об'єкти обігріву (пристрої, які використовуються при цьому називають сонячними тепловими колекторами, в якості носія у них використовується здебільшого вода);

2) сонячна електроенергетика або фотовольтаїка (photovoltaics) [1-6] – передбачає перетворення спектрального випромінювання сонця безпосередньо в електричну енергію, шляхом використання внутрішнього фотоефекту в напівпровідникових фотоелектричних перетворювачах (ФЕП) та їх конструкцій – сонячних батарей та модулів з великою активною площею. В якості н/п матеріалу ФЕП використовуються здебільшого кремній Si, зважаючи на його широку поширеність в природі та найбільш придатні техніко-економічні показники для процесу фотоелектричного перетворення.

Друга галузь є найбільш цікавою і поширеною, як з точки зору отримання електроенергії – самого поширеного виду енергії суспільства в XXI ст., так і з погляду на простоту процесу, надійність, технологічність та гнучкість операцій отримання електроенергії від сонячного випромінювання.

### ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ – ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ ФОТОВОЛЬТАЇКИ

Фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) [3] «фотогальванічні комірки» – напівпровідникові фотоелементи, призначені для перетворення світлового випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні у електричний струм за допомогою явища внутрішнього фотоефекту. ФЕП виконуються перетворення енергії за схемою: *енергія оптичного випромінювання* → *електрична енергія*. Основною характеристикою ФЕП є ефективність фотоелектричного перетворення або коефіцієнт корисної дії (ККД), який для наявних на сьогоднішній день технологічних промислових ФЕП лежить в межах від 7 % до 18 % [1-7], а в лабораторних розробках сягає величини 39-43% [4, 8].

Сонячна батарея або модуль – деяка кількість одиночних комірок ФЕП, що механічно об'єднані в одній конструкції **електрично-з'єднані** для отримання визначеного рівні електричної потужності із встановленими рівнями робочих струму та напруги.

До переваг сонячних фотоенергетичних систем можна віднести:

- \* доступність і невичерпність сонячного випромінювання в якості джерела енергії;
- \* теоретично повна екологічна безпека для навколишнього середовища (існує мала імовірність нагрівання атмосфери над фотоелектростанцією);
- \* економічність процесу використання ФЕП;
- \* мінімальний рівень планового технічного обслуговування та висока надійність (близько 25-50 років для якісних фотоелементів, із втратою по потужності до 80% від початкової);

Не зважаючи на переваги, сонячних фотоелектричних систем, вони не вільні й від недоліків:

- \* залежність від погоди, часу доби та пори року, і як наслідок необхідність акумуляції енергії;
- \* порівняно висока вартість конструкції на сьогоднішній день (до 3-5\$/1Вт потужності всієї

системи), але цей показник постійно знижується, враховуючи широке впровадженні ФЕП у сучасному світі;

\* необхідність періодичного очищення поверхні від пилу та атмосферних опадів;

Хоча існує деякий ряд недоліків, переваги від процесу отримання сонячної електроенергії значно більше і вони мають більш якісний і кількісний характер, що було оцінено світовими виробниками сучасних технологій та оптоелектроніки. Зараз у світі існує близько 700 компаній виробників сонячних панелей для промислового і побутового секторів.

Історично перші фотоелектричні перетворювачі були розроблені ще у 1883 р. електриком із Нью-Йорка американцем Чарльзом Фріттсом, який виготовив фотоелементи із селену, що перетворювали світлове випромінювання у видимому спектрі в електрику і мали ККД 1-2% [1]. На початку 50-х років ХХ століття був винайдений метод Чохральського [4], що і зараз застосовується для вирощування кристалічного кремнію. У 1954 р. у лабораторії компанії "Bell Telephone" синтезували силіконовий фотоелектричний елемент із ККД 4%, надалі ефективність досягла 11% [8]. У 1958 р. невеликі (менш 1 Вт) фотоелектричні батареї забезпечували електроенергією радіопередавач американського космічного супутника "Авангард". В подальшому, космічні дослідження зіграли важливу роль у розвитку фотоелементів.

У сучасному світі найбільш розповсюдженим є метод виробництва кремнію з використанням процесу у реактора Сіменс (Siemens-Reactor) [4]. Сіменс-процес [4] – це процес хімічного осадження полікремнію з термічної газової фази (chemical vapor deposition, CVD). У цьому процесі U-образні злитки полікремнію одержують водне відновленням трихлорсиланів при високій температурі  $T=2500-3000^{\circ}\text{C}$ . При цьому полікремній осаджується на травильні стрижні розміром  $2000 \times 100 \text{ мм}$  масою до 200 кг, що розміщені у Сіменс-реакторі куполоподібної форми. Такі злитки нарізаються на пластини з товщиною 100-300 мкм, до яких в подальшому технологічному процесі під'єднують електричні провідники. Так формуються одиничні комірки – ФЕП, з яких в подальшому комбінуються сонячні панелі. Вихідною сировиною для виробництва полікристалічного кремнію є діоксид кремнію (кремнезем). Кремнезем широко розповсюджений у природі у виді піску, кварцу і глини. У 2008 р. різні модифікації Сіменс-процеса використовувалися більш ніж на 90% діючих потужностей виробництва полікремнію у світі [4].

В деяких роботах [1-4, 7-10] повідомляється, що в окремих випадках в лабораторних умовах отримані сонячні елементи з ефективністю від 40.7 до 43% [10]. Одні з кращих результатів ефективності фотоелектричного перетворення з ККД =42.6% показують ФЕП на основі гетероструктур GaAs (галій арсенід) з оптичними концентраторами на лінзах Френеля і функціонують у спектральному діапазоні 0,55-3.7 мкм. Енергетичні можливості таких ФЕП складають до  $260 \text{ Вт/м}^2$  при інтенсивності світлового випромінювання  $1 \text{ кВт/м}^2$  [10]. Слід відзначити, що в більшості серійних ФЕП і сонячних панелей на їх основі, цей показник становить  $130-140 \text{ Вт/м}^2$  в стандартних умовах STC (Standart Test Conditions) [8]. За останні 2010-2011 роки особлива увага приділяється нанотехнологічним методам виробництва ФЕП.

Можна також відзначити, що інтеграція нанотехнологій в сонячні фотоелементи дозволить досягти принципово нових фізичних і механічних властивостей, наприклад таких, як побудова абсолютно еластичних фотоелементів у вигляді клейких тонких плівок, роздрукування комірок на фотопапері на звичайному принтері з використанням спеціальних напівпровідникових кремнієвих чорнил. Такі елементи по ефективності на одну площі будуть конкурувати з промисловими панелями із значно більшою вагою та критичністю до умов інсталяцій.

На даний момент світові дослідницькі організації, такі як EPIA, Munich Photovoltaic Research Institute, які займаються проблемами підвищення ефективності та робочих характеристик сонячних комірок роблять акцент на нанотехнологічні методи інтеграції у тверді розчини кремнію домішок у вигляді наноточок, нанониток та нанопровідників, що дозволяє досягти, поки що в лабораторних умовах та малих промислових серіях, високих значень ефективності з ККД >40-44% та високої надійності роботи фотогальванічних комірок. Але поки що ці технології не набули широкого впровадження за рахунок високої складності промислового обладнання для вирощування таких твердотілих структур та високої вартості. Але з впевненістю можна стверджувати, що поріг ККД у 50 % для кремнієвих сонячних батарей (як тонкоплівкових, так і полі- та моно- кристалічних) буде подолано завдяки використанню нанотехнологічних домішок інших напівпровідників – у вигляді квантових точок, труб та інших форм об'єктів з розміром 1-10 нм ( $1-10^{-9} \text{ м}$ ).

На даний час широкого поширення отримали 3 види фотоелектричних перетворювачів та сонячних батарей на їх основі [1-5]:

- ФЕП на основі монокристалічного кремнію;
- ФЕП на основі полікристалічного кремнію;
- Тонкоплівкові ФЕП на основі аморфного кремнію (у вигляді тонкої плівки Si).

У більшості економічно дешевих ФЕП використовується аморфний кремній, що дозволяє досягати

ККД до 7-12%. У якісних ФЕП, з яких будують промислові сонячні енергосистеми, використовується монокристалічний або полікристалічний кремній з технологічним ККД 14-16 % [8] (табл. 1). Різниця між монокристалічними та полікристалічними ФЕП складає 1-3% по ККД, але за рахунок того, що полікристалічні фотопластини більш толерантні до косих та не ортогональних світлових промінів (краще сприймають розсіяне та кутове світло), середня виробітка в цих типах ФЕП практично однакова, як і їх вартість в останніх комерційних марках.

Таблиця 1.

**Максимальні значення ККД кремнієвих сонячних фотоелементів в серійному виробництві**

Тип ФЕП для сонячних батарей	ККД фотоелектричного перетворення, %
Si (кристалічний)	18,7
Si (полікристалічний)	17,3
Si (тонкоплівковий)	13,6
InTeCd (тонкоплівковий)	10,4

Відповідно кожний з 3-х видів напівпровідникових матеріалів для сонячних батарей має свої переваги і недоліки. Узагальнено їх можна звести їх до таблиці 2.

Таблиця 2.

**Переваги і недоліки типів фотоелектричних перетворювачів**

Тип ФЕП	Переваги	Недоліки	Область використання
ФЕП на основі монокристалічного кремнію Si (рис. 1)	- високий ККД (17-19%); - висока надійність (25-50 років роботи); - стабільність параметрів протягом тривалого часу (падіння потужності до 80% від <b>максим</b> за 25 років експл.)	- більш висока вартість (2.5-3.3\$/Вт); - менша технологічність; - вища чутливість до кута джерела світла - висока вартість отримання та енергозатратність технології виготовлення	1) професійні сонячні енергосистеми; 2) сонячні електростанції; 3) системи живлення космічних апаратів; 4) високоякісні приватні сонячні системи
ФЕП на основі полікристалічного кремнію (рис. 2)	- нижча вартість (2.1-2.8\$/Вт); - висока технологічність; - стабільність параметрів (падіння пот. до 80% від <b>максим</b> за 25 років експл.)	- дещо нижчий ККД (15-17%); - менша стабільність параметрів	1) широко поширені якісні сонячні енергосистеми; 2) малі електростанції; 3) покриття дахів будинків; 4) фотоелектричні побутові пристрої (зарядні пристрої моб. тел., ноутбуків, вимірювальна техніка)
Тонкоплівкові ФЕП на основі аморфного кремнію (рис. 3)	- висока технологічність - низька вартість (1.5-2.4\$/Вт)	- низький ККД (7-11%); - нестабільність параметрів; - низька надійність (строк служби 5-8 років)	1) поширені більш дешеві приватні сонячні енергосистеми; 2) системи світлодіодного побутового освітлення; 3) побутові пристрої (калькулятори, аудіоплеєри, ліхтарики на сонячній батареї, зарядні пристрої)

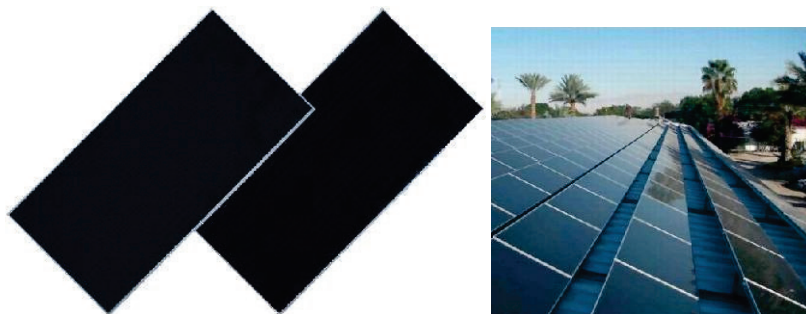


Рис.1. Фотоелектричні перетворювачі на основі монокристалічного кремнію

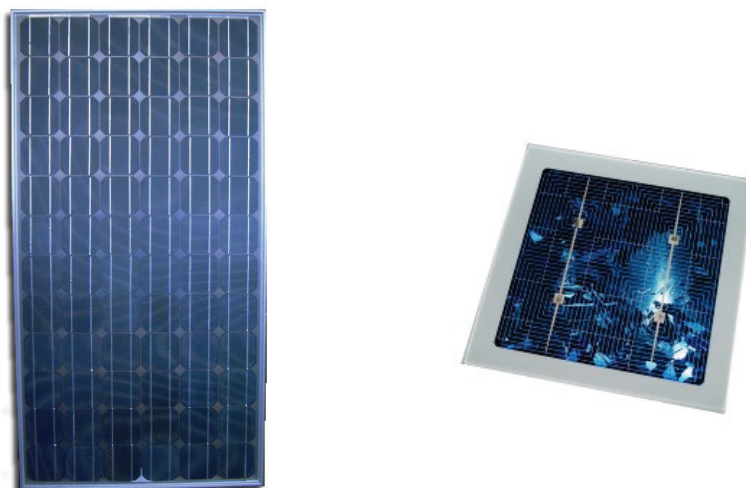


Рис.2. Фотоелектричні перетворювачі на основі полікристалічного кремнію



Рис.3. Тонкоплівкові модулі ФЕП на основі аморфного кремнію

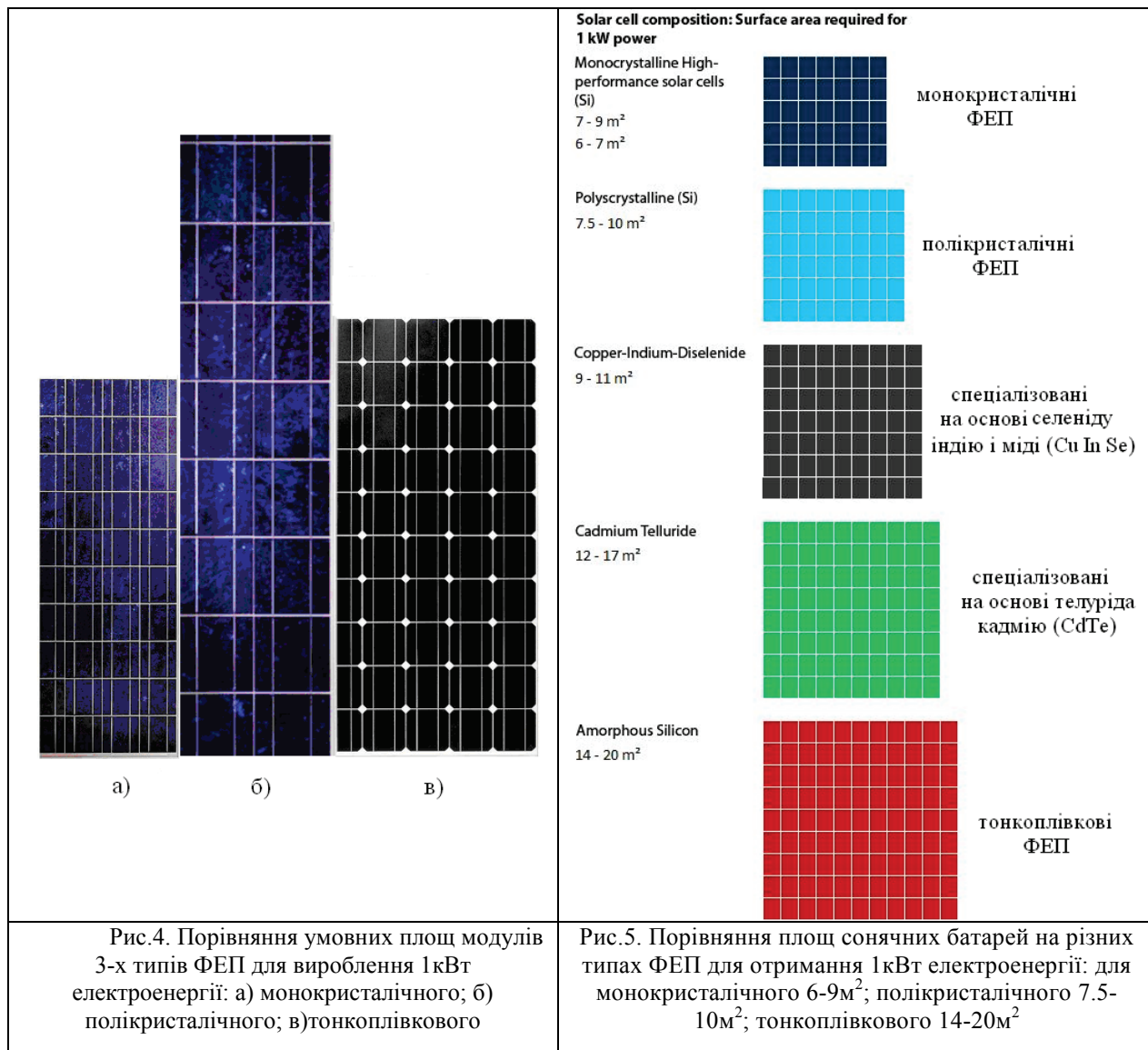
Кожний модуль сонячної батареї складається з 36, 72 або 96 окремих елементів ФЕП. Приведені на рисунках 1-3 фотографії сонячних батарей для промислового і домашнього використання найчастіше застосовуються у вигляді модульних конструкцій, що монтуються на технологічні площадки і дахи будівель. В залежності від ККД матеріалу, різні типи сонячних панелей будуть мати різні площі робочі площі для отримання одного для всіх умовного значення потужності. Промислові батареї збираються з окремих елементів, що з'єднуються проводами, після чого розміщуються між скляними пластинами і полімерними плівками для захисту. Тонкоплівкові елементи випускають вже в готових матрицях, іноді навіть у готових герметизованих корпусах, що забезпечують автоматичне позиціонування комірок ФЕП.

На рис.4 і рис.5 приведено порівняння умовних площ батарей на 3-х різних типах фотоелементах, що необхідні для вироблення 1000 Вт (1кВт) електроенергії.

Сонячні батареї з аморфного кремнію монтують рідше в професійних системах, основна причина – занадто низькі ККД і надійність. Спеціалізовані тонкоплівкові технології [8], такі як  $\text{CuInSe}_2$  (Copper Indium Diselenide) і  $\text{CdTe}$  (Cadmium-Telluride), сьогодні складають всього 2% сектору. Але ці сонячні батареї мають також і деякі переваги в порівнянні з кристалічним кремнієм: менша товщина (активний шар до 100 разів тонший за кристалічний); тонкоплівкові ФЕП можуть приймати розсіяне і слабе сонячне світло

(робота в затемнених місцях).

При цьому ціна батареї складає близько 2-3\$ на Вт номінальної потужності [1, 5]. При промисловій генерації електрики за допомогою фотоелементів ціна за кВт/год складе 0.2-0,25 дол. На думку Європейської Асоціації Фотовольтаїки EPIA (European Photovoltaics Association), до 2020 року вартість електроенергії, виробленої "сонячними батареями" знизиться до рівня менш ніж 0,10 € за кВт/год [1, 6] для промислових установок і менш 0,15 € за кВт/год для установок у житлових будинках [1].



Тонкоплівкові батареї набагато толерантніше відносяться до затемнення та до вищих робочих температур, що характерні для роботи під яскравим сонцем. Але в тонкоплівкових ФЕП є вагомий недолік – щоб одержати такий же рівень енергії, як у кристалічних батареї, потрібно велика площа поверхні, через невисокий ККД. Для промислового і домашнього використання найчастіше застосовуються модулі з полікристалічного та монокристалічного кремнію (рис.6).

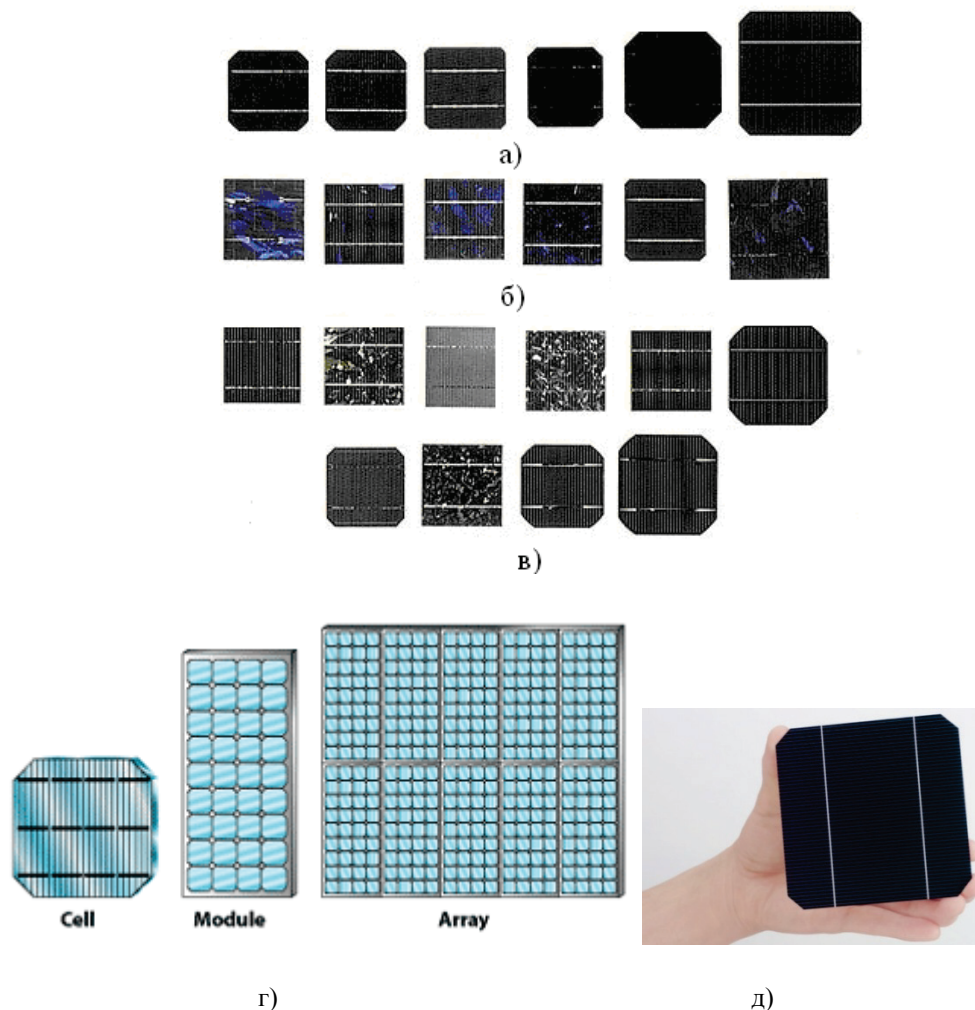


Рис.6. Вигляд різних типів сонячних елементів: а) монокристалічних ; б)полікристалічних ; в) тонкоплівкових; г) конструкція сонячних панелей на базі ФЕП; д) одиночна пластина кристалічного ФЕП

Кожна сонячна батарея складається з набору окремих сонячних елементів (рис.6). Ще зовсім недавно розмір кожного елемента складав близько 125 мм<sup>2</sup>. На практиці елементи з'єднуються в батареї, щоб сумарна напруга була достатня (на один напівпровідниковий *p-n* перехід виробляє стандартну напругу 0,6-1 В). На рис. 7 наведено структурну схему вироблення енергії за допомогою модулів сонячних фотоелектричних перетворювачів.

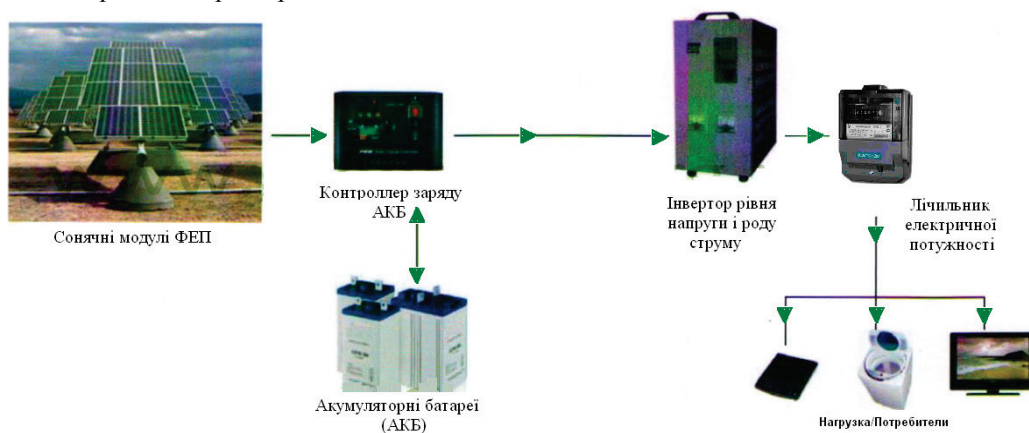


Рис.7. Структура процесу вироблення енергії за допомогою модулів сонячних ФЕП

Стандартна схема сонячної станції на базі ФЕП (рис. 7) включає модулі ФЕП, контролер заряду акумуляторних батарей, інвертор, лічильник електричної потужності та споживачів. Функції контролера

заряду АКБ полягають не тільки в забезпеченні автоматичного заряду акумуляторних батарей, але й контролю і стабілізації рівнів струму та напруги з виходів ФЕП та забезпечення переключення виходу ФЕП безпосередньо на інвертор за умов повного заряду АКБ в денний час доби. У нічний час доби, або у мало сонячну погоду, контролер АКБ комутує вихід збірок АКБ на інвертор в залежності від контролюючих сигнальних значень освітленості. Інвертор забезпечує перетворення рівнів напруги і струму з 12-45 В до 220/380 В 50Гц (I-III фази). А також роботу струму: постійного у змінний з промисловою частотою ~50Гц. Коефіцієнт ефективності перетворення інвертора для сучасних систем перетворення складає 90-95%. Лічильник електричної потужності призначений для контролю кількості спожитої електричної енергії, що подається кінцевим споживачам.

### ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Потужність потоку сонячного випромінювання на відстані 150 млн. км від Сонця (у геосфері Землі), без обліку втрат в атмосфері Землі, складає близько 850-1450 Вт/м<sup>2</sup> [2, 3], в залежності від географічного розташування. У той же час, інтенсивність (відношення оптичної потужності на визначену площу) сонячного випромінювання в Європі в дуже хмарну погоду навіть вдень може [3] бути менш 900 Вт/м<sup>2</sup> [2, 8]. За допомогою широко розповсюджених кристалічних сонячних модулів можна перетворити цю енергію в електрику з ефективністю 14-17%. Електронергетичні можливості таких ФЕП знаходяться в межах 110-170 Вт/м<sup>2</sup>, при оптичній інтенсивності 1 кВт/м<sup>2</sup>.

Згідно принципу перетворення світлової енергії сонячного випромінювання ФЕП на базі внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідникових матеріалах на базі кремнію (Si) або на основі гетероструктур типу А<sub>3</sub>В<sub>5</sub>, А<sub>3</sub>В<sub>6</sub>, (наприклад AlGaAs-GaAs) з домішками індію (In), арсеніду (As) та галію (Ga) та їх твердих розчинів SiP, GeIn, GaAsP, InGaAs, InGaAsP. Фотоелементи промислових сонячних батарей мають ефективну робочу площу  $S_{ef}$  від 1.2м<sup>2</sup> до 1.9 м<sup>2</sup>, яка пропорційна відсотку отриманої енергії. Одним з основних показників ефективності в залежності від ККД є величина виходу на одиницю площі [Вт/м<sup>2</sup>]. Цей показник характеризує енергетичну ефективність і компактність геометричних розмірів сонячних панелей.

Вихідна потужність модуля ФЕП буде пропорційна прийнятій інтенсивності оптичної потужності сонця  $I_{opt}$  ( $I_{opt}=P_{opt}/S$ , Вт/м<sup>2</sup>), величині коефіцієнта корисної дії перетворення  $\eta$ , коефіцієнта поглинання  $k$ , ефективній площі  $S_{ef}$ , а також косинусу кута падіння  $\alpha$ , тобто:

$$P_{FEP} = I_{FEP} \cdot U_{FEP} = \eta \cdot K_t \cdot k \cdot I_{opt} \cdot S_{ef} \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

де  $I_{FEP}$ ,  $U_{FEP}$  – робочі напруга та струм фотоелектричного модуля;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії перетворення;  $I_{opt}$  – інтенсивності оптичного випромінювання;  $k$  – коефіцієнт поглинання,  $k=0.8-0.98$ ;  $S_{ef}$  – ефективна площа поверхні модуля;  $\alpha$  – кут падіння світлових променів, 0-90°;  $K_t$  – температурний коефіцієнт,  $K_t=0.5-0.7$ .

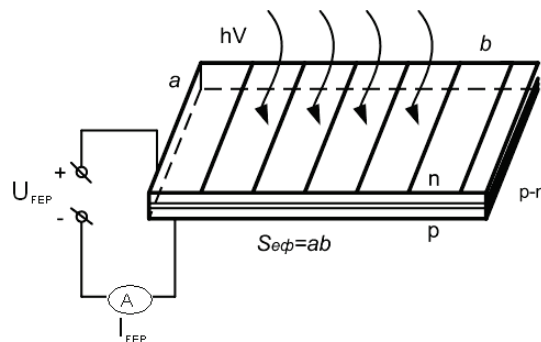


Рис. 8. Електрична схема модуля ФЕП

Для більш ефективного перетворення, кут падіння випромінювання на активну поверхню  $a$ , і він повинен максимально наближатися до 90°, що відповідає умові максимального перетворення при  $\cos 90^\circ = 1$ . Формула (1) при цьому матиме вигляд:

$$P_{FEP} = \eta \cdot K_t \cdot k \cdot I_{opt} \cdot S_{ef} \quad (2)$$

Ефективність та ККД у не слідкуючих за Сонцем ФЕП (в яких не передбачено автоматичного



наведення на Сонце) помітно змінюється протягом доби і може зменшуватись на 30-40% від максимального значення, на відміну від трекерних сонячних систем, які шляхом повороту та радіального переміщення ФЕП забезпечують умову  $\alpha=90^\circ$ . Оскільки при відмінному від  $90^\circ$  куті падіння косинус кута в (1) змінюється від 0.3 до 1 та викликає відповідне зменшення ефективної вихідної потужності  $P_{FEP}$ .

Ефективність перетворення сонячної енергії в значній мірі зменшується через відносно велике значення відбивання від поверхні ФЕП. Кількість поглиненого випромінювання буде визначатись різницею між падаючим і кількістю пропущеного і відбитого  $k_{pogl}P_{pogl} = P_{opt} - k_{vidb}P_{opt} - k_{prop}P_{opt}$ , де  $k_{pogl}, k_{vidb}, k_{prop}$  – коефіцієнти поглинання, пропускання і відбивання. Відомою умовою з теорії взаємодії оптичного випромінювання з речовиною [5] є  $k_{pogl} + k_{vidb} + k_{prop} = 1$ . Найбільше значення коефіцієнта поглинання для ФЕП визначає умову його максимальної ефективності, що відповідає більш «чорним» за темним кольором матеріалом активної поверхні ФЕП (наприклад, монокристали Si).

Через особливості побудови фотоелектричних перетворювачів виникають зниження ефективності сонячних панелей з ростом температури, тому сучасні методики визначення робочих параметрів ФЕП враховують температурний коефіцієнт  $K_t$ , що змінюється в залежності від пори року (взимку ближче до 0.7, влітку  $K_t$  наближається до 0.5).

Фактор часткового затемнення панелі викликає падіння вихідної напруги за рахунок втрат у неосвітленій області, яка виступає в ролі паразитного навантаження. Від даного недоліку можна позбутися шляхом установки схеми „бай-пас” (схеми комутації з входу на вихід комірки за допомогою діодів Шотки [2]) на кожен фотоелемент панелі, що активно використовується промисловими виробниками в якісних сонячних панелях.

Аналізуючи робочі вольт-амперні характеристики більшості фотоелектричних панелей можна побачити, що для досягнення найбільшої ефективності енергетичного виходу необхідно робити правильний підбір опору навантаження. Для цього фотоелектричні панелі не підключають прямо до навантаження, а використовують контролер керування [1-3, 7] фотоелектричними системами, що забезпечує оптимальний режим роботи панелей (рис.7).

Ефективність перетворення також залежить від електрофізичних характеристик неоднорідної напівпровідникової структури, а також оптичних властивостей ФЕП, серед яких найважливішу роль грає фотопровідність, яка визначена явищами внутрішнього фотоэффекта в напівпровідниках.

Основні втрати енергії у ФЕП можна поділити на такі фактори:

- 1) відбивання оптичного випромінювання від поверхні перетворювача;
- 2) проходження частини випромінювання через ФЕП без поглинання;
- 3) розсіювання на теплових коливаннях напівпровідникової ґратки надлишкової енергії фотонів (ріст температури);
- 4) не повне освітлення активної площі, що передбачає роботу на додатково створене власне навантаження та відповідно появу додаткового внутрішнього опору перетворювача;
- д) конструктивними та фізико-хімічними особливостями структури n/p.

Для зменшення усіх видів втрат енергії у сонячних ФЕП розробляються й успішно застосовуються різні заходи:

- 1) використання напівпровідників з оптимальною для сонячного випромінювання шириною забороненої зони, орієнтованих на ширший спектр;
- 2) технологічне покращення і адаптація властивостей напівпровідникової структури шляхом її оптимального легування і створення вбудованих електричних полів;
- 3) перехід від гомогенних до гетерогенних напівпровідникових структур;
- 4) оптимізація конструктивних параметрів ФЕП (глибини залягання p-n переходу, товщини базового шару, частоти розподілу контактної сітки провідників тощо);
- 5) застосування оптичних просвітлюючих покриттів [5];
- 6) застосування примусового охолодження активного шару ФЕП (зменшення величини  $K_t$  у формулах (1) і (2));
- 6) створення каскадних ФЕП із змішаною схемою включення.

Фотоелектричні перетворювачі, які застосовуються у енергетичних сонячних модулях повинні відповідати ряду вимог, в першу чергу високому ККД перетворення оптичного випромінювання в діапазоні 0.3 – 10 мкм в електрику. Параметри, що відповідають всьому комплексу вимог до перспективних технологій фотоелектричних перетворювачів та сонячних батарей на їх основі можуть бути отримані лише при створенні багатоперехідних каскадних гетероструктурних ФЕП на основі напівпровідникових структур групи  $A^3B^5$ , до числа яких відноситься монокристали кремнію Si та арсенід галію GaAs. Збільшення кількості p-n переходів у каскадних ФЕП дозволяє розширити область

фотоактивного поглинання випромінювання та зменшити втрати енергії. Каскадний ФЕП з 4–5-ма  $p-n$  переходами має досяжний в лабораторних умовах ККД $\approx$ 40%, на відміну від ККД $\approx$ 10-17% для одноперехідних гетероструктурних ФЕП. При характерній для ФЭП робочій температурі порядку  $T=300-350$  К (30-80 $^{\circ}$ С), їх граничний теоретично можливий ККД до 35 %.

Інсталяція моно- кремнієвих ФЕП прямокутної форми повинна враховувати напрям (Схід-Захід) руху Сонця, тоді нормаль панелі повинна орієнтувати суворо на південь (саме з півдня світловий потік є максимальним, пройшовши атмосферу під прямим кутом, з мінімальними втратами).

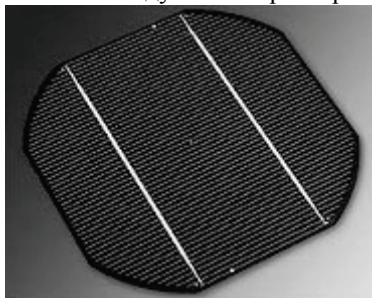
Коефіцієнт корисної дії (ККД) ФЕП (ефективність перетворення) світлової енергії в електричну емпірично визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_{elect}}{P_{optic}} \cdot \gamma \cdot 100\% \approx \frac{I_r U_r}{\Phi \cdot S \cdot \sin \varphi} \cdot \gamma \cdot 100\% , \quad (3)$$

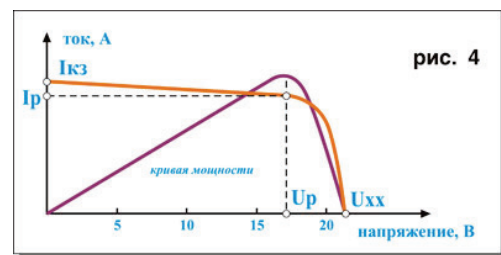
де  $I_r$ ,  $U_r$  – робочі електричні струм та напруга;  $\Phi$  – світловий потік;  $S$  – площа активної поверхні;  $\varphi$  – кут падіння променів;  $\gamma$  – коефіцієнт квантової ефективності та провідності;  $P_{elect}$ ,  $P_{optic}$  – електрична та оптична потужності.

ККД фотоелемента збільшується з ростом світлового потоку  $\Phi$  і фото-електрорушійної сили  $U_r$ . Однак при великих значеннях світлового потоку  $\Phi$  з ростом концентрації вільних носіїв зростає кількість їх рекомбінацій (злиття пар електрон-дірка в структурі  $n/p$ ). Крім того, у результаті збільшення температури модуля при великих  $\Phi$  збільшується струм  $I$ , що також є причиною зниження ККД.

Істотного підвищення ККД (до +15 %) ФЕП і сонячних батарей на їх основі вдається реалізувати за рахунок створення фотоелектричних перетворювачів із двосторонньою чутливістю [9, 10] (2 активних шари з різних боків пластини) або шляхом застосування люмінесцентно перевипромінюючих структур у поєднанні з попереднім розкладанням світлового спектра на дві або більше спектральних областей за допомогою багат шарових плівкових світлоподільників на дифракційних ґратках з послідовним перетворенням кожної ділянки спектра окремим ФЕП.



а)



б)

Рис.9.Фотоелектричні перетворювачі на основі кристалічного кремнію:  
а) зовнішній вигляд ФЕП; б) їх робоча ВАХ

### АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ЗЕМНИХ УМОВАХ

Потік сонячного випромінювання, що проходить через площу в 1 м $^2$ , на вході в атмосферу Землі розташовану перпендикулярно дорівнює в середньому 1367 Вт/м $^2$  (сонячна стала [8]). Через поглинання, при проходженні атмосфери Землі, середній у Європі потік сонячного випромінювання складає 1020 Вт/м $^2$  [8]. Але враховуючи, що значення потоку сонячного випромінювання через одиничну горизонтальну площу змінюється протягом доби, то середньодобове значення є як мінімум у 3 рази меншим (через зміну дня і ночі, і зміни кута сонця над обрієм). Узимку в помірних широтах це значення у 2 рази менше. Карту потужностей отриманих від фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання представлено на рис. 10 [8].

Аналізуючи рис. 10, для України середнє значення виходу з 1 м $^2$  поверхні ФЕП з ККД=13-14% знаходиться в межах 130-140Вт/м $^2$  (наближено). Середнє значення інтенсивності на поверхні землі в Україні лежить в межах 1050 Вт/м $^2$  або в еквіваленті енергії за добу 3.5-7.0 кВт·год/м $^2$ /день. Вінницької області середнє за рік значення інтенсивності сонячного випромінювання складає 1070Вт/м $^2$ . Потенційне вироблення сонячної енергії зменшується також через глобальне затемнення – зменшення потоку сонячного випромінювання, що доходить до поверхні Землі, але цей процес є незначним.

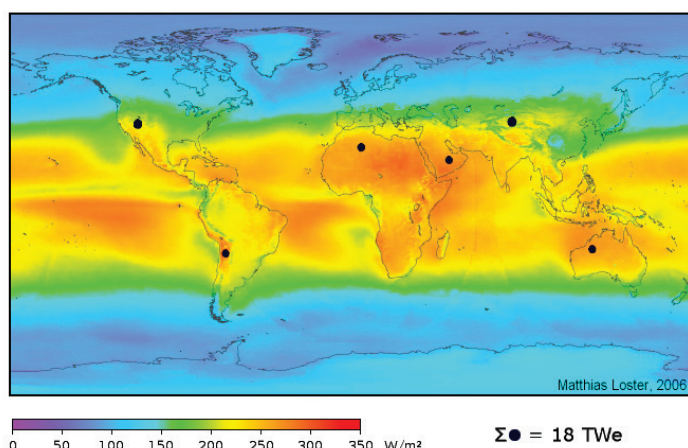


Рис.10. Карта енергетичного виходу ФЕП з середнім ККД=14%(чорними точками показано основні центри, що виробляють переважну більшість сонячної енергетики світу із сумарним значенням – 18ТВт) [8]

Інтенсивність сонячних променів за одиницю часу називають інсоляцією (insolation) [2, 8] або іншими словами середньодобова (середньорічна) енергія оптичного випромінювання.

Традиційна методика розрахунку добової енергетичної виробітки полягає у наступному: фотоелектричний перетворювач потужністю  $P_{фе}$  за контрольний період виробляє наступну кількість електричної енергії ( $E_{фе}$ ):

$$E_{фе} = k * P_{фе} * N \text{ [Вт*год, кВт*год]}, \quad (4)$$

де  $N$ -середня кількість годин у добі, інтенсивність в яких рівна  $1000 \text{ Вт/м}^2$  (STC), при цьому враховується, що кількість годин в яких інтенсивність менша скорочується із підсумовуванням інтенсивності до значень STC;  $k$  – поправочний коефіцієнт, що враховує зниження потужності (залежно від кута падіння випромінювання, рівня опромінення сонячної батареї й падіння потужності фотоелементів у результаті нагрівання: улітку приймається рівним 0,5, узимку - 0,7 оскільки елементи нагріваються в меншій ступені), середнє значення  $k=0.6$ ;  $N$  - кількість пікових годин.

Наприклад для масиву сонячних батарей на  $1 \text{ кВт}$  встановленої потужності, середня виробітка за рік для Вінницького регіону складе:

$$E_{фе} = 0.6 * 1 \cdot 10^3 * 1137 = 682 \ 220 \text{ [Вт*год/рік]} \text{ або } 682,22 \text{ [кВт*год/рік]}$$

Сумарна кількість годин за рік становить  $N=1137$  пікових год. Саме в ці пікові години забезпечується потужність  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , при якій ККД ФЕП є чітко визначеним).

З урахуванням останнього інсоляція залежить від часу доби та пори року, що враховують для більш повного використання енергії. Відповідну залежність інсоляції для України показано на рис. 11. Середнє значення інсоляції в ясну сонячну погоду коливається в межах від  $2400\text{-}3910 \text{ Вт*год/м}^2/\text{добу}$ , у похмуру може зменшуватись до  $150\text{-}320 \text{ Вт*год/м}^2/\text{добу}$ .

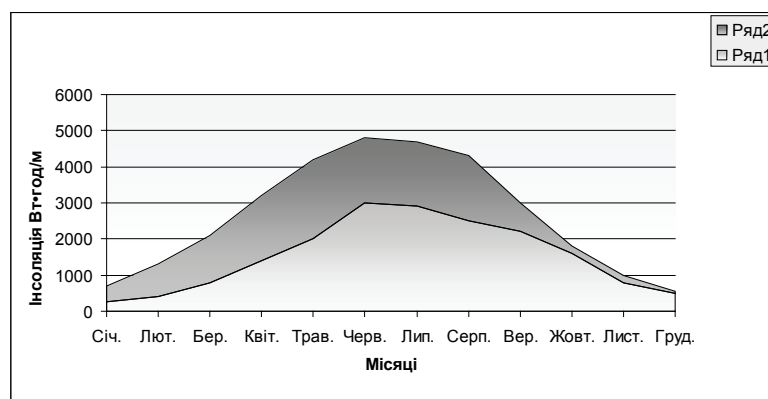


Рис.11. Графік інсоляції сонячного випромінювання в залежності від пори року: ряд1 – розсіяне випромінювання; ряд2 – пряме випромінювання

Наприклад, на широті Києва на  $1 \text{ м}^2$  поверхні при стандартному освітленні вдень за одну годину падає сонячне випромінювання, що еквівалентно  $1 \text{ кВт*год}$  електроенергії з урахуванням ККД

фотоелектричного перетворювача і всіх інших факторів втрат. За десятигодинний світловий день реально можна одержати 4-7 кВт. В зимовий час умови значно погіршуються: світловий день складає 3-5 год, кут нахилу Сонця менше, імовірність атмосферних опадів є більшою. Тому в зимовий час широтах для освітлення тієї ж квартири потрібний семиразовий запас потужності.

### СОНЯЧНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІНШИХ ТИПІВ

Зараз активно ведуться розробки тонкоплівкових фотоелектричних модулів без використання кремнію. На даний момент основним виробником є американська компанія United Solar та японська компанія Kaneka, яка не значно відстає від першої.

Як альтернатива кристалічним ФЕП (на основі моно- та полікристалів Si) поширені **тонкоплівкові** ФЕП з аморфного кремнію. На відміну від кристалічного матеріалу, у них немає структурованого положення атомів. В аморфного кремнію гірше напівпровідникові властивості та в результаті менший ККД перетворення світла. Однак для виробництва елементів необхідно набагато менше кремнію і він може бути нанесений практично на будь-яку поверхню – скло, метал або кераміка. ККД ФЕП з аморфного кремнію з одним шаром – близько 6%. Але повна частина виробництва модулів ФЕП з аморфного кремнію на ринку незначна.

CSG (Crystalline Silicon on Glass) [3, 8] ФЕП виглядають як модулі з аморфного кремнію, але насправді є кристалічними. Спеціальний технологічний процес дозволяє наносити тонкий шар кристалічного кремнію (близько 2мкм) прямо на скло (тоді як товщина традиційних ФЕП складає 200-300мкм). Електричні контакти підключаються з використанням лазерного приварювання і трафаретної печатки. Перші фотоелектричні модулі, зроблені за технологією CSG, мали ККД близько 7%.

CdTe (кадмій-теллурові) [8] фотоелектричні модулі – це спеціальна тонкоплівкова технологія має великий потенціал для зниження вартості фотоелектричних модулів. ККД CdTe - модулів досягає 9%. Зміст кадмію в модулі менше, ніж у звичайній «пальчиковій» батарейці, і європейські виробники обіцяють приймати на переробку усі «відпрацьовані» модулі.

CIS (мідно-селенові) модулі [8, 11]. Основні інгредієнти CIS модулів ФЕП – мідь Cu, індій In, селен Se та іноді галій Ga (тоді елементи позначаються як CIGS). CIS модулі мають найбільший ККД (до 11% у модулі) у групі тонкоплівкових ФЕП.

У Південній Кореї була розроблена принципово нова технологія RGB-технологія [10] тонкоплівкових модулів, що може значно сприяти масовому їх поширенню за рахунок здешевлення і збільшення енергоемності. У нових сонячних елементах присутні 3 кольорових шари на базі наногранул з діоксиду титану. Завдяки кількості шарів нові сонячні елементи можуть збирати видиме світло в трьох найбільш активних спектральних областях довжин хвиль – червоній, синій і зеленій. В результаті, сонячний фотоелемент виробляє електроенергії майже в 3 рази більше, ніж звичайні тонкоплівкові фотоелектричні панелі. Високе світлопропускання дозволяє розташовувати на дахах і вікнах житлових будинків, що не перешкоджає природному освітленню. Для створення цих елементів використовувався метод хроматографії і зовсім не використовувався кремній, що робить виробництво недорогим і незалежним від вичерпних природних ресурсів. Товщина готової плівки складає всього 20 нанометрів, вона здатна робити до 30 міліампер електрики з кожного квадратного сантиметра. ККД ФЕП на основі RGB-технології складає 17-18% [10].

*Технологія концентричних ФЕП* [2-3] передбачає фокусування сонячного випромінювання за допомогою плоских лінз Френеля на фотоелементи з невеликою площею. Розроблена ЗАО Техноексан (дочірня компанія Фізико-технічного інституту (ФТІ) ім. Йоффе, м.Санкт-Петербург, Росія). За період впродовж 30 років у **ФТІ ім. Йоффе** виготовлені одноперехідні AlGaAs/GaAs СЗ з ККД близько 25% (AM1,5) і механічно з'єднані каскадні ФП на основі сумішів AlGaAs/GaAs - In/InGaAs - (або GaSb) з ККД до 30%. У результаті проведених досліджень і розробок були створені фотоелектричні модулі з 16, 24 і 48 елементними лінзовими блоками і гетероструктурними AlGaAs/GaAs орієнтованими для застосування у високопродуктивних сонячних елементах. ФЕП виробництва ЗАО «Техноексан» при ФТІ ім. Йоффе успішно пройшли усі види лабораторних і технологічних випробувань і базуються на принципі концентрування потоку випромінювання на активний напівпровідник (рис. 12).

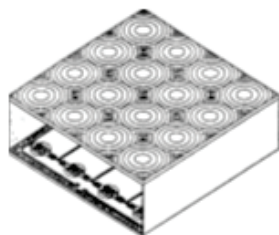


Рис.11. ФЕП з концентраторами на основі лінз Френеля

Концентрування сонячного випромінювання дозволяє, крім того, підвищити ККД гетероструктурних ФЕП до 25-35% і більш в одноперехідних елементах і до 35% - у каскадних конструкціях. Відповідно меншими є загальна площа, маса установок з концентраторами, витрата матеріалів і обсяг робіт, що пов'язані з їхнім створенням і монтажем. Великий вітчизняний і закордонний досвід експлуатації космічних ФЕП на основі GaAs і з'єднань  $A_3B_5$  показав, що GaAs-ФЕП забезпечують збільшення ККД, питомого енергозабезпечення, радіаційної стійкості й інших параметрів у порівнянні з кремнієвими ФЕП.

### ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Одним з перспективних шляхів підвищення енергетичного виходу фотоелектричних перетворювачів є використання системи дзеркал, що створюють додатковий оптичний потік на поверхню фотогальванічних рv-панелей (ФЕП) із незадіяних освітлених Сонцем площ.

Основна ідея використання дзеркал полягає у збільшенні потоку інтенсивності сонячного випромінювання більше стандартних умов по інтенсивності ( $1000-1200 \text{ Вт/м}^2$ ), що дозволить збільшити енергетичну виробітку сонячних панелей більше стандартних параметрів.

Для цього, враховуючи вимоги щодо надійності, технологічності та простоти конструкції, можна розмішувати дзеркала попереду сонячних панелей (рис.12), так щоб забезпечувалось направлення за рахунок відбивання випромінювання з невикористаних площ.

Основними труднощами на шляху застосування цього способу є: 1) збільшення площі сонячної станції за рахунок додаткового віддалення рядів сонячних батарей (solar PV-modules string); 2) перевищення номінальної інтенсивності більше стандартних умов (STC) ( $800-1000 \text{ Вт/м}^2$ ), що може призвести до збільшення ефекту деградації (SGE-effect) [13] та зменшення строку служби панелей. Це вимагає використання панелей якісного виробництва із запасом параметрів.

Авторами проведені експериментальні дослідження використання додаткових дзеркал на малій сонячній PV-комірці (PV-cell). В експерименті використовувалась фотогальванічна комірка (сонячна комірка) з номінальною напругою  $2.5V$  площею  $25 \text{ см}^2$ . Перед цією коміркою встановлювалось пересувне дзеркало, що дозволяло збільшувати інтенсивність сонячного випромінювання в півтора-два рази від початкової. В результаті експерименту отримані виміряні цифровим мультиметром (DT-180) значення напруг і струму холостого ходу (табл.2) та з активним навантаженням  $R_n=2.2 \text{ Ом}$ . Результати наведені в таблиці.

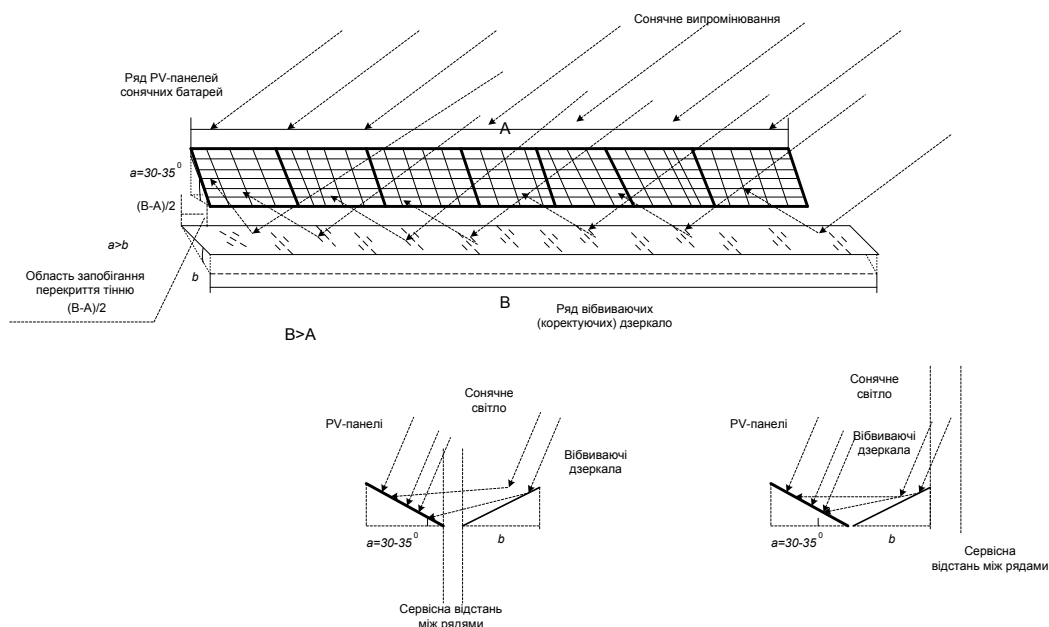


Рис.12. Конструкція з розміщеними дзеркалами для збільшення ефективності виробітки  $E$  [ $\text{кВт}\cdot\text{год}$ ] сонячних фотогальванічних PV-панелей

Вимірювання вихідної електричної потужності показали, що додаткові дзеркала дозволяють підвищити вихідну енергію до 35-60%. Єдиною задачею залишається правильне і чітке позиціонування дзеркала, для запобігання виходу відбитого ним випромінювання поза межі PV-комірки.

Таблиця.2.

## Значення електричних параметрів фотогальванічної комірки із встановленим додатковим дзеркалом та без нього

Параметр	із встановленим дзеркалом	Без дзеркала
Напруга холостого ходу, $U_{\max}$	2.36 В	2.32 В
Струм $I_{\max}$ із навантаженням $R_n=2.2\text{Ом}$	320.8 мА ( $U_{\max}=1.29\text{ В при } 2.2\text{Ом}$ )	260.3 мА ( $U_{\max}=1.18\text{ В при } 2.2\text{Ом}$ )
Кут нахилу сонячної комірки, $a$	30-35 <sup>0</sup>	
Кут нахилу дзеркала, $b$	15-20 <sup>0</sup>	
Кут між коміркою і дзеркалом	120-140 <sup>0</sup>	
Активна потужність $P=\Gamma_{\max}^2 * R_n$ , Вт	2.4 Вт	1.5 Вт
Температура фотогальванічної комірки, <sup>0</sup> С	45-50 <sup>0</sup> С	

В результаті експерименту встановлено, що додаткове дзеркало, яке направляє світловий потік з невикористаної площі (за умови повної освітленості PV-панелі) дозволяє збільшити потужність на 60% (табл.2). Ефект деградації при подвоєнні інсоляції PV-комірки в експериментах не вивчався. Фотографія експериментальної установки з PV-модулем 1.5Вт (полікристалічний кремнієвий ФЕП 2.2В 400мА) та розташованим під ним дзеркалом з кутовою корекцією.



Рис.2. Фотографія експериментального макету

Як раніше відзначалося, другим дієвим шляхом є забезпечення автоматичної корекції кута падіння сонячних променів на поверхню ФЕП шляхом використання слідкуючих трекерних систем. Для перевірки цього був проведений практичний експеримент на базі цього ж дослідного зразка полікремнієвого ФЕП.

Інтенсивність потоку сонячного випромінювання на поверхні Землі для Вінницького регіону складає наближено 1050-1170 Вт/м<sup>2</sup>. Середній відсоток енергетичної ефективності промислових монокристалічних ФЕП 14%. Для більш ефективного перетворення, кут падіння випромінювання на активну поверхню  $\alpha$  повинен максимально наближатися до 90<sup>0</sup> (або 0<sup>0</sup> по відношенню до нормалі), що відповідає умові максимального перетворення при  $\cos\alpha=1$

Як відомо, значення кута падіння  $\alpha$  можна визначити за положенням Сонця (а також тіні від предметів) у визначений час доби. Для Вінницького регіону лінія руху Сонця над горизонтом знаходиться у південній півкулі (південний напрям), що визначає необхідну орієнтацію модулів ФЕП – суворо на південь. Наприклад, у 7.00 ранку тінь від перпендикулярного до поверхні Землі лінійного предмета буде направлена суворо на захід; у 13.00 ця тінь буде направлена на північ; а у 19.00 – на схід. Цей принцип (визначення азимуту) покладено у роботу сонячного годинника, відомого ще багато тисячоліть тому.

Із цього випливає, що середній час руху Сонця над горизонтом дорівнює 12 год, із центром що припадає на 13.00 годину. Саме на цей центр (13.00) год і припадають максимально ефективні умови падіння променів – кут падіння до перпендикуляра поверхні ФЕП наближається до 0<sup>0</sup> (кут по відношенню до нормалі).

При цьому слід відмітити, що по відношенню до поверхні Землі модулі ФЕП промислово

встановлюють під кутом  $\sim 45^{\circ}$ , що відповідає куту нахилу Сонячних променів над горизонтом ( $\sim 45^{\circ} - 45^{\circ} \approx 0^{\circ}$ ). Розділивши повну траєкторію руху Сонця у площині  $180^{\circ}$  на 12 год, отримуємо кут  $15^{\circ}$  що відповідає 1-й годині часу руху Сонця над горизонтом. Тобто, через кожну годину, тілесний кут руху сонячного диска над обрієм (азимут) буде змінюватись на  $15^{\circ}$ . Побудуємо таблицю залежностей кута руху Сонця в часі за одну світлову добу.

Таблиця3.

**Залежність азимута від часу в одній світловій добі\***

№	Час світлової доби	Радіальний кут падіння(азимут) променів Сонця	Кут до нормалі поверхні ФЕП
0.	7.00	$0^{\circ}$	$90^{\circ}$
1.	8.00	$15^{\circ}$	$75^{\circ}$
2.	9.00	$30^{\circ}$	$60^{\circ}$
3.	10.00	$45^{\circ}$	$45^{\circ}$
4.	11.00	$60^{\circ}$	$30^{\circ}$
5.	12.00	$75^{\circ}$	$15^{\circ}$
6.	13.00	$90^{\circ}$	$0^{\circ}$
7.	14.00	$105^{\circ} (-15^{\circ})$	$-15^{\circ}$
8.	15.00	$120^{\circ} (-30^{\circ})$	$-30^{\circ}$
9.	16.00	$135^{\circ} (-45^{\circ})$	$45^{\circ}$
10.	17.00	$150^{\circ} (-60^{\circ})$	$-60^{\circ}$
11.	18.00	$165^{\circ} (-75^{\circ})$	$-75^{\circ}$
12.	19.00	$180^{\circ} (-0^{\circ})$	$-90^{\circ}$

\* У таблиці не враховано зміну кута нахилу  $\beta$  по відношенню до вертикального напрямку (середнє знач. цього куту  $45^{\circ}$ ), але вертикальний кут змінюється в залежності від пори року: найменший взимку ( $15-20^{\circ}$ ) і найбільший влітку ( $40-45^{\circ}$ ).

Якщо врахувати вертикальний кут  $\beta$ , то формула (1) прийме вигляд:

$$P_{FEP} = I_{FEP} \cdot U_{FEP} = \eta \cdot k \cdot I_{opt} \cdot S_{ef} \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\varphi - \beta), \quad (5)$$

де  $\varphi$  – кут нахилу модуля ФЕП (сонячної батареї) до поверхні землі (рівень моря)

Формула (5) є найбільш повною математичною моделлю, яка описує роботу сонячних батарей і ФЕП в земних умовах. Різниця кутів  $(\varphi - \beta)$  визначає кут між перпендикуляром поверхні (нормаллю) ФЕП і безпосередньо напрямом (вектором падіння) сонячних променів. Але як правило, на практиці у більшості фотоенергетичних системах кут нахилу модуля  $\varphi$  застосовують наближеним до  $45^{\circ}$ , що передбачає майже вертикальне падіння променів на поверхню ФЕП.

Проведені експериментальні дослідження параметрів у двох варіантах встановлення ФЕП (рис.2): з автоматичним наведенням на Сонце (за допомогою застосування спеціально підготовленої мініатюрної трекерної системи на мікроконтролері з оптичними датчиками); стаціонарного варіанту розміщення дослідного ФЕП. Отримані параметри в різний час доби (табл.3) вводились в комп'ютерну програму MathCAD для моделювання характеристик ФЕП. (рис.14, рис.15).

Research electricity power generation from sun power photovoltaik cells  
FW sun angle

1. Crystalline silicon 2Wp PV-cell params:

$$I_{max} = 5.86 \text{ mA} \quad U_{max} = 2.40 \text{ V} \quad \text{Time}(I_{max}) = 13.30 \text{ h} \quad R_n = 393 \text{ Ohm} \quad U_2 / R = \frac{2.4^2}{393} = 1.5 \text{ W}$$

$\begin{pmatrix} 19.00 \\ 18.00 \\ 17.00 \\ 16.00 \\ 15.00 \\ 14.00 \\ 13.00 \\ 12.00 \\ 11.00 \\ 10.00 \\ 9.00 \\ 8.00 \\ 7.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5.75 \\ 5.78 \\ 5.82 \\ 5.84 \\ 5.85 \\ 5.85 \\ 5.86 \\ 5.81 \\ 5.79 \\ 5.75 \\ 5.73 \\ 5.72 \\ 5.70 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.35 \\ 2.36 \\ 2.37 \\ 2.38 \\ 2.38 \\ 2.38 \\ 2.40 \\ 2.37 \\ 2.36 \\ 2.35 \\ 2.33 \\ 2.32 \\ 2.31 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \\ 5.86 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \\ 2.40 \end{pmatrix}$
--	--	--	--	--

$P_{eW} := I \cdot U \cdot 10^{-3} \text{ Watt}$	$P_{emW} := I \cdot U \text{ mW}$	$P_{eWtracker} := I_{tracker} \cdot U_{tracker} \cdot 10^{-3} \text{ Watt}$
$P_{eW} = 0.177 \text{ Watt}$		$P_{emWtracker} := I_{tracker} \cdot U_{tracker} \text{ mW}$
$P_{emW} = 177.491 \text{ mW}$		$P_{eWtracker} = 0.183$
$X := \frac{177.491}{182.832} \cdot 100 \%$	$X = 97.079$	$P_{emWtracker} = 182.832$
$P_{emW1} := 177.51 \text{ mW}$	$P_{emW1tracker} := 182.78 \text{ mW}$	

Рис.14. Початкові дані отримані в результаті експерименту та процес їх введення у середовищі комп'ютерного моделювання MathCAD

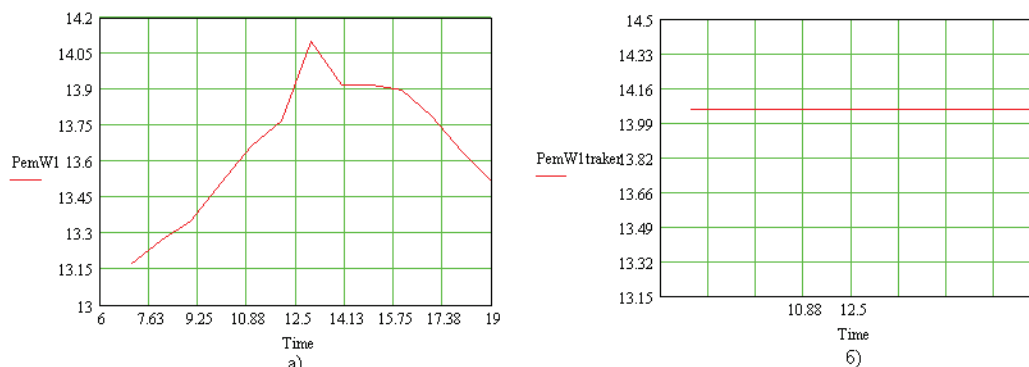


Рис.15. Процес обробки експериментальних результатів та графіки залежності виробітку електроенергії [Вт\*год] від часу доби з 8.00 до 19.00(справедливо для червня 2011):  
а) для стаціонарного розміщення ФЕП; б) для системи, що забезпечує слідкування за рухом Сонця на протязі доби

Як показують результати обробки експериментальних даних у середовищі MathCAD (рис.15), у слідкуючій системі на базі фотогальванічної комірки забезпечується вироблення електричної енергії майже на 45% більша порівняно із стаціонарним варіантом інсталяції модуля ФЕП, що також підтверджує математична модель (1) енергоефективності ФЕП.

Підводячи підсумки, можна сказати, що оптимальним з точки зору отримання максимальної виробітку електроенергії за допомогою сонячних батарей є комбіноване використання поєднаних ФЕП на базі слідкуючих (трекерних) систем із додатковими встановленими дзеркалами, що збільшують оптичний потік на активну поверхню. Це дозволить отримати максимальне використання енергетичного ресурсу сонячних панелей і як наслідок з економічної точки зору – зменшити строк їх окупності.

### ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів в галузі сонячної енергетики, який показав динамічні тенденції до розвитку технологій ФЕП та підвищення їх експлуатаційних та технічних характеристик в швидкозростаючій і перспективній галузі фотовольтаїки.
2. На основі проведеного аналізу встановлено, що кращим варіантом застосування в



промисловості у виробництво є монокристалічні фотоелектричні сонячні модулі, оскільки мають найвищі техніко-економічні показники: вищий ККД (до 16-17%), високу надійність (до 25-50 років експлуатації із допустимим падінням потужності до 80% від максимальної в новому модулі) та вищу стабільність параметрів.

3. На основі аналізу сучасних технологій застосування ФЕП встановлено, що максимальна енергетична ефективність досягається при нормальному куті падіння сонячних променів (900) , а сам робочий напівпровідниковий матеріал ФЕП повинен мати найменшу температуру. Оптимальним режимом роботи є забезпечення автоматичної корекції кута падіння за допомогою систем автонаведення на Сонце (трекери), що дозволяє отримувати на 40-45% вище енергії порівняно зі стаціонарним варіантом, що підтверджено експериментально. Також для підвищення енергетичної ефективності перспективним і практично реалізованим є використання оптичних дзеркал, що направляють додатковий оптичний потік на поверхню ФЕП. Показано, що це дозволяє підвищити енергетичний вихід до 60%.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth // SUN & Wind Energy. –Vol.5. –2011. – pp.256-263.
2. Бекиров Э.А. Компьютерное моделирование сложных энергосистем с концентраторами солнечной энергии / Э.А.Бекиров, А.П.Химич // Відновлювана енергетика . – №1(24). –2011. – с.74-81.
3. Фаренбрух А. Солнечные элементы: теория и эксперимент : [Пер. с англ. И.П. Гавриловой и А.С. Даревского; под ред. М.М. Колгуна] / А. Фаренбрух, Р.Бьюб . –М.: Энергоатомиздат, 1987. –280с. –ил.
4. Солнечная энергетика: обзор отрасли : [Электронный ресурс] / по материалам компании Nitel Solar Limited. – Режим доступа World Wide Web: <http://nitolsolar.com/rusolarenergy/>
5. Украина и Россия: обзоры рынка фотовольтаики, август 2011: [Электронный ресурс] / О.Е. Гадалова, С. Г.Симоненко, Б.Л. Эйдельман, В.М. Звероловлев, Д. Лукомский, М. Черевко, и др. //Открытый отчет информационно-аналитического агентства Cleandex PV . – Режим доступа World Wide Web: [http://www.cleandex.ru/cleanwatch/2011/08/29/Russia\\_and\\_Ukraine\\_photovoltaic\\_market\\_report\\_2011](http://www.cleandex.ru/cleanwatch/2011/08/29/Russia_and_Ukraine_photovoltaic_market_report_2011)
6. Сафонов В.А.Разработка комбинированной солнечной установки для автономного потребителя / В.А.Сафонов, В.В.Кувшинов // Відновлювана енергетика . – №4(23). –2010. – с.61-69.
7. Eckart von Malsen. Opportunities for large-scale projects // SUN & Wind Energy. –Vol.5. –2011. – pp.254-255.
8. Solar energy / Wikipedia, [Free Internet Encyclopedia]. – Режим доступа World Wide Web: [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy)
9. Gil Knier. How do Photovoltaics Work? : [Электронный ресурс] / по материалам NASA Science Headline News by Knier Gil . – vol.34. –2002. – pp.245-247. – Режим доступа World Wide Web: <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>
10. Photovoltaic energy, electricity from the sun : [Электронный ресурс] / Daniel Fraile, Marie Latour, Adel El Gammal, Michael Annett. // EPIA Publications. –vol.50.– april 2010. – Режим доступа World Wide Web: <http://www.epia.org/publications/photovoltaic-publications-global-market-outlook.html>
11. Chunfeng Hou, Zhongxiang Zhou, Xiudong Sun, Baohong Yuan. Incoherently coupled grey-grey screening-photovoltaic soliton pairs in biased photovoltaic-photorefractive crystals // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. –Vol. 112. – Issue 1 . – 2001 . – PP. 17-20.

Надійшла до редакції 20.10.2011р.

**КОЖЕМ'ЯКО В.П.** – засл. діяч науки і техніки України, академік АІНУ, д.т.н., проф., завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ДОМБРОВСЬКИЙ О.Г.** – кандидат економічних наук, провідний науковий співробітник інституту світової економіки і міжнародних відносин НАН України, Київ, Україна.

**ЖЕРДЕЦЬКИЙ В.Ф.** – директор підприємства ТОВ „Агробудтехнології”, Вінниця, Україна.

**МАЛІНОВСЬКИЙ В.І.** – кандидат технічних наук, науковий співробітник, асистент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

**ПРИТУЛЯК Г.В.** – студентка 4-го курсу кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.