

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІЗ СИСТЕМОЮ СЛІДКУВАННЯ ЗА ТОЧКОЮ МАКСИМУМУ ПОТУЖНОСТІ

О.А. Велігорський, канд. техн. наук;

Д.В. Кулініч, інженер,*

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів;

**АТЗТ "Тера", м. Чернігів*

В статье предложен усовершенствованный метод работы системы слежения за точкой максимума мощности фотоэлектрического преобразователя. Рассмотрены особенности построения и расчета таких систем. Приведены экспериментально полученные значения эффективности и усредненной мощности для классического и предложенного методов.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, система слежения за точкой максимума мощности, эффективность, метод возмущения и наблюдения.

У статті пропонується вдосконалений метод роботи системи слідування за точкою максимуму потужності фотоелектричного перетворювача. Розглянуті особливості побудови та розрахунку таких систем. Наведені експериментально визначені значення ефективності та усередненої потужності для класичного та запропонованого методів.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, система слідування за точкою максимуму потужності, ефективність, метод збурення та спостереження.

ВСТУП

Одна з найбільш важливих проблем сучасності – проблема джерел енергії. Людство дуже швидко витрачає ті органічні джерела, які накопичила природа за сотні мільйонів років, оскільки у світі близько 90% енергії зараз отримується за рахунок нафти, газу й вугілля [1]. Атомна енергетика, яка має набагато більше сировинних ресурсів, ніж органічне паливо, і може дати відносно дешеву енергію, вже не вважається найбільш перспективним джерелом. Її найбільші проблеми – утилізація відходів і ризик радіоактивного забруднення навколишнього середовища, що підтверджують останні події в Японії на атомній електростанції Фукусима-1 й наслідки Чорнобильської аварії.

Саме тому все більша увага звертається на альтернативні, відновлювальні джерела енергії – тепло Землі, енергію вітру, сонячне випромінювання тощо. Одним з найбільш перспективних серед них є пряме перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію за допомогою напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів, які об'єднуються в сонячні батареї (СБ), чи як їх ще називають - сонячні модулі (solar modules) [2].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Основною характеристикою СБ є вольт-амперна характеристика (ВАХ), яка є суттєво нелінійною. Граничними параметрами ВАХ СБ є напруга холостого ходу $U_{ХХ}$ та струм короткого замикання $I_{КЗ}$. Значення напруги і струму на виході СБ при підключенні певного опору навантаження, а відповідно і потужності, яка віддається в навантаження, залежать від поверхневої густини потужності сонячного випромінювання W , температури р-п переходу СБ T та опору навантаження R_H , яке підключається до батареї (рис. 1) [3]. Для кожного набору значень W і T буде існувати найбільш оптимальне

значення опору навантаження, при якому від СБ буде відбиратись максимальна потужність. Робочу точку на ВАХ для таких значень W , T та R_H називають точкою максимальної потужності (ТМП). Враховуючи те, що під час роботи СБ параметри навколишнього середовища змінюються (наявність або відсутність хмар, зміна температури повітря), підключення фотоелектричного перетворювача напряму до постійного навантаження є неефективним. Підвищити ефективність використання СБ може система слідування за точкою максимальної потужності (ССТМП, Maximum Power Point Tracking), яка включається між сонячною батареєю та навантаженням (рис. 2), і встановлює найбільш оптимальне значення навантаження [4].

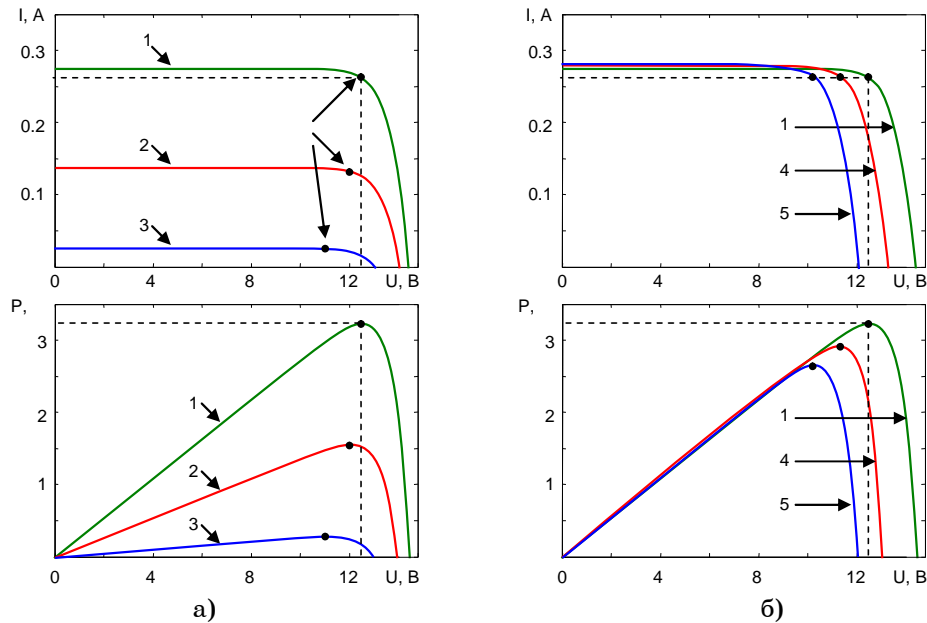


Рисунок 1 – ВАХ та характеристика P-U СБ УН116*116-12А/В250 при зміні потужності сонячного випромінювання (а) і температури (б):
 1 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$ при $T=25^\circ\text{C}$, 2 – $W=500 \text{ Вт/м}^2$ при $T=25^\circ\text{C}$,
 3 – $W=100 \text{ Вт/м}^2$ при $T=25^\circ\text{C}$, 4 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$ при $T=45^\circ\text{C}$,
 5 – $W=1000 \text{ Вт/м}^2$ при $T=65^\circ\text{C}$

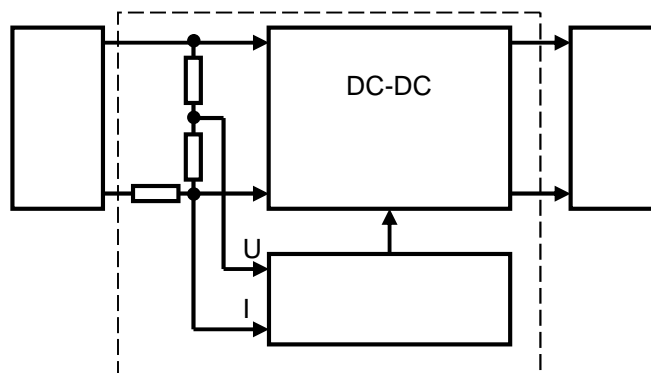


Рисунок 2 – Структурна схема фотоелектричної системи з ССТМП

ССТМП може працювати за одним із таких методів: постійної напруги, холостого ходу, збурення та спостереження, інкрементної провідності [4, 5, 6], методів, які використовують елементи штучного інтелекту (нечітка логіка [7], нейронні мережі [8]). Одним з найбільш поширених є метод збурення та спостереження, який поєднує в собі високу ефективність і невелику вартість комплектуючих для його реалізації. Однак при всіх його перевагах він має й недоліки, найбільш суттєвим серед них є зменшення ефективності при невеликій поверхневій густині потужності сонячного випромінювання W [9, 10]. Враховуючи те, що в північному регіоні України кількість днів з хмарністю за рік може досягати 160, цей недолік є досить суттєвим.

Таким чином, **метою роботи** є підвищення ефективності використання фотоелектричних перетворювачів за рахунок ССТМП, яка працює за певним алгоритмом у широкому діапазоні потужностей сонячного випромінювання. Для її досягнення необхідно вирішити такі завдання:

- розрахунок елементів схеми перетворювача напруги ССТМП;
- реалізація та удосконалення алгоритму роботи ССТМП, розрахунок його ефективності.

РЕАЛІЗАЦІЯ ССТМП

ССТМП містить такі складові: силова частина, інформаційна частина (контролер ССТМП), давачі (рис. 2). Враховуючи те, що експерименти будуть проводитися на двох послідовно з'єднаних сонячних батареях УН116*116-12А/В250 з $U_{XX}=7,2$ В, $I_{KЗ}=0,275$ А, $P_{MAX}=1,5$ Вт, силова частина була побудована на DC-DC-перетворювачі, що знижує напругу, узагальнена схема якого показана на рис. 3. Контролер ССТМП виконаний на мікроконтролері АТmega8 і реалізує метод збурення та спостереження. Кількість давачів визначається методом ССТМП, для нашого випадку використовуються давачі напруги та струму.

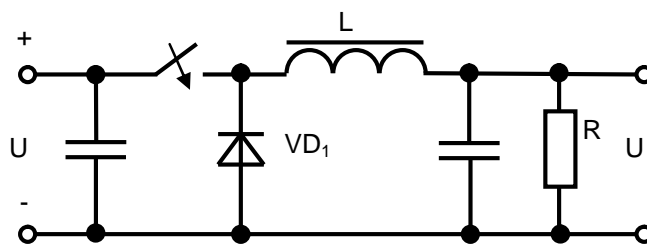


Рисунок 3 – Силова частина ССТМП

Для розрахунку перетворювача, що знижує напругу, встановимо діапазон зміни W , в якому буде працювати ССТМП, від 100 до 1000 Вт/м². З визначеної ВАХ СБ (рис. 1) знайдемо положення точок максимуму потужності: $U_{CB}=12,45$ В, $I_{CB}=260$ мА при $W=1000$ Вт/м²; $U_{CB}=11,2$ В, $I_{CB}=28$ мА при $W=100$ Вт/м². За законом Ома знайдемо опір навантаження СБ, який відповідатиме ТМП: $R_{1000}=47,89$ Ом, $R_{100}=400$ Ом.

Вхідний опір DC-DC-перетворювача, який у нашому випадку буде приведеним опором навантаження СБ, можна визначити таким чином [11]:

$$R_{BX} = \frac{R_H}{D^2}, \quad (1)$$

де R_{BX} – вхідний опір DC-DC перетворювача, Ом;

R_H – опір навантаження, Ом;

D – шпаруватість імпульсів на вході управління силового ключа DC-DC -перетворювача.

Враховуючи те що в експериментальному стенді за навантаження використовується опір $R_H=26,8$ Ом, за формулою (1) знайдемо діапазон зміни шпаруватості: $D_{1000}=74,8\%$, $D_{100}=25,8\%$. Таким чином, знайдено мінімальну і максимальну шпаруватість, при якій ССТМП буде встановлювати ТМП при зміні W від 100 до 1000 Вт/м².

Значення мінімальної шпаруватості також використовується при розрахунку величини індуктивності дроселя, необхідної для забезпечення режиму безперервного струму.

Дані з усіх давачів у режимі реального часу передавалися до персонального комп'ютера (ПК) по інтерфейсу RS-232 з інтервалом 10 секунд упродовж 7 годин. Експериментальні дослідження проводили у травні-червні 2010 року протягом декількох днів, з 9:30 до 16:30. Отримані за час кожного експерименту дані (по 2520 значень напруги та струму на виході СБ, температури СБ, освітленості) у подальшому оброблялись у пакеті Matlab.

АЛГОРИТМИ РОБОТИ ССТМП

Розглянемо класичну реалізацію алгоритму збурення та спостереження, в якій для знаходження точки максимуму потужності необхідно вимірювати значення напруги та струму СБ.

Контролер ССТМП, періодично змінюючи шпаруватість, збурює положення робочої точки, змінюючи таким чином напругу та струм СБ. Контролер за даними давачів розраховує миттєву потужність і порівнює її з потужністю, отриманою на попередньому циклі роботи алгоритму. Якщо робоча напруга СБ і потужність збільшуються ($dP/dU > 0$), то система зміщує робочу точку в тому самому напрямі, в іншому випадку робоча точка переміщується у протилежному напрямку. В наступному циклі робота алгоритму повторюється аналогічно. Таким чином, за декілька ітерацій ми зможемо знайти точку максимуму потужності СБ.

Недоліком такого алгоритму, крім зазначеного вище зменшення ефективності при хмарних погодних умовах, є те, що положення робочої точки СБ змінюється на кожному циклі роботи алгоритму, тому при досягненні ТМП вихідна потужність буде коливатися біля максимального значення.

Для перевірки роботи алгоритму була створена модель ССТМП в Simulink, (рис. 4), для якої параметри СБ й силової частини збігаються з розрахованими раніше для експериментального макета.

Блок Solar Panel реалізує модель СБ, розглянуту в [3], на вхід якої подаються дані про температуру панелі (блок Temperature) та поверхневої густини потужності сонячного випромінювання (блок Insolation). Блок Algorithm, внутрішня структура якого показана на рис. 5, реалізує алгоритм збурення та спостереження, вхідними даними для якого є значення напруги та струму СБ, а вихідним сигналом є імпульси, які подаються на вхід управління силового ключа. Силова частина ССТМП складається з ідеального ключа (Ideal Switch), вхідного (C_in) та вихідного (L, C) фільтрів.

Результат роботи алгоритму при ступінчастій зміні поверхневої густини потужності сонячного випромінювання від 0 до 1000 Вт/м² показаний на рис. 6. Як бачимо, система виходить на максимум потужності за 50 мс від початку роботи. Шпаруватість, яка відповідає ТМП, за результатами моделювання становить 75%, що дуже близько до теоретично розрахованого значення (74,8%). Амплітуда коливань

потужності P біля точки максимуму становить близько 0,2 Вт і залежить від кроку збурення. P можна зменшити за рахунок зменшення кроку зміни шпаруватості, який зараз становить 0,05, однак у цьому випадку погіршиться швидкість алгоритму.

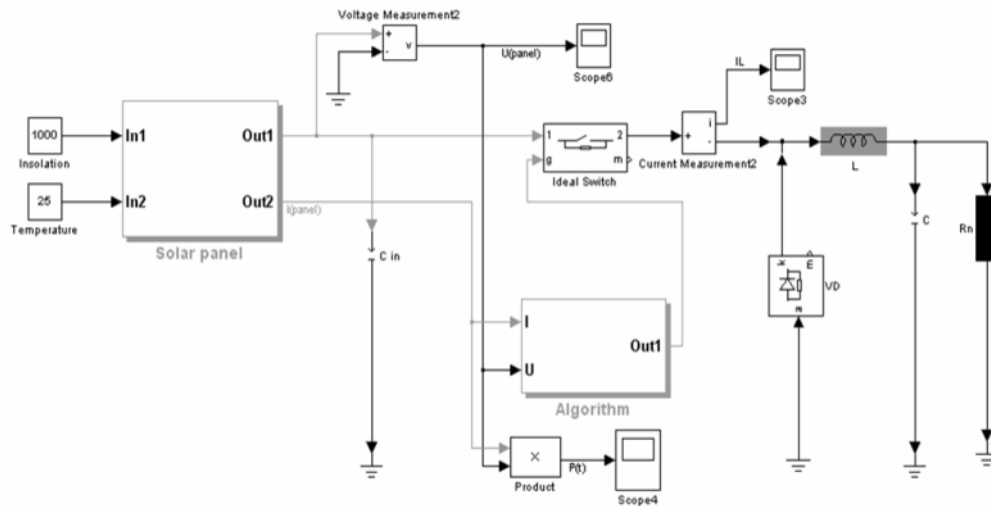


Рисунок 4 – Модель ССТМП у програмі Simulink пакета Matlab

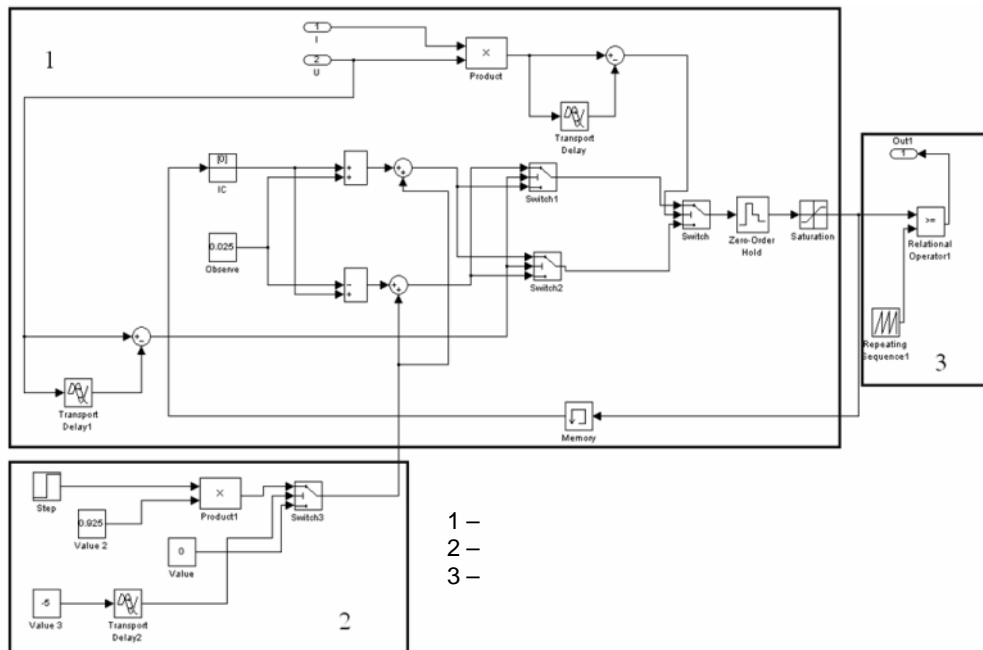


Рисунок 5 – Реалізація алгоритму збурення та спостереження в Simulink

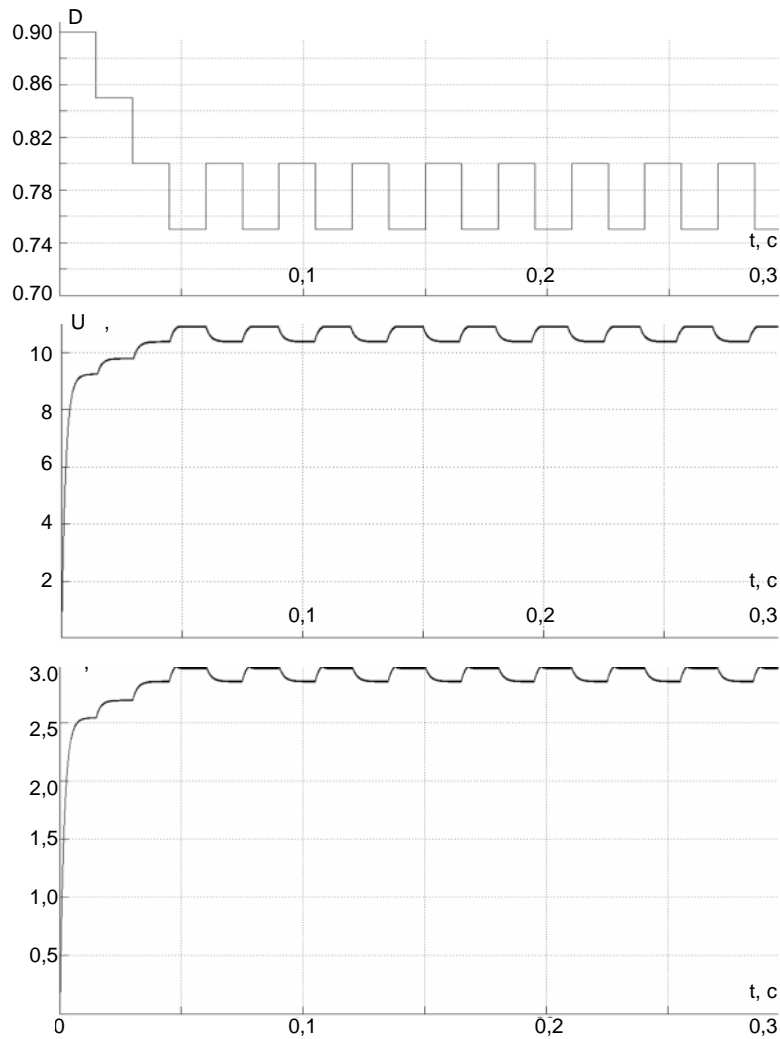


Рисунок 6 – Результати моделювання ССТМП у програмі Simulink

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ССТМП

Залежності миттєвої потужності СБ від часу без та з ССТМП, отримані на експериментальному макеті, показані на рис. 7 та 8 відповідно. Як бачимо, у день проведення дослідів зранку та після обіду була сонячна погода, в той час як з 11:45 по 13:45 на небі були хмари, про що свідчать провали у миттєвій потужності для цього часу.

Середнє значення потужності, яка була вироблена СБ за 7 годин з ССТМП та без неї можна визначити за такою формулою:

$$P_{сер} = \frac{1}{i} \cdot \sum_{i=1}^N P_i, \quad (2)$$

де P_i – миттєве значення потужності СБ, Вт;

N – кількість вимірювань значень потужності;

$P_{сер}$ – середнє значення потужності СБ за час проведення дослідів, Вт.

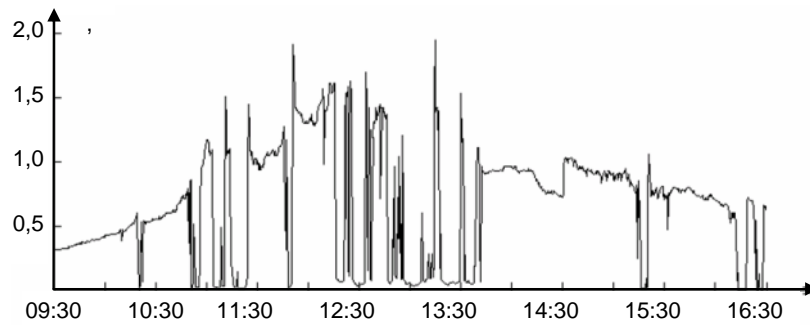


Рисунок 7 – Залежність миттєвої потужності СБ від часу без використання ССТМП

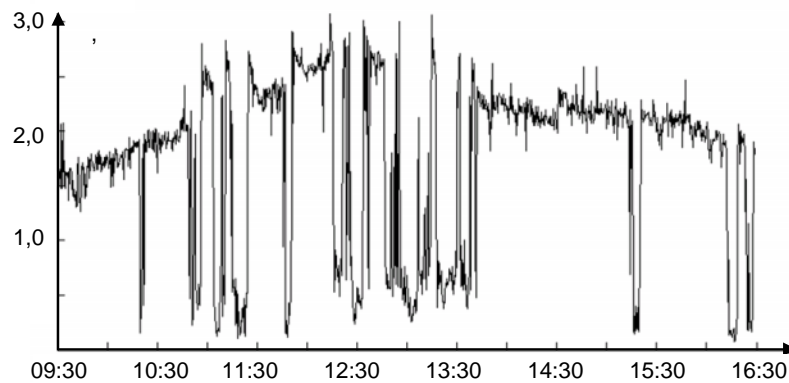


Рисунок 8 – Залежність миттєвої потужності СБ від часу з використанням ССТМП за методом збурення та спостереження

Як було встановлено за результатами розрахунків, середня потужність СБ без використання ССТМП становила $P_{сер}=0,52$ Вт, у той час як з використанням ССТМП – $P_{сер}^{ССТМП}=1,75$ Вт. Для визначення ефективності алгоритму збурення та спостереження програма для контролера ССТМП була змінена таким чином, щоб кожні 10 секунд контролер змінював шпаруватість імпульсів управління ключовим елементом DC-DC-перетворювача від 0 до 1. Таким чином, опір навантаження СБ змінювався від мінімального до максимального значення, і обов'язково проходив точку максимуму потужності, яка визначалась програмою. Отримані значення напруги та струму СБ, які відповідали ТМП, передавались до персонального комп'ютера.

Ефективність роботи алгоритму, таким чином, можна визначити за такою формулою:

$$\eta = \frac{P_{сер}^{ССТМП}}{P_{сер}^{Max}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де $P_{сер}^{Max}$ – максимальне значення потужності СБ усереднене за час проведення дослідів, Вт;

$P_{сер}^{ССТМП}$ – середнє значення потужності СБ з ССТМП за час проведення дослідів, Вт.

За результатами обробки експериментально отриманих даних на ПК встановлена ефективність методу збурення та спостереження (табл. 1), яка є високою при ясній погоді, і поступово знижується при збільшенні

хмарності. Часову залежність миттєвої потужності при відсутності хмарності показано на рис. 9, з якого бачимо, що при таких погодних умовах потужність, яку віддає СБ, наближається до довідникової (3 Вт). Крім того, добре видно, що в зв'язку з тим, що СБ була орієнтована в напрямку півдня, потужність зранку і ближче до вечора зменшується. Це явище пояснюється збільшенням кута між сонячним промінням і перпендикуляром до СБ у цей час. Подальше збільшення ефективності використання СБ можливе за умови використання системи орієнтації фотоелектричного перетворювача за Сонцем, що буде реалізовано в подальшому.

Для збільшення ефективності роботи ССТМП було запропоновано вдосконалений метод збурення та спостереження, що поєднує переваги класичного методу і методу постійної напруги, який є більш ефективним при низьких рівнях поверхневої густини потужності сонячного випромінювання. Структурна схема вдосконаленого методу показана на рис. 10. Допоміжним елементом є датчик освітленості APDS-9002, який визначає межу для перемикавання методів. Експериментально було підбрано значення межі, яке становить 1000 лк. При більших значеннях працює метод збурення та спостереження, при менших – постійної напруги.

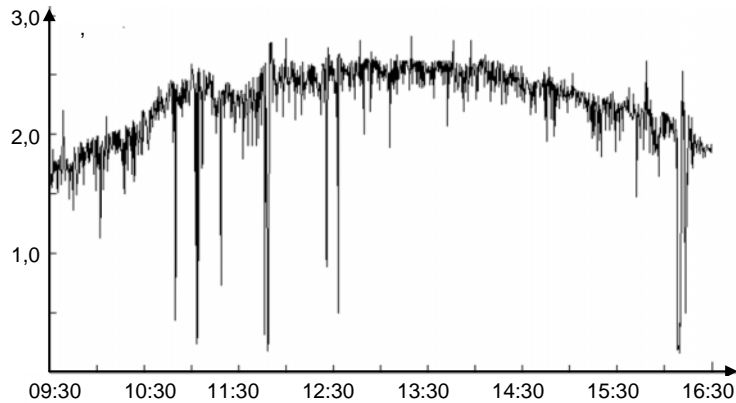


Рисунок 9 – Залежність миттєвої потужності СБ від часу з використанням ССТМП за методом збурення та спостереження для ясної погоди

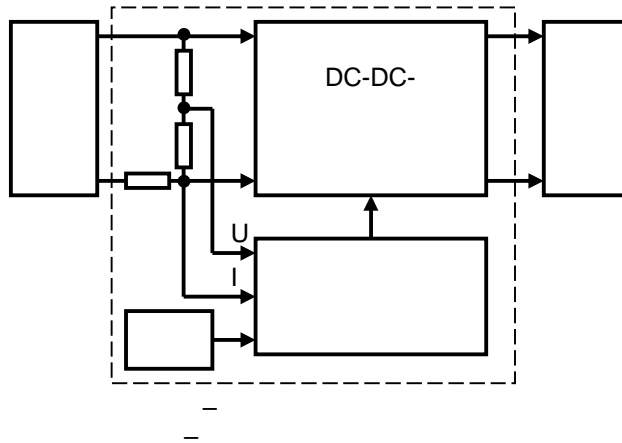


Рисунок 10 – Структурна схема фотоелектричної системи з ССТМП

Проведені дослідження та їх обробка на ПК з використанням формул (1) та (2) дозволили знайти ефективність запропонованого методу при різних погодних умовах (табл. 1). Як бачимо з результатів порівняння класичного та вдосконаленого методів збурення і спостереження, останній має вищу ефективність, що особливо помітно при низьких рівнях поверхневої густини потужності сонячного випромінювання.

Фото експериментального макета фотоелектричного перетворювача максимальною потужністю $P_{MAX}=3$ Вт з ССТМП, на якому проводили дослідження, показано на рис. 11.

Таблиця 1 – Порівняння класичного і вдосконаленого методу збурення та спостереження

Погода	Класичний		Вдосконалий		η , %
	η , %	$P_{сер}^{ССТМП}$, Вт	η , %	$P_{сер}^{ССТМП}$, Вт	
Ясна	95,9	2,241	95,9	2,241	0
Переважно ясна	93,3	1,823	95,5	1,864	2,2
Хмарна з проясненнями	82,2	0,787	93,1	0,883	10,9
Хмарна	75,5	0,510	92,3	0,623	16,8

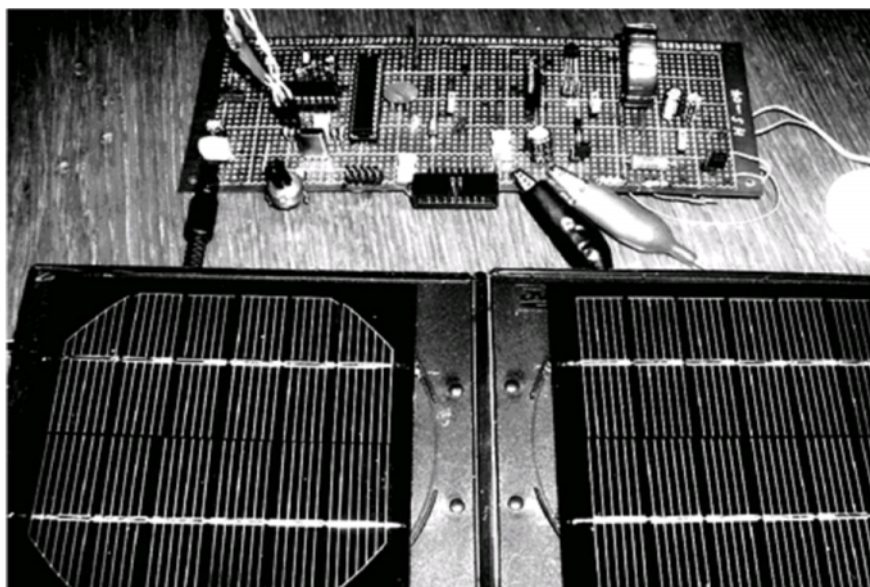


Рисунок 11 – Експериментальний макет фотоелектричного перетворювача з ССТМП

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що системи слідкування за точкою максимуму потужності дозволяють суттєво підвищити ефективність фотоелектричних перетворювачів.

2. Запропоновано методику розрахунку шпаруватості DC-DC-перетворювача ССТМП, який враховує діапазон зміни поверхневої густини потужності сонячного випромінювання.

3. Запропоновано вдосконалений метод збурення та спостереження, який поєднує в собі переваги класичного методу та методу постійної напруги, і є більш ефективним у широкому діапазоні зміни поверхневої густини потужності сонячного випромінювання, що особливо актуально для північних регіонів України. Проведені дослідження встановили, що збільшення ефективності ССТМП, які працюють за таким алгоритмом, становить до 16,8 % порівняно з класичним методом.

SUMMARY

PHOTOVOLTAIC CONVERTERS WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING SYSTEM

*O.A. Veligorsky, D.V. Kulinich**,
Chernigiv State Technological University, Chernigiv;
*ATZT "Tera, CJSC", Chernigiv

This paper proposes an improved method of maximum power point tracking system of the photovoltaic converter. The features of the construction and calculation of such systems are considered. Shows the experimental values of efficiency and average power for the classical and proposed methods.

Key words: photovoltaic converter, maximum power point tracking, efficiency, perturb and observe algorithm, constant voltage method.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловський А.К. Енергетичні ресурси та потоки (ред.) / А.К. Шидловський. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2003. – 468 с.
2. Messenger, Roger. Photovoltaic Systems Engineering / Roger Messenger, Jerry Ventre. – [2nd Edition]. – CRC Press, 2003. – 480 p.
3. Велігорський О.А. Моделювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних перетворювачів / О.А. Велігорський, Д.В. Кулініч // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – 2010. - №45. – С. 180-187.
4. Faranda, Roberto. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems / Roberto Faranda, Sonia Leva // WSES transaction on power systems. – 2008. - Vol.3, №6. – P. 446-455.
5. Esram T. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques / T. Esram, P.L. Chapman // IEEE Transaction Energy Conversion. – 2007. - Vol. 22, №2. – P. 439–449.
6. Kim, Y. A new peak power tracker for cost-effective photovoltaic power systems. / Y. Kim, H. Jo, D. Kim // Proc. IEEE. – 1996. - Vol. 3, №1. – P. 1673–1678.
7. Kottas, T.L. New Maximum Power Point Tracker for PV Arrays Using Fuzzy Controller in Close Cooperation with Fuzzy Cognitive Network / T.L. Kottas, Y.S. Boutalis and A.D. Karlis // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2006. - Vol. 21, №3. – P. 793–803.
8. Aldobhani, A.M.S. Maximum Power Point Tracking of PV System Using ANFIS Prediction and Fuzzy Logic Tracking / Abdulaziz M.S. Aldobhani, Robert John // Proc. IMECS. – 2008. - Vol. 11. – 8 p.
9. Oi, Akihiro. Deseign and simulation of photovoltaic water pumping system [Електронний ресурс] Режим / Akihiro Oi. – 2005. – 103 p. // http://courseware.ee.calpoly.edu/~jharris/research/super_project/ao_thesis.pdf
10. Hsiao, Y.T. Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power System / Y.T. Hsiao, C.H. Chen // Proc. Industry Application Conference. – 2002. - Vol. 2. – P. 1035-1040.
11. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простому к сложному / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.

Надійшла до редакції 28 квітня 2011 р.