

## Силовая електроника

УДК 621.314

Є.В. Вербицький, канд техн. наук, В.Я. Ромашко, д-р техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

Вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

### Особливості пошуку точки максимальної потужності сонячної батареї методами холостого ходу і короткого замикання

*Проаналізовано основні методи пошуку точки максимальної потужності сонячної батареї. Показано, що найпростішими і достатньо ефективними є методи короткого замикання і холостого ходу. Основним їх недоліком є зменшення вихідної потужності сонячної батареї, що викликано відносно широким діапазоном можливого знаходження точки максимальної потужності як за струмом, так і за напругою при зміні зовнішніх умов (потужності сонячного випромінювання, температури), а також опору зовнішніх втрат сонячної батареї. Проаналізовано вплив зазначених факторів на положення точки максимальної потужності і дано рекомендації щодо їх врахування при виборі положення точки максимальної потужності. Показано, що при використанні імпульсних регуляторів для узгодження сонячної батареї з навантаженням, робочу точку сонячної батареї доцільно вибирати лівіше від точки максимальної потужності. Бібл. 5, рис. 5.*

**Ключові слова:** сонячна батарея, відбір максимальної потужності, режими холостого ходу і короткого замикання, пристрої узгодження сонячної батареї з навантаженням.

#### Вступ

Сонячні батареї (СБ) є відновлювальним джерелом електричної енергії і широко застосовуються для живлення електронної апаратури та побутових споживачів. Кількість виробленої електричної енергії залежить від зовнішніх умов (потужність сонячного випромінювання, температура та ін.) і змінюється у часі. Для кожного режиму роботи СБ існує оптимальне навантаження, яке відбиратиме від неї максимально можливу потужність. При зміні зовнішніх умов у це навантаження не вдається передати усю енергію, яку б могла видати СБ. У середньому вдається використати лише близько 60 % від можливої кількості електричної енергії [3]. Для збільшення кількості одержаної енергії використовують пристрої узгодження навантаження з джерелом [5]. В якості таких пристроїв широко

використовують імпульсні регулятори (ІР) постійної напруги. Вони працюють в режимі регулювання вихідного струму СБ і забезпечують її виведення в точку максимальної потужності (МП) при зміні зовнішніх умов. Для керування ІР необхідно визначати координати точки МП ( $I_{МП}$  та  $U_{МП}$ ) СБ. Існує багато алгоритмів пошуку точки МП [1], які умовно можна розділити на дві групи:

- ітеративні алгоритми поступового зміщення робочої точки в сторону збільшення вихідної потужності СБ;
- однокрокові алгоритми визначення точки МП.

Перша група алгоритмів є універсальною і може бути використана для джерел енергії з довільними вольт-амперними характеристиками (ВАХ). Через це пошук точки МП цими методами здійснюється шляхом вимірювання і порівняння параметрів СБ в різних робочих точках. Тому їм притаманні наступні недоліки:

- порівняно велика інерційність;
- періодичне зміщення робочої точки, що збільшує амплітуду пульсації напруги на навантаженні [1].

Друга група методів розроблена спеціально для напівпровідникових СБ, що дозволяє розрахувати точку МП на основі вимірювань, період яких значно перевищує період роботи ІР. Тому ці методи дозволяють усунути недоліки першої групи методів. Найвідомішими алгоритмами цієї групи є вимірювання напруги холостого ходу  $U_{XX}$  і струму короткого замикання  $I_{КЗ}$ . Координата точки максимальної потужності за напругою  $U_{МП}$  знаходиться в межах  $0.7..0.8 U_{XX}$ , а за струмом  $I_{МП}$  – в межах  $0.87..0.93 I_{КЗ}$ . В різних джерелах дані щодо положення точки МП дещо відрізняються, але знаходяться у вказаному діапазоні [1,2]. Ці методи є одними з найпростіших. Для їх реалізації СБ на короткий час (одиниці мілісекунд) закорочується або відключається від навантаження. Після вимірювання струму короткого замикання чи напруги холостого ходу, за до-

помогою IP забезпечується режим роботи близький до точки МП.

Порівняно широкий діапазон зміни координат точки МП пов'язаний з її залежністю від потужності сонячного випромінювання, температури та ряду інших факторів. Тому використання цих методів дозволяє відбирати до 90 % від можливої кількості електричної енергії. У зв'язку з цим доцільно зменшити невизначеність знаходження точки МП за рахунок врахування зазначених факторів на координати точки МП СБ. Вирішення цієї задачі дозволить підвищити ефективність відбору енергії від СБ.

### Математична модель СБ

ВАХ СБ описується наступним виразом [1]:

$$U = \ln\left(\frac{n_1 I_\phi - I}{n_1 I_0} + 1\right) \frac{n_2 k T}{q} - I R_K, \quad (1)$$

де  $I$ ,  $U$  – струм і напруга СБ,  $I_\phi$  – фотострум СБ,  $I_0$  – зворотній струм р-п переходу СБ,  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана,  $T$  – абсолютне значення температури,  $K$ ,  $n_1$  – кількість паралельно включених фотоелементів СБ,  $n_2$  – кількість послідовно включених фотоелементів СБ,  $R_K$  – сумарний опір зовнішніх втрат СБ.

Джерело фотоструму  $I_\phi$  визначає кількість вільних носіїв заряду в одиницю часу, які утворились під дією сонячного випромінювання, опір  $R_K$  враховує втрати в контактах СБ і дротах системи електроживлення, які з'єднують її з IP.

При аналізі формули (1) необхідно зазначити, що вплив температури проявляється не лише явно, а і неявно як залежність зворотного струму р-п переходу СБ  $I_0$  від температури. Вважається, що значення зворотного струму кремнієвого р-п переходу за нормальних умов складає 1-10 нА і збільшується вдвічі при збільшенні температури на кожні 10 °С [4]. Величина фотоструму  $I_\phi$  пропорційна потужності сонячного випромінювання  $S$ . Величину фотоструму  $I_\phi$  можна визначити через значення струму короткого замикання  $I_{K3}$ . В граничному випадку  $R_K \rightarrow 0$ ,  $I_\phi = I_{K3}$ . За наявності активних втрат  $R_K$ , в режимі короткого замикання потенціал на р-п переході фотоелемента відмінний від нуля, тому частина фотоструму протікає через нього, зважаючи на це  $I_\phi = I_{K3} + I_{p-n}$ . На практиці значення струму короткого замикання  $I_{K3}$  складає не менше, ніж 99 % фотоструму, тому можна вважати  $I_\phi \approx I_{K3}$ .

Рівнянню ВАХ СБ (1) відповідає фізична модель, яка складається з однотипних фотоелементів, що зображені на рис. 1.

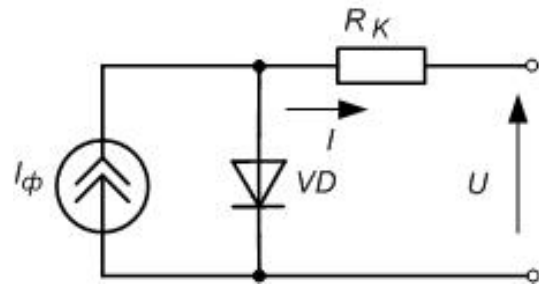


Рис. 1. Модель напівпровідникового фотоелемента

В моделі рис. 1 сила струму джерела  $I_\phi$  визначається фотострумом, який утворюється під дією сонячного випромінювання, діод VD – р-п перехід фотоелемента СБ.

Для визначення діапазону зміни точки МП доцільно дослідити граничні режими роботи СБ, що задаються параметрами навколишнього середовища – потужністю сонячного випромінювання  $S$  і температурою  $T$ .

Відомо [4], що при відсутності зовнішніх втрат граничні положення точки МП СБ по струму і по напрузі спостерігаються при таких умовах:

- при незначних фотострумах і високій температурі – точка МП зміщена в сторону менших струмів і напруг;
- при великих фотострумах і низькій температурі – точка МП зміщена в сторону більших струмів і напруг.

На практиці умова відсутності зовнішніх втрат відповідає типовим режимам роботи малопотужних СБ, для яких виконується умова:

$$R_K \ll \frac{U_{XX}}{I_{K3}}. \quad (2)$$

На основі моделі рис. 1, в пакеті Simulink отримано вольт-амперні характеристики СБ в граничних режимах роботи СБ, дані для яких взято з технічної документації: режим 1, фотострум  $I_\phi = 0.1$  А і температура  $T = 100$  °С, режим 2, фотострум  $I_\phi = 10$  А і температура  $T = -40$  °С, а також в номінальному режимі 3, фотострум  $I_\phi = 10$  А і температура  $T = 25$  °С.

На рис. 2 наведено графіки нормованих ВАХ при відсутності зовнішніх втрат  $R_K \rightarrow 0$ , по осям яких відкладені відносні значення струму  $I^* = I / I_{K3}$ ,  $U^* = U / U_{XX}$ .

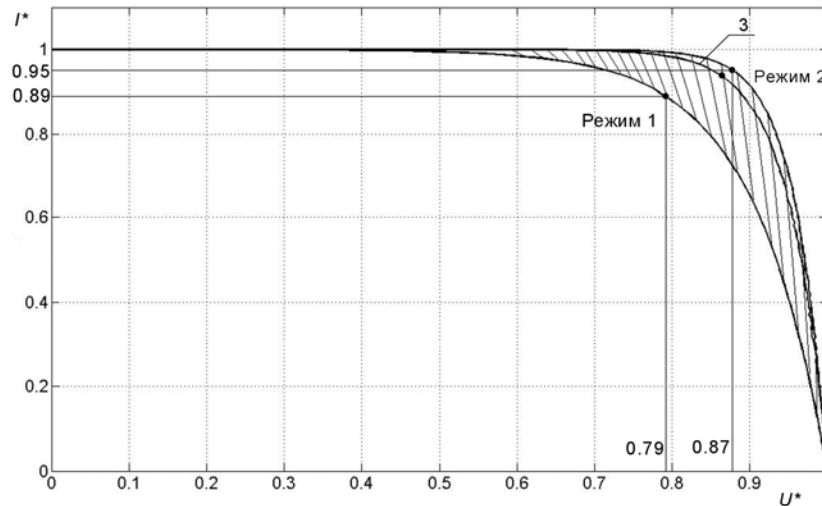


Рис. 2. Нормовані ВАХ СБ у граничних режимах

З рис. 2 видно, що ВАХ СБ у граничних режимах 1 і 2 визначають діапазон зміни точки МП за струмом  $I^*$  і напругою  $U^*$ . По струму він складає  $I^* = 0.89..0.95$ , а по напрузі –  $U^* = 0.79..0.87$ , Тобто область знаходження точки МП зміщена в сторону більших струмів та напруг у порівнянні з даними, наведеними у [1, 2]. Причому при збільшенні температури і зменшенні фотоструму точка максимальної потужності зміщується в сторону менших струмів і напруг, що пояснюється збільшенням зворотного струму і зменшенням потенціального бар'єру р-п переходу СБ зі збільшенням температури.

**Вплив опору зовнішніх втрат на ВАХ СБ**

Зміщення положення точки МП реальних СБ у сторону менших струмів і напруг, у порівнянні з теоретичними даними, наведеними на рис. 2, свідчить про вплив опору зовнішніх втрат  $R_K$  на режими роботи СБ. Їх наявність зменшує вихідну напругу СБ по на величину  $\Delta U = I R_K$ . При використанні нормованих ВАХ для дослідження цього впливу необхідно розрахувати нормоване значення параметра  $\Delta U^*$ . Для чого використовується нормований опір  $R_K^*$  [2]:

$$R_K^* = R_K \frac{I_{K3}}{U_{XX}}, \tag{3}$$

при використанні якого формула для розрахунку параметра  $\Delta U^*$  має такий вид:

$$\Delta U^* = \frac{\Delta U}{U_{XX}} = \frac{I R_K}{U_{XX}} = I^* R_K^* = I^* R_K^* \cdot U_{XX} \tag{4}$$

Вплив нормованого опору  $R_K^*$  на режими роботи СБ доцільно дослідити на основі ВАХ, отриманих за умови  $R_K \rightarrow 0$ . При цьому необхідно оцінити значення параметру  $R_K^*$  по ВАХ СБ, отриманих в заводських умовах та при їх експлуатації. Основною відмінністю вимірювання ВАХ СБ полягає у наступному: в заводських умовах ВАХ вимірюються при мінімальній довжині з'єднувальних дротів, тому можна вважати, що параметр  $R_K^*$  рівний нулю, в умовах експлуатації опір з'єднувальних дротів може мати суттєвий вплив на положення точки МП. Це підтверджується розрахунком точки МП за ВАХ наведеними у заводських технічних характеристиках СБ. Наприклад координати точки МП СБ ND-R250A5 фірми SHARP при максимальній потужності сонячного випромінювання  $S = 1000 \text{ Вт/м}^2$  складають  $U^* = 0.82, I^* = 0.93$ , при потужності  $S = 200 \text{ Вт/м}^2 - U^* = 0.84, I^* = 0.95$ , аналогічні параметри СБ JT195SAb фірми Jetion  $U^* = 0.81, I^* = 0.93$  і  $U^* = 0.83, I^* = 0.95$  відповідно. Наведені дані повністю узгоджуються з даними, отриманими за допомогою ВАХ рис. 2 для випадку  $R_K \rightarrow 0$ .

Оцінку значення нормованого опору  $R_K^*$  при експлуатації СБ доцільно проводити в режимі максимальної потужності сонячного випромінювання, оскільки для цього режиму роботи наводять дані щодо положення МП. Температура роботи СБ в таких режимах роботи складає 50-70 °С. Для вказаних умов побудовано сімейство нормованих ВАХ СБ при різних значень параметру  $R_K^*$ , що зображено на рис. 3.

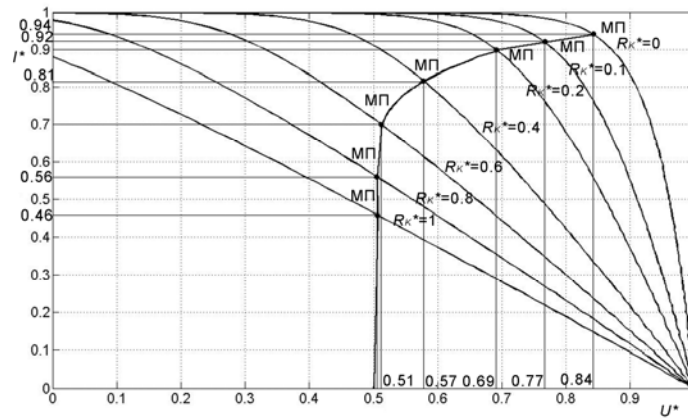


Рис. 3. Сімейство нормованих ВАХ з врахуванням опору втрат  $R_K^*$

Як видно з рис. 3 положення точки МП, в залежності від значення опору  $R_K^*$ , описується монотонно спадаючою кривою. При  $R_K^* \rightarrow \infty$  положення точки МП має координати  $U^* = 0.5$ ,  $I^* = 0$ . За даними рис. 3 можливо визначити значення параметру  $R_K^*$ , що відповідає діапазону координат точки МП, наведених у літературі: координаті  $U^* = 0.8$ ,  $I^* = 0.93$  відповідає значення  $R_K^* = 0.05$ , координаті  $U^* = 0.66$ ,  $I^* = 0.87$  –  $R_K^* = 0.25$ . Зважаючи на це можна зробити висновок, що порівняно широкий діапазон значень точки МП пояснюється різним опором втрат  $R_K$  систем живлення на основі СБ для яких наводяться дані у літературі.

Звуження діапазону точки МП можливе за умови корекції її положення відносно номінального значення, отриманого в заводських умовах при  $R_K \rightarrow 0$ . При цьому положення точки МП доцільно визначати за струмом короткого замкнення, оскільки, як видно з рис. 3, при значеннях відносного опору  $R_K^* < 0.25$ , чутливість положення точки МП від коливання опору  $R_K^*$  більше за напругою, ніж за струмом. Для корекції положення точки МП необхідно оцінити опір

втрат в системі  $R_K$ , розрахувати його нормоване значення за допомогою формули (3), в яку підставляються параметри  $I_{K3}$  і  $U_{ХХ}$  при максимальній потужності сонячного випромінювання, після чого за допомогою рис. 3 знаходиться відкоректоване положення точки МП.

#### Вплив опору зовнішніх втрат на коефіцієнт використання електричної енергії СБ

Збільшення нормованого опору втрат  $R_K^*$  суттєво зменшує коефіцієнт використання електричної енергії СБ, який обчислюється за формулою:

$$\eta = \frac{P_H}{P_D} = \frac{U_H I_H}{U_D I_\phi} = \frac{I^* U^*}{U_i^*}, \quad (5)$$

де  $P_D$  – потужність СБ,  $U_D$  – вихідна напруга СБ,  $I_\phi$  – фотострум СБ,  $U_H$ ,  $I_H$  – напруга і струм навантаження,  $U^*$  – нормована напруга на навантаженні при заданому значенні  $R_K^*$ ,  $U_i^*$  – нормована напруга на навантаженні при  $R_K^* = 0$ .

На рис. 4 наведено графіки коефіцієнту використання електричної енергії СБ при різних значеннях нормованого опору втрат  $R_K^*$ .

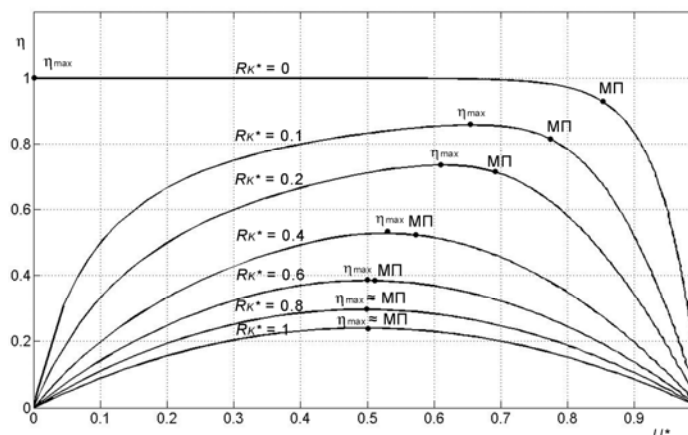


Рис. 4. Графік коефіцієнту використання електричної енергії СБ

З рис. 4 видно, що відстань між точками МП і максимального коефіцієнту використання електричної енергії СБ зі збільшенням опору втрач зменшується.

### Вибір робочої точки СБ

Оскільки вхідний струм  $I_P$  є пульсуючим, при використанні його в якості пристрою узгодження СБ з навантаженням, робоча точка СБ зміщується відносно положення МП. При цьому мит-

тєва потужність, що відбирається від СБ змінюється, внаслідок чого енергія, що передається до навантаження є меншою від максимально можливої  $W_{МП} = P_{МП} t$  [5]. Крім того, внаслідок асиметрії кривої  $P_H^* = f(I^*)$  графік зміни  $P_H^* = f(t)$  є асиметричним, що збільшує недоотриману енергію, яка на рис. 5 показана заштрихованими ділянками. З метою збільшення кількості отриманої від СБ електричної енергії її робочу точку РТ доцільно обирати лівіше від точки МП (рис. 5 б).

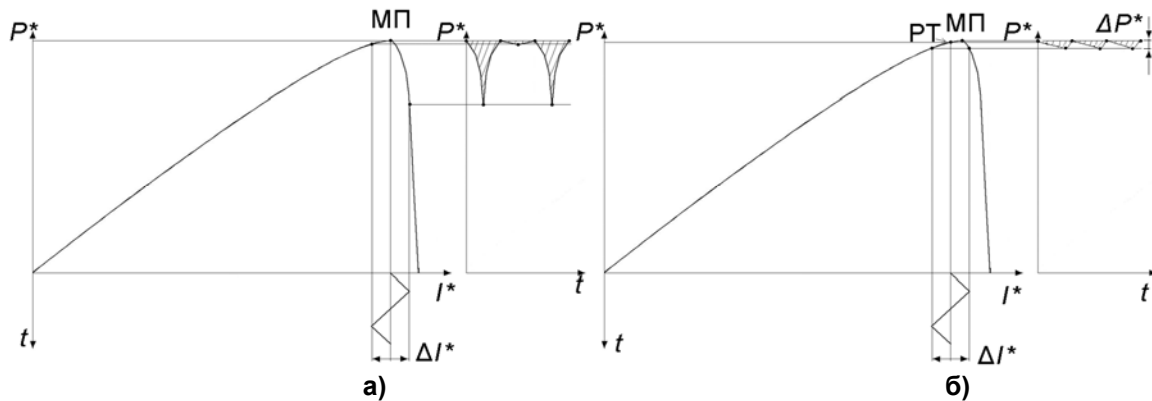


Рис. 5. Вибір робочої точки СБ

При цьому кількість недоотриманої енергії буде тим меншою, чим меншою є пульсація вхідного струму  $\Delta I^*$ .

### Висновки

1. При відсутності зовнішніх втрат енергії ( $R_K \rightarrow 0$ ) точка МП СБ лежить в діапазоні  $(0.79..0.87) U_{XX}$  і  $(0.89..0.95) I_{K3}$ , при чому при збільшенні фотоструму і температури ця точка зміщується в сторону менших струмів і напруг.

2. При наявності зовнішніх втрат енергії положення точки МП суттєво залежить від нормованого опору втрат  $R_K^*$ . Для типових режимів роботи СБ з  $R_K^* < 0.25$  зміна положення точки МП по напрузі відбувається швидше, ніж по струму. У зв'язку з цим точку МП доцільно визначати за результатами вимірювання струму  $I_{K3}$  СБ.

3. При відсутності зовнішніх втрат енергії графік коефіцієнту використання електричної енергії СБ співпадає з її нормованою вихідною характеристикою і в точці МП має значення 0.89-0.95. При наявності зовнішніх втрат енергії точка МП і максимального ККД зміщуються в область менших струмів та напруг, а їх координати зближуються.

4. При використанні пристроїв узгодження СБ з навантаженням, побудованих на основі  $I_P$ , з метою передавання максимальної кількості енергії до навантаження доцільно працювати

лівіше від точки МП СБ з невеликою пульсацією вхідного струму  $I_P$ .

### Список використаних джерел

1. R. Faranda. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. // R. Faranda, S. Leva. Wseas transactions on power systems. – 2008. – Issue 6. – Vol. 3. – Pp. 446-455.
2. D.P.Hohm. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed. // D.P.Hohm, M.E.Ropp. – 2000. – Proc. Photovoltaic specialist conference. – Pp. 1699-1702.
3. S. Leva. Integrated renewable sources for supplying remote power systems. // S. Leva, D. Zaninelli, R. Contino. – 2007. – WSEAS Transactions on power systems. – Vol. 2. – № 2. – Pp.41-48.
4. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. // Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
5. Ромашко В.Я. Устройства согласования нагрузки с источником электрической энергии. Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – Вып. № 7(113), с. 67-74.

Поступила в редакцию 23 октября 2013 г.

УДК 621.314

**Е.В. Вербицкий**, канд. техн. наук, **В.Я. Ромашко**, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

## **Особенности поиска точки максимальной мощности солнечной батареи методами холостого хода и короткого замыкания**

*Проанализировано основные методы поиска точки максимальной мощности солнечной батареи. Показано, что простейшими и достаточно эффективными являются методы короткого замыкания и холостого хода. Их основной недостаток – относительно широкий диапазон смещения точки максимальной мощности как по току, так и по напряжению при изменении внешних условий (мощности солнечного излучения, температуры), а также сопротивления внешних потерь солнечной батареи. Проанализировано влияние указанных факторов на положение точки максимальной мощности и дано рекомендации об их учете при выборе положения точки максимальной мощности. Показано, что при использовании импульсных регуляторов для согласования солнечной батареи с нагрузкой, рабочую точку солнечной батареи целесообразно выбирать левее от точки максимальной мощности. Библиограф. 5, рис. 5.*

**Ключевые слова:** солнечная батарея, отбор максимальной мощности, режимы холостого хода и короткого замыкания, устройства согласования солнечной батареи с нагрузкой.

UDC 621.314

**E.V. Verbitskyi**, Ph.D., **V.Y. Romashko**, Dr.Sc.

National technical university of Ukraine «Kyiv politechnic institute»,  
Polytechnichna st., 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine.

## **Search features of solar battery maximum power point by methods open and short circuits**

*General methods maximum power point of solar battery are analyzed. In article are shown, that methods open and short circuits are simplest and sufficiently effective. Main disadvantage of these method is relatively wide bias range by current and voltage, when outside factors (power of solar radiation, temperature) and outside resistance power losses are changing. Influence mentioned factors to position maximum power point are analyzed and recommendation of taking to account these factors to maximum power point choose are given. When for agreement solar battery and load impulse convertors are used, work point of solar battery expediently choose left from maximum power point. Bibl. 5, pic. 5.*

**Keywords:** solar battery, maximum power collect, open circuit and short circuits methods, agreement devices solar battery and load.

### **References**

1. R. Faranda, S. Leva. (2008), "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems". Wseas transactions on power systems. Issue 6. Vol. 3. Pp. 446-455.
2. D.P.Hohm, M.E.Ropp. (2000), "Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed". Proc. Photovoltaic specialist conference. Pp. 1699-1702.
3. S. Leva, D. Zaninelli, R. Contino. (2007), "Integrated renewable sources for supplying remote power systems". WSEAS Transactions on power systems. Vol. 2. № 2. Pp.41-48.
4. Andreev V.M. Grihles V.A., Rumyantsev V.D. (1989), "Fotovoltavic transform of consetrating solar radiation". L.: Nauka, p. 310. (Rus)
5. Romashko V.Y. (2013), "Load matching devices with electrical energy sources". Energoberezhnie, energetica, energoaudit. Vol. № 7(113), p. 67-74. (Rus)