

В. В. Филенко

Інститут проблем
машинобудування
ім. А. М. Підгорного
НАН України, м. Харків,
e-mail: fylenko@gmail.com

УДК 620.92

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЙСНИХ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

Подано результати моделювання фотоелектростанцій у програмних комплексах RETScreen і PVSYSY, їх порівняння з розрахунковою моделлю та результатами функціонування реальної станції. Наведено підходи до визначення потенціалу сонячної енергетики та класифікацію фотоелектричних панелей. Описано технологічну схему лабораторно-дослідного стенда. Зроблено рекомендації щодо сфери застосування програмних комплексів RETScreen 4.0 та PVSYSY V5.56.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, потенціал, фотоелектричний перетворювач, кут нахилу.

Постановка проблеми

Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) вже давно стало необхідною передумовою створення належних умов сталого енергетичного розвитку та енергетичної безпеки. Незважаючи на велику кількість фундаментальних теоретичних досліджень у цьому напрямі, їх практичне використання показує значні розбіжності між теоретичними розрахунками ефективності використання потенціалу ВДЕ та його реальними значеннями. Особливого значення ці розбіжності набувають у системах на основі фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), де вартість фотоелементів є дуже високою, а похибка при оцінці необхідної встановленої потужності у 15–20% може поставити під загрозу функціонування всієї системи.

За таких обставин вибір адекватної моделі для оцінки режиму роботи фотоелектричної станції (ФЕС) має базуватися на просторово-часовому розподілі інсоляції, технології виготовлення ФЕП, технологічних особливостях ФЕС та результатах натурних досліджень.

Виклад основного матеріалу

Найвищий рівень достовірності про рівень інсоляції та її характер можуть дати результати довгострокових актинометричних досліджень інтенсивності прямої, розсіяної та сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню. Такі дослідження на території України проводилися лише у 21 пункті спостережень, що не дає можливості їх використання для всієї території України.

Іншим джерелом про рівень інсоляції конкретної території є результати довгострокового дослідження НАСА [1], що включають супутникове вимірювання, моделювання атмосфери та наземні дослідження. У цій моделі під час моделювання атмосфери використано такі фактори, як кліматичні зони, альbedo, хмарність, опади та аерозолі в атмосфері. Дані містяться у масштабі $2,5^0 \times 2,5^0$ (з перерахунком до $1,0^0 \times 1,0^0$). Наведено лише дані про пряму сонячну радіацію, водночас як місячне надходження сумарної радіації на похилу поверхню складається з місячних сум прямої та розсіяної радіації [2]

$$Q_{\Pi} = \Sigma S_{\Pi} + \Sigma D_{\Pi},$$

де Q_{Π} – місячне надходження сумарної сонячної радіації на поверхню фотоелектричних панелей площиною 1 м^2 ; ΣS_{Π} – місячні суми прямої радіації на похилу поверхню; ΣD_{Π} – місячні суми розсіяної радіації на похилу поверхню.

Потік розсіяної радіації на похилу поверхню визначається згідно з рекомендаціями [3]

$$\Sigma D_{\Pi} = \Sigma D_{\Gamma} \cos^2 \alpha / 2,$$

де ΣD_{Γ} – місячні суми розсіяної радіації на горизонтальну поверхню; α – кут нахилу приймаючої поверхні.

Місячні суми прямої радіації на похилу поверхню можна розрахувати за допомогою коефіцієнта переходу до перших сум прямої радіації на горизонтальну поверхню

$$\Sigma S_{\Pi} = K_{\Sigma} \Sigma S_{\Gamma},$$

де K_S – коефіцієнт переходу від сум прямої радіації на горизонтальну поверхню до аналогічних значень на похилу поверхню; ΣS_Γ – місячні суми прямої радіації на горизонтальну поверхню.

Коефіцієнт переходу (K_s) може бути розрахований за допомогою відношення сум теоретично можливої прямої радіації на похилу поверхню до її значень на горизонтальну поверхню

$$K_S = \Sigma S'_\Pi / \Sigma S'_\Gamma,$$

де $\Sigma S'_\Pi$ – місячні суми теоретично можливої прямої радіації на похилу поверхню за умов ясного неба; $\Sigma S'_\Gamma$ – аналогічні значення на горизонтальну поверхню.

Потік прямої радіації на горизонтальну поверхню при ясному небі

$$S'_\Gamma = S_m \sin h_0,$$

де S_m – пряма радіація у земної поверхні, що надходить на нормальну до сонячних променів поверхню; h_0 – висота Сонця.

Перша величина може бути розрахована через сонячну сталу S_0

$$S_m = \frac{S_0}{\rho^2} e^{-\tau_\delta m_0},$$

де ρ – відстань між Землею та Сонцем, виражена в одиницях середньої відстані; τ_δ – оптична товща атмосфери; m_0 – повітряна маса у напрямі на Сонце.

Висота Сонця може бути виражена через схилення Сонця, широту місцевості та часовий кут Сонця

$$\sin h_0 = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \Omega,$$

де φ – широта місцевості; δ – схилення Сонця, Ω – часовий кут Сонця.

Аналогічним чином розраховується надходження сонячної радіації на похилу поверхню

$$S'_\Pi = S_m \cos i,$$

де i – кут падіння сонячних променів на поверхню схилу

$$\cos i = \cos \alpha \sin h_0 + \sin \alpha \cosh_0 \cos \psi,$$

$$\psi = \psi_o - \psi_n,$$

де ψ_o , ψ_n – азимуты Сонця і проекції нормалі, побудованої до схилу, на горизонтальну площину; азимуты векторів відраховуються від площини меридіану (прийнято відраховувати азимуты додатними у напрямку годинникової стрілки).

Азимут Сонця визначається співвідношеннями

$$\cos \psi_o = \frac{\sin h_0 \sin \varphi - \sin \delta}{\cosh_0 \cos \varphi}, \quad \sin \psi_o = \frac{\cos \delta \sin \Omega}{\cosh_0}.$$

Вирібіток енергії ФЕП знаходиться у прямій залежності від таких чинників:

- сумарної сонячної радіації, що надходить на їх поверхню;
- коефіцієнта корисної дії сонячних батарей;
- площі поверхні фотоелектричних панелей;
- частки ефективної поверхні останніх.

Місячний виробіток енергії фотоелектричними системами можна розрахувати за допомогою рівняння

$$A = Q_\Pi S_{\text{ФП}} K_{\text{ККД}} K_{\text{ЕП}},$$

де A – місячний виробіток енергії фотоелектричними системами (кВт·год); Q_Π – місячне надходження сумарної сонячної радіації на поверхню фотоелектричних панелей площиною 1 м^2 ; $S_{\text{ФП}}$ – площа фотоелектричних панелей; $K_{\text{ККД}}$ – коефіцієнт корисної дії сонячних батарей; $K_{\text{ЕП}}$ – коефіцієнт, що відображає частку ефективної поверхні.

Останні три параметри характеризують особливості виконання ФЕП.

Основним матеріалом для виготовлення сонячних модулів є кремній. Близько 83% усіх модулів виготовляється на основі кристалічного кремнію, ще 14 – на основі тонкоплівкових структур і лише 3% – на основі інших типів, включаючи концентраторні сонячні енергоустановки [5].

На сучасному етапі прийнято розрізняти 3 покоління технологій виробництва ФЕП.

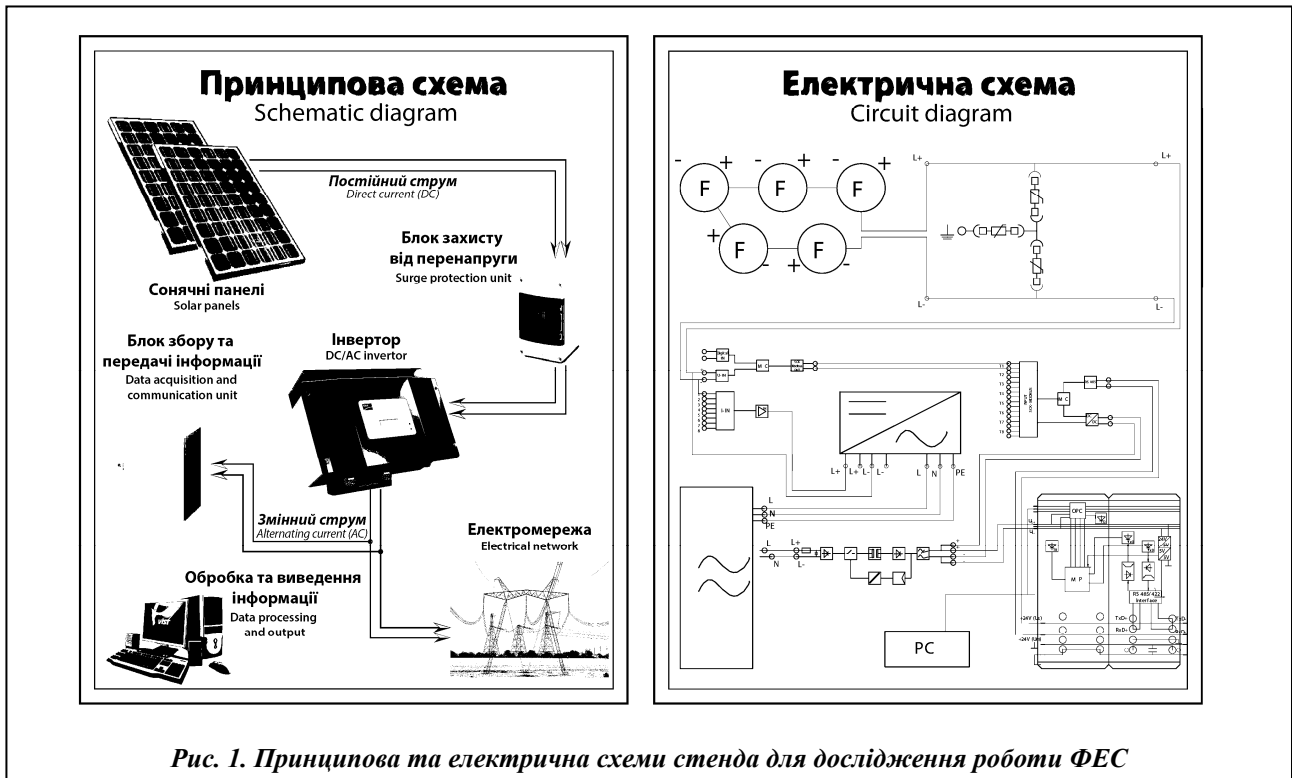


Рис. 1. Принципова та електрична схеми стенда для дослідження роботи ФЕС

Перше покоління включає технології використання кремнієвих пластин. Сюди відносяться моно- та полікристалічний кремній (mc-Si та m-Si), технології на основі GaAs (Si, GaAs), ribbon-технології (EFG, S-web) та тонкошаровий полікремній (Apex).

Друге покоління – тонкі плівки неорганічних або органічних напівпровідників на склі. До цього покоління відносять ФЕП, виконані з аморфного кремнію (a-Si), мікро- та нанокремнію (μc-Si/mc-Si), кремнію на склі (CSG), телуриду кадмію (CdTe), а також селеніду галію-індію-міді (CIGS) та селеніду індію-міді (CIS).

Третє покоління – тонкі плівки на гнучких підкладках (a-Si, CdTe, CIGS).

Для спрощення роботи з великою кількістю баз даних та прискорення проектних розрахунків ФЕС розроблені спеціальні програмні комплекси. Значного поширення набули два такі комплекси: RETScreen та PVSYST.

В роботі проведено порівняння результатів розрахунків, виконаних за методикою, наведеною вище, у програмних комплексах RETScreen та PVSYST (для кутів нахилу 32° та 44°) з результатами функціонування реальної ФЕС. Технологічна схема ФЕС та лабораторно-дослідного стенда наведено на рис. 1, а нижче її основні характеристики.

Досліджуваними параметрами при роботі ФЕС є:

- поточна напруга та потужність електричного струму на вході;
- тривалість роботи фотоелектричної системи (тривалість сонячного періоду, придатного для виробництва електроенергії);
- денний та сумарний виробіток енергії за період роботи;
- безконтактне вимірювання параметрів постійного струму.

Лабораторно-дослідний стенд спроектовано та встановлено у північному корпусі Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Схему покрівлі корпусу та місце розташування ФЕС зображено на рис. 2.

Основні технічні характеристики фотоелектричних елементів:

Тип	Полікристалічні сонячні ЖКМ 235P-60 (5 шт)
Геометричні розміри панелі, мм	1650×992×45
Встановлений кут нахилу	44°
Номинальна потужність	1175 Вт

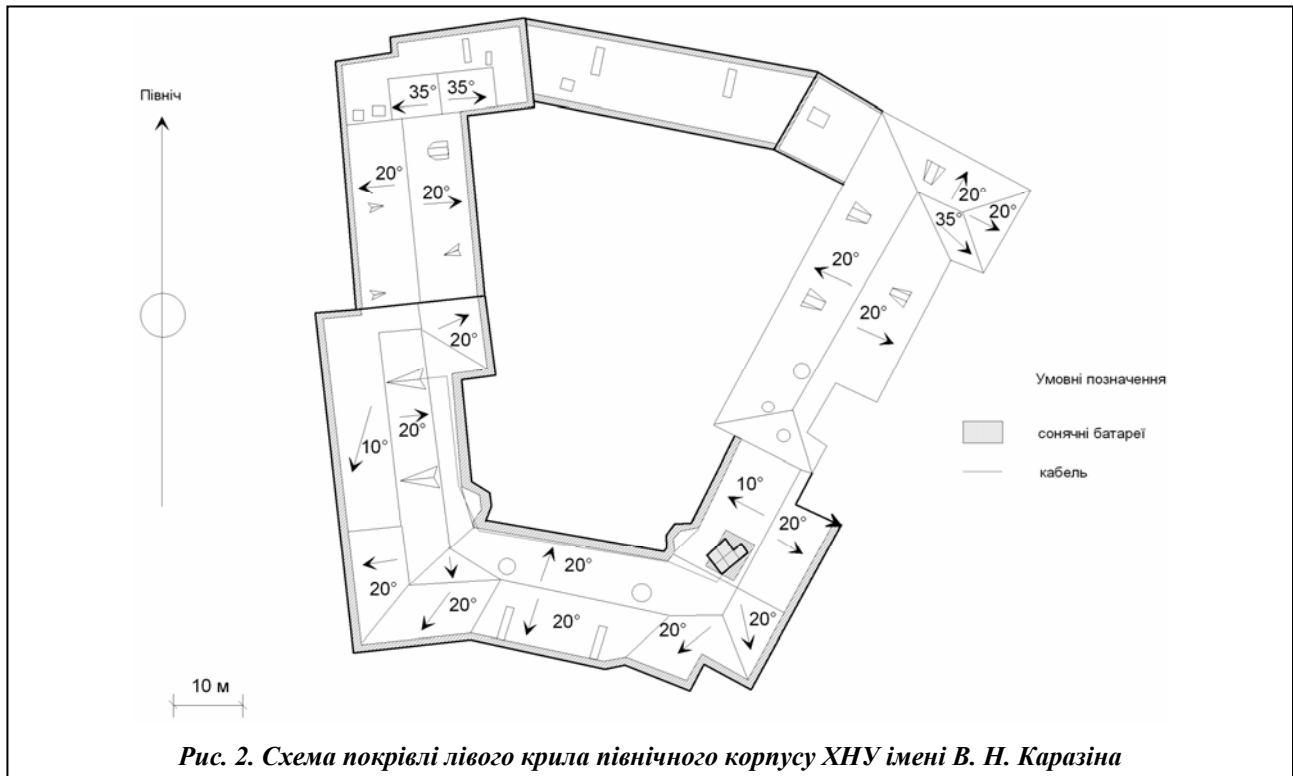


Рис. 2. Схема покрівлі лівого крила північного корпусу ХНУ імені В. Н. Каразіна

Максимальна напруга 149 В
 Максимальна сила струму 7,89 А

У системі використано мережевий інвертор для ФЕП SMA SUNNY BOY 1700, призначений для роботи в сонячних фотоелектричних системах, що працюють паралельно з централізованим електропостачанням. Інвертор оснащено функцією відслідковування процесу OptiTrac MPP, що дозволяє працювати інвертору у оптимальному режимі, навіть за різких змін погодних умов. Інвертори серії SUNNY BOY були спеціально розроблені для роботи у малих та середніх системах електроживлення. Паспортну ефективність роботи інвертора зображено на рис. 3.

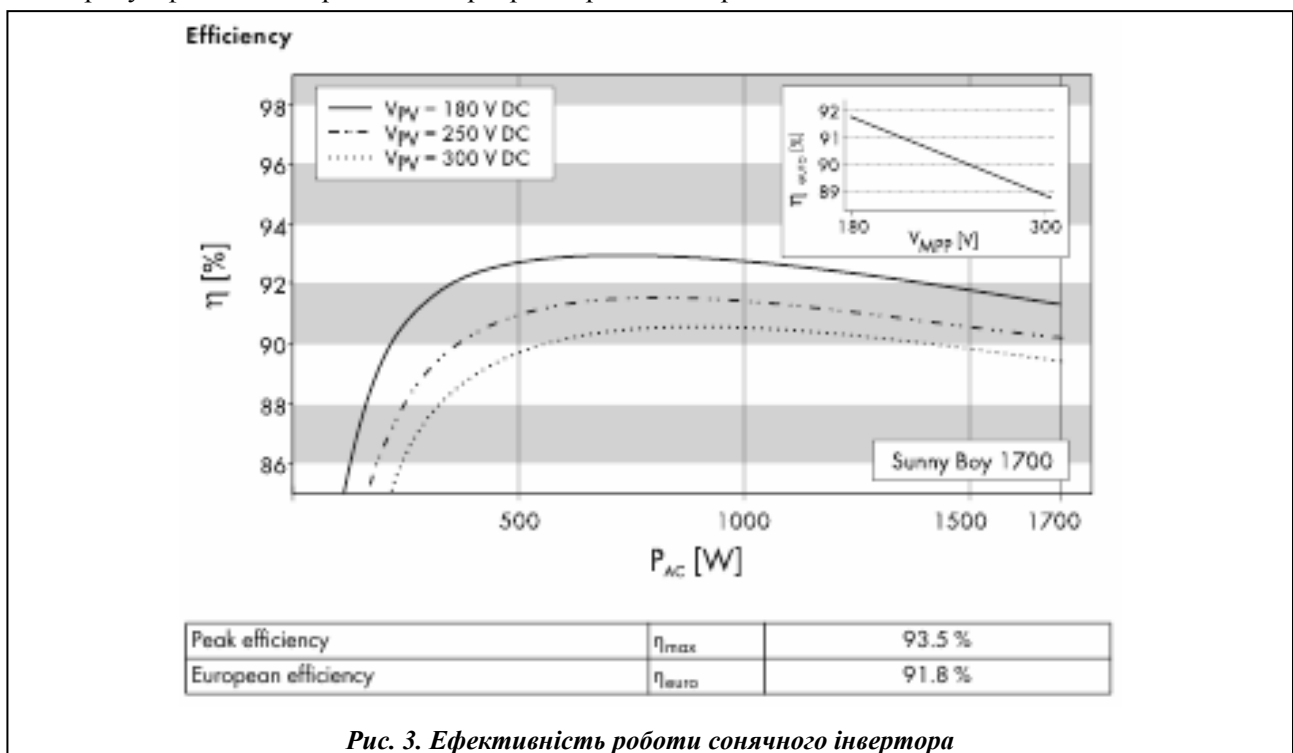


Рис. 3. Ефективність роботи сонячного інвертора

Рівень шуму під час роботи інвертора не перевищує 46Дб, внутрішнє використання електроенергії у нічний час складає менше 0,1 Вт.

Вбудована система моніторингу роботи інвертора дає можливість відслідковувати такі параметри роботи ситами:

- поточна напруга та потужність електричного струму на вході;
- тривалість роботи фотоелектричної системи (тривалість сонячного періоду, придатного для виробництва електроенергії);
- сумарний виробіток енергії за період роботи.

Зведені дані про сонячну інсоляцію для м. Харкова наведено у таблиці.

Розподіл сонячної радіації у м. Харків за різними джерелами

Джерело даних	Місяці												Рік
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
розрахунки за наведеною методикою	46,3	71,4	113,9	162,2	200,8	210,5	214,3	202,7	169,9	119,7	59,9	32,8	1604,4
PVSYST 44°	47,9	72,5	113,8	131,8	181,6	163,6	166,9	165,5	123,3	101,1	44,1	36,1	1348,2
RETScreen	36,9	56,8	94,6	117,6	166,8	163,8	172,4	151,3	104,7	65,1	35,7	27,9	1193,6
[4], Харків 2013	17,4	32,9	54,2	133,6	188,2	200,1	172,1	143,1	67,1	48,2	21,3	13,7	1091,9

Дані, наведені у таблиці, свідчать, що у 2013 році рівень сонячної інсоляції був дещо нижчим від середнього значення за довгостроковими дослідженнями та розрахунковими значеннями.

Висновки

Швидкий розвиток галузі ФЕП потребує приділяти більше уваги оцінці потенціалу відновлювальних джерел енергії з урахуванням останніх тенденцій розвитку галузі та специфічних режимів роботи ФЕП.

Порівняння теоретичних розрахунків з експериментальними даними (рис.4) показують достатньо високу достовірність даних про річну генерацію електричної енергії, проте слід зазначити, що розрахунки у програмі RETScreen мають чітко виражену тенденцію до згладжування перепадів у сезонних коливаннях. Водночас розрахункова модель показала результати, найбільш наближені до параболоїдальної форми розподілу та результатів експериментального дослідження.

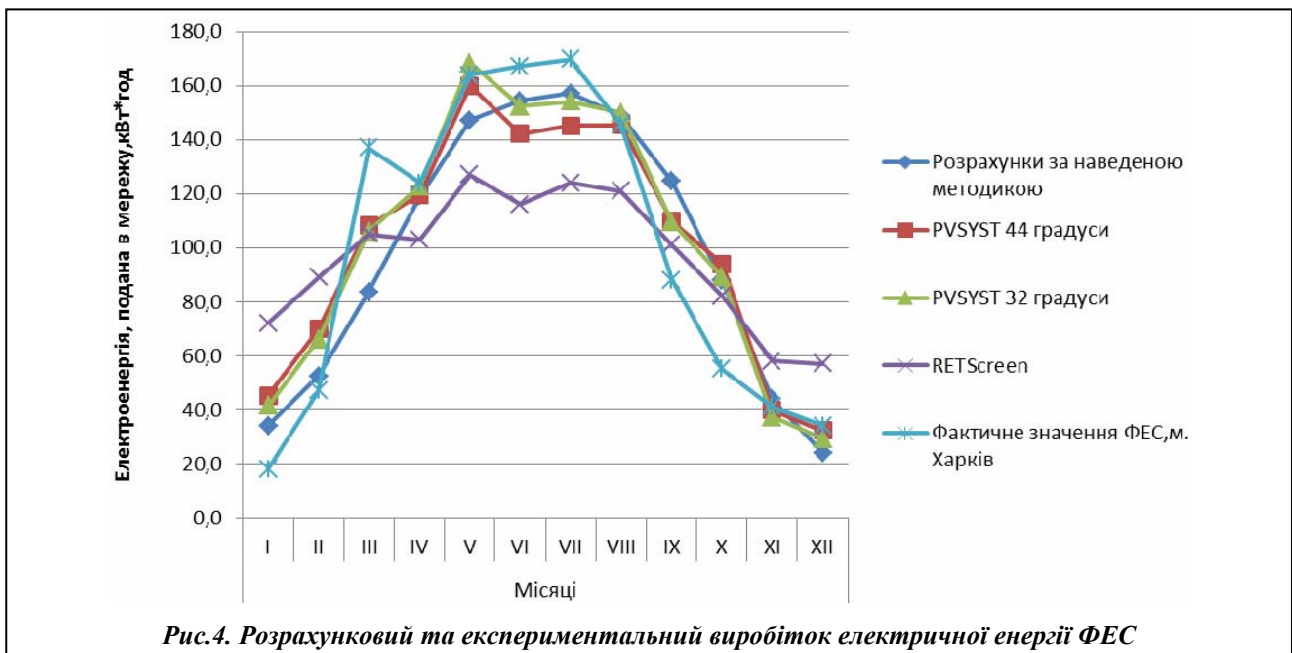


Рис.4. Розрахунковий та експериментальний виробіток електричної енергії ФЕС

Один із найпопулярніших безкоштовних програмних комплексів для оцінки рішень з впровадження ВДЕ RETScreen може використовуватися на початкових етапах підготовки до прийняття рішень, проте видає недостовірні дані щодо сезонних змін у роботі обладнання. Так, наприклад, відносні похибки для жовтня, листопада та грудня перевищили 41%, а для січня склали 300%. Це ставить під сумнів його використання для систем автономного енергозабезпечення та акумуляування енергії.

Результати моделювання роботи ФЕС показують, що вибір вертикального кута встановлення ФЕП у діапазоні 30–50° не має значного впливу (менше 1,5%) на загальну генерацію електроенергії у східній та центральній частині України і може вибиратися у межах зазначеного діапазону залежно від технологічних, монтажних та експлуатаційних особливостей.

Література

1. *Surface meteorology and Solar Energy* [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eosweb.larc.nasa.gov>.
2. Величко, С. А. Природно-ресурсне забезпечення гібридних геліо-вітроенергетичних систем (в межах рівнинної території України): дис... канд. географ. наук: 11.00.11 // С. А. Величко. – Х: 2006. – 300 с.
3. *Клімат України* / Під ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 344 с.
4. *Climatology Resource for Agroclimatology Daily Averaged Data (Evaluation Version)* [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://power.larc.nasa.gov>.
5. *Повышение энергоэффективности концентраторных фотоэлектрических модулей для солнечных батарей* / В. М. Андреев, В. Д. Румянцев, Н. А. Садчиков и др. // Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR-2014: Материалы международного форума., М., 10–11 нояб. 2014 г. – М: Объединен. ин-т высоких температур РАН, 2014. – С 57–62.

Надійшла до редакції 16.02.15