

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ У МІСТІ ЛЬВОВІ

© Щур І.З., Климко В.І., 2014

Наведено алгоритм розрахунку надходження сонячної радіації на фотоелектричні панелі. Опрацьовано метеорологічні дані та створено програмний продукт для прогнозування енергетичної ефективності роботи сонячних батарей у місті Львові.

Ключові слова: фотоелектрична панель, сонячна радіація, пряма сонячна радіація, розсіяна сонячна радіація, інсоляція, енергетична ефективність.

The paper presents the algorithm for calculation the incoming of solar radiation on photovoltaic panels. The meteorological data has been processed and the software product to predict the energy efficiency of solar cells in the city of Lviv has been set up.

Key words: photovoltaic panel, solar radiation, direct solar radiation, diffuse solar radiation, insolation, energy efficiency.

Постановка задачі

Останнім часом можна спостерігати підвищення інтересу до використання фотоелектричних панелей (ФЕП) для отримання електричної енергії (ЕЕ) шляхом перетворення енергії Сонця. Поряд з іншими пристроями генерування ЕЕ від поновлюваних джерел енергії (ПДЕ), ФЕП мають низку переваг, серед яких: простота конструкції та монтажу, мала маса і габарити, тривалий термін експлуатації. Основними недоліками використання ФЕП є їх низький ККД, нестабільність отримання ЕЕ у зв'язку з метеорологічними умовами та залежність вихідної потужності від кута падіння сонячних променів на світлопоглинаючу панель (СПП). Величина вихідної потужності ФЕП залежить від місця розміщення та орієнтації панелі, кута нахилу панелі, температури навколишнього середовища, пори року, часу доби та низки інших факторів.

Для отримання чіткої картини про роботу ФЕП необхідними є опрацювання та аналіз метеорологічних певних для регіону, де розміщується ця панель, а саме: інсоляції, температури навколишнього середовища хоча би за період одного року. Маючи перелічені вище дані, можемо розв'язати низку корисних задач, серед яких:

- знаходження оптимальних параметрів розміщення нерухомої ФЕП, за яких в конкретному місці генеруватиметься найбільша кількість ЕЕ;
- знаходження оптимального кута нахилу ФЕП за заданої орієнтації панелі (тобто азимут панелі є наперед відомим).

Тому актуальним є розроблення алгоритму розрахунку вихідної потужності конкретної ФЕП та кількості згенерованої нею за певний час ЕЕ за заданого її розміщення.

Аналіз останніх досліджень

Для забезпечення енергоефективної роботи ФЕП та отримання максимуму потужності на її виході необхідним є регулювання кутового положення панелі [1]. Сьогодні розрізняють ФЕП фіксованого положення та ФЕП, які орієнтуються за сонцем. Останні здатні генерувати більше ЕЕ, ніж фіксовані, але вони є дорожчими, оскільки оснащуються електричними приводами, до яких входять двигуни, коробки передач, муфти, механізми [2]. Кількість виробленої ЕЕ за певний

проміжок часу напряму залежить від інсоляції, тобто притоку сумарної сонячної радіації на одиницю площі горизонтальної поверхні за одиницю часу. Притік сонячної радіації залежить від таких факторів: тривалості дня, хмарності, висоти Сонця над горизонтом, вологості і прозорості атмосфери, географічної широти. До складу сумарної сонячної радіації входить пряма радіація, що надходить на горизонтальну поверхню від Сонця, і розсіяна небосхилом радіація [3]. У похмурі дні розсіяна радіація є єдиним джерелом енергії в приземних шарах атмосфери. Навіть незначна кількість згенерованої ФЕП енергії в похмурі дні дасть змогу покрити електричні потреби малопотужних споживачів, наприклад: освітлення будинку і території, сигналізація тощо. Також необхідно врахувати те, що від рівня запиленості атмосфери залежатиме, яка кількість сонячної радіації досягне земної поверхні [4].

Ціль статті

Метою роботи є: збір метеорологічних даних та створення програмного продукту для прогнозування енергетичної ефективності роботи сонячних батарей у місті Львові.

Виклад основного матеріалу

Розрахунок сумарної річної сонячної енергії, що надходить на довільно розташовану поверхню у м. Львові

У цьому дослідженні використано підхід, який дає змогу швидко визначати кількість сумарної сонячної радіації, яка надходить на довільно орієнтовану в просторі СПП у будь-який момент часу для заданого її розміщення. Ця методика ґрунтується на понятті сонячної константи – питомої потужності, яка надходить від Сонця на Землю через космос. Ця величина в середньому за межами атмосфери дорівнює 1367 Вт/м^2 [5]. Сонячна енергія досягає атмосфери Землі у вигляді напрямленого потоку сонячного космічного випромінювання. Поверхня Землі отримує як пряму сонячну радіацію S_{dir} , так і розсіяну сонячну радіацію S_{dif} (рис. 1).

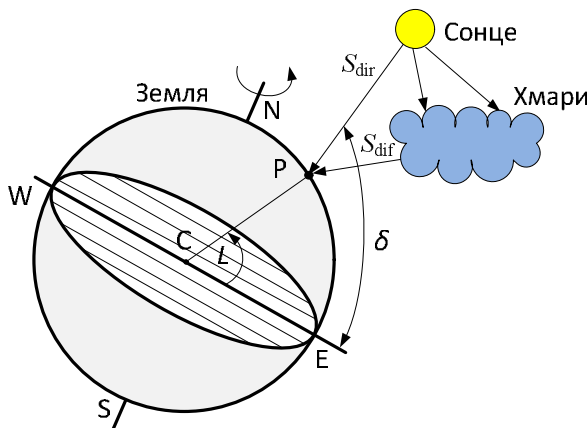


Рис. 1. Пряма сонячна радіація S_{dir} , розсіяна сонячна радіація S_{dif} , L – географічна широта, d – схилення Сонця

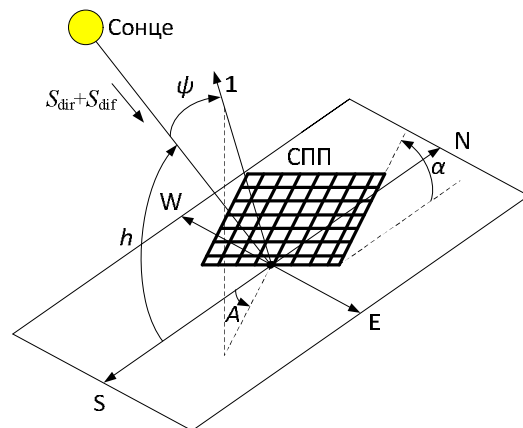


Рис. 2. Параметри орієнтації СПП відносно горизонтальної площини: α – кут нахилу, A – азимут, ψ – кут падіння, h – кут висоти Сонця

На рис. 1 показана Земля, яка обертається навколо своєї осі, що проходить через точки північного N і південного S полюсів. Ця вісь перпендикулярна до екваторіальної площини Землі, яка проходить через точки W і S , які позначають відповідно західний і східний напрями. Центр Землі позначений точкою C . Точка P на поверхні Землі вказує на місце розташування СПП і характеризується географічною широтою L , яка для м. Львова дорівнює 49° [6]. Кут між напрямом на Сонце і екваторіальною площиною називається схиленням d і є мірою сезонних змін [7].

На рис. 2 зображена СПП, що розміщена на поверхні Землі в точці P , та горизонтальна площина, що характеризується чотирма напрямками: західним – W , східним – E , північним – N та південним – S . Для нахиленої під кутом до горизонтальної площини СПП виділимо такі кути:

- a – кут нахилу (кут між СПП і горизонтальною площиною);
- A – азимут – відхилення від меридіана проекції на горизонтальну площину нормалі 1, проведеної до СПП (відхилення до заходу від напрямку на південь вважається додатним, відхилення до сходу – від’ємним);
- u – кут падіння (кут між напрямом на Сонце з точки розміщення СПП та нормаллю 1 до неї);
- h – кут висоти Сонця (кут, який визначає висоту Сонця над горизонтом у певний момент часу, тобто кут між напрямом на Сонце з точки спостереження і горизонтальною площиною).

Для обчислення притоку прямої S_{dir} та розсіяної S_{dif} сонячної радіації на похилу СПП використаємо методикою, що наведена в [8]. Згідно з цією методикою, сумарна сонячна радіація S дорівнює

$$S = S_{\text{dir}} + S_{\text{dif}}. \quad (1)$$

Здебільшого до складу сумарної сонячної радіації зараховують ще й відбиту сонячну радіацію, але її відсоткове співвідношення є незначним, тому в цьому дослідженні нею знехтувано.

Притік прямої сонячної радіації на похилу СПП буде:

$$S_{\text{dir}} = 1367 k_{\text{at}} \cos u, \quad (2)$$

де k_{at} – коефіцієнт атмосфери, який враховує поправку на повітряну масу, яку необхідно пройти сонячному променю.

Косинус кута падіння сонячного випромінювання u визначається виразом [8]

$$\cos u = \sin h \cos a + \sin a (\cos A \tan L \sin h + \sin A \cos d \sin t), \quad (3)$$

де t – часовий кут, який залежить від конкретної години доби.

Важливо зауважити, що рано-вранці чи пізно ввечері, коли Сонце перебуває низько над горизонтом, кут падіння u може перевищувати 90° (тобто косинус кута падіння u може стати від’ємним). У такому випадку сонячні промені не падають на фіксовану СПП [7].

Часовий кут t в точці P (рис. 2) – це є кут, на який Земля повернеться з моменту сонячного полудня. Оскільки Земля повертається на 360° за 24 години, то не важко розрахувати, що за одну годину вона повертається на 15° . Отже, сонячний кут t розраховують за виразом

$$t = \frac{P}{12}(t - 12), \quad (4)$$

де t – час доби.

Для того, щоб визначити схилення сонця d (рис. 2), скористаємось виразом [8]

$$d = 23,45 \sin \left[\frac{2p}{365} (284 + N) \right], \quad (5)$$

де N – порядковий номер дня року (починаючи з 1, що відповідає 1-му січня).

Синус кута висоти сонця h знаходимо за таким виразом:

$$\sin h = \cos t \cos d \cos L + \sin d \cos L. \quad (6)$$

На основі значення $\sin h$ коефіцієнт атмосфери описується співвідношенням

$$k_{\text{at}} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin h}, \quad (7)$$

а притік розсіяної сонячної радіації на похилу СПП:

$$S_{\text{dif}} = (137,1 - 14,82 \frac{1}{\sin h}). \quad (8)$$

Отже, підставивши вирази (2) та (8) в (1), отримаємо вираз для розрахунку сумарної сонячної радіації у вигляді

$$S = (1367 k_{\text{at}} \cos u + 137,1 - 14,82 \frac{1}{\sin h}). \quad (9)$$

Формування бази метеорологічних даних щодо притоку сонячної радіації у м. Львові

Вираз (9) дає змогу погодинно розрахувати загальний потік енергії, який приноситься сонячною радіацією на довільно орієнтовану в просторі похилу СПП для ясного дня. Але важливим також є оцінка хмарності протягом цього ж дня. Для отримання погодинних даних про тривалість сонячного сьйва в інтервалах істинного сонячного часу T_b , ми звернулися у Львівський обласний центр з гідрометеорології, де регулярно проводяться заміри за допомогою геліографа. Також з сайту [9] були взяті дані погодинних значень температури навколишнього середовища протягом 2013 року. Таким чином було сформовано базу метеорологічних даних за 2013 рік в середовищі Microsoft Excel для оцінки притоку сонячної радіації у м. Львові, а також прогнозування отримання ЕЕ від конкретної сонячної батареї при заданому її розміщенні. Фрагмент створеної бази даних показано в табл. 1.

Таблиця 1

Фрагмент бази метеорологічних даних за 2013 рік у м. Львові

Дата	Час	q , °C	T_b , в.о.	T_c , в.о.	ΔW , МДж/м ²	ΔW_{dir} , МДж/м ²	ΔW_{dif} , МДж/м ²
01.01.2013	6:00	-7	0	0	0,0	0,0	0,0
01.01.2013	7:00	-4	0	0	0,0	0,0	0,0
01.01.2013	8:00	-4	0	0	0,0	0,0	0,0
01.01.2013	9:00	-3	0,4	0,6	0,2	0,1	0,3
01.01.2013	10:00	1	1	0	1,2	0,0	1,2
01.01.2013	11:00	3	1	0	1,7	0,0	1,7
01.01.2013	12:00	5	1	0	1,9	0,0	1,9
01.01.2013	13:00	5	1	0	1,7	0,0	1,7
01.01.2013	14:00	6	1	0	1,2	0,0	1,2
01.01.2013	15:00	6	0,6	0,4	0,2	0,1	0,3

Інтервал часу в межах кожної години, протягом якого небо було захмареним, буде

$$T_c = 1 - T_b. \quad (10)$$

Отже, для погодинного обчислення реального притоку енергії сонячної радіації ΔW та її складових, необхідно врахувати T_b та T_c :

$$\Delta W = \Delta W_{dir} + \Delta W_{dif}, \quad (11)$$

де $\Delta W_{dir} = 3600 S_{dir} T_b$ – годинний приріст енергії прямої сонячної радіації протягом часу T_b ; $\Delta W_{dif} = 3600 S_{dif} T_c$ – годинний приріст розсіяної сонячної радіації протягом часу T_c .

Для оцінки динаміки погодинних притоків складових сонячної радіації ΔW_{dir} , ΔW_{dif} та її сумарної кількості ΔW , на рис. 3–5 побудовано їхні річні діаграми для м. Львова протягом 2013 року.

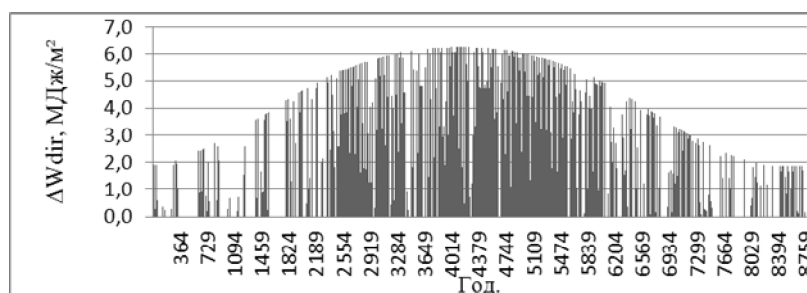


Рис. 3. Діаграма погодинних значень притоку енергії прямої сонячної радіації протягом 2013 р.

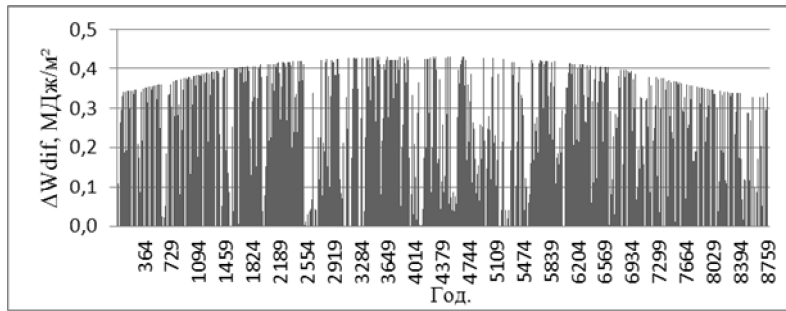


Рис. 4. Діаграма погодинних значень притоку енергії розсіяної сонячної радіації протягом 2013 р.

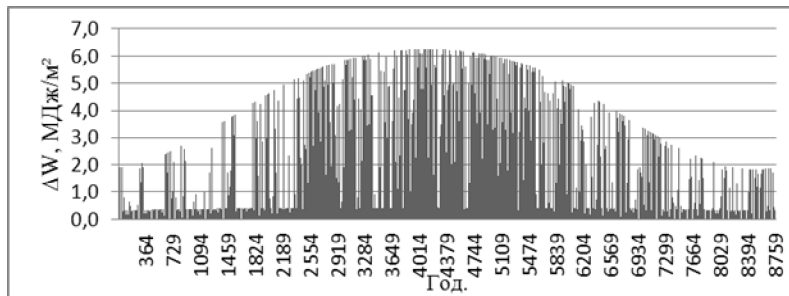


Рис. 5. Діаграма погодинних значень притоку енергії сумарної сонячної радіації протягом 2013 р.

Визначення оптимальних параметрів розташування СПП у м. Львові для отримання максимуму падаючої за рік сонячної енергії

Очевидним є те, що для отримання максимуму ЕЕ за рік на виході з СПП необхідно визначити оптимальні координати орієнтації та розташування СПП. Отже, для певних орієнтацій СПП за сонцем (азимутів $A = -45^\circ, \dots, 0, \dots, 45^\circ$) було розраховано та побудовано на рис. 6 залежності значень сумарної річної падаючої енергії сонячної радіації ΔW від кутів нахилу СПП до горизонту α та знайдено оптимальні координати розташування СПП.

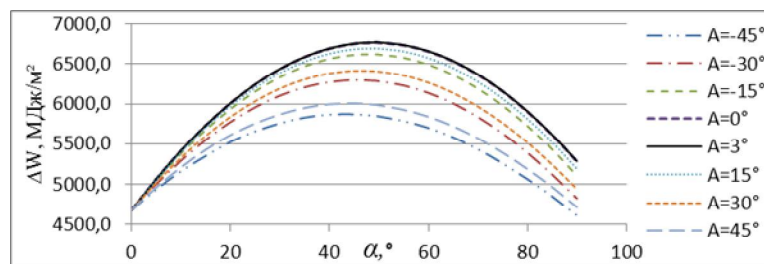


Рис. 6. Залежності значень притоку енергії сумарної річної сонячної радіації від кутів нахилу СПП до горизонту α за різних значень азимуту A розміщення панелі

Проаналізувавши рис. 6, можемо зробити висновок, що для забезпечення максимуму отриманої за рік сонячної енергії у м. Львові, за можливості СПП необхідно орієнтувати на південь з відхиленням до заходу 3° , а кут нахилу панелі до горизонту α вибрати 49° . Якщо один з параметрів розташування є таким, що його не можна змінити, наприклад, азимут СПП (розміщення СПП на покрівлі будинку), то при певному куті нахилу СПП за залежностями, приведеними на рис. 6, можна прогнозувати річний притік сонячної енергії.

Прогнозування кількості отриманої ЕЕ від конкретної ФЕП площею 1 м^2 при заданому її розміщенні

Для прогнозування обсягу отриманої на виході конкретної ФЕП за рік ЕЕ візьмемо, для прикладу, ФЕП М35 фірми Siemens [10] з такими номінальними параметрами:

$V_{oc.stc} = 22 \text{ В}$ – напруга неробочого ходу ФЕП за стандартних умов вимірювання (СУВ);
 $I_{sc.stc} = 2,3 \text{ А}$ – струм короткого замикання ФЕП за СУВ;
 $I_{max} = 2,12 \text{ А}$ – значення струму ФЕП в точці максимуму потужності;
 $V_{max} = 17 \text{ В}$ – значення напруги ФЕП в точці максимуму потужності;
 $q_{ncot} = 43^\circ \text{ С}$ – номінальна робоча температура ФЕП;
 $k_v = -0,1152 \text{ В/}^\circ\text{С}$ – температурний коефіцієнт напруги неробочого ходу ФЕП;
 $k_i = 0,000224 \text{ А/}^\circ\text{С}$ – температурний коефіцієнт струму короткого замикання ФЕП.

Відповідно до алгоритму розрахунку, що представлений в [11], скористаємось таким виразом для обчислення погодинних значень отриманої ЕЕ на виході з конкретної ФЕП:

$$\Delta W_{m,i}(t, a) = N_s N_p V_{oc,i}(t) I_{sc,i}(t) F_i(t) 3600, \quad (14)$$

де i – номер дня року ($1 \leq i \leq 365$); t – година дня ($1 \leq t \leq 24$); N_s – кількість ФЕП, які з'єднані послідовно; N_p – кількість ФЕП, які з'єднані паралельно; V_{oc} і I_{sc} – реальні за конкретної температури значення відповідно напруги неробочого ходу та струму короткого замикання ФЕП; F – коефіцієнт заповнення зовнішньої характеристики ФЕП.

$V_{oc,i}(t)$ є відкоректованим на дію конкретної температури стандартним значенням $V_{oc.stc}$:

$$V_{oc,i}(t) = V_{oc.stc} - k_v q_{c,i}(t), \quad (15)$$

де $q_{c,i}(t)$ – реальна на конкретну годину температура ФЕП.

$q_{c,i}(t)$ знайдемо за виразом [11]

$$q_{c,i}(t) = q_{a,i}(t) + \frac{q_{ncot} - 20^\circ \text{ С}}{800} \frac{\Delta W}{3600}, \quad (16)$$

де $q_{a,i}(t)$ – температура навколишнього середовища в конкретний день року та час дня.

Оскільки на роботу ФЕП значно впливає температура навколишнього середовища, то сформовану базу метеорологічних даних за дослідний 2013 р. у м. Львові доповнено ще й погодинними значеннями температури протягом року (рис. 7).

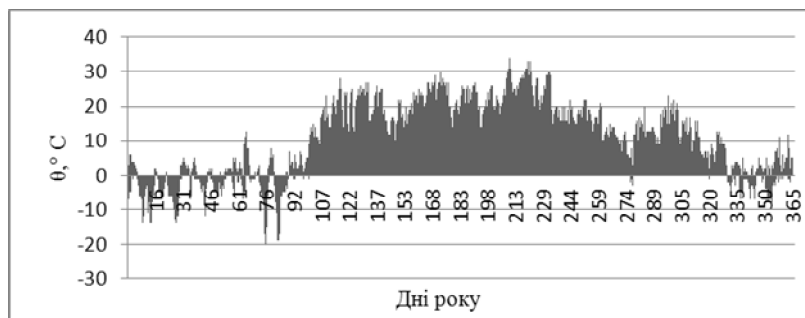


Рис. 7. Діаграма погодинних значень температури навколишнього середовища у м. Львові протягом 2013 р.

Струм короткого замикання ФЕП визначається за виразом [11]

$$I_{sc,i}(t) = \frac{[I_{sc.stc} + k_i(q_{c,i}(t) - 25^\circ \text{ С})]}{1000} \frac{\Delta W}{3600}. \quad (17)$$

Поточне значення коефіцієнта заповнення розраховується за виразом

$$F_i(t) = \frac{I_{sc,i}(t) V_{oc,i}(t)}{I_{sc.stc} V_{oc.stc}}. \quad (18)$$

На рис. 8 наведено розраховану за описаною вище методикою обчислення погодинних значень реального притоку енергії сонячної радіації ΔW , доповненої виразами (14)–(18) діаграму погодинних значень згенерованої ЕЕ на виході ФЕП М35 фірми Siemens протягом 2013 року у м. Львові.

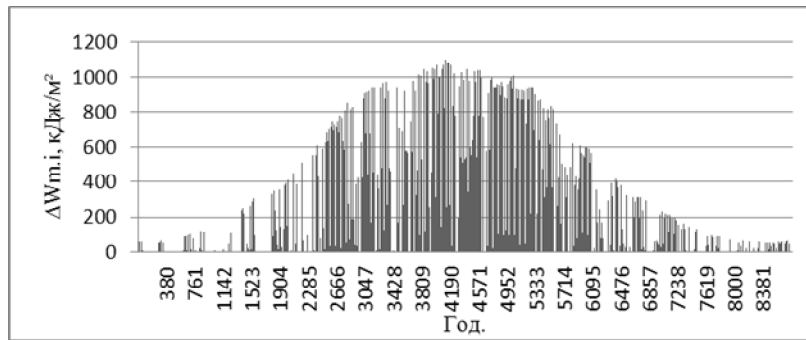


Рис. 8. Діаграма погодинних значень згенерованої ЕЕ ФЕП М35 протягом 2013 р.

Висновки

Створено електронну базу даних, в яку входять погодинні значення розсіяної, прямої та сумарної інсоляції, а також погодинні значення температури навколишнього середовища у м. Львові протягом дослідного 2013 року. На основі цієї бази розроблено алгоритм розрахунку приходу сонячної радіації на довільно орієнтовану у просторі площину. Показано, як для конкретної ФЕП, поразивавши притік сумарної річної сонячної радіації, та маючи її номінальні параметри, можна оцінити скільки вона генеруватиме ЕЕ за рік у м. Львові за заданого її розташування.

Визначено, що оптимальними координатами розміщення ФЕП для міста Львова є орієнтація панелі на південь з відхиленням до заходу 3° , а кут нахилу ФЕП до горизонту становить 49° .

1. Al-Mohamad A. *Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a sun-tracking system* / A. Al-Mohamad // *Applied energy*. – No. 79. – 2004. – P. 345–354.
2. Alixandru C. *Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system* / C. Alexandru, C. Pozna // *Transilvania University of Brasov*. – 2008.
3. Klein W.H. *Calculation of solar radiation and the solar heat load on man* / W.H. Klein // *Journal of Meteorology of U. S. Bureau*. – Washington D.C. – 1948. – Vol. 5. – No. 4. – P. 119–129.
4. Duffie J.A. *Solar Engineering of Processes Thermal* / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – Madison, Wisconsin, USA. – 1980.
5. Вікіпедія: Сонячна стала. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.uk.wikipedia.org.
6. Вікіпедія: Географічні координати розташування міста Львова. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.uk.wikipedia.org.
7. Твайделл Дж. *Возобновляемые источники энергии* / Дж. Твайделл, А. Уеер. – М.: Мир, 1990. – 393 с.
8. Прогрес 21. *Нові енергетичні системи: Розрахунок потоку сонячної радіації* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.progress21.com.ua.
9. *Розклад погоди: Статистика погоди у Львові* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.rp5.ua.
10. *Характеристики сонячної панелі Siemens M35: Інструкція по встановленні сонячних батарей* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.uk.wikipedia.org.
11. Koutroulis E. *Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms* / E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis // *Solar Energy*. – No. 80. – 2006. – P. 1072–1088.