

# Дослідження ефективності роботи та параметрів перетворення електроенергії на лабораторному стенді «сонячний трекер»

О. С.Лавренюк, І. В.Євглевський

магістранти кафедри Інтелектуальні системи  
електропостачання

Дніпропетровський національний університет залі-  
зничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Дніпро, Україна

Д. О. Босий

доцент кафедри Інтелектуальні системи  
електропостачання

Дніпропетровський національний університет залі-  
зничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Дніпро, Україна

[dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

*Анотація* – в статті пропонується конструкція лабораторного стенду «сонячний трекер» для дослідження ефективності роботи та визначення параметрів перетворення електроенергії. Для створення сонячної панелі використані полікристалічні фотоелементи, приведені їх характеристики та використаний спосіб монтажу. В конструкції рухомої частини трекера передбачено дві ступені свободи. В якості схеми керування використано просту схему з доступними компонентами, принцип дії якої базується на компенсації потенціалу небалансу при зміні орієнтації сонячного потоку відносно пари фоторезисторів. Приведені результати порівняння вольт-амперних характеристик розробленої панелі із зразком промислового виробництва. Роботу розробленої конструкції перевірено та оцінено якість інвертованої напруги для двох доступних схем – модифікована та чиста синусоїда. Розроблені схеми та технічні рішення в першу чергу орієнтовані на доступність компонентів та забезпечення повторюваності технології фотоелектричного перетворення електроенергії для використання широким колом фахівців та науковців.

*Ключові слова* - фотоелемент; сонячна панель; сонячний трекер; лабораторний стенд; вольт-амперна характеристика; ефективність.

## I. ВСТУП

Розвиток нетрадиційних джерел енергії є важливим фактором підвищення енергетичної безпеки та покращення екологічного стану в Україні. На сьогодні, вартість використання відновлюваних джерел енергії порівняно з традиційними є значно вищою, тому для розвитку альтернативної енергетики використовуються різні механізми підтримки та стимулювання.

Технічно досяжний річний енергетичний потенціал нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (НВДЕ) України в перерахунку на умовне паливо становить близько 79 млн. т у.п. Економічно досяжний потенціал цих джерел за базовим сценарієм складає 57,7 млн. т у.п., в тому числі відновлювальних природних джерел енергії – 35,5 млн. т у.п., позабалансових (нетрадиційних) – 22,2 млн. т у.п. На даний час цей потенціал використовується недостатньо. Частка НВДЕ в енергетичному балансі країни становить 7,2% (6,4% – позабалансові джерела енергії; 0,8% – відновлювальні джерела енергії) [1]. Один з шляхів вирішення вказаної про-

блеми – приділення особливої уваги подальшому розвитку нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Їх беззастережною перевагою є невичерпність і екологічна чистота. Невипадково країни Європейського Союзу поступово переходять на використання енергії біомаси, вітру, сонця і води. В енергетичному балансі деяких країн питома вага нетрадиційних джерел сягає 40 % [2]. В разі виконання прийнятої в Україні Енергетичної Стратегії, частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) буде складати 18,33 млн. т. у. п. (6 % від загального споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) у 2030 р. Для порівняння, країни ЄС у цілому досягли приблизно 12% внеску ВДЕ вже до 2010 р.

Поступово з розвитком технологій за рахунок конкуренції, вони стають доступніше і здобувають більшого поширення. Аналіз джерел альтернативної енергетики показує, що світовий ринок сонячних елементів щорічно збільшується на понад 30 % [3].

Метою роботи є розробка лабораторного стенду для наочної демонстрації можливостей фотоелектричної генерації електроенергії, проведення досліджень ефективності її роботи та визначення параметрів перетворення електроенергії.

## II. КОНСТРУКЦІЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ

Подальші розробки ґрунтувались на відомих роботах [4-6].

Для дослідження ефективності і параметрів перетворення електроенергії розроблено дослідний макет, який складається з двох частин:

- сонячна панель;
- трекер поворотного типу.

Для виготовлення сонячної панелі застосовані полікристалічні сонячні елементи. Як правило, потужність цих елементів не велика, складає одиниці ват. Характеристики параметрів використаних фотоелементів приведені в Table 1., а зовнішній вигляд підготовлених елементів – на Fig. 1.

TABLE I. ПАРАМЕТРИ ВИКОРИСТАНИХ ФОТОЕЛЕМЕНТІВ

| № | Характеристики фотоелектричних елементів |            |             |
|---|------------------------------------------|------------|-------------|
|   | Найменування                             | Од. виміру | Значення    |
| 1 | Тип                                      | –          | полікристал |
| 2 | Клас фотоелементів                       | –          | A           |
| 3 | Розміри                                  | мм         | 156 x 156   |
| 4 | Напруга                                  | В          | 0,5         |
| 5 | Струм                                    | А          | 8           |
| 6 | Потужність                               | Вт         | 4           |



Fig. 1. Підготовлені до пайки фотоелементи

Для того, щоб при генерації отримати 16-18 В на виході сонячної панелі, кількість фотоелементів прийнята рівною 36 шт, цього достатньо щоб заряджати акумулятори номінальною напругою 12 В. Після вибору кількості та геометричної конфігурації розташування елементів, виконане їх послідовне з'єднання спеціальною шиною за допомогою спаювання. Тонка шина застосовується для послідовного з'єднання елементів у групи, ширина якої складає 1,5 мм, і широка 5 мм – для об'єднання груп в єдиний контур.

Для розміщення елементів на поверхні використане скло, оскільки воно менше заломлює світло, і ефективність панелі стає дещо вищою. Застосоване скло для сонячної панелі мало товщину 5мм. За допомогою алюмінієвого кутового профілю 25 мм виготовлений квадратний корпус 1000x1000 мм, після чого поверхню рами з внутрішньої сторони заповнено епоксидною смолою.

Герметизація виконана для уникнення проникання води в середину панелі. Після просихання всієї конструкції на склі було розміщено фотоелементи у 6 рядів, кожний з яких містив в собі також 6 фотоелементів. При розміщенні фотоелементів від кожного фотоелементу витримано відступ не менше 5 мм. Процес пайки самих елементів та підготовлених частин безпосередньо на склі зайняв деякий час. Після повного пропаю-

вання елементів були виведені головні контакти «+» і «-» панелі.

З внутрішньої сторони фотоелементи ущільнені підкладкою товщиною 5 мм, яка дає можливість закрити готову панель з внутрішньої сторони OSB товщиною 10 мм. Готова сонячна панель (Fig. 2). кріпиться на окремо розробленій конструкції сонячного трекера



Fig. 2. Сонячна панель на фотоелектричних елементах

Сонячні елементи дедалі частіше використовуються як джерела живлення. Відомо, що сонячні панелі виробляють набагато більше енергії, якщо вони постійно наведені на Сонце, ніж тоді, коли перебувають у фіксованому положенні. Для цього потрібен сонячний поворотний механізм (трекер), котрий змінюватиме положення сонячної панелі відповідно до положення сонця.

Перш за все необхідно забезпечити кріплення приводного двигуна і сонячної панелі. При розробці необхідно було зробити систему стеження, яка була б простою, недорогою і придатною до транспортування. Портативність пристрою забезпечується конструкцією, яка досить легко розбирається і збирається за допомогою лише кількох інструментів.

Конструкція сонячного трекера для макету складається з труби висотою 60 см, діаметром 58 мм. На основі розміщено дві шестерні (редуктор). Для розміщення панелі на трекері використано металеву конструкцію у вигляді букви Г, яка кріпиться на одній шестерні. У свою чергу шестерня кріпиться в металевій трубі через підшипник який дозволяє передавати обертовий момент рухомій частини.

У конструкції трекера передбачено дві ступені свободи, панель може зміщуватись по осям схід-захід і північ-південь.

Перша ступінь, яка відповідає за вісь північ-південь зроблена на основі двигуна постійного струму ДТА-40, який підключається через силову схему.

Для корекції положення по кожній осі використовується два датчики освітлення, в нашому випадку обрано фоторезистори. Вони розташовані таким чином, щоб при оптимальній орієнтації на Сонце, рівень сигналів від датчиків був однаковий. Якщо вісь пристрою орієнтована на Сонце не точно, то один з датчиків освітлюється менше, а різниця між рівнями сигналів датчиків визначає в яку сторону треба оберта-

ти систему. Для нормальної роботи такої системи необхідно спочатку орієнтувати систему по одній осі, наприклад горизонтальній. А після того, як рівень сигналів від двох сенсорів вирівняється, коригувати систему по вертикалі.

Можна врахувати, що Сонце небосхилом рухається нешвидко, тому достатньо малопотужного двигуна ДТА-40 з редуктором. Для керування напрямком обертання двигуна зібрана силова схема, яка містила в собі реле для перемикання контактів і створення реверсного ходу двигуна.

Конструктивне виконання вертикального трекера здійснювалось за допомогою підйомного механізму. Конструкція підйомного механізму виконана за допомогою електродвигуна постійного струму напругою 18 В. Двигун закріплений через редуктор, який з'єднаний з різьбовою шпилькою довжиною 40 см. На шпильку накручена труба, зовнішній діаметр якої складає 18 мм та до труби приварені два болтові з'єднувачі з різьбою 12 мм. Після того, як дана конструкція приведена до однієї суцільної, вона була накручена на шпильку і розташована в трубу діаметром 22 мм і довжиною 45 см. Для уникнення високих вібрацій під час викручування висувного механізму на кінцях труби встановлено резинові прокладки які забезпечують плавний момент висувного механізму. Конструктивне виконання трекера приведено на Fig. 3.

В якості схеми керування трекером обрано просту, компактну схему з доступними радіокомпонентами (Fig. 4). Для визначення позиції Сонця при орієнтації за однією віссю використовуються два фоторезистори. Двигун поворотної частини вмикається через комутуючі реле за схемою Н-моста на основі біполярних транзисторів, які комутують струм до 500 мА при напрузі живлення 6-15В. Пристрій на основі цієї схеми працює в темряві та повинен орієнтувати сонячну панель на найбільш яскраве джерело світла, що є певним недоліком при чергуванні хмарності та роз'яснення.

Вхідний каскад однієї частини схеми складається з двох операційних підсилювачів (IC1) та фоторезисторів LDR1 (LDR3) і LDR3 (LDR4). Якщо кількість світла, що потрапляє на них однакова, то опори фоторезисторів рівні. Отже при напрузі живлення 12 В в місці з'єднання фоторезисторів LDR1 (LDR3), LDR2 (LDR4) буде напруга 6 В. Якщо кількість світла, що потрапляє на один фоторезистор буде більша, ніж на інший фоторезистор, то напруга буде зміщуватись. Транзистори в схемі працюють в парі, по діагоналі, комутуючи +Ve або -Ve до вихідних котушок реле, і, в залежності від полярності, змушують двигун обертатись вперед або назад.

При вимиканні напруги для зупинки двигуна, він продовжує обертатись, тому що присутня певна інерційність. Внаслідок цього та наявності в колі індуктивності, виникають перенапруги, які можуть вивести транзистори з ладу. Для захисту транзисторів від зворотної ЕРС в схемі моста використовується 4 зворотні діоди.

Обмеження (ліміти) від + V до 0 в схемі керування встановлюються чотирма послідовно з'єднаними резисторами і коригуються 2-ма резисторами підлаштування. Якщо напруга вийде за межі цих обмежень, то опе-

раційний підсилювач пропускає сигнал і двигун буде обертатись постійно.

Резистором підлаштування 10К регулюють чутливість, тобто діапазон між лімітами. Резистор підлаштування 100К регулює наскільки ліміти будуть симетричні відносно  $+ V / 2$  (точка балансу).

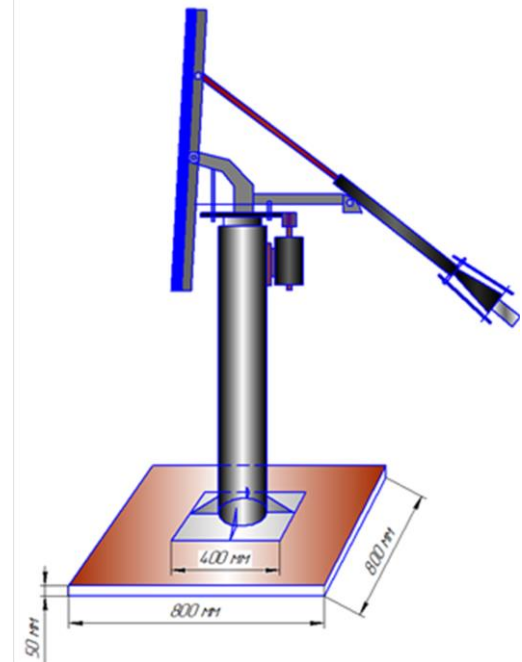
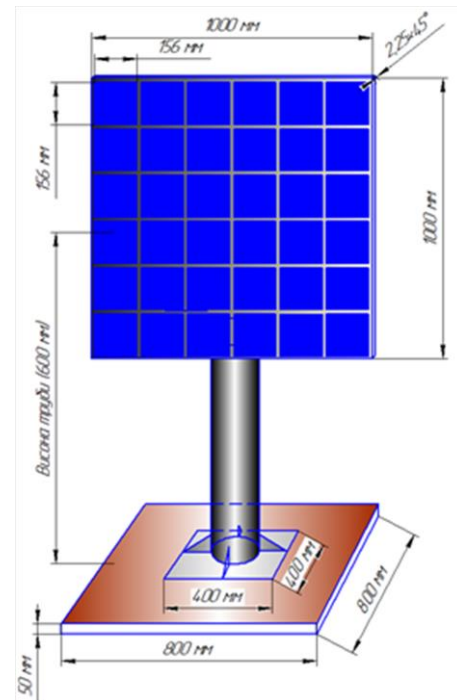


Fig. 3. Конструктивне виконання поворотної частини трекера

Для комутації силової частини розроблена схема (Fig. 5), яка отримує сигнали від транзисторів у схемі керування. Таким чином, транзистори працюють в парі по діагоналі, комутуючи +Ve або -Ve до вихідних котушок реле, і, в залежності від полярності, змушують двигун обертатись вперед або назад.

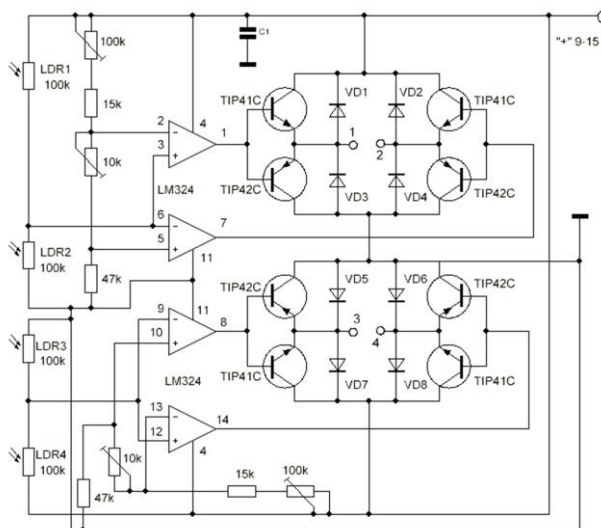


Fig. 4. Схема керування трекером

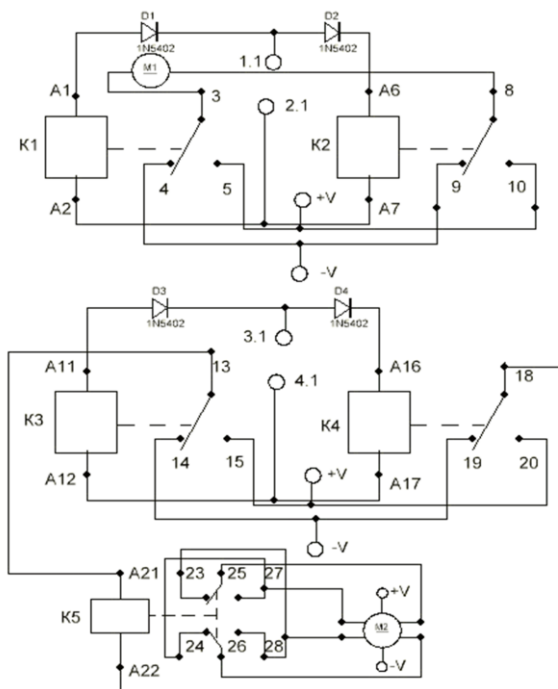


Fig. 5. Схема комутації силової частини

Налаштування схеми виконується в наступній послідовності:

1. перевірити напругу джерела живлення схем;
2. підключити двигун постійного струму;
3. встановити фоторезистори так, щоб на них потрапляла однакова кількість світла;
4. повністю викрутити обидва резистора підлаштування проти годинникової стрілки;
5. подати живлення на схему, двигун повинен закрутитись;
6. повернути резистор підлаштування 100К за годинниковою стрілкою до тих пір, поки двигун не зупиниться, відмітити цю позицію;

7. продовжити обертання резистора підлаштування 100К за годинниковою стрілкою до тих пір, поки двигун не почне обертатись в інший бік, відмітити цю позицію;
8. розділити кут між двома позиціями навпіл і встановити тум резистор підлаштування (це буде точка балансу);
9. обертати резистор підлаштування 10К за годинниковою стрілкою до тих пір, поки двигун не почне смикатися;
10. трохи повернути положення резистора підлаштування назад (проти годинникової стрілки), щоб двигун зупинився (даний резистор відповідає за чутливість);
11. перевірити коректність роботи схеми, по черзі закриваючи від світла один і другий фоторезистори.

Для монтажу розробленої схеми виконано розведення друкованої плати, яка має вигляд приведений на Fig. 6. Зовнішній вигляд зібраної схеми з компонентами приведено на Fig. 7. Перелік елементів для збирання приведений в Table 2.

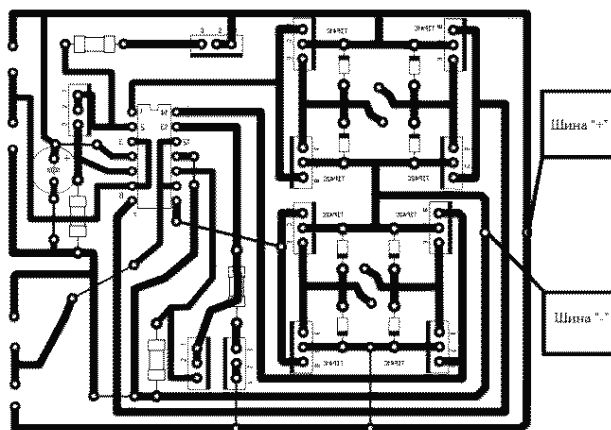


Fig. 6. Вигляд друкованої плати схеми керування трекером

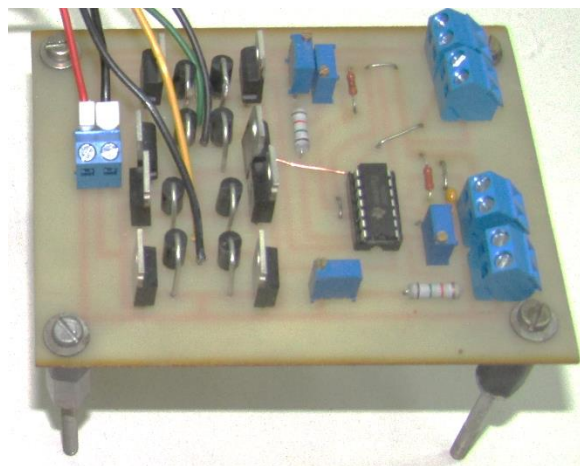


Fig. 7. Зовнішній вигляд зібраної плати керування

TABLE II. КОМПОНЕНТИ ДЛЯ СИСТЕМИ СТЕЖЕННЯ

| № | Назва                  | Тип / Номінал | Кількість |
|---|------------------------|---------------|-----------|
| 1 | Операційний підсилювач | LM324         | 1         |
| 2 | Біполярний транзистор  | ТP41С         | 4         |
| 3 | Біполярний транзистор  | ТP42С         | 4         |
| 4 | Випрямний діод         | 1N5402        | 8         |
| 5 | Резистор               | 15 кОм        | 2         |
| 6 | Резистор               | 47 кОм        | 2         |
| 7 | Резистор підлаштування | 100 кОм       | 2         |
| 8 | Резистор підлаштування | 10 кОм        | 2         |
| 9 | Фоторезистор           | LDR           | 4         |

### III. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ

Робота сонячної панелі на відкритому повітрі характеризується залежністю вихідної електричної потужності від положення сонця на небосхилі і метеоумов. Отже, протягом світлового дня вироблення електроенергії буде змінюватися від нульового значення до деякого максимального (з подальшим спадом до нульового). Крім того, через нелінійність вольт-амперної характеристики фотоелементів, точка максимальної потужності, що може бути видана сонячною панеллю підлягає експериментальному визначенню. Для дослідження використовувалась сонячна панель власного виробництва на основі елементів, характеристики яких приведені в Table 1.

Дослідження проводились в реальних умовах при яскравому сонці, характеристики знімалися за допомогою мультиметра VA18B. При цьому визначено як змінюється напруга в залежності від струму при зміні навантаження за допомогою реостату РСПС3 номінальним опором 14 Ом та номінальним струмом до 7 А. В результаті проведених досліджень отримана вольт-амперна характеристика, яка приведена на Fig. 8.

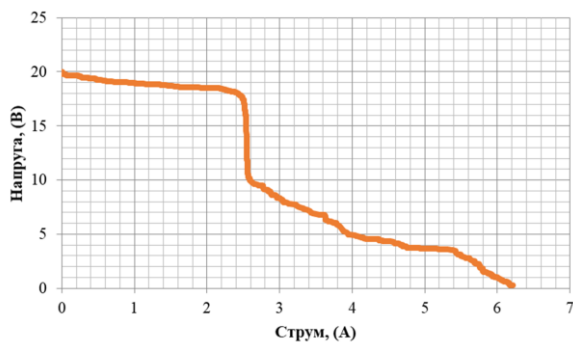


Fig. 8. Вольт-амперна характеристика розробленої сонячної панелі

Для порівняння розробленої сонячної панелі використано сонячну панель промислового виробництва ALM-250MB-60 (Китай). Для даної панелі були прийняті такі ж самі умови, як і в попередньому досліді. За даними вимірювань побудовано вольт-амперна характеристика, яка приведена на Fig. 9.

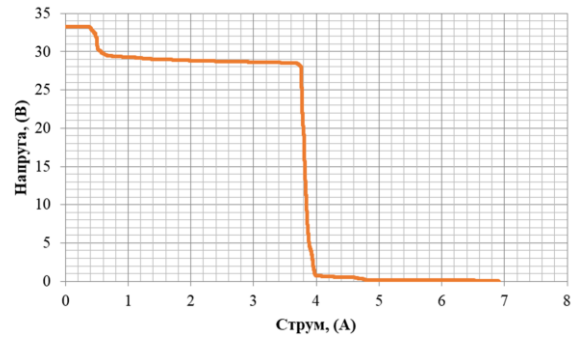


Fig. 9. Вольт-амперна характеристика сонячної панелі ALM-250MB-60

В ході експериментальних досліджень проведені додаткові вимірювання з оцінки якості інвертованої напруги від сонячної панелі з акумулятором. У порівнянні досліджувались дві схеми. Перша використовує просту схему комутації ключових елементів з отриманням на виході модифікованої синусоїди (комп'ютерний блок неперервного живлення). Інвертована напруга для цієї схеми (Fig. 10) має найбільший коефіцієнт спотворення який складає 63,3 %, а у гармонічному спектрі характеризується непарними гармоніками з порядковими номерами 3, 7, 11, 13, 17, ...

Друга схема інвертора зібрана на польових транзисторах за схемою H-моста з широтно-імпульсною модуляцією та драйвером керування «чиста синусоїда» EGS002 (EG8010 + IR2110). Інвертована напруга для неї (Fig. 11) має значно менший коефіцієнт спотворення, який складає 4,2 %, а у гармонічному спектрі має складові більш високого порядку – 3, 28, 45, 46, 47...

Осцилограми інвертованої напруги 220 В фіксувались за допомогою аналізатора потужності Satec EDL-175хг.

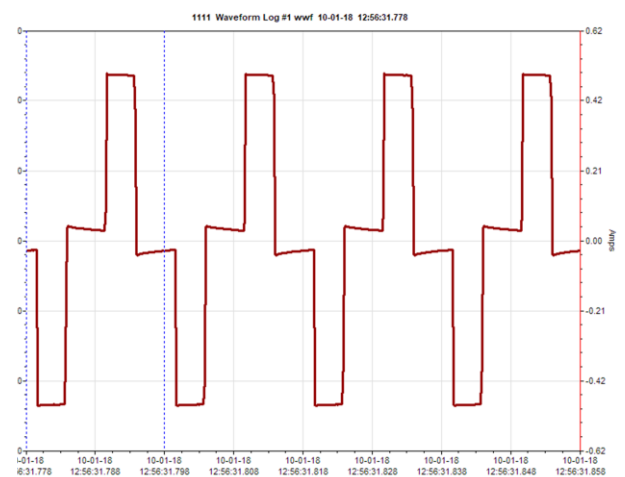


Fig. 10. Форма модифікованої синусоїди на виході інвертора

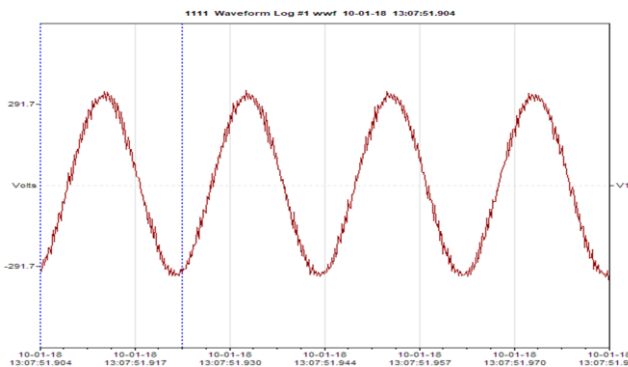


Fig. 11. Форма вихідної напруги для схеми з ШІМ модуляцією

Таким чином, на підставі проведених досліджень можна стверджувати, що найкращим варіантом перетворення є схема з ідеальною синусоїдою з відповідним слідкуванням за точкою максимальної потужності, реалізація якої з доступних елементів належить до подальшої розробки.

#### IV. ВИСНОВКИ

На основі проаналізованої в роботі інформації можна зробити висновок про необхідність подальших наукових досліджень та розробки методів та пристроїв використання альтернативної енергії. Даний процес був та залишається актуальним навіть на сьогодні, в часи високого технологічного розвитку у світі альтернативної енергії. Розглянуте питання впровадження відновлювальних джерел енергії в Україні дає можливість зменшити використання традиційних джерел енергії таких як газ, вугілля, нафта.

Проведені експериментальні дослідження демонструють достатній ефект від застосування сонячної панелі з трекером для збільшення генерації фотоелектричної енергії, що в свою чергу дозволяє збільшити

обсяг виробництва електроенергії на сонячних електростанціях на 30-40%.

Розроблені схемні та технічні рішення підвищують доступність та забезпечують повторюваність технологій фотоелектричного перетворення електроенергії для використання широким колом фахівців та науковців.

При широкому впровадженні слід дотримуватись комплексного підходу до визначення ефективності сонячної генерації, що враховує одночасне геометричне орієнтування в просторі та підвищення показників ефективності перетворення при слідкуванні за точкою максимальної потужності вольт-амперної характеристики.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] D. Bosyi, O. Sablin, I. Khomenko, Y. Kosariev, I. Keбал and S. Myamlin Jr. "Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems", *Transport Problems*, vol. 12 (se), 2017, pp. 57-71.
- [2] Ja. Ekanayake, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama and N. Jenkins, *Smart Grid technology and applications*, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] L. Nakashydzhe, V. Gabrinets and Y. Mitkov, *Zastosuvannya fotoelektrychnykh system dlya otrymannya elektrychnoyi enerhiyi [The use of photovoltaic systems for power generation]*, Dnipro, Ukraine: LLC Accent PP, 2016. (In Ukrainian)
- [4] V. Poulek and M. Libra, "New solar tracker", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 51, iss. 2, 1998, pp. 113-120.
- [5] Yingxue Yao, Yeguang Hu, Shengdong Gao, Gang Yang and Jinguang Du, "A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies", *Renewable Energy*, vol. 72, 2014, pp. 88-98.
- [6] A. Jakovleva, "Sistema upravleniya panel'yu solnechnykh batarei s dvumya stepenyami svobody" [Control system by the panel of sunny batteries with two degrees of freedom], *Elektronika ta systemy upravlinnya [Electronics and control systems]*, no. 2(32), 2012, pp. 79-82.
- [7] M. Bollen and I. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Piscataway, NJ.: IEEE Press, 2006.

## A study of the effectiveness of and power conversion parameters on a laboratory bench «a sun tracker»

O. Lavrenyuk, I. Evglevsky

undergraduates of the Department of Intellectual systems electrosupply,  
Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan  
Dnipro, Ukraine

D. Bosyi

associate Professor of Intellectual systems Department electrosupply  
Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan  
Dnipro, Ukraine  
[dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

*The paper proposes a design of the "solar tracker" laboratory stand for studying the effectiveness and the definition of the electric power conversion parameters. To create a solar panel used polycrystalline solar cells. Their characteristics and mounting method are given in the article. The design of the moving part of the tracker provides two degrees of freedom. A simple circuit with available components is used as a control circuit. Its principle of operation is based on compensation of the unbalance potential when the orientation of the solar flux changes relative to a pair of photoresistors. The results of comparison of the current-voltage characteristics of the developed panel with a sample of industrial production are given. The work of the developed design has been checked and the quality of the inverted voltage has been evaluated for the two available circuits - modified and pure sine wave. The developed circuit and technical solutions are primarily focused on the availability of components and ensuring the repeatability of the photoelectric power conversion technology for use by a wide range of specialists and scientists.*

**Keywords** – solar cell; solar panel; solar tracker; laboratory stand; current-voltage characteristic; efficiency.

# Исследование эффективности работы и параметров преобразования электроэнергии на лабораторном стенде «солнечный трекер»

О. С. Лавренюк, И. В.Евглевский

магистранты кафедры Интеллектуальные системы  
электрообеспечения  
Днепропетровский национальный университет желе-  
знодорожного транспорта имени академика  
В. Лазаряна  
Днепр, Украина

Д. О Босий.

доцент кафедры Интеллектуальные системы  
электрообеспечения  
Днепропетровский национальный университет желе-  
знодорожного транспорта имени академика  
В. Лазаряна  
Днепр, Украина  
[dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

*В статье предлагается конструкция лабораторного стенда «солнечный трекер» для исследования эффективности работы и определения параметров преобразования электрической энергии. Для создания солнечной панели использованы поликристаллические фотоэлементы, приведены их характеристики и примененный способ монтажа. В конструкции подвижной части трекера предусмотрено две степени свободы. В качестве схемы управления использована простая схема с доступными компонентами, принцип действия которой основывается на компенсации потенциала небаланса при изменении ориентации солнечного потока относительно пары фоторезисторов. Приведены результаты сравнения вольтамперных характеристик разработанной панели с образцом промышленного производства. Проверена работа разработанной конструкции и оценено качество инвертированного напряжения для двух доступных схем – модифицированная и чистая синусоида. Разработанные схемные и технические решения в первую очередь ориентированы на доступность компонентов и обеспечение повторяемости технологии фотоэлектрического преобразования электроэнергии для использования широким кругом специалистов и ученых.*

**Ключевые слова:** фотоэлемент; солнечная панель; солнечный трекер; лабораторный стенд; вольт-амперная характеристика; эффективность.