

УДК 621.32

**Коваль Вадим Петрович**, канд. техн. наук, доц., *E-mail: koval\_vp@ukr.net*

**Ивасечко Роман Романович**, канд. техн. наук, асист.

**Козак Катерина Миколаївна**, асист. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна. *Вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001*

### ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПЛОСКИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

*Встановлено закономірності поступлення сонячної енергії на сонячну панель закріплену стаціонарно та постійно орієнтовану системою позиціонування перпендикулярно сонячному випромінюванню. Виявлено вплив захисного скління на зменшення кількості поступлення енергії на приймач сонячної панелі впродовж дня. Встановлено відносні втрати енергії у стаціонарно змонтованих сонячних панелях в порівнянні із орієнтацією їх системою позиціонування.*

**Ключові слова:** сонячна панель, енергія, система позиціонування.

**Коваль Вадим Петрович**, канд. техн. наук, доц., *E-mail: koval\_vp@ukr.net*

**Ивасечко Роман Романович**, канд. техн. наук, асист.

**Козак Екатерина Николаевна**, асист. Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя., г. Тернополь, Украина. *Ул. Руська, 56, г. Тернополь, Украина, 46001*

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

*Установлены закономерности поступления солнечной энергии на солнечную панель закрепленную стационарно и постоянно ориентированную системой позиционирования перпендикулярно солнечному излучению. Выявлено влияние защитного остекления на уменьшение количества поступления энергии на приемник солнечной панели в течение дня. Установлено относительные потери энергии в стационарно смонтированных солнечных панелях по сравнению с ориентацией их системой позиционирования.*

**Ключевые слова:** солнечная панель, энергия, система позиционирования.

**Koval Vadim Petrovich**, Cand. Sc. (Eng.), *E-mail: koval\_vp@ukr.net*

**Ivasechko Roman Romanovich**, Cand. Sc. (Eng.), TF

**Kozak Katerina Nikolaevna**, TF. Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopol, Ukraine , *Ruska str., 56, Ternopil, Ukraine*

### ENERGETIC EFFICIENCY OF FLAT SOLAR PANELS POSITION SYSTEM

*The principles of arrival of solar energy at the solar panel are established. This panel is permanently installed and positioned by the position system perpendicularly to the solar radiation. The dependency of energy arrival at the flat receiving terminal from the radiation arrival angle and protective glass optical properties during the day is studied. The calculations of the dynamics of changes in energy value arriving during the day at the flat surface of the solar panel in the city of Ternopil were made due to the type of permanent or automatic position systems against the position of the sun. The algorithm of calculating the relative energy consumption in permanently installed solar panels compared to the orientation of their position system was offered. It enabled to find such descent angle that proves the smallest alterations in the relative energy consumption during the year.*

**Keywords:** solar panel, energy, positioning system.

### Постановка проблеми в загальному вигляді

За прогнозом Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ) сонячна енергетика зможе скласти конкуренцію сучасній традиційній енергетиці на базі викопного палива. Потенційні можливості енергетики, заснованої на використанні безпосередньо сонячного випромінювання, надзвичайно великі. Використання всього лише 0,0125 % енергії Сонця могло б забезпечити всі сьгоднішні потреби світової енергетики, а використання 0,5 % – повністю покрити потреби на перспективу. Проте на сьогодні організація бачить дві основні проблеми, що стримують сонячну енергетику від повноцінної конкуренції з викопним паливом. Однією з таких проблем є дороговизна панелей, інша - їх досить низький ККД. В реально діючих структурах з гетеропереходами ККД досягає на сьогоднішній день більше 30 %, а в однорідних напівпровідниках типу монокристалічного кремнію – до 18 %.

Середнє значення ККД в сонячних батареях на монокристалічному кремнії сьогодні близько 15 %. Ці цифри дійсні лише коли експлуатація сонячних панелей проходить влітку, ополудні і при падінні випромінювання перпендикулярно на світлопоглинаючу площину. В реальних умовах, коли Сонце рухається від сходу до заходу змінюється кут падіння випромінювання та його інтенсивність [1]. Для зменшення впливу цих факторів встановлюють сонячні панелі стаціонарно в положенні, при якому для даної широти місцевості виробництво енергії буде максимальне, або організують автоматизоване позиціонування площини сонячних панелей перпендикулярно падаючому сонячному випромінюванню. Тут відкритим залишається питання, який із цих методів є більш енергоефективним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** [2, 3, 4, 5, 6] показав, що особливістю енергопостачання із використанням сонячної енергії є непостійність в часі, спричинена обертанням Землі навколо Сонця. Для забезпечення необхідної генерованої потужності збільшують площу панелей, або, якщо це можливо, укомплектовують їх поворотним механізмом [7]. В залежності від сигналів від давача положення Сонця поворотний механізм позиціонує площину панелі перпендикулярно до сонячних променів. Ряд авторів [3, 4, 5, 6] розглядають шляхи розрахунку оптимальних кутів нахилу сонячних панелей до горизонту і азимута повороту, при яких буде отримано найбільше енергії від сонячного випромінювання. Проте порівняльного аналізу між системою позиціонування та стаціонарним монтажем сонячних панелей досі не виконано.

Саме тому **метою даної роботи** є аналіз поступлення сонячної енергії на поверхню сонячних панелей в залежності від їх орієнтації в просторі та встановлення залежності кількості поглиненої енергії від системи позиціонування.

Розглянуто два випадки систем монтажу сонячних панелей:

- 1) стаціонарний монтаж;
- 2) використання системи автоматичного позиціонування відносно положення Сонця.

Для розрахунків необхідно задатися наступними вихідними даними (для прикладу взято м. Тернопіль, Україна):

- 1) *координати розташування сонячної батареї*: місто Тернопіль із широтою  $\varphi = 49,33^\circ$ ;
- 2) *день року*: розрахунок проводиться для 15 дня 3, 6, 9 і 12 місяців;
- 3) *година дня*: дані обчислюються на кожну годину дня;
- 4) для першого випадку *положення сонячної батареї в просторі*:
  - азимут орієнтації нормалі до поверхні сонячної батареї відносно південного напрямку  $\alpha = 0^\circ$ ;
  - кут нахилу поверхні сонячної батареї відносно поверхні Землі  $\beta = 2,5^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ;
- 5) для другого випадку позиціонування проводиться неперервно із постійним суміщенням нормалі до поверхні сонячної батареї і напрямку на Сонце.

Визначення схилення Сонця  $\delta$  для зазначених днів (табл. 1) у році проведено користуючись формулою (1) [8, 9, 10].

Таблиця 1

Порядкові номери днів 2014 року та схилення Сонця

	15 березня	15 червня	15 вересня	15 грудня
$m$	74	166	257	349
$\delta$	-2,82	23,36	2,62	-23,38

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + m}{365}\right), \quad (1)$$

де  $\delta$  – схилення Сонця; град;  $m$  - порядковий номер дня у році.

Розрахунок тривалості дня 15 березня, 15 червня, 15 вересня і 15 грудня проведено згідно формули (2), а також визначено час сходу і заходу Сонця.

$$T_0 = \frac{24}{\pi} \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta), \quad (2)$$

де  $\varphi$  – географічна широта місцевості.

Відповідно до цього прийнято за початкову годину розрахунків найменше значення часу сходу Сонця – це 4 година ранку, а за кінцеву – найбільше – це 20 година.

Для розрахунку інтенсивності потоку сонячного випромінювання, яке поступає на похилу поверхню сонячної батареї, необхідно знати кути падіння сонячних променів на неї [8]. Нами проведено розрахунок кутів падіння сонячних променів на поверхню із однаковими азимутами користуючись формулою (3) (рис.1). При цьому годинний кут  $\omega$  розраховано згідно формули (4) від 4 до 20 години і кроком 1 година.

$$\cos\theta_1 = \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta), \quad (3)$$

$$\omega = 15 \cdot (12 - \tau), \quad (4)$$

де  $\beta$  – кут нахилу поверхні сонячної батареї відносно поверхні Землі.

При значних кутах падіння сонячного проміння на площину поглинаючої поверхні важливим є такий показник як коефіцієнт заломлення захисного скла. Так як він вищий ніж у повітря, то при певному куті падіння випромінювання буде спостерігатися ефект повного внутрішнього відбивання. Саме тому для встановлення залежності кількості пропущеного випромінювання через скло до приймача від кута падіння випромінювання, нами проведено розрахунок пропускну здатності одношарового захисного покриття сонячної батареї із скла для вище розрахованих значень кутів падіння променів.

Коефіцієнт відбивання для прямовисного падіння променів у випадку використання системи позиціонування сонячних батарей визначено за формулою (5).

$$\rho = \left[ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right]^2, \quad (5)$$

При цьому що коефіцієнт заломлення скла становить  $n = 1,526$ .

$$\rho = \left[ \frac{(1,526-1)}{(1,526+1)} \right]^2 = 0,0434.$$

Знаючи кут падіння променів  $\theta_1$  (рис. 1), кут заломлення  $\theta_2$  визначено за співвідношенням:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)}. \quad (6)$$

Враховуючи, що для повітря  $n = 1$ , отримаємо:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta_1)}{n_2}\right). \quad (7)$$

Здатність скла відбивати промені, які падають на нього під кутом  $\theta_1$ , розраховано за формулою (8).

$$\rho(\theta_1) = (1/2) \left[ \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\operatorname{tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right]. \quad (8)$$

Прийнявши, що для механічного захисту сонячної батареї використано лише одне чисте скло товщиною 3 мм, розраховано його пропускну  $\tau_{np}$  та поглинальну  $\tau_{ног}$  здатність за формулами (9) і (10) відповідно.

$$\tau_{np} = (1 - \rho) / [1 + (2 \cdot i - 1) \cdot \rho], \quad (9)$$

$$\tau_{noz} = \exp\left(-\frac{k \cdot L}{\cos(\theta_2)}\right), \quad (10)$$

Кут нахилу поверхні сонячної батареї відносно поверхні Землі  $\beta$

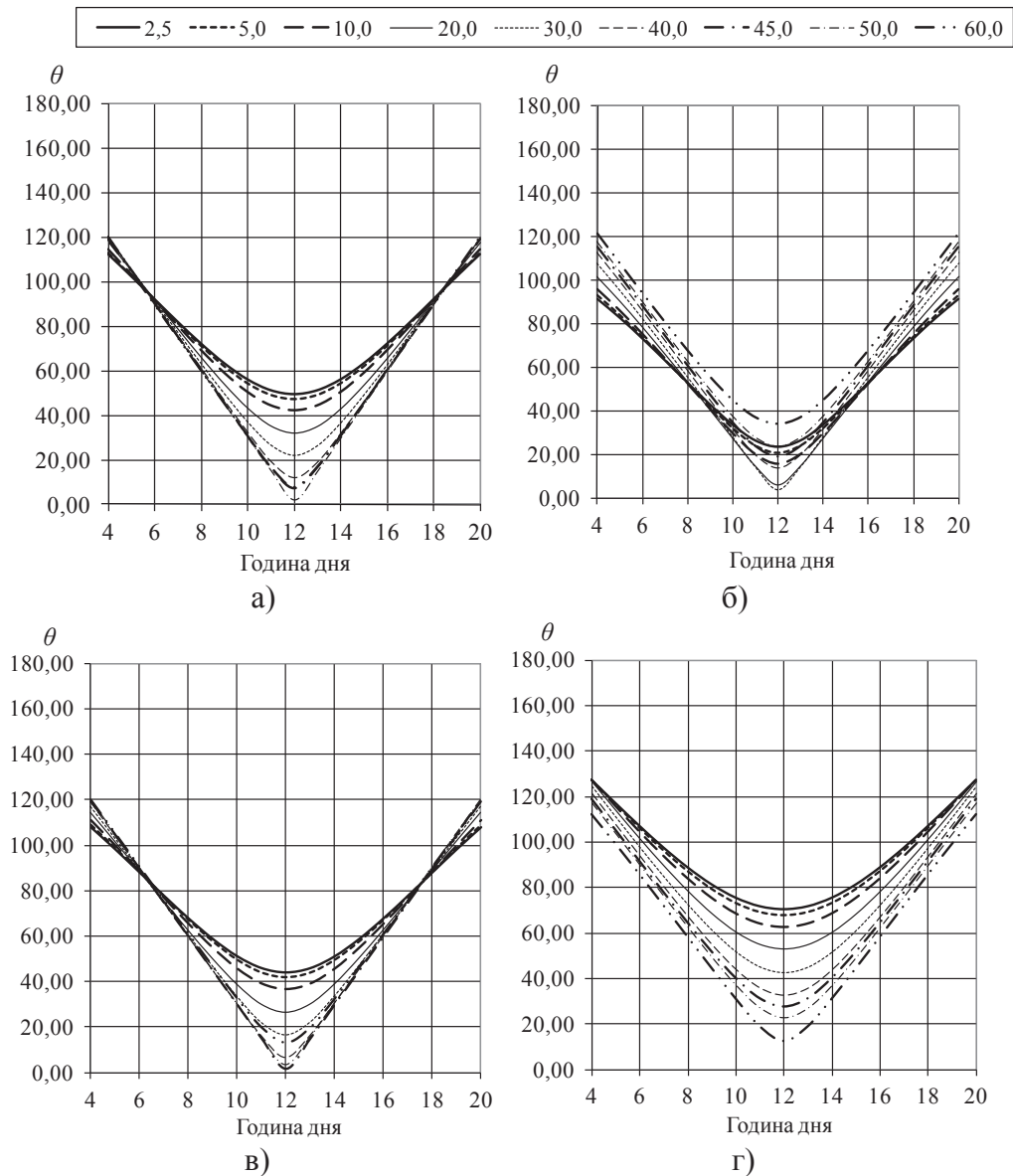


Рис. 1. Результати розрахунку кутів падіння ( $\theta_1$ ) сонячного проміння на поверхню сонячної батареї для: а) для 15 березня; б) 15 червня; в) 15 вересня; г) 15 грудня

Результати розрахунку пропускну́ї здатності скла графічно зображені на просторових діаграмах рис. 2.

Розрахунок поступлення сонячної енергії здійснено для двох вищезазначених випадків монтажу сонячних панелей.

*Перший випадок. Система позиціонування сонячної батареї*

На будь-яку поверхню попадає сонячне випромінювання із двох «джерел»: безпосередньо від сонця – *пряме* та *розсіяне* через атмосферу. Для розрахунку залежності розсіяного сонячного випромінювання  $E_p$  від кута висоти сонця  $h$  дані табл. 2 взяті із [10] апроксимовано неперервною функцією (12) із середньоквадратичним відхиленням  $0,29 \text{ Вт/м}^2$ , яку використано для розрахунків.

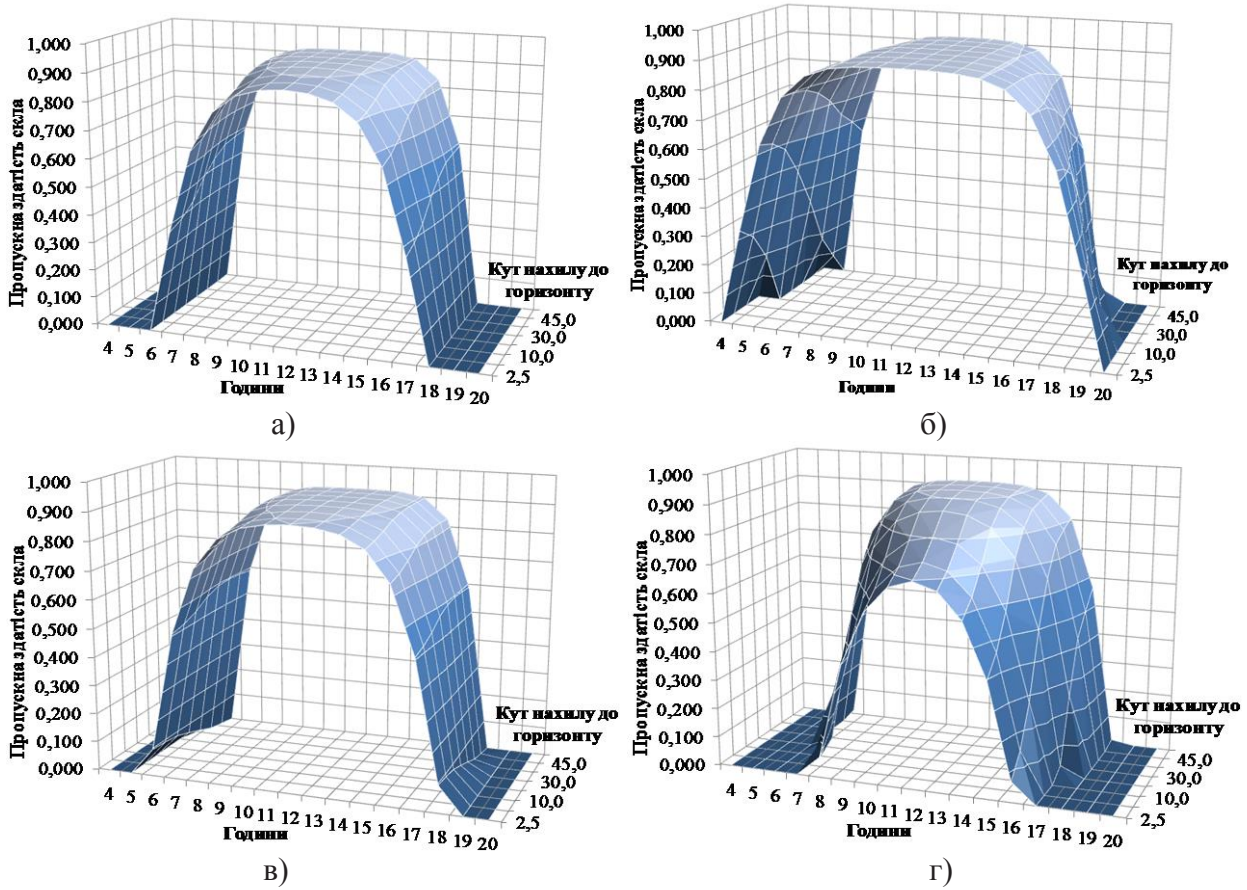


Рис. 2. Залежність пропускної здатності скла похилої поверхні від години дня і кута її нахилу до горизонту для: а) 15 березня; б) 15 червня; в) 15 вересня; г) 15 грудня

Таблиця 2

Інтенсивність розсіяної сонячної радіації

$h$ , град	10	20	30	40	50	60	70
$E_p$ , Вт/м <sup>2</sup>	31,4	43,1	52,4	60,5	65,2	67,5	68,6

$$E_p = -0,011 \cdot h^2 + 1,52 \cdot h + 17,24. \tag{12}$$

де  $h$  – кут висоти Сонця (11)

$$h = \arccos(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega). \tag{11}$$

Розрахунок поступлення прямого сонячного випромінювання виконано за формулою (13).

$$E_{cp} = 1360 \cdot \sin(h) / [\sin(h) + (1 - P_{np}) / P_{np}], \tag{13}$$

При розрахунку сумарної сонячної енергії на перпендикулярну поверхню враховано коефіцієнти пропускання та поглинання захисного скла для кута падіння проміння  $0^\circ$  ( $\tau_{np} = 0,917$ ,  $\tau_{пог} = 0,988$ ).

Результати розрахунків поступлення сумарної сонячної енергії на перпендикулярну поверхню представлені на рис. 3.

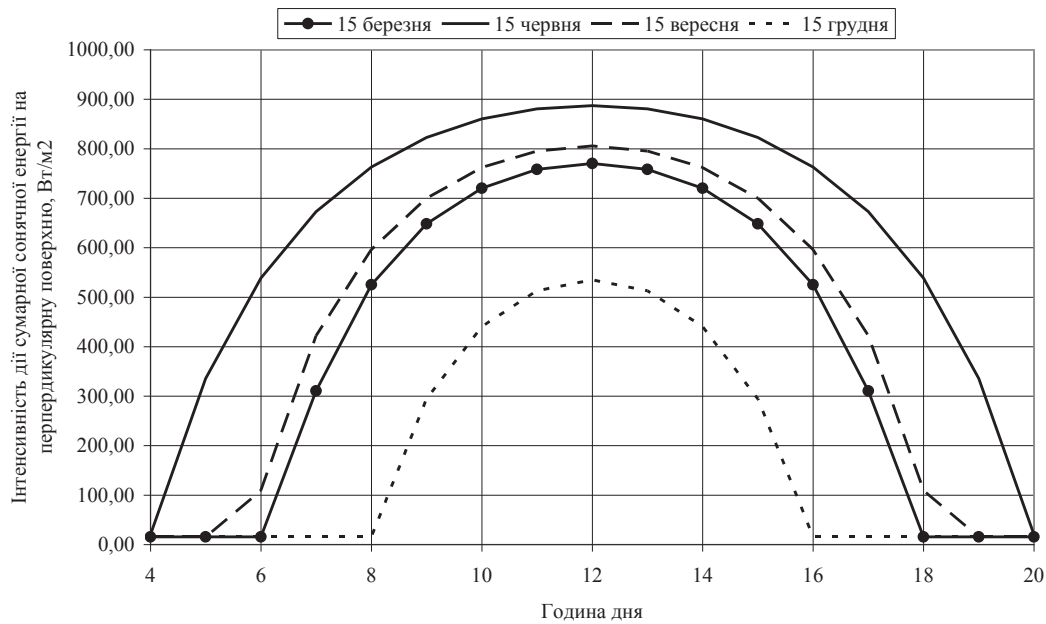


Рис. 3. Залежність поступлення сумарної сонячної енергії на перпендикулярну поверхню впродовж дня від пори року

Другий випадок. Стаціонарно змонтована сонячна батарея, орієнтована на південь під кутом  $\beta^\circ$

Враховуючи те, що сонячна батарея при стаціонарному монтажі нерухома, то кількість сонячної енергії, яка поступає безпосередньо на поверхню батареї залежить від коефіцієнтів пропускання і поглинання захисного скла та площі проекції сонячної батареї на поверхню перпендикулярну руху сонячних променів (14):

$$E_n = E_c \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{ноз} \cdot S_{np}, \tag{14}$$

де  $E_c$  – сумарна сонячна енергія, яка поступає на  $1 \text{ м}^2$ , Вт/1  $\text{м}^2$ ;

$S_{np}$  – площа проекції сонячної батареї на поверхню перпендикулярну руху сонячних променів,  $\text{м}^2$ .

Для спрощення розрахунків приймемо, що сонячна батарея має форму круга, площею  $1 \text{ м}^2$ . Тоді діаметр батареї повинен становити  $d = \sqrt{1/\pi}$  і площа її проекції на поверхню перпендикулярну руху сонячних променів буде визначатись за формулою для розрахунку площі еліпса:

$$S_{np} = \pi \cdot d_1 \cdot d_2, \tag{15}$$

де  $d_1$  і  $d_2$  – головні осі еліпса, м.

В нашому випадку:

$$d_1 = d, d_2 = d \cdot \sin(\theta_1). \tag{16}$$

Підставивши значення із (16) у (15) отримаємо:

$$S_{np} = \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \sin(\theta_1) = \sin(\theta_1). \tag{17}$$

Тоді формулу (14) можна записати наступним чином:

$$E_n = E_c \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{ноз} \cdot \sin(\theta_1). \tag{18}$$

Саме за цією формулою і проведено розрахунок поступлення сонячної енергії на стаціонарно змонтовану поверхню для вище зазначених умов. На рис. 4 наведено поступлення сонячної енергії на 1 м<sup>2</sup> площі 15 червня протягом дня на стаціонарно закріплену сонячну батарею під змінним кутом до горизонту  $\beta$  і на сонячну батарею із системою позиціонування.

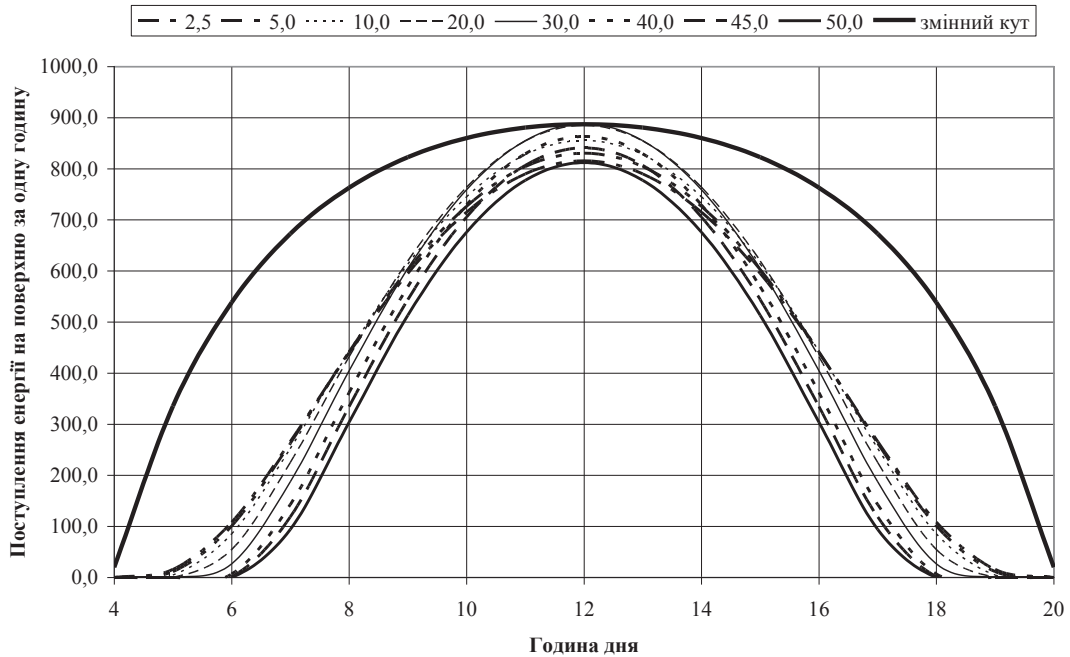


Рис. 4. Залежність поступлення сонячної енергії на сонячну панель із змінним кутом нахилу (система позиціонування) до горизонту та фіксованим ( $\beta$ ) від 2,5° до 50° (стаціонарний монтаж) для 15 червня

На основі отриманих даних по поступленню енергії на сонячні батареї із різною системою монтажу, визначено відносні втрати енергії  $\varepsilon$  (19) у стаціонарно змонтованих сонячних батареях в порівнянні із орієнтацією їх системою позиціонування.

$$\varepsilon = \frac{E_n - E_{cm}}{E_n} \cdot 100\%, \quad (19)$$

де  $E_{cm}$  – сонячна енергія, яка потрапляє на сонячну панель при її стаціонарному монтажі впродовж дня, Вт·год;  $E_n$  – сонячна енергія, яка потрапляє на поверхню перпендикулярну руху сонячних променів впродовж дня, тобто при наявності системи позиціонування, Вт·год.

При порівнянні отриманих результатів розрахунків відносних втрат енергії, встановлено, що при наявності системи позиціонування кількість сонячної енергії впродовж дня в 1,6–2,2 рази більша літом і 1,2 – 5,7 рази більша зимою (табл. 3, рис. 5).

Таблиця 3

Денна кількість сонячної енергії, яка потрапляє на розглянуті поверхні

Відносні втрати доступної енергії	Стаціонарний монтаж, Вт							
	$\beta^\circ$							
	2,5°	5°	10°	20°	30°	40°	45°	50°
15 березня								
$\varepsilon, \%$	57,1	54,2	48,9	39,8	33,1	28,8	27,5	26,8
15 червня								
$\varepsilon, \%$	37,5	37,0	36,3	36,5	38,5	42,5	45,1	48,1

15 вересня								
$\epsilon, \%$	51,7	49,3	44,9	37,9	33,1	30,6	30,2	30,4
15 грудня								
$\epsilon, \%$	82,4	78,4	70,3	54,5	40,9	29,8	25,3	21,5

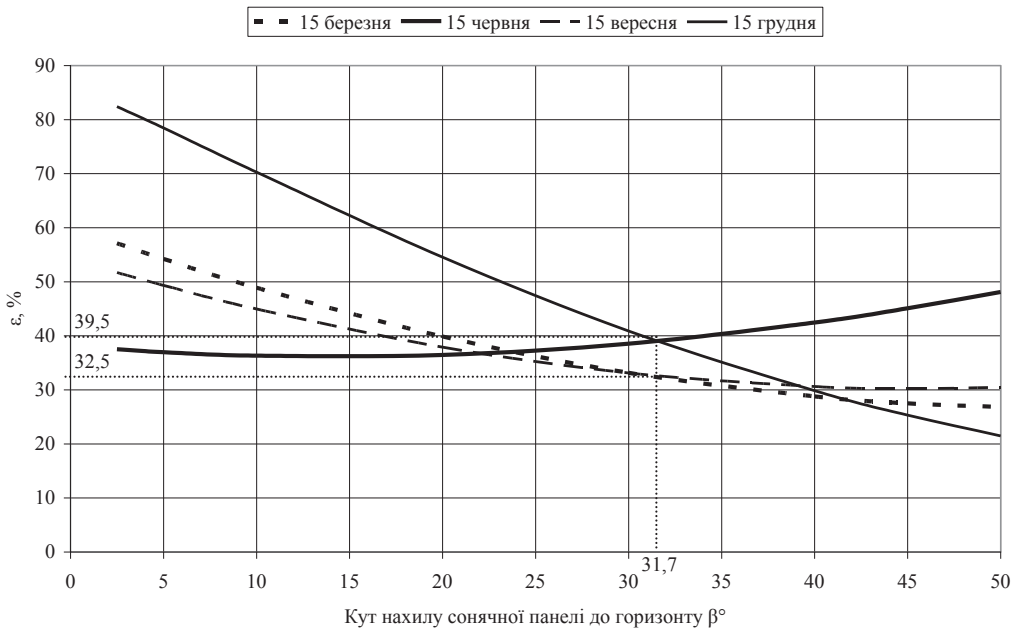


Рис. 5. Залежність відносних втрат енергії  $\epsilon$  від кута нахилу сонячної панелі до горизонту

### Висновки

1. При стаціонарному монтажі сонячних панелей на даху будинку, кут їх нахилу задається скатом покрівлі. Тому найбільша кількість енергії сприймається панеллю батареї лише тоді, коли випромінювання падає на дах під прямим кутом. В інших положеннях Сонця кількість отриманої сонячною панеллю енергії значно падає.
2. Встановлено, що відносні втрати сонячної енергії при стаціонарному монтажі сонячних панелей становлять 37–48 % літом і 20–80 % зимою. Що підтверджує високу енергоефективність систем позиціонування сонячних панелей.
3. Встановлено, що найбільше сонячної енергії потрапляє на стаціонарно закріплену сонячну панель, яка розташована на широті Тернополя, тоді коли кут її нахилу до горизонту становить близько 32°. При цьому  $\epsilon$  в межах від 32,5 до 39,5 % в залежності від пори року.
4. Нажаль отримані результати не враховують споживання електроенергії системою позиціонування через те, що воно не є величиною сталою і її залежність від встановленої потужності сонячних батарей досі не встановлена. Це питання буде надалі вивчатися.

### Список використаної літератури:

1. Brownson Jeffrey R.S. Solar Energy Conversion Systems. 1<sup>st</sup> Edition / Brownson Jeffrey R.S. – Elsevier: Academic Press, 2014. – 457 p.
2. Chen C.J. Physics of Solar Energy / C.J. Chen. – Willey, 2011. – 352 p.
3. Шаповал С. П. Ефективність системи тепlopостачання на основі сонячного колектора за зміни кута надходження теплового потоку / С. П. Шаповал, О. Т. Возняк, О. С. Дацько // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Теорія і практика буд-ва. – 2009. – № 655. – С. 299-302.
4. Касперські Я. Компактний даховий кондиціонер на сонячній енергії – оптимізація кута нахилу колекторів / Я.Касперські, М. Левкович, С. Петровіч // Ринок інсталяцій. – 2008. – № 5. – С. 8–11.
5. Касинець М. Є. Аналіз надходження сонячної енергії на геліопанель / М. Є. Касинець // Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація : [збірник наукових праць] / відповідальний редактор С. П. Пістун. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 135-139. – (Вісник / Національний університет "Львівська політехніка" ; № 758)



6. Jamal Kamal Husain. Оптимизация угла наклона солнечных коллекторов в гелиосистеме. Труды Одесского политехнического университета / Денисова А. Е. Дорошенко О. В., Jamal Kamal Husain // Труды Одесского политехнического университета – 2008. – Вып. 1 (29). С.133–137.
7. Femia N. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems / N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. – CRC Press, 2012. – 366 p.
8. Kalogirou Soteris A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2nd edition / A. Kalogirou Soteris. – Elsevier Inc., 2014. – 819 p.
9. Дудюк Д. Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч посіб / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин. – Львів: "Магнолія 2006", 2008. – 188 с.
10. Харченко Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
11. Посошков В.Л. Закономерности поступления солнечной энергии на наклонные гелиоприемники/ В.Л. Посошков // Морской гидрофизический журнал, 2001. – С. 67–75.

#### References

1. Brownson Jeffrey R.S. (2014), Solar Energy Conversion Systems. 1<sup>st</sup> Edition. – Academic Press. Elsevier, 457 p.
2. Chen C.J. (2011), Physics of Solar Energy. – Willey, 352 p.
3. Shapoval S. P. (2009), "The efficiency of the district heating system based on solar collector by changing the angle of heat flow" [Efektyvnist systemy teplopostachannia na osnovi soniachnoho kolektora za zminy kuta nadkhodzhennia teplovoho potoku], Visn. Nats. un-tu "Lviv. politekhnika". Teoriia i praktyka bud-va, No. 655. P. 299–302.
4. Kasperski Ja. (2008), "Compact roof air conditioner on solar energy - optimizing the angle of inclination of collectors" [Kompaktnyj dakhovyj kondycioner na sonjachnij energiji – optymizacija kuta nakhyly kolektoriv], Rynok instaljacij, No. 5. P. 8–11.
5. Kasinets M. E. (2013), " Analysis of incoming solar energy on heliopanel" [Analiz nadkhodzhennia soniachnoi enerhii na heliopanel], Lviv, Vydavnytstvo Lvivskoi politekhnika", P. 135–139.
6. Jamal Kamal Husain. (2008), "Optimization of the angle of solar collectors in solar systems" [Optimizatsiya ugla naklona solnechnyih kollektorov v geliosisteme], Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta, Vol. 1 (29), P. 133–137.
7. Femia N. (2012), Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. – CRC Press, 366 p.
8. Kalogirou Soteris A. (2014), Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2nd edition, Elsevier Inc., 819 p.
9. Dudiuk D. L. (2008), Alternative energy: basic theory and problems [Netradytsiina enerhetyka: osnovy teorii ta zadachi], Lviv, Mahnoliia 2006, 188 p.
10. Kharchenko N. V. (1991), Individual solar installation [Yndyvydualnyie solnechnyie ustanovky], Moscow, Enerhoatomyzdat, 208 p.
11. Pososhkov V. L. (2001), " Regularities of solar energy on inclined solar absorber" [Zakonomernosti postupleniya solnechnoy energii na naklonnyie geliopriemniki], Morskoy gidrofizicheskij zhurnal, P. 67-75.

Поступила в редакцию 10.02 2015 г.