

Рис. 4. Загальна схема драйвера з понижуючим ШПМ як навантаження

**Висновки.** Враховуючи потреби сучасної силової електроніки, було розроблено драйвер, що реалізує швидкий захист ключових транзисторів, має невелику кількість елементів та низьку вартість. Крім того, він не містить моточних елементів, а отже, може бути реалізований у вигляді однієї ІМС.

#### Список використаних джерел

1. Рогачёв К. Д. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [Электронный ресурс] / К. Д. Рогачёв. – Режим доступа: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/igbt/transistor.htm>.
2. Колпаков А. И. Обеспечение защиты от перегрузки в MOSFET драйверах [Электронный ресурс] / А. И. Колпаков. – Режим доступа: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/igbt/protect.htm>.

УДК 621.383.51

**О.А. Велігорський**, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ОРІЄНТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

*Розглянуто основні типи сонячних трекерів, для яких побудовані залежності вихідної потужності фотоелектричної системи від часу доби, отримані за результатами аналітичних розрахунків та експерименту. Розраховано математично та перевірено експериментально ефективність одно- та двоосьових сонячних трекерів у порівнянні з фіксованою сонячною панеллю, встановлено, що одноосьовий трекер зі слідкуванням за азимутом Сонця є найбільш оптимальним за співвідношенням ефективності роботи та затрат на реалізацію.*

**Ключові слова:** фотоелектричний перетворювач, ефективність, сонячний трекер.

*Рассмотрены основные типы солнечных трекеров, для которых построены зависимости выходной мощности фотоэлектрической системы от времени суток, полученные по результатам аналитических расчетов и эксперимента. Рассчитано математически и проверено экспериментально эффективность одно- и двухосевых солнечных трекеров в сравнении с фиксированной солнечной панелью, установлено, что одноосевой трекер со слежением за азимутом Солнца является наиболее оптимальным в соотношении эффективности работы и затрат на реализацию.*

*The main types of solar trackers have been considered, the dependence of output power of photovoltaic systems on time of day have been obtained from the results of analytical calculations and experiment. The efficiency of single- and dual-axis solar trackers in comparison with a fixed solar panel calculated mathematically and verified by experiment. The result is shows that the single-axis tracker with azimuth-tracking of the Sun is the best in the ratio of efficiency and implementation costs.*

**Постановка проблеми.** Однією з найбільш важливих проблем сучасної енергетики є проблема її джерел, так як споживання енергії у світі постійно зростає. Станом на кінець 2010 року загальна кількість споживаної енергії за рік склала 12 мільярдів тон у нафтовому еквіваленті [1]. Найбільш розповсюдженими на сьогодні постачальниками енергії є

викопні джерела, які складають до 81 % від загальної кількості енергії та до 67 % – електроенергії. Використання такої енергії призводить до екологічних проблем та змін клімату із-за збільшення рівня CO<sub>2</sub> в атмосфері. Крім того, вартість цих джерел постійно збільшується за рахунок того, що легкодоступні родовища вже використовуються, а нові є більш складними з точки зору видобутку. Значну складову вартості викопних джерел становить геополітична складова, яка призводить до різких змін вартості (як правило – у бік збільшення) за рахунок локальних конфліктів у місцях видобутку (Іранська революція, вторгнення Іраку в Кувейт і т. п.) [1]. Насамкінець, невідновлювальний характер таких джерел з часом призведе до того, що вони закінчатся на нашій планеті.

Зазначені вище проблеми викликали значний інтерес щодо питання відновлювальних та альтернативних джерел енергії. Станом на кінець 2009 року, відновлювальні джерела становили до 16 % від загального рівня видобутку. Одним із найбільш розповсюджених і дешевих серед них на сьогодні є гідроенергія, яка займає до 8 % світового ринку. Однак цей вид енергії використовується лише в певних країнах з потужною річковою системою і вже майже дійшов до насичення [2].

Найбільш швидкозростаючою відновлювальною технологією видобутку енергії нині є сонячна енергія, яка може використовуватись як для перетворення сонячного випромінювання в тепло (сонячні колектори), так і для прямого перетворення в електроенергію (пристрої, які позначають загальним терміном – фотовольтаїка). Сонячна електроенергія має велику кількість переваг, серед яких – легке поєднання з традиційними джерелами, гнучкість у монтуванні (пересувні пристрої, змонтовані на землі або на дахах чи стінах будівель), екологічність у роботі (не генерують шум та не забруднюють атмосферу), легкість та мінімальна необхідність в обслуговуванні.

Густина потужності сонячного випромінювання на поверхні землі, яка падає на поверхню, перпендикулярну до променів, становить приблизно 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Однак в електроенергію перетворюється лише частина, яка визначається коефіцієнтом корисної дії фотоелектричного перетворювача – сонячної панелі (СП), який, у свою чергу, залежить від матеріалу СП і становить приблизно 20 % для найбільш розповсюджених, кремнієвих панелей.

Ефективність роботи фотоелектричної системи загалом залежить від таких складових.

1. Коефіцієнта корисної дії (ефективності) фотоелектричного перетворювача – СП, який визначається матеріалом.

2. Від положення робочої точки на вольт-амперній характеристиці сонячної панелі, яка визначається приведеним до виходу сонячної панелі опором навантаження.

3. Від кута між поверхнею сонячної панелі та променями Сонця. Максимальна ефективність буде в тому випадку, коли промені падають перпендикулярно до поверхні панелі.

Відповідно, покращення ефективності можливе за рахунок розроблення нових матеріалів для фотовольтаїки, слідкування за точкою максимуму потужності на вольт-амперній характеристиці [3], а також – орієнтуючи сонячну панель за Сонцем, що реалізується в так званих “сонячних трекерах” (СТ) [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зростання інтересу до відновлювальних джерел енергії загалом та сонячної енергії зокрема викликало значний інтерес до досліджень серед науковців по всьому світу. На рис. 1 показана загальна встановлена потужність усіх сонячних електростанцій (СЕС) у світі у порівнянні з кількістю статей у наукових журналах видавництва IEEE з проблематики ефективності використання фотовольтаїки за роки з 1996 по 2011.

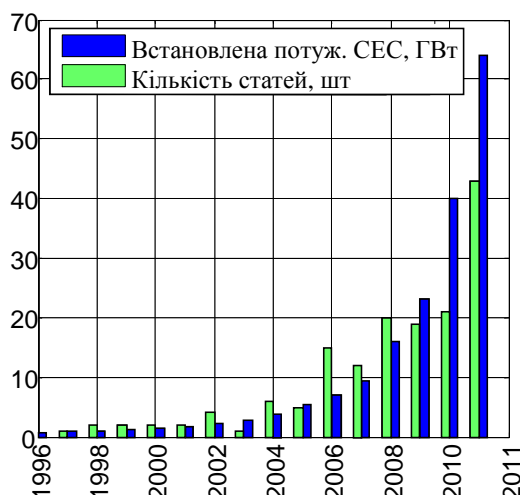


Рис. 1. Порівняння сумарної встановленої потужності СЕС у світі та кількості наукових статей у наукових журналах видавництва IEEE з проблематики ефективності використання фотовольтаїки

Досить велика кількість наукових досліджень спрямована на дослідження систем слідування за точкою максимуму потужності (ССТМП), які дозволяють суттєво підвищити ефективність використання СП. У відомих публікаціях детально розглянуті класичні методи ССТМП (постійної напруги [5], збурення та спостереження [6], інкрементної провідності [7]), які мають високу ефективність у випадку постійних або таких, що повільно змінюються залежно від погодних умов. В інших випадках, а також в умовах часткового затінення СП класичні методи можуть неточно визначати положення точки максимуму потужності. Більшу ефективність у таких умовах мають методи, які базуються на принципах штучного інтелекту (нечітка логіка [8; 9], нейронні мережі та комбіновані нейро-нечіткі системи).

Друга група наукових досліджень у галузі ефективності фотовольтаїки пов'язана з використанням СТ, які забезпечують постійну орієнтацію нормалі до поверхні СП на Сонце. Одними з перших практично доведених результатів про підвищення ефективності СП за рахунок використання СТ були дослідження радянських учених у Казахстані [10] на сонячній електростанції, потужність якої за рахунок використання трекерів збільшилась з 375 до 500 Вт. Подальші дослідження в цій галузі проводились за декількома напрямками:

- аналіз різноманітних способів підвісу СП (одноосьове зі змінним азимутом [11], одноосьове зі змінним кутом нахилу [12], двоосьове [13]) та їх вплив на ефективність вироблення електроенергії;
- точний розрахунок положення Сонця та використання отриманих даних для програмного слідування за світилом (сонячні трекери без зворотного зв'язку) [14-16];
- встановлення оптимальних з точки зору ефективності кутів нахилу фіксованих СП за відсутності трекеру [17-21];
- використання датчиків для орієнтації СП за Сонцем (трекери зі зворотним зв'язком) [22].

Окремо в кожному з напрямків розглядалися випадки роботи у хмарну погоду, коли відсутні чітко направлені промені, а освітленість СП йде за рахунок розсіяного сонячного світла. В цьому випадку, як показали дослідження, найбільш ефективним є не слідування за “уявним” положенням Сонця, а орієнтація СП на зеніт, що приведе до збільшення ефективності до 40-50 % при хмарних погодних умовах [23, 24].

Однією з найбільш важливих наукових проблем у сфері дослідження сонячних трекерів є оцінка ефективності роботи фотоелектричної системи, на яку будуть впливати

погодні умови для цієї місцевості (як миттєві – протягом дня, так і усереднені за місяць та рік), тип трекеру, географічні координати місцевості (довгота). У відомих наукових дослідженнях [11-13, 17-22] проводився аналіз впливу типу трекеру на кількість електроенергії, яку виробляє фотоелектрична система протягом дня для певних регіонів Землі (Китай, Туреччина, Іспанія й т. п.). Тому завдання оцінки впливу типу трекеру (одноосьовий зі слідкуванням за азимутом Сонця, зі слідкуванням за зенітним кутом Сонця, двохосьовий) на ефективність фотоелектричної системи для географічних координат і погодних умов, притаманних Україні, на сьогодні є актуальною.

**Цілі статті.** Відповідно, метою роботи є порівняння ефективності різних типів СТ для погодних умов, притаманних Україні, а також розробка рекомендацій на їх основі з використання траекторів.

**Сонячне випромінювання.** Кількість енергії, виробленої фотоелектричним перетворювачем чи сонячним колектором, у першу чергу, залежить від кількості сонячного випромінювання, яке потрапляє на фоточутливу поверхню. Наше світло створює постійну освітленість  $E_0 = 135000$  лк на відстані від Сонця, яка дорівнює 1 астрономічній одиниці. Сонячне випромінювання, яке проходить через атмосферу Землі, містить три складові: пряме випромінювання, розсіяне атмосферою й відбите від поверхні Землі.

$$E = E_{np} + E_{диф} + E_{відб}, \quad (1)$$

де  $E$  – загальна освітленість, лк;  $E_{np}$ ,  $E_{диф}$ ,  $E_{відб}$  – пряма, дифузна і відбита освітленість, лк.

У сонячні дні пряма складова досягає до 80 % від загальної кількості [25] й може бути розрахована за такою загальною формулою (для випадку, коли СП паралельна до поверхні Землі):

$$E_{np} = E_0 \cdot p^m \cdot \cos \Theta, \quad (2)$$

де  $E_{np}$  – пряма освітленість, лк;  $E_0 = 135000$  – освітленість на відстані 1 а.о. від Сонця (за межами атмосфери Землі), лк;  $p = 0 \dots 1$  – коефіцієнт прозорості атмосфери (середнє значення – 0,8, димка – 0,6, густі хмари – 0);  $m$  – “маса” атмосфери;  $\Theta$  – кут між сонячними променями та нормаллю до СП, °.

“Маса” атмосфери враховує збільшення товщини атмосфери, яку проходять сонячні промені при куті падіння більше 0°, за найбільш простою методикою вона розраховується за формулою  $m = 1 / \cos \Theta$ .

Розсіяне (дифузне) випромінювання створюється за рахунок дисперсії на молекулах повітря та хмарах. У сонячні дні відносна частка дифузної складової освітленості складає до 20 % від загальної, в той час як у хмарну погоду – наближається до 100 % [25]. Як і для прямої складової, дифузне випромінювання залежить від “маси” атмосфери, і приблизно опівдні буде в декілька разів більшим ніж зранку та увечері, так як сонячні промені проходять меншу товщу атмосфери й менше поглинатимуться.

Так як дифузне випромінювання створюється не точковим джерелом, а всією небесною напівсферою, максимальна ефективність його освоєння буде для сонячної панелі, нормаль до якої направлена в зеніт. Дифузна освітленість може бути розрахована за такою формулою:

$$E_{диф} = k_{диф} \cdot E_0 \cdot p^m \cdot (\theta + 90) / 180, \quad (3)$$

де  $k_{диф}$  – коефіцієнт рівня дифузного випромінювання,  $k_{диф} = 0,1 \dots 0,2$ ;  $E_{диф}$  – дифузна освітленість, лк;  $\theta$  – кут між нормаллю до СП та зенітом, °.

Відбите випромінювання буде залежати від багатьох факторів, які досить важко врахувати (альbedo поверхні в місці розташування ФЕП, будівлі й т. п.), тому, як правило, в розрахунках ця складова не враховується.

Для математичного розрахунку ефективності фотоелектричної системи будемо вважати, що:

- коефіцієнт прозорості атмосфери  $p = 0,8$  (відсутність хмар) протягом усього дня;
- геометричні координати місця розташування ФЕП відповідають координатам м. Чернігова (широта –  $51^{\circ}30'00''$  пів.ш., довгота –  $31^{\circ}18'00''$  с.д.);
- сонячне випромінювання має пряму й розсіяну складову, які розраховуються за формулами (2) та (3) відповідно.

**Типи сонячних трекерів.** Сонячні трекари, основні типи яких наведені на рис. 2, виконують орієнтацію нормалі до поверхні СП у напрямку Сонця. Вони відрізняються кількістю осей обертання (одноосьові та двохосьові) та способом орієнтації за Сонцем (з розрахунком положення Сонця – без зворотного зв'язку, або з використанням фотоелектричних датчиків – зі зворотним зв'язком). Одноосьові трекари мають лише один двигун і за конструкцією суттєво простіші двохосьових, крім того, мають менші затрати потужності на роботу (обертання СП), і залежно від типу можуть бути зі слідуванням за зенітним кутом  $\alpha$  (рис. 2, б) чи за азимутом Сонця  $\beta$  (рис. 2, в).

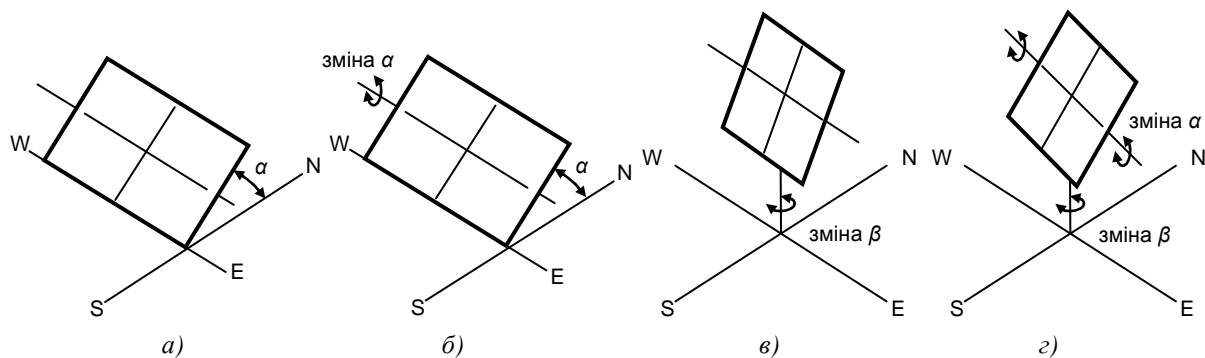


Рис. 2. Типи сонячних трекерів: фіксована СП (а), одноосьовий трекер зі слідуванням за зенітним кутом Сонця (б), одноосьовий трекер зі слідуванням за азимутом Сонця (в), двохосьовий трекер

Перевагою двохосьових трекерів (рис. 2, г) є вища ефективність, так як вони можуть забезпечити точне слідування СП за Сонцем.

**Математичний розрахунок ефективності сонячних трекерів.** Основою для розрахунку ефективності використання СТ є розрахунок положення Сонця над горизонтом, який може бути виконаний за декількома методиками, найбільш простою з яких є використання описаної в [15]. Крім того, саме ця методика реалізована у вигляді m-файлу для пакету обчислень Matlab [26], який і буде використовуватись для подальших розрахунків.

Найпростішим є визначення ефективності двохосьового трекару, так як різниця зенітних кутів та азимутів СП й Сонця в цьому випадку буде нульовою. Відповідно, для цього випадку вихідна потужність може бути розрахована за такою формулою:

$$P_{вих} = (E_{np} + E_{диф}) \cdot P_{max} / E_{\delta_{аз}}, \quad (4)$$

де  $P_{max}$  – максимальна вихідна потужність ФЕП, Вт при базовій потужності сонячного випромінювання  $1000 \text{ Вт/м}^2$  (базовій освітленості  $E_{\delta_{аз}} = 100000 \text{ лк}$ ).

Побудована за (4) залежність вихідної потужності для ФЕП з  $P_{max} = 1 \text{ Вт}$  та двохосьовим трекаром залежно від часу дня та номера місяця наведена на рис. 3, а. Максимальна потужність, яку вироблятиме ФЕП у листопаді-січні буде суттєво меншою, ніж у травні-липні. Це пов'язано з тим, що взимку Сонце в Україні буде дуже низько над горизонтом, і навіть за умови сонячної погоди в полудень “маса” атмосфери буде значно більшою, ніж у полудень улітку, коли сонце знаходиться значно вище.

У випадку, коли використовується одноосьовий СТ зі слідкуванням за зенітним кутом Сонця, СП за азимутом орієнтується в південному напрямку ( $180^\circ$ ). Вихідна потужність для такого типу трекару СП визначається таким чином:

$$P_{вих} = (E_{пр} + E_{диф}) \cdot P_{max} \cdot \cos(\beta - 180), \text{ при } \beta = [90^\circ \dots 270^\circ] \quad (5)$$

$$P_{вих} = E_{диф} \cdot P_{max} \cdot \cos(\beta - 180), \text{ при інших } \beta,$$

де  $\beta$  – азимут Сонця,  $^\circ$ .

У (5) враховано, що на поверхню СП будуть потрапляти лише розсіяні сонячні промені у випадку, коли азимут Сонця менший  $90^\circ$  і більше  $270^\circ$ , що буде в ті періоди, коли тривалість сонячного дня більше 12 годин.

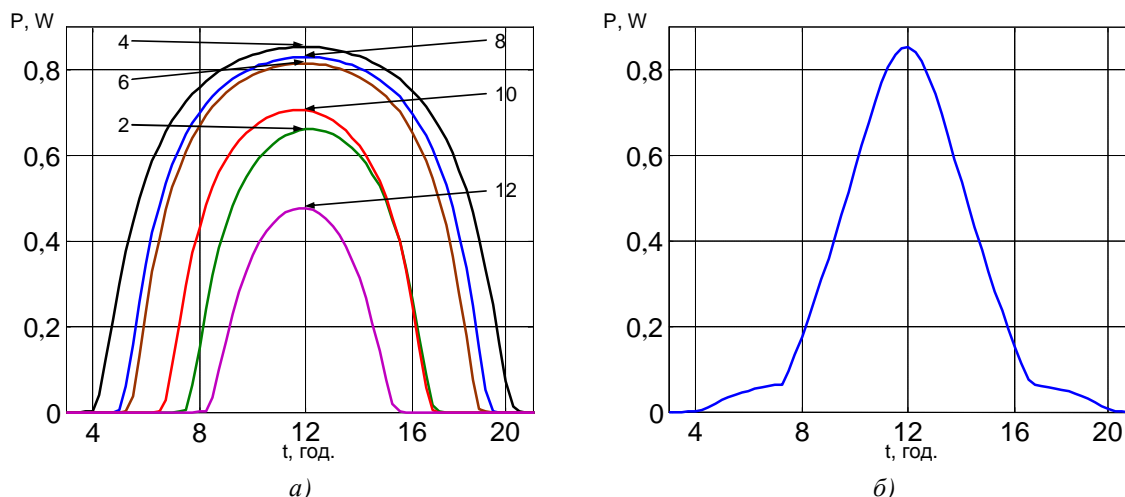


Рис. 3. Залежність вихідної потужності СП з двохосьовим трекаром (а) та з одноосьовим трекаром зі слідкуванням за зенітним кутом Сонця для червня (б), 2, 4, 6, 8, 10, 12 – номер місяця

Залежність вихідної потужності ФЕП від часу доби для одноосьового трекару зі слідкуванням за азимутом Сонця для червня місяця показана на рис. 3, б. Як видно з залежності, влітку такий трекару буде неефективним, так як частину ранку і частину вечора прямі сонячні промені не потраплятимуть на СП.

Для одноосьового СТ зі слідкуванням за азимутом Сонця, СП за зенітним кутом може бути орієнтована на будь-який кут, від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Вихідна потужність СП для такого типу трекару визначатиметься таким чином:

$$P_{вих} = (E_{пр} + E_{диф}) \cdot P_{max} \cdot \cos(\alpha - \theta_{СП}), \quad (6)$$

де  $\alpha$  – зенітний кут Сонця,  $^\circ$ ;  $\theta_{СП}$  – зенітний кут СП,  $^\circ$ .

Для повністю фіксованої СП панель за азимутом орієнтується в південному напрямку ( $180^\circ$ ), а за зенітним кутом може бути орієнтована на будь-який кут, від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , який залишається незмінним. Вихідна потужність для такого типу трекару СП визначається таким чином:

$$P_{вих} = (E_{пр} + E_{диф}) \cdot P_{max} \cdot \cos(\beta - 180) \cdot \cos(\alpha - \theta_{СП}), \text{ при } \beta = [90^\circ \dots 270^\circ], \quad (7)$$

$$P_{вих} = E_{диф} \cdot P_{max} \cdot \cos(\beta - 180) \cdot \cos(\alpha - \theta_{СП}), \text{ при інших } \beta.$$

Побудовані за формулами (6) та (7) залежності вихідної потужності для різних зенітних кутів нахилу панелі показані на рис. 4, а та б, відповідно.

На основі побудованих часових залежностей максимальної вихідної потужності (рис. 3, а) можна розрахувати сумарну потужність  $P_D$ , вироблену ФЕП за день для різних місяців року. Максимальну кількість електроенергії вироблятиме двохосьовий трекару, дані для нього залежно від номеру місяця (1 – січень, ... 12 – грудень) наведені в таблиці 1. Як видно, максимальна кількість енергії за день вироблятиметься в червні, в той час як у зимові місяці ефективність фотоелектричної системи буде досить низькою.

Сумарна денна потужність для одноосьових типів трекерів та для фіксованої панелі для червня, як найбільш сприятливого для ФЕП місяця зведена в таблицю 2.

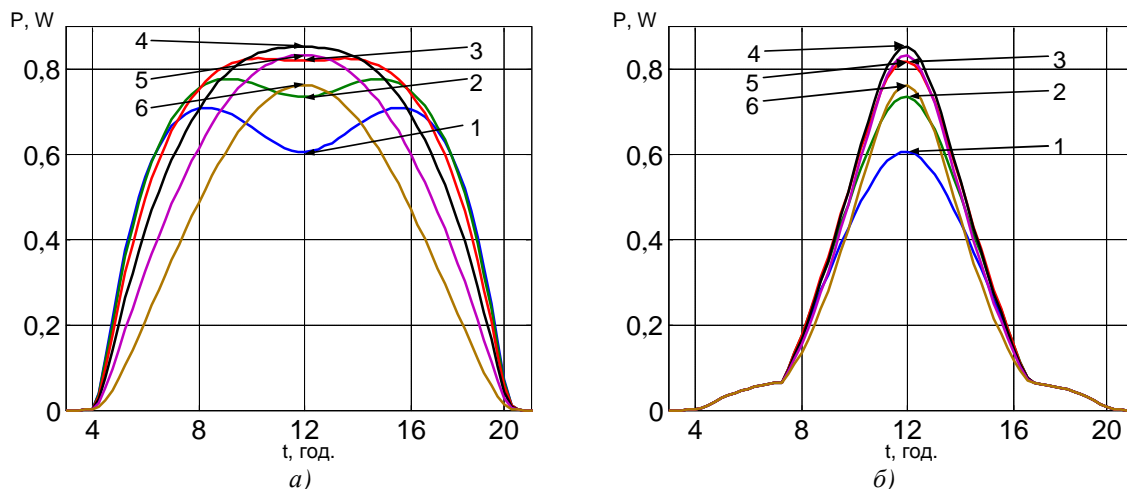


Рис. 4. Залежність вихідної потужності СП для червня: з одноосьовим трекером зі слідуванням за азимутом Сонця (а), для фіксованої панелі (б), кут нахилу панелі 1-15°, 2-30°, 3-45°, 4-60°, 5-75°, 6-90°

Таблиця 1

Потужність, вироблена СП за день сонячною панеллю з двохосьовим трекером

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_{д}, Вт$	2,74	4,46	6,34	8,23	9,62	<b>10,3</b>	10,0	8,90	7,20	5,25	3,32	2,28
$P_{д}^{від}, \%$	26,6	43,2	61,4	79,7	93,2	<b>100</b>	97,3	86,2	69,7	50,9	32,2	22,1

Таблиця 2

Потужність, вироблена СП за день з одноосьовим трекером та без нього

Кут нахилу СБ, °		15	30	45	60	75	90
$P_{д}, Вт$	зі слідуванням за азимутом Сонця	8,96	9,75	<b>9,94</b>	9,52	8,51	6,99
	зі слідуванням за зенітним кутом Сонця	<b>4,76</b>					
	для фіксованої СБ	3,82	4,36	4,67	<b>4,72</b>	4,52	4,07

Як видно з даних таблиці 2, трекер зі слідуванням за зенітним кутом Сонця й фіксованим азимутом 180° виробляє енергії лише на 0,8 % більше, ніж фіксована панель, кут нахилу якої  $\beta$  оптимальний для цього місяця, і для червня становить приблизно 60°. У той же час, порівнюючи ефективність двохосьового трекеру з одноосьовим зі слідуванням за азимутом Сонця, видно, що останній, у випадку оптимального кута нахилу СБ (біля 45 % для червня), виробляє енергії менше лише на 3,5 %. Тобто, найбільш оптимальним з точки зору співвідношення затрат на реалізацію та ефективності за результатами математичного розрахунку є саме одноосьовий трекер зі слідуванням за азимутом Сонця.

**Експериментальне дослідження ефективності сонячних трекерів.** Для перевірки отриманих шляхом математичних розрахунків результатів було проведено експериментальне дослідження трьох основних типів сонячних трекерів та фіксованої панелі з точки зору їх ефективності. В експерименті використовувалась СП УН116\*116-12А/В250 з параметрами: максимальна потужність  $P_{MAX} = 1,5$  Вт, максимальний струм короткого замикання  $I_{KЗ} = 0,275$  А, максимальна напруга холостого ходу  $U_{ХХ} = 7,2$  В. Для реалізації сонячного трекеру використовувались два двигуни: для орієнтації за азимутом – кроковий двигун ДШИ-200-1, для орієнтації за зенітним кутом Сонця – сервопривід Согона SC-929MG. Використання сервоприводу обумовлене тим, що в двохосьовому трекері завжди присутній обертальний момент, викликаний масою СП. Відповідно, не-

бхідно забезпечити фіксацію вала двигуна в ті моменти, коли відсутній сигнал управління, що можливо для сервопривода. Враховуючи те, що математично розрахована ефективність одноосьового сонячного трекера була низькою, в експериментальному дослідженні цей тип трекера не перевірявся.

Система управління експериментальної установки виконана на на базі мікроконтролера Atmel AVR, який виконував розрахунок положення Сонця, формував сигнали управління для орієнтації СП за заданим алгоритмом, вимірював поточні значення напруги та струму на виході СП та зберігав їх у внутрішню пам'ять. Після завершення експерименту, який тривав увесь день 20.06.2011 р. при сонячній погоді, дані з пам'яті мікроконтролера передавались до персонального комп'ютера й оброблялись.

Експериментально отримані залежності миттєвої потужності на виході СБ від часу представлені на рис. 5.

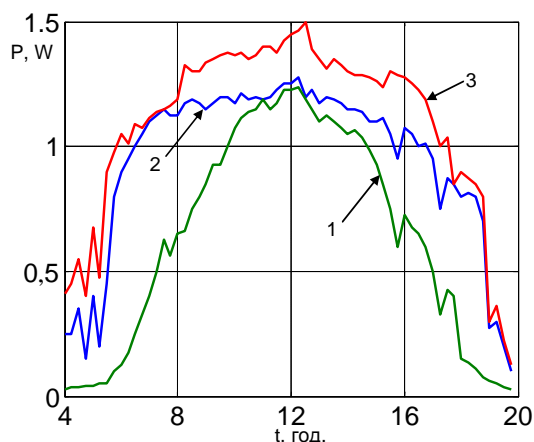


Рис. 5. Експериментальна залежність  $P=f(t)$  для СП протягом дня: 1 – фіксована, 2 – з одноосьовим трекером, слідуванням за азимутом Сонця, 3 – з двохосьовим трекером

За результатами обробки експериментальних даних була розрахована середня потужність, яку виробляла СП протягом дня, значення  $P_{СЕР}$  та різниці в ефективності між основними трекерами за результатами математичного розрахунку та експерименту наведені в табл. 3.

Як видно з рис. 5 та табл. 3, експериментальні дані свідчать про підтвердження аналітичних результатів щодо ефективності основних сонячних трекерів.

Таблиця 3

Середня потужність, вироблена за день сонячною панеллю з  $P_{max} = 1,5 \text{ Вт}$

Тип трекера СП	$P_{СЕР}$ , Вт	$\Delta P_{ЕКСП}$ , %	$\Delta P_{РОЗР}$ , %
СП фіксована	0,675	0,0	0,0
СП з одноосьовим трекером, слідуванням за азимутом	1,004	+48,7	+110,5
СП з двохосьовим трекером	1,166	+72,7	+118,2

### Висновки і пропозиції.

1. Визначено оптимальний кут нахилу СП для червня місяця, який складає  $45^\circ$  для трекера зі слідуванням за азимутом Сонця й  $60^\circ$  для фіксованої панелі.

2. Аналітично розраховано ефективність трьох основних типів сонячних трекерів у порівнянні з фіксованою панеллю, встановлено, що двохосьовий трекер дозволяє підвищити ефективність фотоелектричної системи на 118,2 % у порівнянні з фіксованою СП у червні місяці.

3. За результатами аналітичного розрахунку й експериментальної перевірки встановлено, що найбільш ефективним з точки зору співвідношення затрат та ефективності є одноосьовий трекер зі слідуванням за азимутом Сонця.



4. Сонячний трекер зі слідуванням за азимутом Сонця має ефективність, яка більше ефективності фіксованої СБ з оптимальним кутом нахилу лише на 0,8 %, і не може бути рекомендованим для використання у порівнянні з трекером зі слідуванням за азимутом.

#### Список використаних джерел

1. BP Statistical Review of World Energy 2011. – 49 p.
2. Renewable energy: RD&D Priorities Insights from IEA Technology Programme. 2006 – 224 p.
3. Efram T. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques / T. Efram, P.L. Chapman // IEEE Transaction Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22. – №2. – P. 439–449.
4. Hossein Mousazadeha. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output / Hossein Mousazadeha, Alireza Keyhanian, Arzhang Javadib, Hossein Moblia, Karen Abriniac, Ahmad Sharifib // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13. – №8. – P. 1800-1818.
5. G.J.Yu. A Novel Two-Mode MPPT Control Algorithm Based on Comparative Study of Existing Algorithms / G.J.Yu, Y.S.Jung, J.Y.Choi, I.Choy, J.H.Song, G.S.Kim // Proc. Photovoltaic Specialists Conference. – 2002. – P. 1531-1534.
6. Youngseok Jung. Improved perturbation and observation method (IP&O) of MPPT control for photovoltaic power systems / Youngseok Jung, Junghun So, Gwonjong Yu, Jaeho Choi // Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 2005. – P. 1788-1791.
7. M. Qiang. A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems / M. Qiang, S. Mingwei, L. Liying, J.M. Guerrero // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58. – №6. – P. 2427-2434.
8. T. Senjyu. Maximum power point tracker using fuzzy control for photovoltaic arrays / T. Senjyu, K. Uezato // Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology. – 1994. – P. 143-147.
9. J.L. Agorreta. Fuzzy switching technique applied to PWM boost converter operating in mixed conduction mode for PV systems / J. L. Agorreta, L. Reinaldos, R. Gonzalez, M. Borrega, J. Balda, L. Marroyo // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2009. – Vol. 56. – №11. – P. 4363-4373.
10. K.A. Akhmedyarov. Economic efficiency of the FV-500 solar photoelectric station with automatic tracking of the sun / K.A. Akhmedyarov, B.A. Bazarov, B. Ishankuliev, K.E. Karshenas, G. Schaimerangulyev // Appl. Solar Energy. – 1986. – №22. – P. 44-47.
11. İbrahim Sefa. Application of one-axis sun tracking system / İbrahim Sefa, Mehmet Demirtas, İlhami Çolak // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50. – №11. – P. 2709-2718.
12. Ahmet Şenpinara. Evaluation of power output for fixed and two-axis tracking PV arrays / Ahmet Şenpinara, Mehmet Cebec // Applied Energy. – 2012. – Vol. 92. – P. 677-685.
13. Salah Abdallah. The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics // Energy Conversion and Management. – 2004. – Vol. 45. – №11-12. – P. 1671-1679.
14. Roberto Grena. An algorithm for the computation of the solar position // Solar Energy. – 2008. – Vol. 82. – №5. – P. 462-470.
15. Ibrahim Reda. Solar position algorithm for solar radiation applications / Ibrahim Reda, Afshin Andreas // Solar Energy. – 2004. – Vol. 76. – №5. – P. 577-589.
16. Roberto Grena. Five new algorithms for the computation of sun position from 2010 to 2110 // Solar Energy. – 2012. – Vol. 86. – №5. – P. 1323-1337.
17. Tian Pau Chang. The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere // Solar Energy. – 2009. – Vol. 83. – №8. – P. 1274-1284.
18. Yaow-Ming Chen. Calculation of the optimum installation angle for fixed solar-cell panels based on the genetic algorithm and the Simulated-annealing method / Yaow-Ming Chen, Chien-Hsing Lee, Hsu-Chin Wu // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2005. – Vol. 20. – №2. – P. 467-473.
19. Chang Ying-Pin. Effects of the Solar Module Installing Angles on the Output Power / Chang Ying-Pin, Shen Chung-Huang // ICEMI'07. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. – 2007. – №1. – P. 278-282.

20. Runsheng Tang. Installation Design of Solar Panels with Seasonal Adjustment of Tilt-Angles / Runsheng Tang, Xinyue Liu // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – 2010. – P. 1-4.
21. Murat Kaciraa. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey / Murat Kaciraa, Mehmet Simsekb, Yunus Baburc, Sedat Demirkolc // Renewable Energy. – 2004. – Vol. 29. – №8. – P. 1265-1275.
22. Lee C.-Y. Sun Tracking Systems: A Review / Lee C.-Y., Chou P.-C., Chiang C.-M., Lin C.-F. // Sensors. – 2009. – Vol. 9. – №5. – P. 3875-3890.
23. Nelson A. Kelly. Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days / Nelson A. Kelly, Thomas L. Gibson // Solar Energy. – 2011. – Vol. 85. – №1. – P. 111-125.
24. Nelson A. Kelly. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system / Nelson A. Kelly, Thomas L. Gibson // Solar Energy. – 2009. – Vol. 83. – №11. – P. 2092-2102.
25. Mila Pucar. The effect of diffuse/indirect light on the energy gain of solar thermal collectors / Mila Pucar, Aleksandar Despic // Renewable Energy. – 2005. – Vol. 30. – №11. – P. 1749-1758.
26. Sun\_position.m: MatlabCentral / V. Roy // Режим доступу: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4605>.

УДК 621.317.35

**А.О. Ковтун**, канд. фіз.-мат. наук

**О.В. Рогоза**, канд. фіз.-мат. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

## ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВИХ І ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ

*Запропоновано новий підхід до визначення фазового зсуву між сигналами, що надходять від одного джерела чи різних джерел і подаються на входи осцилографа.*

**Вступ.** Методи оцінки фазових зсувів в електричних колах і пристроях та вимірювання частоти за допомогою електронного осцилографа до цього часу розроблені достатньо. Але неоднозначність трактувань деяких понять, їх невизначеність у різних літературних джерелах змушує звернутись до обговорення й уточнення окремих методів осцилографічних вимірювань з метою підвищення їх ефективності.

Звернемось до найбільш поширеного методу вимірювань частоти і зсуву фаз коливань за допомогою фігур Ліссажу. Для одержання таких фігур на екрані електронно-променевої трубки осцилографа, як відомо, на його входи «х» і «у» подають окремі сигнали, що можуть походити або від одного джерела, або від різних джерел.

Розглянемо особливості осцилографічних вимірювань для кожного з випадків. Нехай маємо гармонічні коливання:

$$U = U_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1); \quad (1)$$

$$U = U_2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2). \quad (2)$$

1. Сигнали на входи осцилографа надходять від одного джерела,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ .

Регулюванням підсилення у каналах осцилографа на його екрані утворюється стійке зображення еліпса, вписаного у квадрат із стороною  $2r$  (рис. 1), де  $r$  – амплітудні відхилення променя на екрані по горизонталі і вертикалі.