

УДК 621.314

Ромашко Володимир Якович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри промислової електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна, пр. Перемоги, 37, 03056, тел. (044) 454-90-69. (orcid.org/0000-0002-5429-7685).

Вербицький Євген Володимирович, канд. техн. наук, асист. кафедри промислової електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна, пр. Перемоги, 37, 03056, тел.: (044) 454-90-69. E-mail: verbitsky@bigmir.net (orcid.org/0000-0001-7275-5152).

Киричик Євген Іванович, магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна, пр. Перемоги, 37, 03056, тел.: (044) 454-90-69. E-mail: kyrychykj@gmail.com.

НЕДООТРИМАНА ЕНЕРГІЯ ПРИ ПОШУКУ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ

Проаналізовано умову відбору максимального обсягу електричної енергії від сонячної батареї при пошуку її точки максимальної потужності методом холостого ходу. На основі використання лінійної та нелінійної моделей кривої вихідної потужності сонячної батареї розраховано положення робочої точки, при якому в заданому робочому діапазоні недоотримана енергія буде мінімальною. Результати моделювання порівняно з реальними характеристиками сонячної батареї і визначено похибку для кожної з моделей.

Ключові слова: сонячна батарея, відбір максимальної потужності, метод холостого ходу, метод короткого замикання.

Ромашко Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры промышленной электроники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, пр. Победы, 37, 03056, тел. (044) 454-90-69. (orcid.org/0000-0002-5429-7685).

Вербицкий Евгений Владимирович, канд. техн. наук, асс. кафедры промышленной электроники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, пр. Победы, 37, 03056, тел. (044) 454-90-69. E-mail: verbitsky@bigmir.net (orcid.org/0000-0001-7275-5152).

Киричик Евгений Иванович, магистр, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, пр. Победы, 37, 03056, тел. (044) 454-90-69. E-mail: kyrychykj@gmail.com.

НЕДОПОЛУЧЕННА ЕНЕРГІЯ ПРИ ПОИСКЕ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ МОЩНОСТІ СОЛНЕЧНОЇ БАТАРЕЇ

Проаналізовано умову відбору максимального обсягу електричної енергії від сонячної батареї при пошуку її точки максимальної потужності методом холостого ходу. На основі використання лінійної та нелінійної моделей кривої вихідної потужності сонячної батареї розраховано положення робочої точки, при якому в заданому робочому діапазоні недоотримана енергія буде мінімальною. Результати моделювання порівняно з реальними характеристиками сонячної батареї і визначено похибку для кожної з моделей.

Ключевые слова: солнечная батарея, отбор максимальной мощности, метод холостого хода, метод короткого замыкания.

Romashko Volodymyr Yakovych, Ph. D., Prof., Prof. of industrial electronics department, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic University», Kyiv, Ukraine, Peremohy 37 av., 03056, tel. (044) 454-90-69. (orcid.org/0000-0002-5429-7685).

Verbitskyi Ievgen Volodymyrovych, Ph. D., assistant of industrial electronics department, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic University», Kyiv, Ukraine, Peremohy 37 av., 03056, tel. (044) 454-90-69. E-mail: verbitsky@bigmir.net (orcid.org/0000-0001-7275-5152).

Kyrychyk Ievgen Ivanovych, Msc, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic University», Kyiv, Ukraine, Peremohy 37 av., 03056, tel. (044) 454-90-69. E-mail: kyrychykj@gmail.com.

ENERGY LOSS IN SEARCH MAXIMUM POWER POINT OF SOLAR BATTERIES

Pick condition of maximum amount electrical energy are analyzed. Based on the use of linear and nonlinear models of curve of output solar duty point at which a predetermined operating range energy shortfall will be minimal are calculated. The simulation results are compared to the actual characteristics of the solar battery and the error for each of the models are determined.

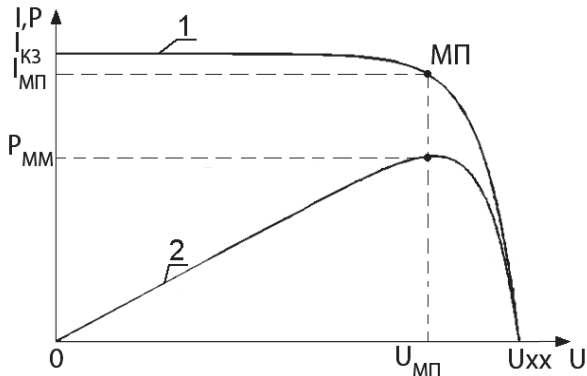
Key words: solar battery, picking of the maximum power, short circuit method, open circuit method.

Коефіцієнт корисної дії сучасних сонячних батарей (СБ) є порівняно невисоким і складає (9–17) % [1]. Зважаючи на це, а також з урахуванням безкоштовності енергоносія, від

подібних джерел електричної енергії у будь-який момент часу доцільно відбирати максимально можливу вихідну потужність. За рахунок цього у навантаженні можемо отримати максимальну кількість електричної енергії.

Під час роботи при заданих умовах навколишнього середовища максимальній вихідній потужності СБ P_{max} відповідає робоча точка максимальної потужності (МП) на її вихідній характеристиці з координатами $U_{МП}, I_{МП}$ (рис. 1).

За зміни умов навколишнього середовища вихідна характеристика СБ зміщується, що призводить до зміни координат точки максимальної потужності (ТМП). Для одержання від



1 – ВАХ СБ, 2 – крива потужності СБ
Рис. 1. ВАХ і крива потужності СБ

СБ максимальної кількості електричної енергії необхідно постійно відслідковувати координати ТМП СБ і забезпечувати її роботу у цій точці. Для цього використовують спеціальні методи та алгоритми пошуку ТМП СБ [2]. Якби робоча точка СБ постійно перебувала у ТМП від неї можна було б отримати максимально можливу кількість електричної енергії $W_{ММ}$:

$$W_{ММ}(t) = P_{max}(t) \cdot t. \quad (1)$$

При реалізації більшості сучасних алгоритмів пошуку ТМП робоча точка СБ перебуватиме не в самій ТМП, а в її околиці,

або коливатиметься навколо неї. За рахунок цього у навантаженні недоотримуємо певну кількість електричної енергії. Крім того, при зміні координат ТМП і пошуку нової, в навантаженні також недоотримуємо енергію, кількість якої залежатиме від методу пошуку ТМП та способу його реалізації. Проаналізуємо від чого залежить кількість недоотриманої від СБ електричної енергії на прикладі двох найпростіших методів пошуку ТМП – методу холостого ходу та методу короткого замикання.

Відомо [3], що координата ТМП СБ за напругою перебуває у діапазоні $(0,7 \dots 0,88)$ від значення напруги холостого ходу $U_{ХХ}$ СБ. Мінімальне значення $k_{min} = 0,7$ відповідає мінімальній освітленості СБ і максимальній температурі. Максимальне значення $k_{max} = 0,88$ відповідає максимальній освітленості СБ і мінімальній температурі. При використанні методу холостого ходу реальну робочу точку (РТ) СБ k' обирають в діапазоні $k_{min} \dots k_{max}$. Лінеаризовані моделі кривих потужності, що відповідають описаному випадку зображено на рис. 2 у нормованих координатах:

$$U^* = U / U_{ХХ}; P^* = P / P_{max}. \quad (2)$$

Як видно з рис. 2 мінімальне нормоване значення потужності СБ P^*_{min} у точці k' є однаковим для двох кривих потужності з ТМП k_{min} і k_{max} . Для будь-якої кривої потужності, ТМП якої знаходиться у діапазоні $k_{min} \dots k_{max}$, нормоване значення потужності P^* буде перевищувати це значення $P^* > P^*_{min}$. Тому за умови використання методу холостого ходу для мінімізації недоотриманої енергії бажано працювати у точці k' . Значення k' визначають на основі моделі кривої потужності. У найпростішому випадку криву потужності можна задати двома прямими.

Перша пряма проходить через початок координат $(0,0)$ і ТМП $(k,1)$:

$$P^* = U^* / k. \quad (3)$$

Друга – через ТМП $(k,1)$ і точку $(1,0)$:

$$P^* = (1 - U^*) / (1 - k). \quad (4)$$

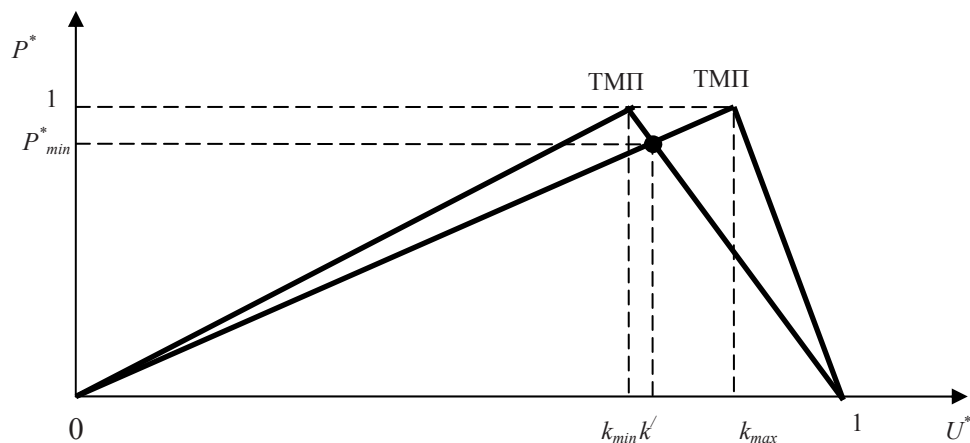


Рис. 2. Лінеаризовані моделі кривих потужності у нормованих координатах

Шукана робоча точка k' знаходиться на перетині спадної ділянки кривої потужності з ТМП k_{min} і зростаючої ділянки кривої потужності з ТМП k_{max} . Положення точки k' розраховують з системи:

$$\begin{cases} P^* = (1 - k') / (1 - k_{min}) \\ P^* = k' / k_{max} \end{cases} \Rightarrow (1 - k') / (1 - k_{min}) = k' / k_{max} \Rightarrow k' = k_{max} / (1 + k_{max} - k_{min}). \quad (5)$$

Нормоване значення потужності P^*_{min} у точці k' рівне:

$$P^*_{min} = 1 / (1 + k_{max} - k_{min}). \quad (6)$$

Для діапазону (0,7...0,88) положення робочої точки СБ бажано обирати $k' \approx 0,75$, при цьому мінімальне значення потужності $P^*_{min} \approx 0,85$.

Розраховане значення P^*_{min} є нижньою межею значення потужності. Для реальних кривих потужності, внаслідок їх нелінійності значення P^*_{min} буде більшим, а робоча точка k' дещо відрізняться від розрахованого значення.

Для уточнення положення точки k' і значення потужності P^*_{min} доцільно використовувати нелінійні моделі кривих потужності. Рівняння кривої потужності отримують з ВАХ СБ [4]:

$$I = n_1 I_\phi - n_1 I_0 \left(e^{\frac{q(U - RI)}{n_2 k T}} - 1 \right), \quad (7)$$

- де I, U – струм і напруга СБ,
- I_ϕ – 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, К,
- n_1 – кількість паралельно включених фотоелементів СБ,
- n_2 – кількість послідовно включених фотоелементів СБ,
- R – сумарний опір зовнішніх втрат СБ.

Рівняння (7) є трансцендентним відносно струму СБ I . Усунення трансцендентності можливе за умови $RI < n_2 k T / q$, тобто за режиму незначних втрат. За цієї умови, розклавши у ряд Тейлора складову $\text{Exp}(qRI / n_2 k T)$, отримаємо:

$$I = n_1 I_\phi - n_1 I_0 \left(e^{\frac{qU}{n_2 k T}} \left(1 - qRI / n_2 k T \right) - 1 \right), \quad (8)$$

після перетворень з рівняння (8) виразимо струм СБ I :

$$I = \frac{n_1 I_\phi - n_1 I_0 \left(e^{\frac{qU}{n_2 kT}} - 1 \right)}{1 + n_1 I_0 e^{\frac{qU}{n_2 kT}} \frac{qR}{n_2 kT}} \quad (9)$$

Після нормування ВАХ, $U^* = U / n_2 U_{XX}$, $I^* = I / n_1 I_{K3}$, $R^* = R n_1 I_{K3} / n_2 U_{XX}$ вона матиме такий вид:

$$I^* = \frac{1 - \frac{I_0}{I_{K3}} \left(e^{\frac{qU^* U_{XX}}{kT}} - 1 \right)}{1 + I_0 e^{\frac{qU^* U_{XX}}{kT}} \frac{qR^* U_{XX}}{kT I_{K3}}} \quad (10)$$

Домноживши рівняння (10) на нормоване значення напруги U^* і поділивши на потужність ТМП P_{max} , отримаємо вираз для кривої потужності у нормованих координатах $P^* = f(U^*)$:

$$P^* = \frac{U^*}{P_{max}} \frac{1 - \frac{I_0}{I_{K3}} \left(e^{\frac{qU^* U_{XX}}{kT}} - 1 \right)}{1 + I_0 e^{\frac{qU^* U_{XX}}{kT}} \frac{qR^* U_{XX}}{kT I_{K3}}} \quad (11)$$

На рис. 3 наведено криві потужності для температури $T = 293$ К, зворотного струму $I_0 = 15$ нА, струму короткого замикання $I_{K3} = 1$ А і трьох значень нормованого опору, які є типовими для систем електроживлення з СБ, $R^* = 0$, $R^* = 0,05$, $R^* = 0,1$.

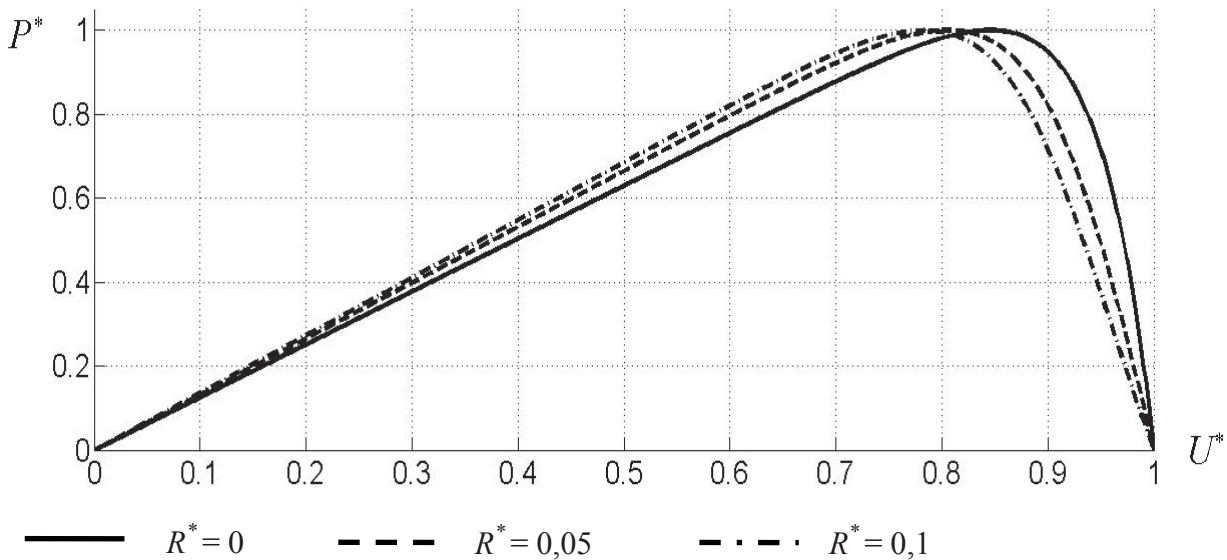


Рис. 3. Графіки кривих потужності за різних значень нормованого опору R^*

З рис. 3 видно, що зростаюча ділянка кривих потужності має майже лінійний характер, тому може бути заміщена лінійною функцією $P_{(1)}^*$, ділянка в околі ТМП і спадна ділянка можуть достатньо точно апроксимуватись параболічною функцією $P_{(2)}^*$. Головною вимогою до моделі кривої потужності є те, щоб за умови використання обчислювалась верхня межа втрат. Для цього крива потужності моделі повинна знаходитись нижче реальної кривої потужності. Моделювання кривої потужності почнемо з параболічної функції $P_{(2)}^*$. Задамо її у загальному виді:

$$P_{(2)}^* = -a_2 U^{*2} - a_1 U^* - a_0, \quad (12)$$

де a_2, a_2, a_0 – постійні коефіцієнти.

Коефіцієнти a_2, a_2, a_0 розраховують поетапно. Спочатку до формули (12) підставляють відоме нормованого значення напруги МПТ $U_{МП}^*$, за якого значення нормованої потужності рівне одиниці $P^*(U_{МП}^*) = 1$:

$$1 = -a_2 U_{МП}^{*2} - a_1 U_{МП}^* - a_0. \quad (13)$$

Друге рівняння складається за умови, що похідна у ТМП від функції кривої потужності рівна нулю:

$$-2a_2 U_{МП}^* - a_1 = 0. \quad (14)$$

Третє рівняння складають за умови, що потужність СБ за напруги холостого рівна нулю $P^*(I) = 0$.

$$0 = -a_2 - a_1 - a_0. \quad (15)$$

Вирішивши систему, складену з рівнянь (13)-(15) відносно коефіцієнтів a_2, a_2, a_0 , отримаємо:

$$\begin{cases} 1 = -a_2 U_{МП}^{*2} - a_1 U_{МП}^* - a_0; \\ -2a_2 U_{МП}^* - a_1 = 0; \\ 0 = -a_2 - a_1 - a_0. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = -2a_2 U_{МП}^*; \\ 1 = -a_2 U_{МП}^{*2} + 2a_2 U_{МП}^* - a_0; \\ 0 = -a_2 + 2a_2 U_{МП}^* - a_0. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_0 = a_2(2U_{МП}^* - 1); \\ 1 = -a_2 U_{МП}^{*2} + 2a_2 U_{МП}^* - a_0. \end{cases}$$

$$1 = -a_2 U_{МП}^{*2} + 2a_2 U_{МП}^* - a_2(2U_{МП}^* - 1)$$

$$a_2 = 1/(U_{МП}^{*2} - 2U_{МП}^* + 1) = 1/(U_{МП}^* - 1)^2; a_0 = (2U_{МП}^* - 1)/(U_{МП}^* - 1)^2; a_1 = -2U_{МП}^*/(U_{МП}^* - 1)^2. \quad (16)$$

На рис. 4 наведено моделі ділянки в околі точки ТМП і спадної ділянки кривих потужності, наведених на рис. 3.

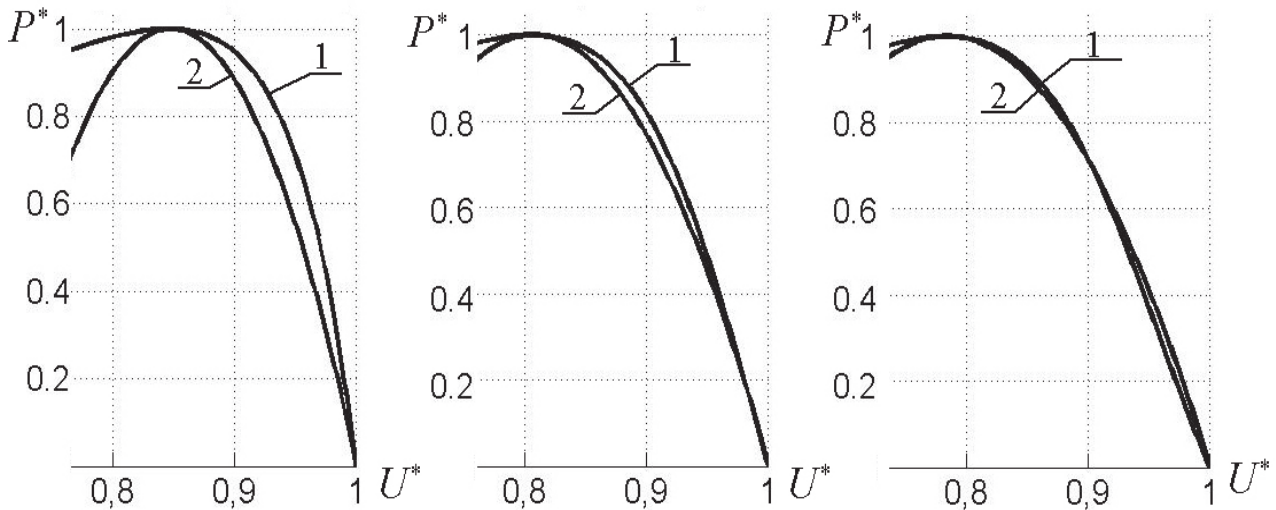


Рис. 4. Моделі кривої потужності в околі точки ТМП і спадної ділянки:

1- реальна крива потужності СБ; 2- модель кривої потужності

а) $R^* = 0$

б) $R^* = 0,05$

в) $R^* = 0,1$

З аналізу рис. 4 можна зробити висновки:

1. Моделювання ділянки в околі точки ТМП і спадної ділянки кривої потужності параболою значно збільшує точність розрахунків.

2. Для випадків $R^* = 0$ і $R^* = 0,05$ парабола знаходиться під реальною кривою потужності на всьому діапазоні. Для випадку $R^* = 0,1$ ця умова порушується лише біля точки холостого ходу. Але зважаючи на те, що для досліджень є цікавою ділянка в околі ТМП це припустимо.

Лінійна ділянка кривої потужності моделюється прямою, яка проходить через початок координат і є дотичною до параболи моделі. Для цього задамо пряму $P^* = b \cdot U^*$ і знайдемо умови дотичності цієї прямої до параболи – єдиний розв’язок рівняння:

$$bU^* = -a_2U^{*2} - a_1U^* - a_0. \quad (17)$$

Квадратне рівняння (17) має єдиний розв’язок, коли його дискримінант рівний нулю:

$$D = (a_1 + b)^2 - 4a_2a_0 = 0. \quad (18)$$

Звідки

$$b = \frac{-2a_1 \pm \sqrt{4a_1^2 - 4(a_1^2 - 4a_2a_0)}}{2} = -a_1 \pm 2\sqrt{4a_2a_0}. \quad (19)$$

Умові задовольняє менший з коренів формули (19). Виразимо його значення через параметр $U_{МП}^*$, використавши формули (16):

$$b = \frac{2U_{МП}^*}{(U_{МП}^* - 1)^2} - 2 \sqrt{\frac{1}{(U_{МП}^* - 1)^2} \frac{2U_{МП}^* - 1}{(U_{МП}^* - 1)^2}} = \frac{2}{(U_{МП}^* - 1)^2} (U_{МП}^* - \sqrt{2U_{МП}^* - 1}). \quad (20)$$

Знаючи значення параметра b розв’яжемо рівняння (17).

$$U^* = \frac{-(b + a_1)}{2a_2} = \sqrt{2U_{МП}^* - 1}. \quad (21)$$

Тобто в діапазоні $(\sqrt{2U_{МП}^* - 1}; 2U_{МП}^* - \sqrt{2U_{МП}^* - 1})$ втрати енергії у СБ є нехтовно малі.

Загальну модель кривої потужності СБ показано на рис. 5.

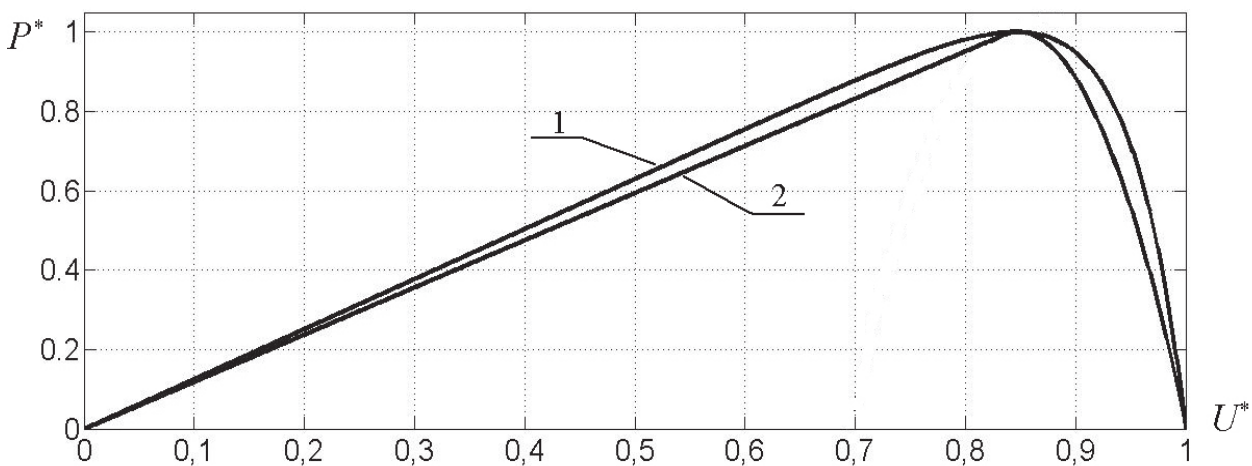


Рис. 5. Загальна модель СБ:
1 – реальна крива потужності СБ; 2 – модель кривої потужності

Вирішимо задачу знаходження точки в якій раціонально працювати, якщо задано можливий діапазон знаходження ТМП $k_{min}..k_{max}$. Для знаходження точки з мінімально можливими втратами шукається перетин зростаючої характеристики кривої потужності з ТМП k_{max} і спадної з ТМП k_{min} .

$$\frac{2U^*}{(k_{max} - 1)^2} (k_{max} - \sqrt{2k_{max} - 1}) = -\frac{U^{*2}}{(k_{min} - 1)^2} + \frac{2k_{min}U^*}{(k_{min} - 1)^2} - \frac{2k_{min} - 1}{(k_{min} - 1)^2}. \quad (22)$$

Підставивши ті ж значення, що і для лінійної моделі $k_{min} = 0,7$, $k_{max} = 0,88$, отримаємо:

$$11,111U^{*2} - 14,138U^* + 4.444 = 0. \quad (23)$$

Звідки $k' = U^* = 0,79$, $P^* = 0,90$.

Значення коефіцієнта k' і нормованого значення потужності P_{min}^* , отримані за допомогою лінійної і нелінійної моделей кривої потужності СБ було порівняно з реальним значенням коефіцієнтів. Отримані значення наведено у таблиці.

Таблиця

Значення коефіцієнта k' , отримані за допомогою моделей для діапазону $k=0,7..0,88$

Модель Параметр	Реальні значення	Лінійна модель	Похибка лінійної моделі	Нелінійна модель	Похибка нелінійної моделі
k'	0,78	0,75	3,8 %	0,79	1,3 %
P^*	0,93	0,85	8,6 %	0,90	3,2 %

За даними, наведеними у табл. 1, можна зробити висновок, що похибка розрахунку коефіцієнтів k' і P_{min}^* за допомогою нелінійної моделі кривої потужності СБ зменшується у 2–3 рази у порівнянні з лінійною моделлю.

Аналогічний аналіз може бути проведений для алгоритму пошуку ТМП СБ методом короткого замикання.

Висновки

1. При пошуку ТМП СБ методом холостого ходу, для зменшення кількості недоотриманої енергії бажано коректувати значення коефіцієнта k' у межах від k_{min} до k_{max} з урахуванням змін умов навколишнього середовища, однак це суттєво ускладнює систему керування.

2. При реалізації найпростіших систем пошуку ТМП СБ доцільно вибирати фіксоване значення k' , яке визначають з умови (5). При цьому в заданому діапазоні зміни умов навколишнього середовища недоотримана енергія не перевищуватиме значення $1-P_{min}^*$, де P_{min}^* розраховують за формулою (6).

Список використаної літератури

1. R. Faranda. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems // R. Faranda, S. Leva. Wseas transactions of power systems. 2008. Issue 6. Vol. 3. P. 446–455.
2. D. P. Holm. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed // D. P. Holm, M. E. Ropp Proc. Photovoltaic specialist conference. 2000. P. 1699–1702.
3. Є. В. Вербицький. Особливості пошуку точки максимальної потужності сонячної батареї методами холостого ходу і короткого замикання. // Є. В. Вербицький, В. Я. Ромашко Електроніка і зв'язок. – Київ, 2013, № 5, С. 13–18.
4. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. // Андреев В. М., Грихлес В. А., Румянцев В. Д. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.

References

1. R. Faranda, S. Leva. (2008) Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. Wseas transactions of power systems. Issue 6. Vol. 3. P. 446–455.
2. D. P. Holm, 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. P. 1699-1702.
3. Y. V. Verbiytskyi, V. Y. Romashko (2013). Search features of solar battery maximum power point by methods open and short circuits [Osoblyvosti poshuku tochky maksimalnoyi potuzhnosti sonyachnoyi batareyi metodamy holostogo hodu i korotkogo zamykannya]. Electronics and Communication. № 5, P. 13–18.
4. Andreev V. M., Grichles V. A., Rumyantsev V. D. (1989), Fotovoltaic transform of concentrating solar radiation [Fotoelektricheskoye preobrazovanie kontsentrivannoho solnechnoho izlucheniya]. L. Nauka, 310 p.

Поступила в редакцию 20.02 2016 г.