



## ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ВІДНОСНО ЇЇ ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ

*Стаднік Микола Іванович д.т.н., професор*  
*Рубаненко Олена Олександрівна к.т.н., доцент*  
*Бондаренко Сергій Валерійович магістрант*  
*Вінницький національний аграрний університет*  
**Stadnik M.**  
**Rubanenko O.**  
**Bondarenko S.**

*Vinnitsia National Agrarian University*

**Анотація:** в статті розглянуто величину фактичної генерації сонячними панелями за рік, розраховано величину відхилення реальної генерації та встановленої потужності. Розглянуто шляхи підвищення рівня генерації за допомогою орієнтації панелей на сонце та проведено розрахунки кута повороту відносно траєкторії руху сонця за рік для конкретної місцевості.

**Ключові слова:** сонячна панель, відхилення генерації, орієнтація на сонце, трекерні системи.

### **Постановка проблеми**

Встановлена потужність сонячної панелі – це та кількість електроенергії, яку вона повинна виробляти протягом 1 години роботи. Ця величина визначається виробником під час проведення лабораторних досліджень і залежить від ККД сонячної панелі. В реальних умовах на роботу сонячної панелі впливає ряд факторів, які знижують величину електроенергії. Даний фактор є вкрай важливим і під час проектування його необхідно враховувати для досягнення технічної ефективності роботи сонячної електростанції та економії фінансових ресурсів.

### **Аналіз основних досліджень і публікацій**

Дослідженням впливу різних факторів на роботу сонячних колекторів та фотоелектричних панелей присвячена робота Л.І. Лисенка, К.В. Махотіло, Д.М. Косатого [1], а також А.В. Юрченка, А.В. Волгіна, А.В. Козлова [3].

### **Результати досліджень**

Під час роботи сонячної електростанції на величину електроенергії буде впливати ряд факторів. До цих факторів відносяться: кут падіння сонячних променів на площину батареї, місце розташування СЕС, тривалість світлового дня, хмарність та затіненість, температура навколишнього середовища, вологість повітря, швидкість вітру, запилення та забруднення, для зимових місяців потрібно відзначити засніженість та намерзання льоду на площині панелі. Одні фактори створюють більш значний вплив на роботу сонячної електростанції, інші – менший. До основних факторів впливу можна віднести кут падіння сонячних променів на площину ФЕП. В найбільш оптимальному варіанті цей кут має становити 90°, в цьому випадку досягаються найвищі показники генерації. При відхиленні від оптимального положення на 15°-20° потужність сонячної батареї знижується на 25-30%. При відхиленні на 30° потужність сонячної панелі знижується на 50% [1]. Іншим важливим фактором є місце розташування на поверхні Землі та річна інсоляція регіону. Сумарна річна сонячна активність або інсоляція є важливим показником для розрахунку рентабельності сонячної станції, тому що від неї залежить величина електроенергії виробленої за рік. На поверхні планети найвищі показники інсоляції знаходяться на екваторі і знижуються в напрямку полюсів. Для України в основному характерні річні показники інсоляції 1100-1500 кВт год/м<sup>2</sup>. Ці показники вищі ніж у Німеччині чи Данії, для яких характерні показники річної інсоляції 1000-1200 кВт год/м<sup>2</sup>, при цьому ці країни є лідерами у розвитку сонячної енергетики [2]. Від місця розташування та пори року залежить тривалість світлового дня, від чого залежатиме кількість часу під час якого СЕС перебуває в активному стані, генеруючи електроенергію, і скільки – в неактивному. Щодо кліматичних факторів, то значний вплив на роботу СЕС створює хмарність, яка перешкоджає прямому потраплянню сонячних променів на поверхню сонячних панелей, створюючи затіненість. При затіненні площини панелі на половину потужність сонячної батареї знижується на 60% від номінального значення, при повному затіненні – на 70% від номінального значення. Негативний вплив на роботу сонячної батареї створює підвищення її температури, найвищий ККД батареї спостерігається при низьких температурах, при підвищенні температури батареї з 10° до 50° ККД падає з 13 до 5%, а отже більш ніж удвічі падає величина електроенергії [3]. Менший вплив на роботу СЕС створюють вологість повітря та



швидкість вітру. При високій вологості повітря краплинки водяної пара поглинають частину світлового спектру сонячних променів, знижуючи тим самим величину сонячної радіації, яка досягає поверхні сонячної панелі. Вплив швидкості вітру полягає зміні інтенсивності теплообміну між сонячною панеллю та навколишнім середовищем. Запиленість, забрудненість, сніг та намерзання створюють затіненість для сонячної панелі, знижуючи її ефективність, тому потребують періодичного очищення [5].

Враховуючи вище приведені дані негативного впливу факторів навколишнього середовища, проведемо аналіз відхилення електроенергії від встановленої потужності СЕС у реальних умовах роботи, на основі даних статистики генерації електроенергії. Аналіз проведемо на основі даних Томашпільської СЕС для травня 2015 року. Встановлена потужність СЕС 4500 кВт, сонячні панелі працюють з 7 години до 21 години. Розрахуємо величину електроенергії сонячних батарей при роботі в ідеальних умовах, тобто 14 годин роботи на 100% встановленої потужності:

$$W_{ДР} = P * t \quad (1)$$

де  $P$  – встановлена потужність сонячної станції, кВт;

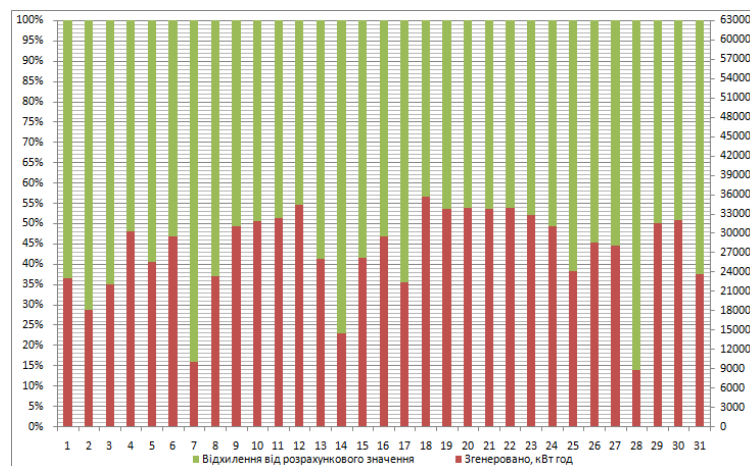
$t$  – час роботи сонячної станції за добу, год.

Обраховане за формулою (1) значення складатиме 63000 кВт год, однак у реальних умовах сонячні панелі не зможуть виробити стільки електроенергії. Якщо б стільки електроенергії генерувалось щодня впродовж місяця, то за весь травень отримали б значення:

$$W_{МР} = W_{ДР} * D \quad (2)$$

де  $D$  – кількість днів в місяці.

Одержане за формулою (2) значення складає 1953000 кВт год. Порівняємо отримані значення з реальними місячними даними, які представлені на рис. 1.



**Рис. 1. Статистика генерації електроенергії за травень 2015 в абсолютних показниках та у відсотках від розрахункових 63000 кВт год**

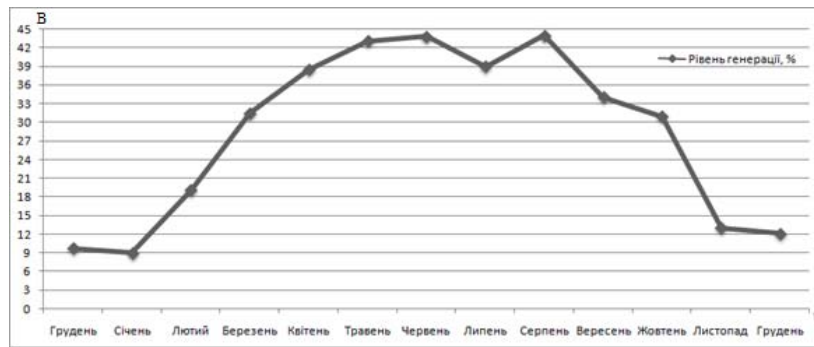
Як видно з проведеного аналізу (рис. 1) сонячна станція лише половину місяця працює на 45%-55% від своєї встановленої потужності. 7 та 28 травня виявились найбільш несприятливими днями, через значний негативний вплив зовнішніх факторів сонячна станція працювала лише на 15% від своєї встановленої потужності. До того ж, як правило, найвищі показники роботи СЕС припадають на середину дня або 11-15 годину, але і в ці години рівень генерації складає 80-90% від встановленої потужності, зранку та ввечері генерується менше електроенергії. За весь місяць на СЕС було 842337 кВт год електроенергії, тому можемо розрахувати рівень використання виробленої електроенергії відносно встановленої потужності за місяць, використавши формулу:

$$B = W_{МЗ} / W_{МР} * 100\% \quad (3)$$

де  $W_{МЗ}$  – кількість згенерованої електроенергії за місяць, кВт год;

В результаті розраховане за формулою (3) значення склало 43,1%, саме на такий відсоток відносно встановленої потужності працювали сонячні панелі впродовж травня 2015 року.

Використавши подібну методику та формули (1), (2), (3) розрахуємо рівень використання для всіх місяців року, враховуючи різну величину світлового дня. Розрахунки в статті не приводяться, результати розрахунку представлені на рис. 2, який демонструватиме різницю у рівні використання встановленої потужності сонячних панелей між місяцями.



**Рис. 2. Графік рівня використання встановленої потужності сонячних панелей на Томашпільській СЕС за грудень 2014 року – грудень 2015 року**

Використовуючи рис. 2 складемо рівняння регресії, яке б описувало дано криву з найменшим відхиленням, дане рівняння можна представити у вигляді:

$$B = 4,56 \cdot e^{\frac{-(t-7,34)^2}{2 \cdot 3,43^2}} \quad (4)$$

де  $t$  – вісь абсцис з позначенням місяців, яка відображає зміну часу;

$B$  – вісь ординат з позначенням відсотків генерації відносно встановленої потужності;

$e$  – число Ейлера.

З рис. 2 видно, що найбільш навантажені сонячні панелі у літні місяці і працюють на 40%-45% від встановленої потужності, у зимні місяці сонячні панелі працюють лише на 10%-15% від встановленої потужності. Провівши розрахунки і отримавши значення за кожен місяць можемо розрахувати, що за зимовий період відхилення складало 12,7%, за весняний – 38%, за літній – 42,3%, за осінній – 26,7% і за весь рік в цілому – 31,6%.

Використовуючи дані з рис. 2 можна розрахувати падіння рівня генерації в різні пори року прийнявши літню генерацію за 100%, так як для кліматичних умов Вінницької області в даний період року спостерігається найвищий рівень генерації. Для цього скористаємось виразом:

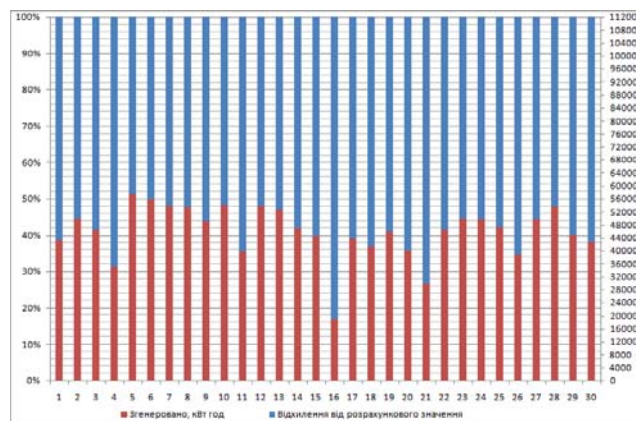
$$C_{II} = (1 - B_{II} / B_{L}) \quad (5)$$

де  $B_{II}$  – рівень використання встановленої потужності за певну пору року, %;

$B_{L}$  – рівень використання встановленої потужності за літню пору року, %.

В такому разі використовуючи формулу (5) отримаємо падіння генерації для осіннього періоду на 36,88%, для зимового періоду – 70%, для весняного – 10,16% менше відносно літнього періоду.

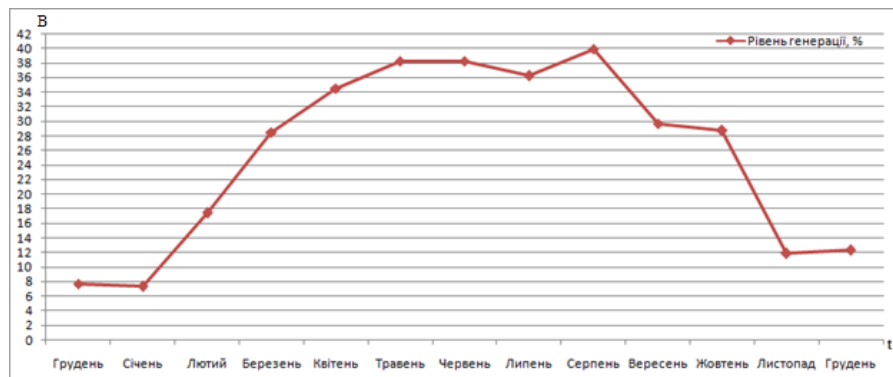
Проведемо аналіз ще для однієї сонячної станції у Вінницькій області. Використаємо річну статистику генерації електроенергії на Шаргородській СЕС. Встановлена потужність СЕС 7982 кВт. Для демонстрації рівня використання встановленої потужності виберемо червень 2015 року. Як і в попередньому аналізі скористаємось формулами (1), (2), (3). Розрахункова величина генерації за день складає 119730 кВт год, за місяць складає 3591900 кВт год. Реальна величина генерації за місяць складає 1377558 кВт год. Рівень використання встановленої потужності за кожен день впродовж місяця показано на рис. 3.



**Рис. 3. Статистика генерації електроенергії за червень 2015 в абсолютних показниках та у відсотках від розрахункових 119730 кВт год**



Проведемо розрахунки для інших місяців та на основі даних про рівень використання встановленої потужності побудуємо графік за рік (рис. 4), який демонструватиме різницю у використанні між місяцями.



**Рис. 4. Графік помісячного рівня використання встановленої потужності на Шаргородській СЕС за грудень 2014 року – грудень 2015 року**

Використовуючи рис. 4 складемо рівняння регресії, яке б описувало дано криву з найменшим відхиленням, дане рівняння можна представити у вигляді:

$$B=2,12+1,92\cdot\cos(3,92\cdot t-2,9) \quad (6)$$

Провівши розрахунки на основі яких побудовано графік на рис. 4 можна визначити, що за зимовий період рівень використання встановленої потужності складає 11%, за весняний – 34%, за літній – 38%, за осінній – 24% і за весь в рік в цілому – 28,5%.

Використовуючи формулу (5) проведемо розрахунок падіння генерації за порами року відносно літа, в результаті якого одержимо значення для осіннього періоду на 37%, для зимового – 71,4%, для весняного – 10,76%. Наведені значення дуже близькі до значень Томашпільської СЕС, тому можна зробити висновок, що для кліматичних умов південної частини Вінницької області, прийнявши літню генерацію за 100%, як найбільш продуктивну, восени генерація падає на 36-37%, взимку – на 70-72%, весною – на 10-11%. Також використовуючи формулу (5) можна зробити висновок по найбільш продуктивному та найменш продуктивному місяцях роботи СЕС. Так замість середнього рівня використання за пору року підставимо місячне значення, прийнявши показник серпня за 100% як найбільш продуктивний, найменш продуктивним місяцем є січень з падінням генерації для Томашпільської СЕС на 79,5%, а для Шаргородської – на 81,7% менше відносно серпня.

Одним із шляхів підвищення ефективності сонячних батарей є адаптація їх кута повороту відносно положення сонця. Для найбільш ефективної роботи площина сонячної батареї повинна бути завжди перпендикулярною до вектору падіння сонячних променів. Для цього використовують трекерні системи. Трекерні системи можуть одноосьовими або двоосьовими, від цього залежатиме те, як обертаватиметься сонячна панель. В одноосьовій системі змінюється тільки один кут: відносно вертикальної стійки, або відносно горизонтальної стійки. У двоосьових системах можна змінювати два кути: і відносно вертикальної стійки, і відносно горизонтальної. Від вибору між цими двома типами систем залежить точність повороту відносно сонця. Для найвищих показників генерування електроенергії необхідно постійно утримувати положення панелі перпендикулярно падінню сонячних променів. Для обертання трекерної системи використовують кроковий двигун, на який подаються керуючі сигнали з мікроконтролера. Для відслідковування положення сонця можна використовувати датчики на основі фотодіодів. Датчики залежно від освітленості подають сигнали на мікроконтролер, який в свою чергу обробляє сигнал та встановлює кут на який має повернутись трекерна система. Якщо освітленість відсутня або дуже низька сигнал на поворот не подається. З одного боку це є плюсом даної системи, тому що при низькому рівні генерації, через погане освітлення, не використовується електроенергія на обертання. З іншого боку при захмаренні чи забрудненні датчика на мікроконтролер надходить некоректний сигнал і встановлюватиметься неправильний кут повороту. Ще одним методом регулювання є програмування мікроконтролера на весь рік без відстеження положення сонця. Щоб написати правильну програму необхідно точно враховувати широту розташування станції та висоту над рівнем моря. Під час програмування потрібно точно знати швидкість і траєкторію руху сонця по небу, щоб змінювати кут повороту. Для



цього визначають зміну азимуту сонця та його висоту над горизонтом впродовж дня та впродовж року, залежно від координат місцевості де знаходяться сонячні панелі. Зміну траєкторії сонця відображено на рис. 5.

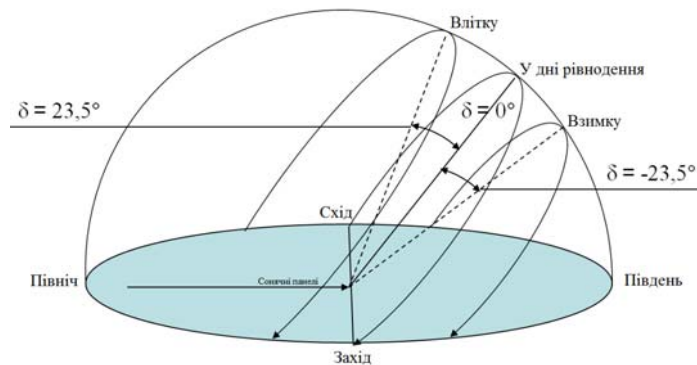


Рис. 5. Траєкторія руху сонця відносно сонячних батарей у різні пори року

Як видно з рис. 5 траєкторія сонця змінюється весь рік, змінюється азимут сходу сонця з-за лінії горизонту та заходу за лінію горизонту, змінюється висота над лінією горизонту впродовж дня. Азимут сонця змінюється відносно днів рівнодення у березні та вересні на  $23,5^\circ$ , найвища точка над лінією горизонту у день літнього сонцестояння у червні, найнижча – у день зимового, у грудні. Проведемо аналіз траєкторії сонця для Томашпільської СЕС за 20 червня. Для цього можна використати електронний ресурс [4]. Результати дослідження показані на рис. 6.

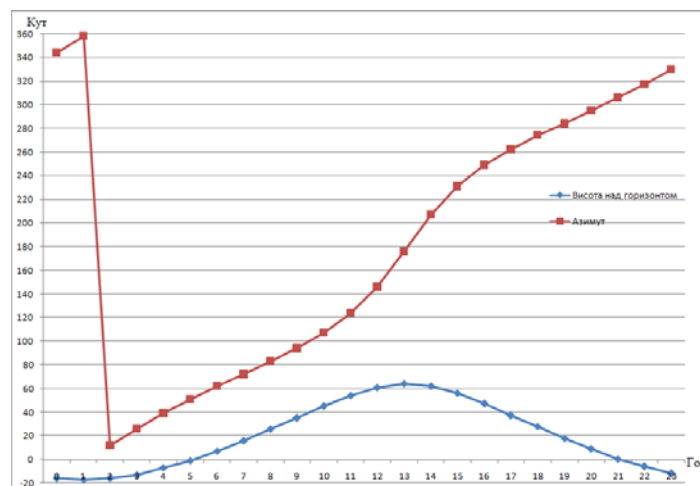


Рис. 6. Графік зміни азимуту сонця та висоти сонця над горизонтом за 20 червня для Томашпільської СЕС

Як видно з рис. 6 швидкість зміни азимуту сонця неоднакова, з 11 до 15 години швидкість руху сонця по небу більша ніж зранку та ввечері. Отже такі особливості зміни швидкості азимуту сонця потрібно враховувати під час написання програми для мікроконтролера трекера сонячної панелі. На початку дня сонячна панель повинна зайняти положення на схід сонця, з рис. 6 видно, що 20 червня сонце сходить в 5 годин ранку та має азимут  $50^\circ$ , о 6 годині сонце підіймається над горизонтом на  $7^\circ$  та має азимут  $60^\circ$  і так далі. Захід сонця відбувається о 21 годині, коли воно має азимут  $305^\circ$ . Найвище положення над горизонтом сонце займає о 13 годині з кутом  $64^\circ$ , у цій позиції сонячна активність найвища. Під час програмування контролера можна скористатись виразом для визначення кутової швидкості азимута:

$$\omega_A = \frac{d\alpha}{dt}, \quad (7)$$

де  $\alpha$  – азимут сонця;

$t$  – час, за який змінився кут.

Подібний вираз для кутової швидкості зміни положення сонця над горизонтом:

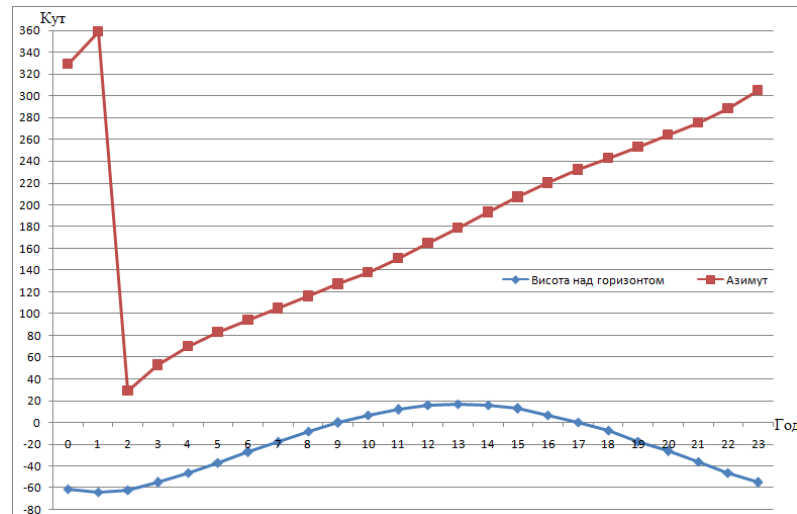




$$\omega_r = \frac{d\delta}{dt}, \quad (8)$$

де  $\delta$  – кут між площиною землі де розташовані панелі та напрямком на сонце.

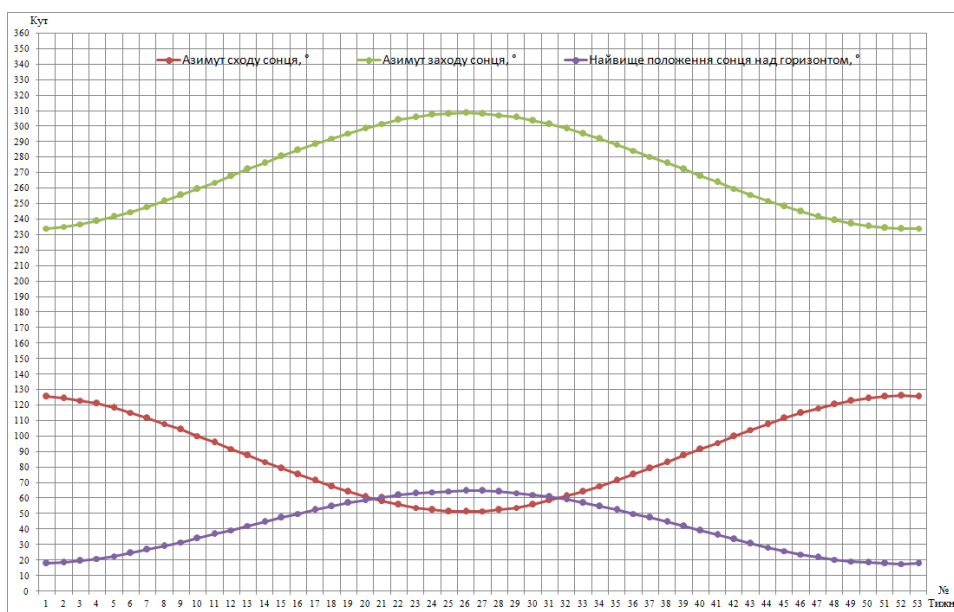
Проміжки часу, за які змінюється кут потрібно вибирати невеликими, щоб прискорення та сповільнення були рівномірними, а не стрибкоподібними, це дозволить якомога точніше координувати положення сонячної панелі. Для порівняння проведемо аналіз добової траєкторії сонця за 20 грудня також для Томашпільської СЕС. Результати показані на рис. 7.



**Рис. 7. Графік зміни азимуту сонця та висоти сонця над горизонтом за 20 грудня для Томашпільської СЕС**

З рис. 7 видно, що зміна азимуту більш прямолінійна ніж за 20 червня, що свідчить про те, що панелі будуть обертатись весь день з постійною швидкістю. Однак висота над горизонтом значно відрізняється ніж на рис. 6, сонце сходить пізніше, а заходить раніше, також максимальне положення над рівнем горизонту сонце займає о 13 годині, але кут не перевищує  $20^\circ$ .

Проведемо аналіз річної орієнтації сонячних батарей для Томашпільської СЕС. Для аналізу приймемо координати  $48,56^\circ$  північної широти і  $28,55^\circ$  східної довготи. Вирахуємо значення кута орієнтація для кожного тижня впродовж року, на основі яких побудовано графік, який представлено на рис. 8



**Рис. 8. Графік зміни азимуту сходу і заходу сонця та висоти сонця над горизонтом за 2015 рік для Томашпільської СЕС**



З проведеного дослідження видно річну зміну руху сонця відносно конкретної точки на земній поверхні. Подібний аналіз можна зробити для будь-якого іншого місця, ці дані допоможуть точно орієнтувати площину сонячної панелі на сонце впродовж року. Необхідно врахувати те, що в такому аналізі не враховуються особливості земної поверхні, такі як пагорби, гори, схили, наявність лісів. Через такі особливості конкретної місцевості схід та захід сонця може відрізнятись на деяку величину по часу та азимуту залежно від висоти розташування навколишніх пагорбів, а також висоти розташування над рівнем моря самої сонячної станції. Розрахунок проводився для кожного понеділка 2015 року, для точнішого орієнтування потрібно проводити розрахунок для кожного дня або запрограмувати мікроконтролер на рівномірну зміну між понеділками кута азимуту сходу та заходу сонця, але в цьому випадку орієнтування панелі буде менш точним. Даний аналіз також стане в нагоді для власників невеликих сонячних станцій без трекерних систем, які можуть вручну встановлювати кут повороту сонячних панелей для різних сезонів. Азимут найвищого положення сонця на небі весь рік залишається на позначці  $179^\circ$ , а в часі змінюється від 11:47 до 12:18, в цьому положенні сонячна активність найвища, тому нерухомі сонячні панелі потрібно орієнтувати саме на  $179^\circ$  по азимуту і змінювати положення впродовж року відносно висоти сонця над горизонтом. З рис. 8 добре видно як змінюється довжина світлового дня впродовж року, порівнюючи зелений та червоний графіки. Фіолетовий графік відображає зміну висоти положення сонця в зеніті, коли його активність максимальна.

### Висновки

Річна величина генерації буде складати близько 30% від встановленої потужності тільки в світлу пору дня плюс те, що вночі сонячна панель не працює. У сприятливий день сонячна панель буде генерувати близько 24% від встановленої потужності, у дні року з найнижчими показниками генерації, як правило взимку, добовий рівень генерації може опускатись до 5-10% від встановленої потужності. Для підвищення рівня генерації використовують зміну орієнтації панелей на сонце впродовж року та впродовж дня. Зміну можна проводити за допомогою сонячних трекерів або вручну. Чим точніше проходитиме відслідковування розташування сонця на небі тим більшу величину електроенергії зможуть згенерувати панелі за рік. При стаціонарному встановленні сонячних панелей, які не відслідковують положення сонця потрібно встановлювати сонячні панелі так, щоб вони були перпендикулярні падінню сонячних променів, коли воно знаходиться в положенні  $179^\circ$  по азимуту для умов Вінницької області, але все одно потрібно враховувати зміну висоти положення сонця над горизонтом впродовж року. Якщо зміна кута відносно висоти сонця над горизонтом з якихось причин також не проводиться, то необхідно визначити найвищу висоту положення сонця за рік і відносно неї встановити кут нахилу сонячної панелі, для південної частини Вінницької області це  $64^\circ$ , тому що саме в такому положенні сонячні панелі зможуть генерувати найбільше електроенергії.

### Список літератури

1. Лисенко Л.І. Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в Харківській області. / Л.І. Лисенко, К.В. Махотіло, Д.М. Косатий. – Харків: Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 59 (1032) – С. 101-111.
2. Maps of Global horizontal irradiation [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI> – Назва з екрану.
3. Юрченко А.В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов / А.В. Юрченко, А.В. Волгин, А.В. Козлов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. Т. 314. № 4. – Томск – С. 142-148.
4. Положение солнца на заданную дату [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://planetcalc.ru/4270/> – Назва з екрану.
5. Стаднік М.І. Аналіз ефективності генерації електроенергії на основі сонячної енергії в Вінницькій області. / М.І. Стаднік, О.О. Рубаненко, С.В. Бондаренко. – Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця, 2016. – №2 (94) – С. 87-97.

### References

1. Lysenko L.I. Faktory vplivu na efektyvnist Sonyachnykh kolektoriv ta fotoelektrichnykh paneley v Kharkivskiy oblasti. / L.I. Lysenko, K.V. Makhotilo, D.M. Kosatu. - Kharkiv : Visnyk NTU « KHPI ». 2013 r. № 59 (1032) - S. 101-111.
2. Maps of Global horizontal irradiation [ Elektronnyy resurs ] - Rezhim dostupa: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI> - Nazvaniye s ekrana.
3. Yurchenko A.V. Statisticheskaya model' kremniyevykh solnechnykh batarey, rabotayushchikh pod vozdeystviyem prirodnykh i apparatnykh faktorov / A.V. Yurchenko, A.V. Volgin, A.V. Kozlov // Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo universiteta. - 2009. T. 314. № 4. - Tomsk - S. 142-148.



4. Polozheniye solntsa na zadannuyu datu [ Elektronnyy resurs ] - Rezhim dostupa: <http://planetcalc.ru/4270/> - Nazvaniye s ekrana.

5. Stadnik M.I. Analiz efektyvnosti heneratsiyi elektroenerhiyi na osnove Sonyachnoyi enerhiyi v Vinnytskiy oblasti . / M.I. Stadnik, O.O. Rubanenko, S.V. Bondarenko. - Tekhnika , enerhetyka , transport APK . - Vinnytsya , 2016. - №2 ( 94 ) - S. 87-97 .

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ОТНОШЕНИИ ЕЕ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ**

**Аннотация:** в статье рассмотрены величину фактической генерации солнечными панелями за год, рассчитан величину отклонения реальной генерации и установленной мощности. Рассмотрены пути повышения уровня генерации с помощью ориентации панелей на солнце и проведены расчеты угла поворота относительно траектории движения солнца за год для конкретной местности.

**Ключевые слова:** солнечная панель, отклонения поколения, ориентация на солнце, треккерных системы.

#### **DEFINITION OF ELECTRICITY GENERATION IN THE SOLAR POWER FOR ITS INSTALLED CAPACITY**

**Summary:** in the article the actual value generation solar panels per year, calculated the deviation of the actual generation and installed capacity. The ways of raising generation using the sun orientation panels and Calculations angle of rotation relative to the trajectory of the sun during the year for a particular area.

**Keywords:** solar panel, deviations generation, orientation to the sun, trekkernyh system.