

УДК 621.383.51

І.М.Кирпатенко, канд.техн.наук, І.О.Кухарчук (Національний технічний ун-т України "КПІ", Київ)

Використання екстремальних регуляторів в енергосистемах на основі батарей сонячних фотоперетворювачів

У статті розглянуто математичні моделі систем "батарея фотоелектричних перетворювачів – активне навантаження", "батарея фотоелектричних перетворювачів – електрохімічний акумулятор". Запропоновано програми, що дозволяють оцінити ефективність застосування екстремальних регуляторів у таких системах.

В статье рассмотрены математические модели систем "батарея фотоэлектрических преобразователей – активная нагрузка", "батарея фотоэлектрических преобразователей – электрохимический аккумулятор". Предложены программы, позволяющие оценить эффективность применения экстремальных регуляторов в таких системах.

Енергетичні системи на основі батарей фотоелектричних перетворювачів (БФП) широко використовуються для енергозабезпечення автономних об'єктів. Окрім космічної галузі, де БФП є поза конкуренцією, вони використовуються для забезпечення енергією таких автономних споживачів, як радіоретранслятори, автоматичні метеорологічні станції, станції катодного захисту, а також для живлення засобів навігаційного обладнання.

Використання БФП для живлення автономних об'єктів може мати відчутний економічний ефект. Цей ефект полягатиме в тому, що зникне необхідність прокладки ліній електропередачі до об'єктів. БФП можуть замінити в автономних системах дизель-генератори, використання яких супроводжується шкідливим впливом на довкілля, а також значними витратами на закупівлю і транспортування палива. У зв'язку з цим питання дослідження ефективності енергосистем на основі БФП має суттєву актуальність.

Математичні моделі систем електроживлення на основі батарей сонячних фотоперетворювачів.

1. Система "БФП – активне навантаження".

У найпростішому випадку система електроживлення складається з БФП, до якої підключено активне навантаження (рис. 1). Активним навантаженням може бути, наприклад, електролізер для отримання водню, двигун постійного струму в режимі, що встановився, тощо.

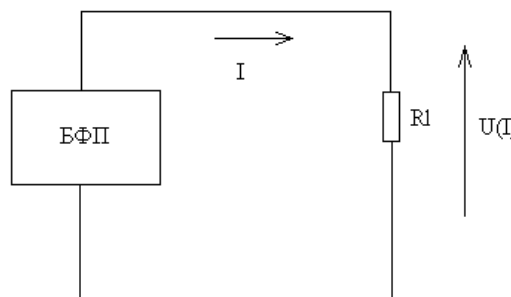


Рис. 1. Система електроживлення з БФП і активним навантаженням.

Для математичного описання такої системи необхідна математична модель вольт-амперної характеристики (ВАХ) БФП. Скористаємось апроксимацією ВАХ БФП, наведеною в [1]:

$$I_l = I_{sc} \left\{ 1 - C_3 \left[\exp(C_4 \cdot V^m) - 1 \right] \right\}; \quad (1)$$

$$m = \frac{\ln \frac{C_5}{C_6}}{\ln \frac{V_{opt}}{V_{oc}}}; \quad C_4 = \frac{C_6}{V_{oc}^m}; \quad C_5 = \ln \left\{ \frac{I_{sc} (1 + C_3) - I_{opt}}{C_3 \cdot I_{sc}} \right\};$$

$$C_6 = \ln \left(\frac{1 + C_3}{C_3} \right); \quad C_3 = 0,01175,$$

де V_{oc} – напруга холостого ходу БФП; I_{sc} – струм короткого замикання БФП; V_{opt} – напруга, що відповідає напрузі точки максимальної потужності; I_{opt} – струм, що відповідає струму точки максимальної потужності.

Крива, що апроксимує ВАХ БФП, наведена на рис. 2.

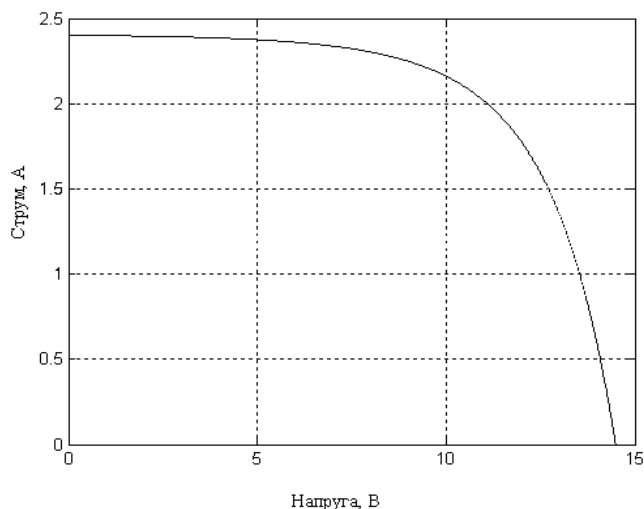


Рис. 2. Апроксимація ВАХ БФП.

Для того, щоб знайти робочу точку системи, необхідно розв'язати рівняння (1), підставивши замість $I_l - \frac{V}{R_l}$, де R_l – опір навантаження.

$$I_l - \frac{V}{R_l}$$

Рівняння (1) неможливо розв'язати в аналітичному вигляді. Для розв'язання цього рівняння чисельним методом була написана програма в програмному середовищі MATLAB.

Результат розв'язання рівняння (1) з наступними вихідними даними: $V_{oc} = 14,5$ В; $I_{sc} = 2,4$ А; $V_{opt} = 11$ В; $I_{opt} = 2,02$ А; $R_l = 10$ Ом.

представлено нижче:

- струм у робочій точці – 1,2329 А;
- потужність на навантаженні – 15,2001 Вт;
- максимально можлива потужність – 18,1800 Вт.

Як видно з отриманих результатів, потужність на навантаженні менше максимально можливої потужності на $\frac{18,18 - 15,2}{18,18} \cdot 100 = 16,4\%$.

В програмному середовищі MATLAB була написана програма для побудови графіка залежності потужності, що віддається БФП у навантаження, від величини навантаження. Цей графік наведено на рис. 3.

Як видно з графіка, залежність потужності на навантаженні від величини навантаження має яскраво виражений екстремум.

Для збільшення ефективності систем електроживлення на основі БФП використовують екстремальні регулятори, які забезпечують віддачу в навантаження максимальної потужності незалежно від величини навантаження і зовнішніх умов. Такі екстремальні регулятори побудовані на основі напівпровідникових перетворювачів постійної напруги [2].

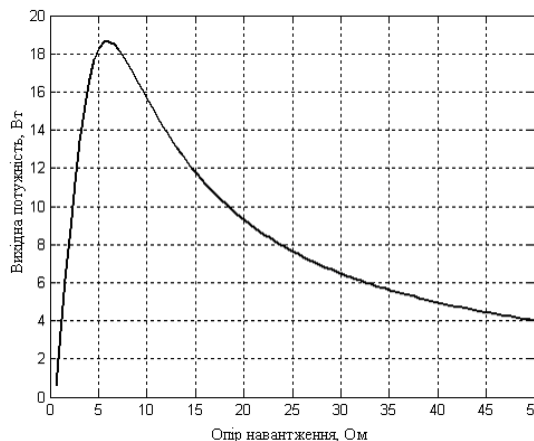


Рис. 3. Залежність потужності, яку віддає БФП у навантаження, від величини навантаження.

Екстремальний регулятор, як і будь-який пристрій, має ККД, менший від 1. Для сучасних регуляторів на основі напівпровідникових перетворювачів постійної напруги ККД становить 75-85%, а за умови використання активних демпферів силових напівпровідникових ключів, наприклад, таких, який описано в [3], досягає значення 90-95%. У зв'язку з наявністю втрат в екстремальному регуляторі його використання може не дати очікуваного ефекту, або навіть погіршити енергетичні характеристики системи. Для визначення доцільності використання екстремальних регуляторів у системі "БФП – активне навантаження" була написана програма в програмному середовищі MATLAB.

Вхідними аргументами програми є параметри БФП: I_{opt} , I_{sc} , V_{oc} , V_{opt} , похибка обчислень – ϵ , ККД регулятора – η та опір навантаження R_l . Програма повертає стрінг "Використання регулятора ефективне" у випадку ефективності використання регулятора, або "Використання регулятора неефективне" – у випадку, коли втрати у регуляторі дорівнюють або більші за можливий корисний ефект. Лістинг програми наведено на рис. 4.

```

function f=Ir5(Iopt,Isc,Voc,Vopt,Rl,eps,k)
C6=4.46;
C3=0.01175;
C5=log((1.01175*Isc-Iopt)/(0.01175*Isc));
m=(log(C5/4.46))/(log(Vopt/Voc));
C4=4.46/(Voc)^m;
right=Isc;
left=0;
while (right-left)>eps
center=(right+left)/2;
if Isc*(1-C3*(exp(C4*(Rl*center)^m)-1))-center==0
break
end
if (Isc*(1-C3*(exp(C4*(Rl*left)^m)-1))-left)*(Isc*(1-3*(exp(C4*(Rl*center)^m)-1))-center)<0
right=center;
else
left=center;
end
end
Output_power=Rl*center^2;
Max_power=Iopt*Vopt;
Output_power_with_MPP=Max_power*k;
if Output_power_with_MPP > Output_power
disp('Використання регулятора ефективне')
else
disp('Використання регулятора неефективне')
end
end
    
```

Рис. 4. Лістинг програми для визначення ефективності використання екстремального регулятора в системі "БФП – активне навантаження".

2. Система "БФП – електрохімічний акумулятор".

У більшості випадків в енергосистемах на основі БФП у якості буферного джерела енергії використовують електрохімічний акумулятор, який би забезпечував електроживлення споживачів у періоди відсутності або недостатньої інтенсивності сонячної радіації. Через те, що електрохімічний акумулятор має низький опір для постійного струму, можна розглядати тільки процес зарядження акумулятора від БФП, нехтуючи впливом навантаження. Систему електроживлення, що складається з БФП, активного навантаження та електрохімічного акумулятора, показано на рис. 5.

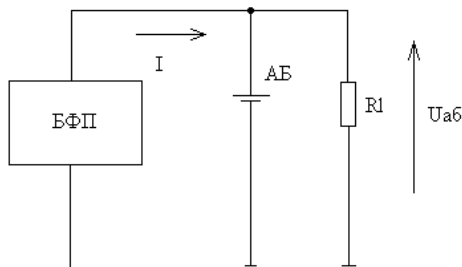


Рис. 5. Система електроживлення на основі БФП та електрохімічних акумуляторів.

Для побудови математичної моделі системи "БФП – електрохімічний акумулятор" використаємо апроксимацію зарядних характеристик акумулятора, яка наведена в [2]:

$$V = V_0 + a \cdot Q \quad (12B \leq V \leq 14,5B), \quad (2)$$

де Q – заряд акумулятора на даний момент часу; V – напруга на акумуляторі, В; V_0 – напруга розрядженого акумулятора, В; a – коефіцієнт пропорційності, який визначається як $a = \frac{\Delta V}{\Delta Q}$, Ом/год.

Використовуючи апроксимацію (1) і апроксимацію (2), запишемо диференціальне рівняння зарядження електрохімічного акумулятора від сонячної батареї:

$$\frac{dQ}{dt} = I_{sc} \left\{ 1 - C_3 \left[\exp(C_4(V_0 + a \cdot Q)^m) - 1 \right] \right\}. \quad (3)$$

Рівняння (3) нелінійне і досить складне, тому для його чисельного розв'язання була написана програма в програмному середовищі MATLAB.

Графік залежності величини заряду акумулятора від часу зарядження за наступних параметрів

БФП і акумулятора: $V_{oc} = 14,5 \text{ В}; I_{sc} = 2,4 \text{ А}; V_{opt} = 11 \text{ В}; I_{opt} = 2,02 \text{ А}; a = 0,21 \text{ Ом/год}$ наведено на рис. 6.

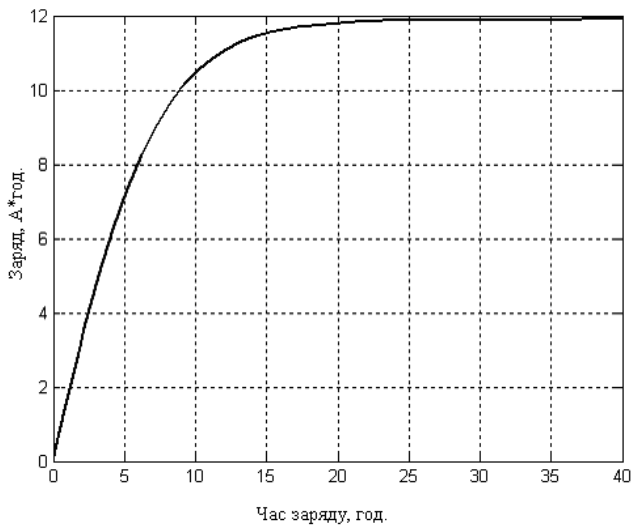


Рис. 6. Графік залежності величини заряду акумулятора від часу зарядження.

```
function F=Irl(t,Q)
F=[2.4*(1-0.0118*(exp(0.0313*((12+0.21*Q)^1.8539))-1)];
[T,Q]=ode45('Irl',[0 40],0);
U=12;
i=1;
q=0;
D=zeros(size(Q));
k=size(Q);
s=k(1);
for i=1:1:s
if q<14.5
q=U+0.21*Q(i);
D(i)=Q(i);
else
D(i)=0;
end
end
L=max(D)
G=0;
for i=1:1:s
if G<D(i)
G=D(i);
i=i+1;
end
end
t=T(i-1);
Q=(-12+sqrt(144+4*0.21*t*18.18*0.8))/(2*0.21)
if Q>L
disp('Використання регулятора ефективне')
else
disp('Використання регулятора неефективне')
end
```

Рис. 7. Лістинг програми для визначення ефективності використання екстремального регулятора в системі "БФП –електрохімічний акумулятор".

З графіка на рис. 6 видно, що зарядження акумулятора від БФП відбувається досить пові-

льно: за 25 годин зарядження заряд акумулятора становитиме 12 А*год. Це еквівалентно 25-годинному зарядженню акумулятора від джерела постійного струму потужністю не більше 7 Вт. Максимальна потужність БФП у нашому випадку складає 18 Вт.

Для прискорення зарядження акумулятора від БФП також використовують екстремальні регулятори. Але і в цьому випадку ефект прискорення зарядження може бути компенсований втратами у регуляторі.

Для визначення ефективності використання екстремальних регуляторів у випадку роботи БФП на зарядження акумулятора була написана програма в програмному середовищі MATLAB. Вхідними даними програми є параметри БФП, акумулятора і ККД регулятора. Програма повертає стрінг "Використання регулятора ефективне" у випадку ефективності використання регулятора, або "Використання регулятора неефективне" у випадку, коли втрати у регуляторі нейтралізують ефект прискорення зарядження. Лістинг програми наведено на рис. 7.

Висновки. Використання екстремальних регуляторів у системах електроживлення на основі БФП не завжди є ефективним. Іноді використання регуляторів може мати негативні наслідки через наявність втрат у регуляторі. Для визначення ефективності використання екстремальних регуляторів були створені програми, де вхідними величинами є параметри БФП та навантаження. Використання таких програм при проектуванні систем електроживлення на основі БФП дозволить оптимізувати енергетичні та вартісні показники систем електроживлення.

1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. Пер. с англ. / Под. ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1983 г. – 358 с.
2. Курпатенко І.М. Методи і засоби раціонального перетворення та акумулявання енергії Сонця та вітру в автономних енергосистемах. Дис... канд. техн. наук 05.14.08. – К., 2003. – 176 с.
3. Антипенко Р.В., Курпатенко І.М., Кухарчук І.О., Мовчанок А.В., Фесіч В.П. Активний демпфер із забезпеченням перемикання ключа при нульовій напрузі / Вісник НТУУ "КПІ" Радіотехніка, радіоапаратобудування. – Вип.37. – К., 2008 р. – С. 89.