

УДК 620.91+621.382+697.329+004.942

О.Ю.Гаєвський, докт.физ.-мат.наук, **М.О.Врещ**, **О.В.Мельник** (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Аналіз ефекту затінення фотоелектричних модулів у послідовно-паралельному з'єднанні

Запропоновано схему розрахунку вольт-амперних характеристик (ВАХ) послідовно-паралельних з'єднань фотоелектричних модулів (ФМ), що працюють в умовах локально-неоднорідної радіації. Вихідними даними, крім інтенсивності сонячної радіації, є параметри ФМ і шунтувальних діодів. Даний розрахунок може бути застосований для аналізу вольт-амперних і потужнісних характеристик фотоелектричної станції з різним розподілом затінених ФМ.

Предложена схема расчета вольт-амперных характеристик (ВАХ) последовательно-паралельных соединений фотоэлектрических модулей (ФМ), работающих в условиях локально-неоднородной радиации. Исходными данными, помимо интенсивности солнечной радиации, являются параметры ФМ и шунтирующих диодов. Данный расчет может быть применен для анализа вольт-амперных и мощностных характеристик фотоэлектрической станции с различным распределением затененных ФМ.

Для ефективного використання фотовольтаїчних систем – як автономних джерел електричної енергії, так і постачальників енергії у мережі централізованого електропостачання – необхідне оптимальне автоматичне управління режимами роботи фотоелектричних модулів. Це можливо лише при врахуванні вольт-амперних та потужнісних характеристик ФМ, які, як відомо, мають нелінійний характер [1]. Задача управління режимом ФМ ускладнюється, коли модулі фотоелектричної станції (ФЕС) мають неузгоджені параметри, а також, коли вони працюють в умовах неоднорідної падаючої сонячної радіації. Наслідком такої неузгодженості є те, що при з'єднанні модулів у послідовні серії (стрінги – від англ. *string*) потужність, яка видається кожним модулем, виявляється меншою від номінальної потужності окремо взятого модуля [2]. Неузгодженість характеристик ФМ сильніше проявляється у великих системах, ніж у малих системах із незалежними модулями, які дозволяють реалізувати автономну оптимізацію робочої напруги.

Правильне розміщення ФМ, при якому мінімізується затінення, дозволяє збільшити робочу потужність ФЕС. Однак, часткового затінення неможливо уникнути при розміщенні модулів на місцевості з нерівним ландшафтом, а також у містах і передмістях, на дахах та стінах будинків. Досвід показує, що навіть незначне затінення може

привести до деградації ВАХ та значного зниження потужності ФЕС. Із цього випливає, що необхідна розробка систем, толерантних до затінення, у яких відслідковується зміщення точки максимуму потужності зі зміною локальних умов сонячної радіації.

У даній роботі вплив затінення на робочі характеристики ФМ досліджувався методами комп'ютерного моделювання та порівнянням розрахункових даних із експериментом. Виміри проводилися для різних схем підключення модулів типу SEM 70 (виробник "S. E. Project", Італія), кожен із яких набраний із 36 фотовольтаїчних комірок з двома шунтувальними (*bypass* – обвідними) діодами. Щільність потужності сонячного випромінювання контролювалася на рівні $S = 950 \text{ Вт/м}^2$ для відкритого і $S = 70 \text{ Вт/м}^2$ – для затіненого ФМ.

Можна показати, що коли всі комірки фотомодуля ідентичні і працюють в однакових умовах, зв'язок між струмом I та напругою на навантаженні U дається нелінійним рівнянням виду:

$$I = I_{ph} - \frac{U + IR_s}{R_p} - I_{0pn} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{N_c A_{pn} k T_{pn}} \right) - 1 \right] + I_{0bd} \left[\exp \left(- \frac{qU}{2 A_{bd} k T_{bd}} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

де I_{0pn} , I_{0m} , T_{pn} , T_{bd} і A_{pn} , A_{bd} – струми зворотнього насичення, температури і коефіцієнти неідеальності діодів D_{pn} (pn – перехід) і D_{bd} (bypass) відповідно; N_c – число комірок у панелі ФМ; k – стала Больцмана; q – заряд електрона. В даній роботі у якості модельної кривої, яка описує ВАХ і одержується розв’язанням рівняння (1), була взята 6-параметрична функція виду [3]:

$$I = a_0 - a_1 U - a_2 \left[\exp(a_3 U) - 1 \right] + a_4 \left[\exp(-a_5 U) - 1 \right], \quad (2)$$

яка виходить із рівняння (1), якщо врахувати нерівності $I_{ph} \gg I_{0pn}$ та $R_p \gg R_s$, які зазвичай виконуються, а також нерівність $U \gg IR_s$, яка справедлива при помітних значеннях U і автоматично виконується при робочих напругах ФМ поблизу точки максимуму потужності.

Моделювання та експеримент проводились у кілька етапів:

1. Вимірювання ВАХ окремого модуля в умовах контрольованої дворівневої потужності випромінювання: $S = 950 \text{ Вт/м}^2$ та $S = 70 \text{ Вт/м}^2$ (затінення). Визначення характеристик освітленого та затіненого модулів було виконано на основі розробленої 6-параметричної моделі [3] у рамках методу нелінійної багатовимірної оптимізації Левенберга-Марквардта [4].

2. Вимірювання ВАХ мінімальної конфігурації фотомодулів, у якій проявляється ефект часткового затінення одного зі стрінгів. Така конфігурація являє собою паралельне з’єднання двох ланцюгів по два модулі у кожному, причому один із модулів затінений (рис. 1а). Результати розрахунку ВАХ мінімальної конфігурації з використанням параметрів, отриманих раніше за допомогою багатовимірної оптимізації, та порівняння їх із експериментом показані на рис. 2.

3. Моделювання систем із числом модулів, більшим за 4 (рис. 1б). Для цього було створено програмний додаток на мові C++, який дозволяє задавати електричну схему з’єднань, тобто кількість ФМ у серії та число серій, підключених до

загального інвертора. Результатом таких розрахунків є графіки $I(U)$ та залежності потужності $P(U)$ на навантаженні, які відображаються у головному вікні програми (рис. 3).

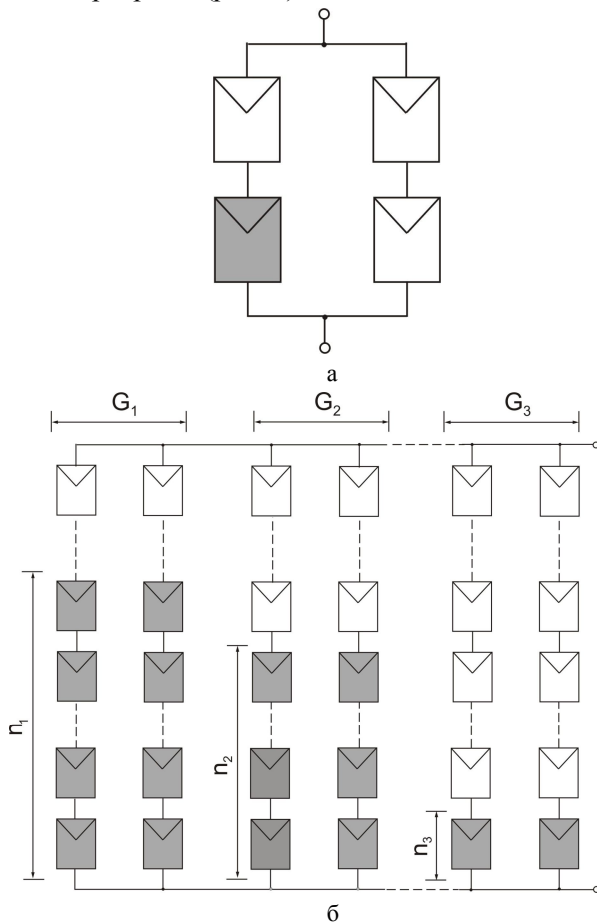


Рис. 1. Конфігурації модулів, які моделюються:

- а – мінімальна конфігурація з 4 ФМ, яка демонструє спільну роботу незатіненої та частково затіненої серії;
- б – загальна схема затінення ФЕС у додатку на C++.

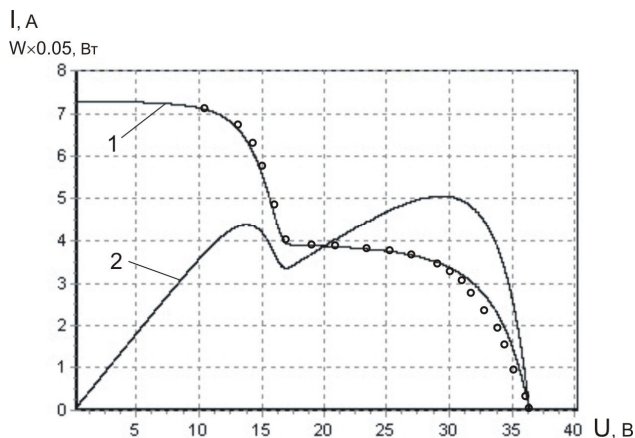


Рис. 2. Розрахункові залежності $I(U)$ (крива 1) та $P(U)$ (крива 2), а також експериментальні дані (○) для конфігурації з рис. 1а.

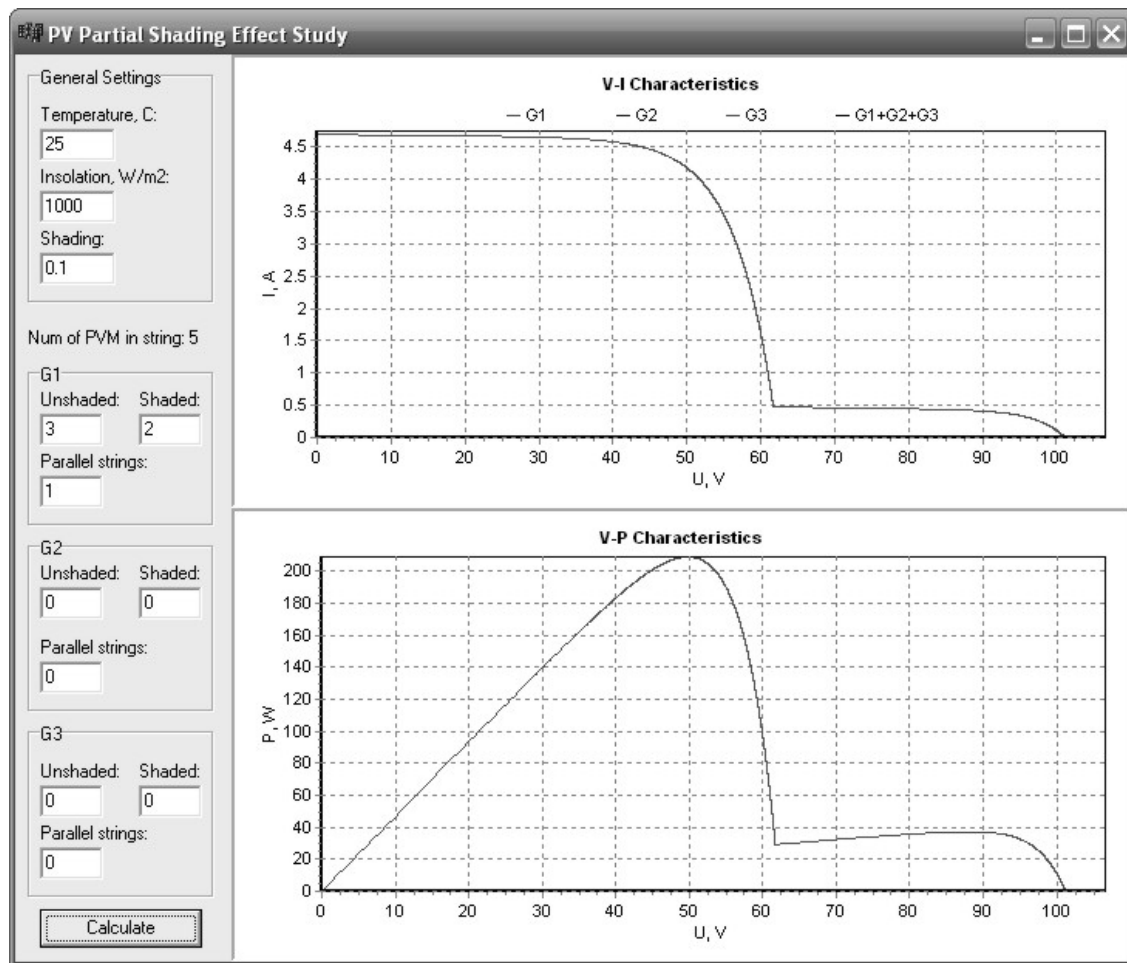


Рис. 3. Вікно програми для моделювання характеристик різних конфігурацій затінених та освітлених модулів.

Виконані вимірювання та розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

1. У залежності від конфігурації затінення модулів ФЕС (рис. 16) на кривій $P(U)$ можуть з'являтися два і більше локальних максимумів. Це ускладнює відслідковування (трекінг) точки максимальної потужності та ставить під сумнів можливість застосування багатьох методів МРРТ [5, 6], які розраховані на роботу в умовах однорідної освітленості.

2. Розроблена в [3] 6-параметрична модель може бути застосована для аналізу ВАХ ФЕС із різним розподілом затінених ФМ. Для адаптації моделі до конкретної ФЕС достатньо експериментальних даних про ВАХ окремого модуля.

3. Для розрахунку загальної ВАХ за допомогою створеної програми необхідно знати параметри окремого модуля в умовах різної сонячної

радіації. Запропонована схема розрахунку характеристик паралельного з'єднання стрінгів може бути масштабована на систему із довільним числом модулів та будь-якою конфігурацією затінення.

1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
2. Bishop W. Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar Energy* (1988), 25. – P. 73–89.
3. Гаевский А.Ю. XII Міжнародна науково-практична конференція "Відновлювана енергетика XXI століття". – АР Крим, 2011. – 487 с.
4. Демиденко Е.З. Оптимизация и регрессия. – М.: Наука. 1989. – 296 с.
5. Esham T., Chapman P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Trans. on Energy Conversion* (2007), 22. – P. 439–449.
6. Ariyur K.B., Krstic M. Real-time optimization by extremum-seeking control. – New Jersey: Willy&Sons, 2003. – 252 p.