

УДК 681.3.021

В. П. КОЖЕМ'ЯКО, О. Г. ДОМБРОВСЬКИЙ, В. І. МАЛІНОВСЬКИЙ

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЄКТІВ БУДІВНИЦТВА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ІЗ ВРАХУВАННЯМ БАЗОВИХ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, вул.Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація. В роботі проаналізовані проблеми, які виникають на шляху будівництва промислових сонячних електростанцій (СЕС) — як альтернативного шляху забезпечення енергетичної безпеки України в умовах сьогодення. Запропоновані підходи до оптимізації проєктів на стадії будівництва в складних умовах на території України. Наведені і виділені ключові критерії та техніко-економічні показники промислових проєктів СЕС, які розглядаються на стадії перспективного та діючого будівництва. Приведені умови максимальної стабільності та доцільності проєктів СЕС за урахуванням факторів ризику і умов максимальної стабільності.

**Ключові слова:** сонячна електростанція(СЕС); інсоляція; виробітка енергії; оптичне, сонячне випромінювання; встановлена потужність; фотовольтаїка, інвертор; сонячна панель; сонячний модуль.

**Аннотация.** В работе проанализированы проблемы, которые возникают на пути строительства промышленных солнечных электростанций (СЭС) — как альтернативного пути обеспечения энергетической безопасности Украины в сегодняшних условиях. Предложенные подходы к оптимизации проєктов на стадии строительства в сложных условиях на территории Украины. Приведенные и выделены ключевые критерии и технико-экономические показатели промышленных проєктов СЭС, которые рассматриваются на стадии перспективного и действующего строительства. Приведены условия максимальной стабильности и целесообразности проєктов СЭС за учетом факторов риска и условий максимальной стабильности.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция (СЭС); инсоляция; выработка энергии; оптическое, солнечное излучение; установленная мощность; фотовольтаика, инвертор; солнечная панель; солнечный модуль.

**Abstract.** In the paper analyzed the problems that arise in the way of construction of industrial solar power stations — as an alternative way of providing energy security of Ukraine in today's conditions. The approaches to the optimization of projects under construction in difficult conditions in Ukraine. These and highlighted key criteria's and technical and economic indicators of industrial solar station projects being considered at the stage of prospective and existing construction. Resulted conditions of maximum stability and feasibility projects with considering a risk factors and maximum stability conditions.

**Keywords:** solar power (SES); insolation; Production volumes of energy; optical, solar radiation; installed capacity; Photovoltaics, inverter; solar panel; solar module.

### ВСТУП

Одним із перспективних напрямів відновлювальних джерел енергії, є сонячна енергетика, або фотовольтаїка (photovoltaics). В остання десятиліття дана галузь активно розвивається в світовій промисловості і побуті. Завдяки розвитку нових технологій і запровадженню субсидованих тарифів («зелених» тарифів) сонячні енергетичні системи і пристрої дозволяють здійснювати ефективний виробіток та економію електричної енергії, завдяки природнім, практично не вичерпним можливостям світлового випромінювання Сонця із практично відсутнім 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, Китай, а також Україна.

Сучасний стан галузі сонячної енергетики визначається основною тенденцією економії використання ресурсів встановленої потужності. Основний акцент робиться виробниками і розробниками компонентів СЕС на використання здешевленого обладнання і зменшення техніко-економічного показника встановленої потужності  $k\$/kW$  [1]. Якщо у 2012—2014 роках для фотоелектричних сонячних панелей (сонячні батареї) цей показник вже подолав психологічну відмітку  $1\$/1Вт$ , що стало значним стимулом для інвестування в сектор відновлювальних джерел енергії та розвитку програм отримання субсидованих («зелених тарифів») в різні країнах Європи і Америки, то у

2015—2016 роках відбувається основна тенденція зменшення вартості всього обладнання і проектів СЕС в цілому. Зараз ця величина для сонячних панелей становить 0.7-0.8\$/1Вт – для полі- кремнієвих панелей та 0.8-0.9\$/1Вт – для моно- кремнієвих. Вцілому, по прогнозам експертів та враховуючи динаміку ринку, якщо ціна на панелі в 2015 році сягнули величини 0.75\$/Вт, то у 2018 вони стануть 0.5\$/Вт [2].

При цьому ціна проектів СЕС в світі під ключ складе близько 1,2—1,8\$ за Вт номінальної встановленої потужності. 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, вироблюваної «сонячними батареями» знизиться до рівня менш ніж 0,10 € за кВт/год для промислових установок і менш 0,15 € за кВт/год для установок у житлових будинках [2].

Зараз ціни системи СЕС під ключ для мережевих проектів у межах України складає 1,1—1,3 \$/1 Вт встановленої потужності (монтаж, і проекти та пусконаладжувальні роботи). Це в основному інверторні On-Grid системи сонячних електростанцій без акумуляторних батарей АКБ, які працюють як компенсатори потужності мережі або як системи із скидом вироблення/залишків електроенергії мережу. При цьому у всій Європі спостерігається чітка тенденція до зменшення субсидованих «зелених» («*fid*») тарифів, оскільки частка відновлювальних джерел в загальному енергобалансі зросла та відповідає необхідності стрімкої підтримки відновлювального сектору. Вигідними умовами для гравців ринку залишилось першочерговість входу на ринок: у вииграші залишились ті, хто раніше інсталивав сонячні електростанції в аграрному, промисловому та приватному секторах, які вже окупились і працюють на генерацію. Разом із сукупною тенденцією здешевлення питомої вартості джерел енергії та стрімкими падіннями цін на нафту, економічна доцільність проектів СЕС спадає. Особливо це спостерігається для проектів, що знаходяться на стадії будівництва, які мають високі ризики і значно великі терміни окупності.

Але в Україні існує проблема ефективного розвитку побудованих проектів СЕС, а також проектів на стадії будівництва у важких умовах економічної та військової кризи. Ця проблема потребує вирішення шляхів оптимізації та запровадження нових підходів, як технічних та економічних за оптимізацією ключових показників СЕС.

Основними техніко-економічними характеристиками сучасних СЕС є:

- кількість виробленої електричної енергії (kWh, кВт/год);
- встановлена потужність сонячних модулів станції (kW, кВт);
- максимальний обсяг інвестицій повної реалізації проекту СЕС (тис./млн. \$, грн);
- середній показник вартості встановленої потужності проекту СЕС (тис. \$/kW, тис. грн./кВт);
- термін окупності інвестицій (міс., років);
- середній питомий прибуток станції в залежності від кількості виробленої електроенергії (тис. \$/міс, тис. грн./міс);
- тип проекту станції СЕС: з підключенням та скидом електроенергії в мережу (on-grid), автономна СЕС (off-grid); гібридна СЕС (tue-grid).

Ключовою задачею будь-якого проекту СЕС є отримання максимальної кількості електричної енергії в залежності від погодних умов сонячної інсоляції (кількості випромінювання Сонця kW/m<sup>2</sup>) для кожного конкретного регіону встановлення [1—3]. Відповідно задачею є отримання максимальної економічної ефективності станції та середнього питомого прибутку в конкретних умовах встановлення, та максимальної значення при мінімальних кількості інвестицій проекту.

### БАЗОВІ СТРУКТУРИ ПРОЕКТІВ СЕС

Кожна сонячна електростанція (СЕС) складається із набору встановлених на монтажні конструкції сонячних батарей, які в свою чергу складаються із набору окремих сонячних елементів (рис. 1). 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 для живлення інверторів в оптимальному режимі без суттєвих електричних втрат. Для прикладу напруга в оптимальному режимі промислових мережевих інверторів СЕС складає від 250 до 560В, а одна батарея має напругу 27—45 В (на один напівпровідниковий *p-n* перехід виробляє стандартну напругу 0,6-1 В. кількість їх в батареї складає від 30 до 75). На рис. 1 наведено структурну схему вироблення енергії за допомогою модулів сонячних фотоелектричних перетворювачів.

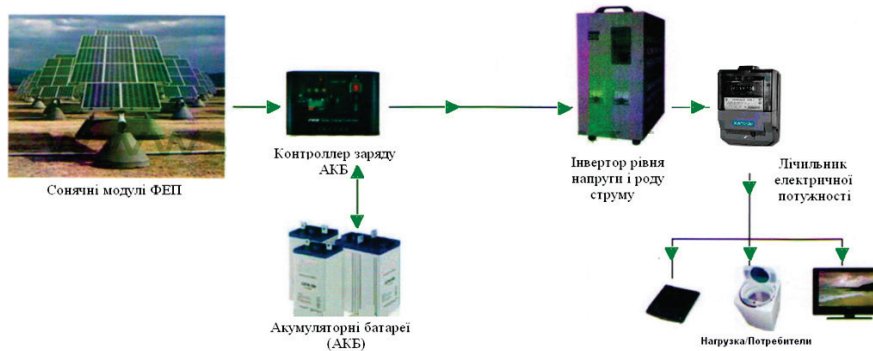


Рис. 1. Структура процесу вироблення енергії за допомогою модулів сонячних ФЕП [1]

Стандартна схема сонячної станції на базі ФЕП (рис. 1) 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. В промислових варіантах проєктів СЕС, набори сонячних батарей об'єднуються в масиви і кластери. Кожен такий кластер сонячної електростанції передбачає використання окремого інвертора, трансформатора та схеми з'єднання сонячних модулів із схемами контролю і захисту.

Для прикладу наведемо склад промислового проєкту СЕС на 40кВт на базі полікристалічних сонячних модулів.

Склад системи СЕС:

- 200 шт АКБ 12В 200 А\*год ( наприклад, Changeller 12/200);
- 400 сонячних модулів модуля по 250Вт ( наприклад, YL-250/260 від виробника Yingli Solar(Китай)) на встановлену потужність 100 кВт (пік), а також відповідна кількість систем кріплення;
- інвертори 6шт×Хantech 17 000 (6×Хantech 17 000TL) MPPT 380V AC 50Hz, 3Ф 17,5kW (18kVA), синусний ККД  $\geq 98$  % із режимом суміщення (компенсації) навантаження від зовнішньої мережі 380В;
- схема комутації та дистанційного керування;
- бокси та приміщення АКБ;
- можливі контролери заряду (+5—7 % вартості сонячних модулів), але функції покладені в систему інверторів Хantech 17 000 TL
- бокси (короба) захисту та з'єднання, а також інші силові комунікації.

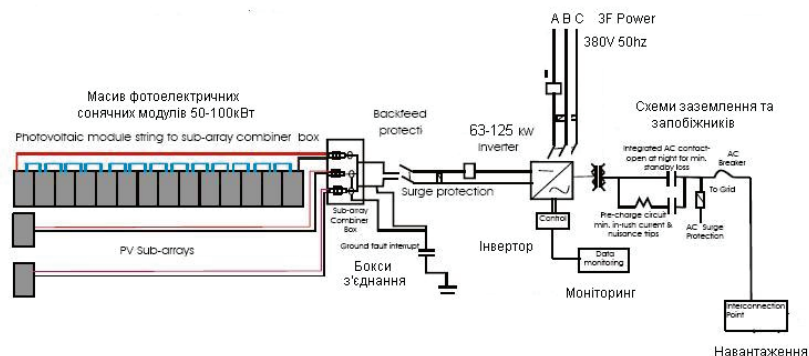


Рис. 2. Промислова сонячна електростанція на 50—100 кВт (пік, мах) типу «on-grid» (із підключенням до зовнішньої електроенергетичної мережі 380 В)

Враховуючи закордонний та відчизняний досвід, оптимальним в проектах СЕС є використання сонячних фотоелектричних модулів промислових серії від 220 до 260Вт з полікристалічного кремнію, оскільки по-перше полікристалічний кремній є більш толерантним до кутового і дифузного світла при майже однаковій середньорічній виробітці і вартості порівняно з монокристалічним, а по-друге промислова серія PV 220–260 Вт є серединою більшості промислових лінійок модулів від 60 % світових виробників (компаній із високою якістю продукції, компаній-виробників 1-го ешелону), і з точки зору максимального коефіцієнта передачі потужності з площі (ККД модуля а не ККД матеріалу пластин) є найбільшим вигідним в середньому промисловому діапазоні. Можливим також є використання модулів в діапазоні 185—225 Вт.

Для прикладу у великих промислових проектах від 1 МВт, загальна кількість модулів постійної потужності виходячи з технічних даних 1МВт складає  $1\ 000\ 000 / 225 = 4464$  шт. Сумарна активна площа:  $1,63\ \text{м}^2 \times 4464 = 7276,5\ \text{м}^2$  (0,7277 Га). Площа електростанції складає  $7276,5\ \text{м}^2 \times 3 = 21\ 830\ \text{м}^2$  (2,183 Га), оскільки в промислових проектах коефіцієнт використання площі в середньому береться рівним 3.

Середньодобова виробітка СЕС на 1 МВт протягом року для центральних регіонів України одного модуля 225Вт складає 0.7кВт\*год /добу/рік (3.11світлових годин з потужністю 1000Вт/м<sup>2</sup> (STP)-стандартні тестові умови в яких P = 225Вт) – для одного модуля, та 0.7кВт\*год × 4464 = 3 125 кВт\*год /добу/рік (3,125МВт\*год /добу) для СЕС на 1МВт. Сумарна виробітка протягом року СЕС на 1МВт для центральних регіонів України складає:

$$3\ 125\ \text{кВт*год} \times 365 = 1\ 140\ 625\ \text{кВт*год} (1,140625\ \text{ГВт*год})$$

Цей потенціал можна використати в промислових проектах по утилізації енергії Сонця від продажу електричної енергії в єдину електромережу по зеленому тарифу.

Структура промислової сонячної станції на 1 МВт встановленої потужності складає з окремих блоків, що гальванічно розв'язані між собою трансформаторами, і дозволяють забезпечити як більшу стабільність роботи (надійність енергопостачання) так і менші енергетичні затрати в лініях і каскадах. Структурна схема сонячної електростанції зображена на рис. 3.

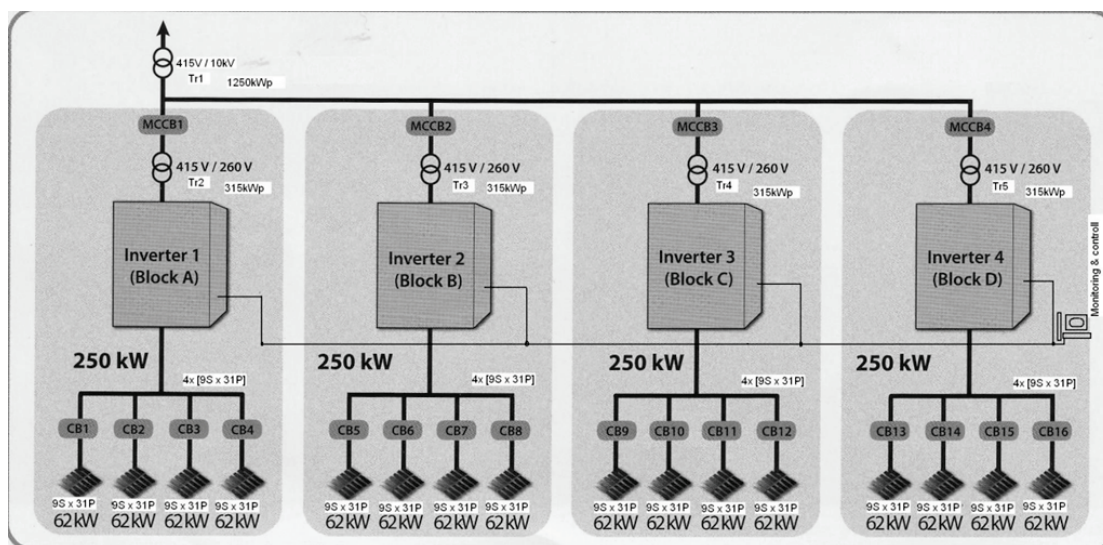


Рис. 3. Структура сонячної електрогенеруючої станції 1 МВт встановленої потужності на базі полікристалічних панелей по 225 Вт

На структурі прийняті такі позначення: Tr1 — силовий мережевий трансформатор 50 Гц 0,4/10 кВ 1 МВт (загальна повна потужність 1250kVA, Power Factor  $\cos\phi = 0,8$ ); Tr2-Tr5 — силові секційні проміжні трансформатори 50 Гц 0,26/0,4кВ 250 кВт(загальна повна потужність 315 kVA, Power Factor  $\cos\phi = 0,8$ ); MCCB1-MCCB4 — бокси захисту і силові комутатори відключення лінії; CB1-CB16 — бокси управління і визначення робочої точки яйцки сонячних модулів (MPPT-схеми або високовольтні контролери) на номінальну потужність 62 кВт; S-послідовний тип підключення модулів (serial connection); P-паралельний тип підключення комірок з послідовно підключеними модулями. Кожна комірка представляє собою MPPT-схему з напругою 260 V DC і струмом 240А, на номінальну потуж. P = 62 кВт.

Загальна формула комбінованої схеми підключення для кожної з 16 окремих ланок по 62 кВт складає : 9S·31P для модулів по 225 Вт, тобто модулі повинні підключатися паралельно 31 ланки по 9шт в кожній підключених послідовно. Таким чином загальна кількість модулів в ланці складає 279 шт. Сумарна кількість модулів електростанції 16 x 279 = 4464 по 225 Вт кожен на загальну встановлену потужність 1 МВт. При зміні типу і величини потужності модуля необхідно робити перерахунок формули підключення.

Схема сонячної електростанції відноситься до типу «on-grid» систем, що передбачає зв'язок з електроенергетичною мережею на рівні 2-го класу з напругою 10 кВ. Принцип роботи системи полягає у перетворенні сонячного випромінювання масивами фотоелементів в кожній ланці в електричну енергію в кожній окремій з 4-х ячеек по 62 кВт. Схема підключення — комбінована з набором 9 послідовно підключених модулів в ланці, 31 ланка підключена паралельно. Кожна ячейка представляє собою MPPT-блок, в якому модулі компонується для досягнення постійної напруги 260V (DC) і струмом 240 А номінальну потужність  $P = U_p \cdot I_p = 260 \text{ V} \cdot 240 \text{ A} = 62,4 \text{ кВт}$ . Для досягнення промислової частоти 50Гц, в кожній ячейці використовуються безтрансформаторні інвертори, що здійснюють перетворення роду струму з постійного в змінний та направляють його у секції трансформатори Tr2-Tr5, що здійснюють HV-перетворення (High Voltage Conversion) до рівнів 415 В(0,4 кВ) з діючим рівнем напруги 380В. Тип виходу з трансформаторів — 3-х фазний розрахований на повну електричну потужність 315 kVA. Повна потужність враховує активну та реактивну складову, з урахуванням типу традиційних силових навантажень по реактивній складовій при синусній формі сигналу ( $\text{Power Factor } \cos\phi = 0,8, P[\text{kWp}] = P[\text{kVA}] \cdot \cos\phi, P[\text{kVA}] = P[\text{kWp}] / \cos\phi$ ), номінальний вихід по потужності повинен складати  $P[\text{kWp}] = 315 / 0,8 = 250 \text{ кВт}$  з кожної з чотирьох ячеек.

3-х фазний струм напругою 0,4 кВ з проміжних секційних трансформаторів Tr2-Tr5 комбінується по кожній з 3-х фаз А, В, С(слід зазначити, що інвертори (Block A — Block C) повинні мати функцію синхронізації фаз) в одну силову 3-х фазну лінію і направляється на силовий мережевий трансформатор Tr1, що здійснює перетворення електроенергії [ 50 Гц 0,4 кВ 1100 А / на фазу] до рівня 2-го класу електричних мереж [10 кВ 3-фази по 60 А / фазу]. Силовий мережевий трансформатор Tr1 повинен мати повну потужність 1250кVA, з розрахунку на 1 МВт (1000кВт) номінальної при синусній формі сигналу ( $\text{Power Factor } \cos\phi = 0,8, P[\text{kVA}] = P[\text{kWp}] / \cos\phi, P[\text{kVA}] = 1000 / 0,8 = 1250 \text{ kVA}$ ). При цьому номінальний вихід по потужності складатиме 1000 кВт (1 МВт).

Система управління і моніторингу (Monitoring & Controll System) дозволяє здійснювати керування кожним з 4-х інверторів (Block A – Block C), вимушене або аварійне відключення кожної з 4-х ячеек по 250 кВт, а також дозволяє проводити моніторинг виробітки кВт\*год/добу як всієї станції, так і кожної з 4-х ячеек. Дані при цьому можуть передаватись до місцевого РЕС для щоденного моніторингу виробітки електроенергії за вимогами Проекту Закону України про зелений тариф №2010д.[4]

Для прикладу на рис. 4 приведений графік залежності ефективності виробітки сонячної електрогенеруючої станції на 1МВт встановленої потужності в Японії (м. Нігата) на базі сонячних фотоелектричних модулів по 225 Вт.

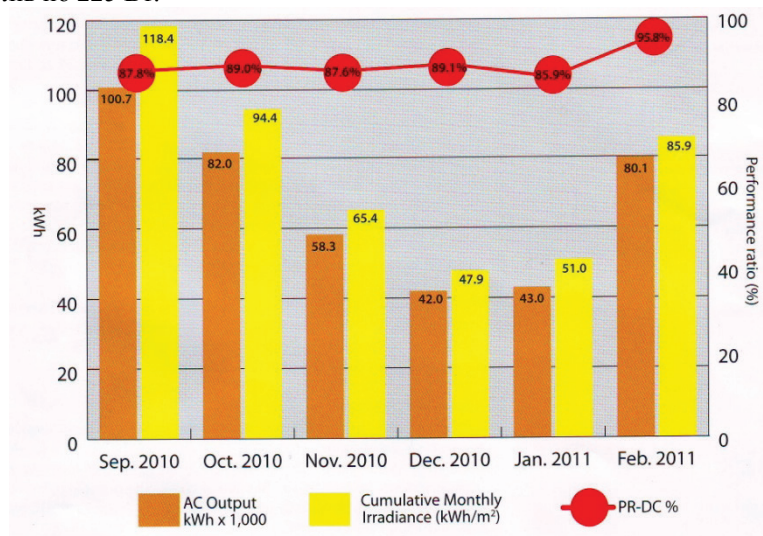


Рис. 4. Графік ефективності сонячної електрогенеруючої станції в Японії (м. Нігата) [3]

Для визначення потужностей фотоелектричних сонячних батарей необхідно скористатись методикою розрахунку по інсоляції за місяць.

Виробітка (електроенергія) сонячних панелей розраховується по наступній формулі [1]:

$$E_{\text{сб}} = I_{\text{инс}} \cdot P_{\text{сб}} \cdot \eta \cdot k / P_{\text{инс}} = I_{\text{инс}} (N) \cdot P_{\text{сб}} \cdot \eta \cdot k / 1000 \quad (1),$$

де  $E_{\text{сб}}$  — виробітка енергії сонячними батареями (кВт\*год);  $I_{\text{инс}}$  — місячна інсоляція квадратного метра (з таблиці інсоляції), або чиста променева енергія Сонця, вироблена за цілу кількість годин  $N$ ;  $P_{\text{сб}}$  — номінальна потужність сонячних батарей;  $\eta$  — ККД інвертора при перетворення низьковольтної постійної напруги в стандартне (якщо передбачається використовувати низьковольтну напругу напругу, то  $\eta$  можна прирівняти до 1, тобто не враховувати);  $P_{\text{инс}}$  — максимальная потужність інсоляції квадратного метра земної поверхні (1000 Вт при стандартних умовах, STC — standart test conditions інтенсивність відповідає паспортним умовам ( $STC = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ), при яких електрична вихідна потужність панелі відповідає заявленій);  $k$  — коефіцієнт, що враховує нагрівання та похиле падіння сонячних променів на поверхню сонячних модулів на модулі впродовж року(зміна кута падіння), улітку  $k = 0,75$ , узимку  $k = 0,95$  (для подальших розрахунків прийємо  $k = 0,8$ ).

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. 5. Середнє значення інсоляції в ясну сонячну погоду коливається в межах від 2400—3910 Вт\*год/м<sup>2</sup>/добу, у похмуру може зменшуватись до 150—320 Вт\*год/м<sup>2</sup>/добу.

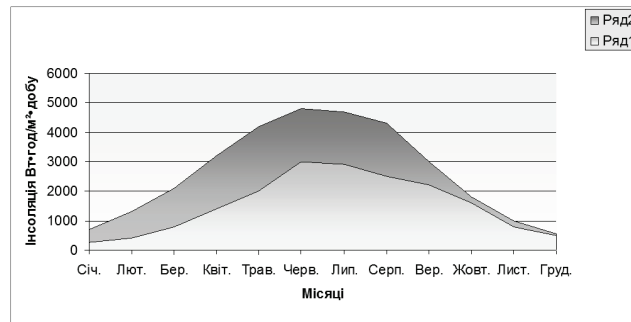


Рис. 5. Графік інсоляції сонячного випромінювання в залежності від пори року для центральних регіонів України : ряд1 — розсіяне випромінювання; ряд2 — пряме випромінювання

Для прикладу виробітка електроенергії СЕС у центральних регіонах України на відповідну пікову потужність 1МВт складає  $E_{\text{сб}} \sim 1\ 100 \text{ МВт*год}$  або  $1\ 100\ 000 \text{ кВт*год}$  за рік. 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 2—3 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 для забезпечення енергетичних потреб потрібен 7-ми разовий запас потужності.

**Ефективність фотоелектричних батарей.** Потужність потоку сонячного випромінювання на відстані 150 млн. км від Сонця (у геосфері Землі), без обліку втрат в атмосфері Землі, складає близько  $850\text{—}1450 \text{ Вт/м}^2$  [1], 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 бути менш  $900 \text{ Вт/м}^2$  [1, 2]. За допомогою широко розповсюджених кристалічних сонячних модулів можна перетворити цю енергію в електрику з ефективністю 14—17 %. Електроенергетичні можливості таких ФЕП знаходяться в межах  $110\text{—}220 \text{ Вт/м}^2$ , при оптичній інтенсивності  $1 \text{ кВт/м}^2$ .

Згідно принципу перетворення світлової енергії сонячного випромінювання ФЕП на базі внутрішнього фотоефекту у напівпровідникових матеріалах на базі кремнію (Si) або на основі гетероструктур типу  $A_3B_5$ ,  $A_3B_6$ , (наприклад  $AlGaAs\text{-}GaAs$ ) 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  $S_{\text{еф}}$  від  $1,2 \text{ м}^2$  до  $1,9 \text{ м}^2$ , яка пропорційна відсотку отриманої енергії. Одним з основних показників ефективності в залежності від ККД є величина виходу на одиницю площі  $[Вт/м^2]$ . 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 [1]:

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

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,  $0-90^\circ$ ;  $K_t$  — температурний коефіцієнт,  $K_t = 0,5-0,7$ .

Для більш ефективного перетворення, кут падіння випромінювання на активну поверхню  $\alpha$ , і він повинен максимально наближатися до  $90^\circ$ , що відповідає умові максимального перетворення при  $\cos 90^\circ = 1$ . Формула (2) при цьому матиме вигляд:

$$P_{FEP} = \eta \cdot K_t \cdot k \cdot I_{opt} \cdot S_{ef}. \quad (3)$$

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 (2) змінюється від 0,3 до 1 та викликає відповідне зменшення ефективної вихідної потужності  $P_{FEP}$ .

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 [1]) 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 фотоелектричними системами, що забезпечує оптимальний режим роботи панелей.

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 фотоефекта в напівпровідниках.

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 ФЕП робочій температурі порядку  $T = 300-350\text{ K}$  ( $30-50^\circ\text{C}$ ) [1, 5], їх граничний теоретично можливий ККД до 45 %.

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 [1]:

$$\eta = \frac{P_{elect}}{P_{optic}} \cdot \gamma \cdot 100\% \approx \frac{I_r U_r}{\Phi \cdot S \cdot \sin \phi} \cdot \gamma \cdot 100\% , \quad (4)$$

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

ККД сонячного 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 н/п). Крім того, у результаті збільшення температури модуля при великих  $\Phi$  збільшується струм  $I$ , що також є причиною зниження ККД.

Потік сонячного випромінювання, що проходить через площу в  $1 \text{ м}^2$ , на вході в атмосферу Землі розташовану перпендикулярно дорівнює в середньому  $1367 \text{ Вт/м}^2$  (сонячна стала [1, 3]). Через поглинання, при проходженні атмосфери Землі, середній в Україні потік сонячного випромінювання складає  $1020 \text{ Вт/м}^2$  [3]. 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 сонячного випромінювання для території України представлено на рис. 6 [6, 7].

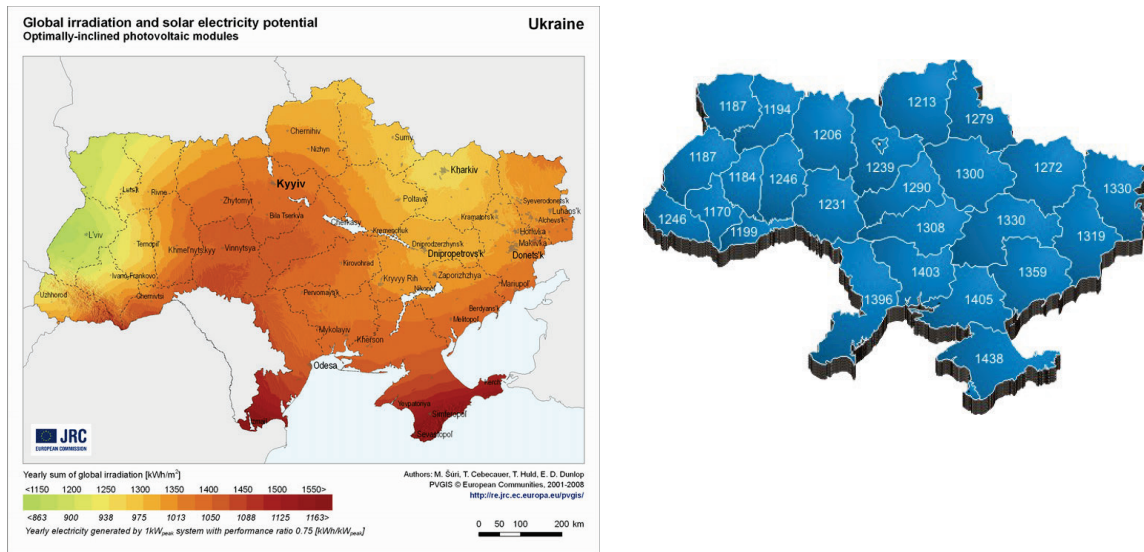


Рис. 6. Мапа потужностей сонячного випромінювання для території України [6, 7]

Аналізуючи рис. 6, для України середнє значення корисного виходу електричної енергії з  $1 \text{ м}^2$  поверхні сонячних батарей ФЕП з ККД = 14—17 % знаходиться в межах  $145—180 \text{ Вт/м}^2$  (наближено). Середнє значення інтенсивності на поверхні землі в Україні лежить в межах  $1050 \text{ Вт/м}^2$  або в еквіваленті енергії за добу  $3,5—7,0 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^2/\text{день}$ . Для Вінницької і Київської областей середнє за рік значення інтенсивності сонячного випромінювання складає  $1070 \text{ Вт/м}^2$  [1—3]. Потенційне вироблення сонячної енергії зменшується також через глобальне затемнення – зменшення потоку сонячного випромінювання, що доходить до поверхні Землі, але цей процес є незначним.

### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТІВ СЕС

Ключове завдання підвищення техніко-економічної ефективності зводиться до збільшення питомого показника кількості виробленої електричної енергії ( $\text{kWh/ h}$ ,  $\text{kWh/год}$ ) при мінімальних затратах будівництва СЕС. Слід відзначити, що можуть бути використані різні шляхи досягнення цього завдання:

- використання новітніх інноваційних сонячних модулів і панелей з високим ККД (ККД >14—17 % порівняно із традиційними технологіями);
- розташування станції в умовах максимальної сонячної інсоляції  $I_{\text{solar}} = P / S_{\text{solar}} (\text{kW/м}^2, I_{\text{solar}} > 1000 \text{ Вт/м}^2)$ ;
- використання оптимізованої структури станції і практичних технологій здешевлення будівництва (дешевші панелі, інвертор і компоненти станції, використання здешевлення компонент і елемент кріплення, армування і бетонування огорож, вико ристання технологій збору сонячного випромінювання із незадіяних площ — наприклад, за допомогою плоских дзеркал [//]);
- використання незадіяних земельних площ або земель суміжного функціонального призначення. Відомо, що одним із ключових вагомих факторів затрат собівартості проекту СЕС є необхідні виділені земельні ресурси. Тож, цей показник повинен враховуватись як ключовий в



будівництві СЕС. Можуть бути використані такі підходи як: використання суміжного функціонального призначення земель і простору (наприклад, дахів агропромислових та інших будівель, фасадів домів, дахів промислових та комерційних будівель), використання подвійного застосування землі, наприклад для тваринництва із розміщенням над агроплощами масивами СЕС;

— використання концепції мінімалізму проекту в залежності від необхідних умов — зменшення кількості компонент та як наслідок вартості проекту СЕС за рахунок адаптування його до певних умов (наприклад, використання набірних елементів і електричних кіл постійного струму із відмовою від інверторів, які складають до 40—45 % вартості проекту);

— інші перспективні технологічні прийоми і підходи до оптимізації проекту будівництва СЕС із застосуванням технологій зменшення вартості проекту і компонент сонячних електростанцій.

Оскільки альтернативна енергетики, та зокрема її галузь — сонячна енергетика представляються дуже перспективним ринком на найближчі 20-30 років із використанням державних програм субсидування та підтримки її розвитку ( «зелені»/ «fid» тарифи на енергію від фотоелектричних станцій [4]), то є ключовим завданням оптимізації проектів будівництва СЕС є пошук оптимального співвідношення цих основних техніко-економічних параметрів для досягнення точки максимальної техніко-економічної ефективності проекту (буде розглянута в подальшому). Для цього необхідно є пошук оптимального критерію ефективності проекту СЕС, який би максимально зміг узгодити в врахувати основні показники проекту сонячних електростанцій.

### РОЗРОБКА КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТІВ СЕС

В літературі [8] наводяться критерії оцінки проектів складних технічних систем, до яких можуть бути віднесені і СЕС. Серед основних показників оцінки є: питома виробітка із врахуванням вартості інвестицій (kWh/k\$); показники чистої вартості енергії (\$/ kWh) СЕС; індекси рентабельності (CVM, CBR) та інші. Але основна проблема в тому, що ці показники не описують максимально повної картини реалізації проекту, а тому не можуть об'єктивно функціонально повно описати процес реалізації проекту СЕС (та оптимізувати його). Для вирішення цього завдання потрібно отримати новий об'єктивний критерій оцінки проекту СЕС.

Відомо [8], що розробка будь-якого критерію ефективності починається із оцінки співвідношення виграшу до затрат. Загальновідомий принцип формування критеріїв ефективності і оптимальності є відношення [8]:

$$Q_{ef} = S_{effect} / R_{cost} , \quad (5)$$

де  $S_{effect}$  — узагальнена кількісна величина (добуток показників) виграшу проекту чи технічної системи;  
 $R_{cost}$  — узагальнена кількісна величина (добуток показників) затрат проекту чи технічної системи;

Слід зазначити, що формування відношення типу (1) може базуватись на різних показниках, величини  $S_{effect}$  та  $R_{cost}$  можуть включати комплекс показників за рахунок їх добутку (або відношення чи суми). Головна ідея згідно [8] — щоб зберігався фізичний зміст і логічне співвідношення цих показників. Величина  $Q$  (5) може бути як безрозмірною — тоді необхідний такий підбір показників, щоб відбулось скорочення їх одиниць вимірювання; або мати певний логічний і фізичний зміст (наприклад, питома величина енергіїгенерації до вартості — кВт\*год/грн, що означає що 1 кВт\*год електроенергії коштує стільки то гривень).

Завдання формування критерію ефективності проекту будівництва СЕС повинна включати всі вищезазначені ключові технічні та економічні показники, які виражені кількісно і несуть в собі певний фізичний зміст і характеризують сонячну електричну станцію:

— кількість виробленої електричної енергії —  $E$  [kWh]; [кВт/год];

— встановлена потужність сонячних модулів станції —  $P$  [kWt, кВт];

— максимальний обсяг інвестицій повної реалізації проекту СЕС —  $S_{invest}$  [тис./млн. \$, грн], включаючи затрати на комплектувачі, проект монтаж та супровідні застрати;

— середній показник вартості встановленої потужності проекту СЕС —  $S_{SES}$  [тис. \$/kWt, тис. грн./кВт];

— термін окупності інвестицій [міс., років] —  $P_y$ ;

— середній питомий прибуток станції в залежності від кількості виробленої електроенергії —  $S_{profit}$  [\$\*month];

— вартість виробленої електричної енергії в залежності від умов ринку —  $S_{power}$  [\$/kWt, грн./kWt]

— середньомісячна інсоляція для регіону інсталяції  $I_m$  [kWt / m<sup>2</sup>\*month];

— повна ефективність генерації/перетворення енергії СЕС —  $\eta_{SES}$  [%], яка складається із добутку ефективності панелей із врахуванням температурних перетворень  $\eta_{solar}$  [%], ККД інвертора СЕС  $\eta_{inverter}$  [%], ККД електричних шинних ліній передачі електроенергії в точку скиду в мережу  $\eta_{LEP}$  [%], тобто:

$$\eta_{SES} = \eta_{solar} * \eta_{inverterr} * \eta_{LEP} ; \quad (6)$$

— ефективна площа фотоелектричних панелей сонячної електростанції  $S_{ef}$  [m<sup>2</sup>], яка визначається із повної площі об'єкту будівництва CEC  $S_{SES}$  [m<sup>2</sup>] за допомогою коефіцієнта узгодження  $kS$ :

$$S_{ef} = k_S * S_{SES}; \quad (7)$$

— економічні ризики, які враховані як сума потенційно-можливих втрат  $S_{RISK}$  [тис.млн. \$, грн./міс];

— повна фаза тривалості будівництва та реалізації проекту CEC включаючи проектні, пуско-налагоджувальні роботи —  $T$  [міс.];

— повна кількість годин генерації в місяці із апроксимованою інсоляцією в стандартних тестових умовах STC (Standart Test Conditions) при  $I_m = 1000$  Вт/м<sup>2</sup>.

— узгоджувальні коефіцієнти, які враховують значення кількості тестових і робочих годин в місяці. Обираються емпірично шляхом евристичного синтезу на основі єдності фізичних значень (наприклад, якщо станція генерує кількість енергії за год —  $kWt * hour$ , то відповідний коефіцієнт за місяць складе  $30 * 24 = 720$ ).

Отже завдання отримання залежності коефіцієнта критерію оцінювання ефективності проекту SES необхідно методом евристичного синтезу та дедукції на основі логічних принципів віднести дані критерії відповідно по типам затрат та вирашу підставивши як добуток у залежність (5). Зазначимо, що для забезпечення принципу єдності фізичних величин і одиниць вимірювання (врахована система одиниць вимірювання СИ) слід буде ввести необхідні числові значення — коефіцієнтів узгодження (наприклад, для узгодження середньомісячного прибутку, значення виробітки електричної енергії необхідно помножити на 30). Враховуючи це отримана залежність критерію оцінки проектів будівництва CEC буде виражане:

$$Q_{SES} = \frac{N_{h/mon} [month] \times E [kWt * h] \times P [kWt] \times S_{power} [\$ / month] \times I_m [kWt / m^2 * month] \times \eta_{SES} [\%]}{(S_{invest} [\$] + S_{SES} [\$ / kWt] + S_{RISK} [\$ / month]) \times T [month] \times P_y [month] \times S_{ef} [m^2]}; \quad (8)$$

$$Q_{SES} = \frac{N_{h/mon} \times E \times P \times S_{power} \times I_m \times \eta_{SES}}{(S_{invest} + S_{SES} + S_{RISK}) \times P_y \times S_{ef} \times T} \left[ \frac{[month] \times [kWt * h] \times [kWt] \times [\$ / month] \times [kWt / m^2 * month] \times [\%]}{([\$] + [\$ / kWt] + [\$ / month]) \times [month] \times [m^2] \times [month]} \right];$$

Враховуючи, що показник максимального обсягу інвестицій повної реалізації проекту CEC  $S_{invest}$  напряму залежить від виробітки CEC за місяць і від питомої ринкової вартості електричної енергії, то для отримання чистого питомого прибутку CEC за місяць виходячи суто з технічних параметрів сонячної станції, якщо не враховувати ризики і потенційні втрати на стадії будівництва проекту CEC, буде умовно визначатись суто чисельником формули (8) і матиме вигляд:

$$S_{profit} \approx N_{h/mon} \times E \times P \times S_{power} \times I_m \times \eta_{SES} \quad (9)$$

Враховуючи це, критерій (8) можна спростити застосувавши серію математичних перетворень:

$$Q_{SES} \approx \frac{S_{profit}}{(S_{invest} + S_{SES} + S_{RISK}) \times P_y \times S_{ef} \times T} \left[ \frac{1}{[\$ * kW / m^2]} \right] \quad \text{або} \quad (10)$$

$$Q_{SES} \approx \frac{P}{S_{investP} \times S_{ef}} \left[ \frac{kW}{[\$ * m^2]} \right]$$

де  $S_{investP}$  — повна кількість інвестицій проекту CEC, включаючи потенційно можливі ризики,  $S_{investP} = S_{invest} + S_{SES} + S_{RISK}$ .

В результаті нескладних математичних скорочень по одиницям вимірювання техніко-економічних показників і арифметичних їх скорочень, кінцевий математичний вираз оцінки ефективності проектів CEC по критерію  $Q_{SES}$  (формула (10)) залежить від трьох основних показників:

— ефективної площі станції CEC (площа фотом одулів та орієнтована площа ділянок супровідних систем та додаткового обладнання) —  $S_{ef}$  [m<sup>2</sup>];

— обсяг загальних повних інвестицій проекту —  $S_{investP}$  [\\$];

— повної встановленої потужності станції —  $P$  [kW].

Слід зауважити, що для більш детального аналізу краще використовувати формулу (8), яка максимально повно дозволяє оцінити той чи інший проект СЕС. Оскільки включає його основні показники як на стадії будівництва, так і на стадії проектування та пусконаладжувальних робіт.

Чим величина критерію  $Q_{SES}$  більша, тим проект сонячної електростанції є кращим як з технічної, так і з економічної точки зору та доцільності. І навпаки. Чим величина  $Q_{SES}$  є меншою — тим гірший для реалізації і отримання (повернення) інвестицій та відповідно отримання прибутку є проект.

По умовам визначення дійсності критерію можна сказати, що він не має принципових обмежень, але величина завжди є більшою 0. Тобто аналітичні межі дійсності критерію  $Q_{SES} \in Q_{SES} \in 0..+\infty$ , але на практиці для діючих проектів СЕС, враховуючи конкретні питомі показники вартості обладнання і електроенергії, величина  $Q_{SES}$  приймає значення від 0 до сотні, тобто  $Q_{SES} \in 0.. \sim n_i \times 10^2$ , де  $n_i$  — дійсне ціле або дробне число.

Формулу (10) по визначенню наближеного спрощеного значення критерію  $Q_{SES}$ , доцільно застосовувати для грубої аналітичної оцінки проектів СЕС, які вже діють, не враховуючи при цьому етапи будівництва та можливі потенційні економічні ризики.

Більш точна оцінка проектів СЕС на стадії менеджменту будівництва та запуску і введення в експлуатацію дозволяє оцінити значення по формулі (8), яка враховує всі потенційно-можливі показники проекту.

**Оцінка ефективності сонячних панелей ФЕП по критерію: середньодобовий виробіток ел.енергії \* надійність / вартість.** Усереднений критерій є умовною безрозмірною величиною і визначається як добуток середньодобового виробітку ел.енергії  $kWh \cdot day \cdot m^2$  на  $[кВт \cdot год \cdot день \cdot м^2]$  з  $1m^2$  площі поверхні панелі за добу на надійність  $t_{sr}$  [років] (час за який робочі параметри сонячної панелі знаходяться в межах 90 % від початкових) поділений на добуток вартості  $V$  [ $\$$  (€)] і площі поверхні  $S$  [ $m^2$ ] панелі, тобто:

$$f = \frac{kWh \cdot day \cdot m^2 \times t_{sr}}{V \times S_{ef} \times 3.5 \cdot 10^2} \left[ \frac{кВт \times год \times день \times м^2 \times кілк. років. надійн.}{\$ \cdot м^2 \cdot 3.5 \cdot 10^2} \right]. \quad (11)$$

Усереднений критерій  $f$  може змінюватись в межах від 0 до 1 ( $0 < f < 1$ ), при обмеженнях на  $t_{sr}$  ( $1 < t_{sr} < 30$ ) та  $\$ \cdot m^2 \neq 0$ . Реальний середньодобовий виробіток електричної енергії визначається як добуток середнього середньодобового значення сонячної радіації за рік для конкретного регіону на коефіцієнт корисної дії ФЕП  $\eta$  на коефіцієнт кутового перетворення  $k = 0,5-0,7$ , що поділений на площу

$$\text{панелі } S [m^2], \text{ тобто: } kWh \cdot day \cdot m^2 = \frac{\left| kWh \cdot day \cdot m^2 \right|_{medium} \times \eta \times k}{S_{ef} \text{ per year}}.$$

Для ідеальної сонячної панелі в якій ККД  $\sim 1$  відповідно  $kWh \cdot day \cdot m^2 \sim$  середньодобове значення сонячної радіації (максимальне в ідеальних умовах  $kWh \cdot day \cdot m^2 = 7кВт \cdot год \cdot м^2 \cdot добу$ ), кількість років надійності  $t_{sr} = 50$ , при середній вартості 100 \$ за 1 панель з площею  $1 m^2$  критерій  $f$  буде:

$$f = \frac{7 \times 50}{100 \times 1 \times 3,5 \cdot 10^2} = 1$$

Для сонячної панелі на основі монокристалічного кремнію з середнім коефіцієнтом корисної дії 16 % площею  $1,5 m^2$  середньодобовий виробіток у Вінницькій області (середньорічне  $\left| kWh \cdot day \cdot m^2 \right|_{medium} = 3,91$  [дані NASA]) складе  $kWh \cdot day \cdot m^2 = \frac{3,91 \times 0,16 \times 0,7}{1,5} \approx 0,3 кВт \times Ч \times м^2 \times день$ , а

узагальнений критерій  $f = 0,0135$ . Чим більша величина  $f$ , тим кращий і ближчий до ідеального по основним показникам є сонячний модуль.

### ПРАКТИЧНІ ПІДХОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЕКТІВ СЕС

Для забезпечення оптимізації проектів СЕС згідно отриманих критеріїв ефективності можуть бути розглянуті кілька шляхів та практичний досвід провідних світових інсталювальників. По-перше, оптимізація проекту СЕС відбувається по шляху зменшення вартості обладнання і супровідних робіт (знаменник формули критерію (8)) — зменшення економічних параметрів проекту СЕС). По-друге,

оптимізація може відбуватись шляхом збільшення технічних показників — зокрема збільшення корисного виходу електроенергії проекту СЕС (чисельних формули критерію (8) — збільшення технічних параметрів СЕС). Оскільки, враховуючи світову тенденцію розвитку сонячної енергетики впродовж 2-х десятиліть (1990-ті та 2010-ті роки), покращення технічних показників не відбувається стрибкоподібно, а проходить поступово, то якісна оптимізація СЕС може бути реалізована шляхом зменшення вартості проекту, тобто зменшенням величин у критерії (8).

Для цього, враховуючи практичний досвід і технічні прийоми застосовуються декілька основних підходів:

— зменшення кількості обладнання СЕС, шляхом переходу на інші — кола живлення постійно напруги(наприклад, відмова від використання мережевих інверторів (40—45 % вартості системи) шляхом переходу на низьковольтні 24/36В або суміщені кола постійного струму — 350—500 В, там де це можливо;

— будівництво СЕС на дахах промислових споруд, що дозволяє економити земельні ресурси і зменшити загальні капіталовкладення (рис. 7);



а)



б)

Рис. 7. Побудовані СЕС: а) наземна із виділенням земельної ділянки; б) змонтована на даху СЕС (із використанням незадіяних площ та без необхідності виділення додаткових земельних ресурсів)

— економія ресурсів за рахунок зменшення вартості конструкцій кріплення та використання універсальних фундаментів (рис. 8);



а)



б)

Рис. 8. Фундаменти проектів СЕС: а) наземний із бетонними сваєвими опорами (із більшими капіталозатратами); б) універсальний штировий фундамент СЕС (із меншими капіталозатратами)

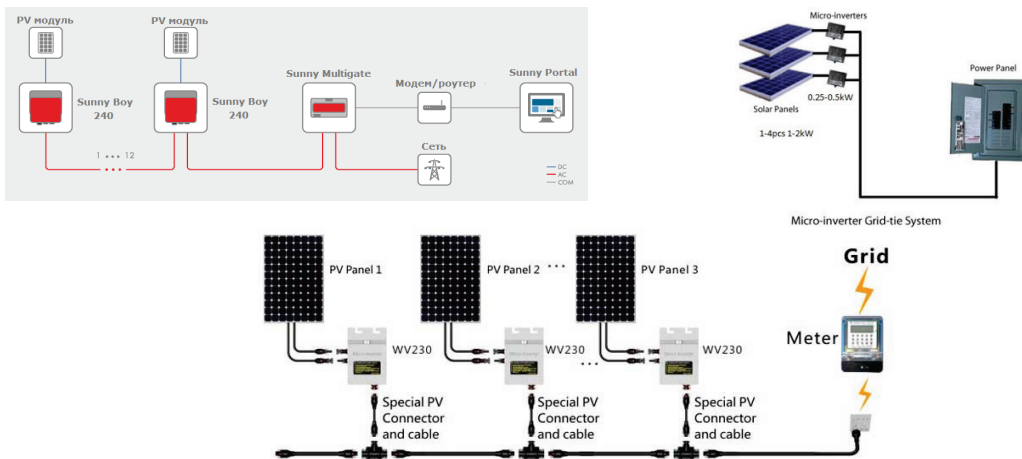


Рис. 9. Приклад використання проекту СЕС із розподіленою структурою на базі автономних мікромодулів

— використання розподіленої структури СЕС на базі окремих модулів із одною сонячною батареєю та мікроінвертором в комплекті (рис. 9, рис. 10);

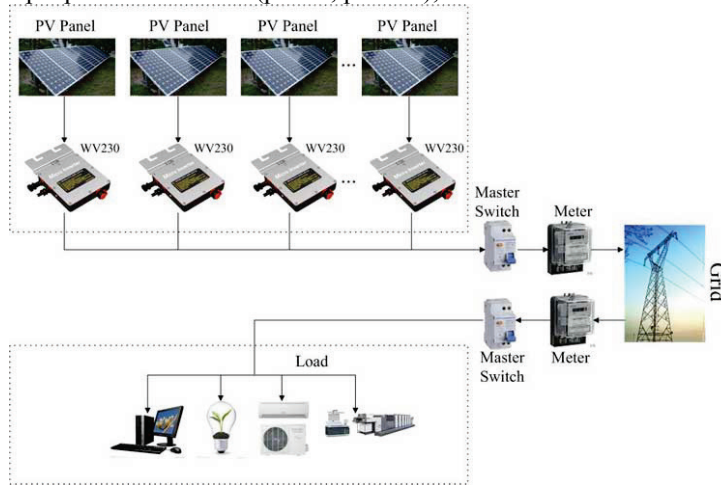


Рис. 10. Об'єднання масивів мікромодулів розподіленої СЕС для скиду енергії мережу

— використання технології дзеркал, які дозволяють підвищити енергетичну виробітку електроенергії шляхом утилізації випромінювання із додаткових, незадіяних площ СЕС, що призводить до підвищення коефіцієнта використання площі до 1,6—2 (рис. 11). Технологічною проблемою є правильне і чітке позиціонування дзеркала, для запобігання виходу відбитого ним випромінювання поза межі PV-комірки при русу Сонця вздовж лінії горизонту на протязі світлового дня.

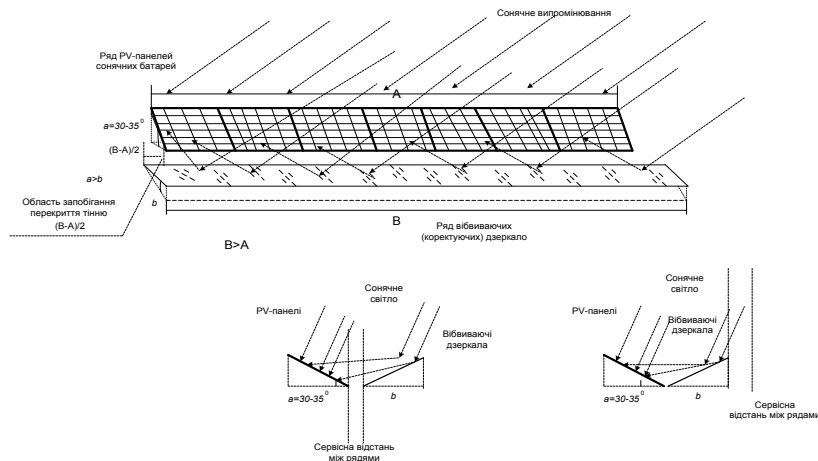


Рис. 11. Конструкція СЕС з розміщеними дзеркалами для збільшення ефективності виробітки фотогальванічних PV-панелей (збільшення виробітки можливо до 35—60 % згідно [1])

— оптимальне розміщення масивів фотомодулів в межах робочої площі проекту СЕС із досягненням максимального коефіцієнту використання площі (рис. 12).

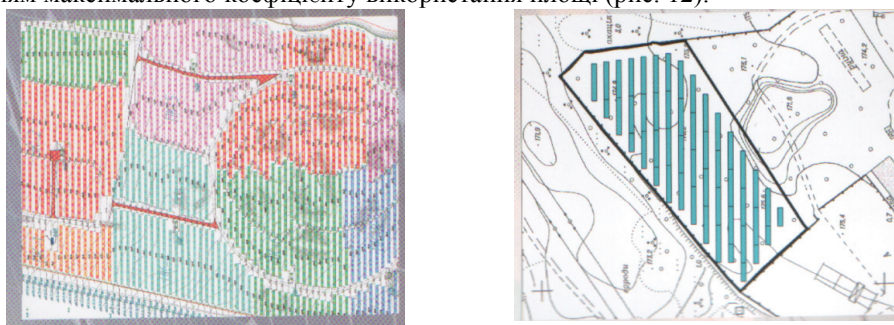


Рис. 12. Геодезичний план розташування масивів сонячних батарей проекту СЕС із їх оптимальним розміщенням на виділеній земельній ділянці

— використання комплектуючих СЕС: сонячні модулі і інвертора та конструкції кріплення із компаній по меншим ціновим параметрам (з меншою вартістю) при зберіганні допустимого рівня параметра ціна/якість при високих термінах експлуатації. Наприклад, використовувати сонячні батареї китайських компаній 1-го ешелону (Yingli Solar, Trina Solar), які на 15—20 % дешевші за аналогічні компанії інших виробників при однаковому терміні експлуатації (MTBF > 25—35 років);

— імпортозаміщення «некритичних» комплектуючих СЕС, таких як конструкції кріплення, будівельні матеріали, використання цих конструкцій і матеріалів вітчизняного виробника із вартістю меншою до 20—25 %.

Врахування всіх перерахованих практичних прийомів в комплексі в процесі підготовки і реалізації проекту СЕС з метою зменшення капіталовкладень проекту дозволить забезпечити: високу надійність системи за рахунок децентралізації джерел генерації електроенергії; високий термін експлуатації мікромодулів і їх швидку заміну із зменшенням експлуатаційних витрат; перехід на модульну структуру СЕС із меншою собівартістю реалізації; гнучке нарощування встановлених потужностей системи СЕС шляхом простого додавання модульних зборок і їх підключення в спільну мережу; простота монтажу та експлуатації; розподілена структура СЕС дозволяє підвищити стабільність всієї системи СЕС, на відміну від традиційних СЕС, у разі відмови однієї з ланок — решта продовжують генерувати електроенергію.

По інформації від експертів, за допомогою мікроінверторів можна підвищити енергетичну ефективність сонячних інсталяцій на 25 %, що виливається у збільшення економічного показника.

Не менш важливими у досягнення вищої техніко-економічної ефективності проектів СЕС є застосування інноваційних технічних рішень, до числа яких належать:

— використання багат шарових сонячних фотоструктур панелей (зі ККД вищим на 7—12 % за традиційні);

— використання концентраторної фотовольтаїки – CPV (Concentrator Photovoltaics) [2] із найвищим ККД на сьогоднішній день до 44 %. Тенденція до поступового зменшення її вартості спостерігається з кожним роком;

— використання технологій інтелектуального керування потужністю генерації СЕС і фільтрація електромагнітних завад для підвищення якості електроенергії. Чітка тенденція в сонячній енергетиці — розробка систем моніторингу показників виробітки і інтелектуального керування електростанціями, що стає 1-м етапом на шляху реалізації розподілених інтелектуальних «розумних» електромереж (концепція SmartGrid, яка розвивається в США).;

— використання інноваційних технологій акумуляції електроенергії на базі новітніх нано- і карбонових акумуляторних батарей, а також інших способів акумуляції. Електроенергія з фотоелектричних систем в значній мірі залежить від погодних умов і тому енергія породжена сонячними фотоелектричними системами повинна бути використана негайно або буде втрачена.

— використання нових фотоелектричних матеріалів, розробки, яких ведуться постійно в світі.

— розробки по органічному об'єднанню інформаційних технологій з енергетичними системами з метою енергоефективності та розширенню функціоналу останніх є перспективними і економічно вигідними, що стимулює розвиток їх численими комерційними організаціями.

— технології швидкого монтажу (fast-installation), що значно економить часові ресурси при реалізації проекту СЕС (рис. 13.).

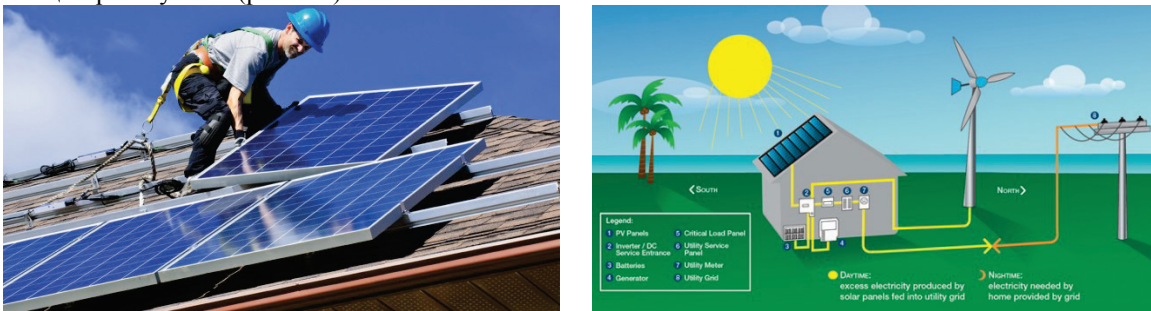


Рис. 13. Швидкий, рейковий монтаж сонячних панелей на даховій СЕС

Серед перспективних підходів, який відзначений вище для зменшення вартості системи СЕС під ключ та зменшення строків окупності сонячних електростанцій стає перехід на низьковольтні кола живлення постійного струму, що передбачає відмову від інверторів, які складають 30—40 % вартості всієї сонячної системи. Там, де можливість використати енергію сонячних панелей напряму, тобто без використання ланки перетворення постійного струму в змінний (інвертор) можна використати

низьковольтні кола 12—24 В (DC) постійного струму, або кола 250-400В (DC) безпосередньо від самих сонячних батарей напряму. Вартість самих батарей 0.8-0.9\$/Вт потужності, що значно дешевше ніж в системах з інверторами 1,1—1,3 \$/ Вт.

Також активно розвивається комплексні системи сонячних панелей з вбудованим акумулятором. Також використовуються технології прикладного локального застосування сонячних батарей — як варіанти розміщення фотомодулів інтегрованих в елементи існуючих будівельних споруд, які можуть перетворити галузь у масштабне використання альтернативних джерел енергії в локальних пристроях і будівництві. Наприклад, технологія «сонячних доріг», що передбачає інтеграцію сонячних батарей в дорожнє полотно з паралельним використанням і площі покриття і економії ресурсів.

Іншим способом вирішення проблем землекористування і землевідведення під енергетичні проекти, пов'язані з широким масштабом використання сонячних систем є будівництво сонячних електростанцій на воді (плаваючих сонячних електростанцій), так як більше 70 % поверхні Землі вкрито водою і ці ресурси є менш затратними ніж земля.

Використання космічного простору для сонячних електростанцій є не менш привабливим, оскільки в космічному просторі супутники можуть захоплювати сонячне світло і перетворювали його в мікрохвильову енергію із значно більшою ефективністю і передавати його на земну поверхню лазерним промінем або мікрохвильовим ви промінюванням. Перспективний тип технології концентраторних батарей CPV та безпосередньо концентраторів сонячного випромінювання на базі розгортаємих в космосі дзеркал обіцяє утилізувати значно більшу кількість сонячного світла (до 90 %), так як супутники можуть бути розташовані, щоб оптимізувати поглинання світла цілодобово. Зараз такі країни як Індія, Китай і Японія активно інвестують в дану технологію.

## ВИСНОВКИ

Сонячна електроенергетика — один з найбільш прогресивних і швидкозростаючих секторів альтернативної енергетики, які активно розвиваються у світі. Великий потенціал зростання сонячної енергетики обумовлений необхідністю забезпечення національної енергетичної та екологічної безпеки як в Україні, так і у інших країнах світу. В статті проаналізовані проблеми будівництва сонячних електростанцій в сучасних умовах і наведені шляхи оптимізації як діючих так і проектів СЕС на стадії будівництва. Запропоновані критерії ефективності оцінки проектів дозволяють врахувати оптимальні умови та проводити аналітичну оцінку проектів сонячних електростанцій враховуючи основні фактори впливу як на стадії проектування, так і в режимі експлуатації. Наведені практичний досвід та сучасні підходи збільшення ефективності та оптимізації проектів СЕС.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В. П. Кожем'яко, В. Г. Домбровський, В. Ф. Жердецький, В. І. Маліновський, Г. В. Прутуляк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — № 2(22). — 2011. — С. 142—157.
2. Солнечная электростанция: прибыльный бизнес или недешевая игрушка? / Матеріали компанії Rentechno [Електронний ресурс]. — Режим доступу : World Wide Web: <http://rentechno.ua/articles/solnechnaya-energetika-pribilniy-biznes.html>
3. Eckart von Malsen. Opportunities for large-scale projects // SUN & Wind Energy. — Vol.5. — 2011. — Рр. 254—255.
4. Проект Закону України про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії №2010д від 19.05.2015р. / Матеріали офіційного порталу Верховні Ради України [Електронний ресурс]. — режим доступу: World Wide Web: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=53806](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=53806)
5. Фаренбрух А. Солнечные элементы: теория и эксперимент : [Пер. с англ. И. П. Гавриловой и А. С. Даревского; под ред. М. М. Колтуна] / А. Фаренбрух, Р. Бьюб. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 280 с. —ил.
6. Map of solar radiation in Europe: Ukraine / M. Suri, T. Sebecauer, T. Huld, E. D. Dunlop // Materials of JRC European commission. — PVGIS: European communities, 2001—2008. — p. 27.
7. Photovoltaic energy, electricity from the sun : [Електронний ресурс] / Daniel Fraile, Marie Latour, Adel El Gammal, Michael Annett. // EPIA Publications. — vol. 50. — april 2010. — Режим доступу : World Wide Web: <http://www.epia.org/publications/photovoltaic-publications-global-market-outlook.html>
8. Моисеев В. С. Системное проектирование преобразователей информации [Текст] /

В. С. Моисеев. — Л. : Машиностроение, 1982. — 255 с.

#### SPUSOK LITERATURU

1. Analitichnij ogljad suchasnykh technologiy fotoelektrichnykh peretvoruvachiv dlja sonjachnoj energetiki / V. P. Kozhemjako, A. G. Dombrovskiy, V. F. Zherdetskiy, V. I. Malinovskiy, G. V. rutylyak // optiko-electronni informacijno-energetichni tehnologii. — № 2(22). — 2011. — S. 142—157.
2. Solnechnaja electrostancija: pribulnij biznes ili nedeshovaja igrushka? / Materialu kompanii Rentechno [Electronnij resyurse]. — rezhum dostupy: World Wide Web: <http://rentechno.ua/articles/solnechnaya-energetika-pribilny-biznes.html>
3. Eckart von Malsen. Opportunities for large-scale projects // SUN & Wind Energy. — Vol.5. — 2011. — pp. 254—255.
4. Project Zakony Ukrainu pro vnesenni zmin do dejakuh zakoniv Ukrainu shodo zabezpechennja konkurentnih umov vurobnytstva tlctroenergii z alternativnih dzherel energii № 2010d vid 19.05.2015r. / Materialu oficijnogo portaly Verhovnoij Radu Ukrainu [Electronnij resyurse]. — rezhum dostupy: World Wide Web: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=53806](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=53806)
5. Farenbrykh A. Solnechnue elementu: teorija i eksperiment: [Per s angl. I.P. Gavrilovoj i A. S. Darevskogo; pod red. M. M. Koltuna ] / A. Farenbrykh, R.B'ujb. —M. : Energoatomizdat, 1987. — 280s. — il.
6. Map of solar radiation in Europe: Ukraine / M. Suri, T. Cebecauer, T. Huld, E. D. Dunlop // Materials of JRC European commission. — PVGIS: European communities, 2001—2008. — p. 27.
7. Photovoltaic energy, electricity from the sun : [Електронний ресурс] / Daniel Fraile, Marie Latour, Adel El Gammal, Michael Annett. // EPIA Publications. — vol. 50. — april 2010. — Режим доступу : World Wide Web: <http://www.epia.org/publications/photovoltaic-publications-global-market-outlook.html>
8. Moiseev V. S. Sistemnoe projektirovanie preobrazovatelej informatsii [Text] / V. S. Moiseev. — L. : Mashinostroenie, 1982. — 255 s.

Надійшла до редакції 10.12.2015 р.

**КОЖЕМ'ЯКО ВОЛОДИМИР ПРОКОПОВИЧ** — засл. діяч науки і техніки України, академік АНУ, д.т.н., проф., завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**ДОМБРОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ГЕОРГІЙОВИЧ** — кандидат економічних наук, экс-губернатор Вінницької Обласної державної адміністрації, народний депутат України VIII скликання, м. Вінниця, Україна.

**МАЛІНОВСЬКИЙ ВАДИМ ІГОРЕВИЧ** — к.т.н., доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.