

Список литературы

1. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наук. думка, 2002. – 172 с.
2. Семеновко, Е.В. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных водоугольных суспензий / Е.В. Семеновко, А.А. Круть // Форум горняков – 2011: Материалы междунар. конф., октябрь, 2011 г. – Д.: НГУ, 2011. – С. 205 – 211.
3. Мурко, В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.07 / В.И. Мурко. – М., 1999. – 48 с.
4. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семеновко, В.Д. Шурыгин. – Д.: Сич, 2001. – 224 с.
5. Сергеев И.В. Новые направления совершенствования способов дегазации угольных пластов / И.В. Сергеев, В.Г. Рыжков, Р.Г. Багдасаров // Проблемы горного дела. – М.: Недра, 1974. – С. 34–40.
6. Васильев Л.М. Научные основы процесса и создание технических средств нагнетания жидкости в угольные пласты для борьбы с вредными явлениями в шахтах : дис. доктора техн. наук: 05.15.11; 05.05.06 / Васильев Леонид Михайлович. – Д., 1985. – 307 с.
7. Родин А.В. Обоснование параметров и разработка погружного кавитационного генератора импульсов давления, обеспечивающего повышение эффективности предварительного увлажнения угольных пластов : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Родин А.В. – Днепропетровск, 1983. – 254 с.
8. Обоснование параметров и режимов работы гидротранспортных систем горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семеновко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
9. Свитлый, Ю.Г. Расчет измельчаемости угля при гидротранспорте / Ю.Г. Свитлый // Гидравлическая добыча угля. – 1966. – № 11. – С. 8 – 11.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Блюссом Б.А.

УДК 621.311.243

С.В. Машурка

(Україна, Дніпропетровськ, Державний ВНЗ "Національний гірничий університет")

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФОТОГАЛЬВАНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Зростання населення Землі та рівня енергоспоживання за рахунок розвитку промисловості та особистих потреб сучасної людини, скорочення запасів традиційних енергоресурсів призвело до розповсюдження альтернативних або відновлювальних джерел енергії, до яких відноситься і сонячна енергетика. Використання сонячних батарей з ефективністю 10 % перетворення сонячної енергії на електричну може 1000 разів задовольнити потреби електроенергії планети, при чому використання 0,4 % твердої поверхні Землі повністю забезпечить людство енергією [1]. Нова енергетична стратегія України спрямована на розвиток та збільшення використання нетрадиційних джерел енергії та доведення загальної потужності електростанцій до 2,1 ГВт. Порівняно з традиційними енергоресурсами сонячні панелі мають такі переваги: джерело енергії є невичерпним та загально доступним, відсутні забруднювальні відходи при роботі, низькі експлуатаційні витрати, робота при температурі оточуючого середовища, модульність установки, можливість швидкої установки на нових та існуючих спорудах; крім того вони мають деякі недоліки, які значною мірою сповільнюють їх широке використання: розсіяне джерело енергії, великі витрати на встановлення модулів, непередбачувана часова або денна вихідна потужність, відсутність економічно ефективного способу накопичення виробленої енергії. Тому дослідження ефективності роботи сонячних електростанцій в умовах України у цілому та Дніпропетровської області є актуальним завданням для реалізації програми розвитку нетрадиційної електроенергетики.

Метою роботи є розробка математичної моделі фотогальванічного елемента та дослідження його роботи в умовах використання на території Дніпропетровської області.

Через те, що один фотогальванічний елемент виробляє струм рівня кількох ампер при напрузі у декілька мілівольт, то для досягнення заданих напруги та струму цілої панелі сонячні генератори складаються з багатьох елементів, що з'єднуються послідовно та паралельно. За таких умов номінальна вольт-амперна характеристика (ВАХ) може бути отримана шляхом складання величин напруг всіх дискретних елементів, з'єднаних послідовно, та складанням струмів усіх елементів, з'єднаних паралельно. Проте такий підхід можливий лише тоді, коли всі фотогальванічні елементи працюють за однакових умов, особливо це стосується освітленості та температури, що на практиці не виконується внаслідок розбіжності технічних характеристик елементів одного типу та можливого потрапляння їх частин або повної поверхні у тінь через забруднення або тінь від рослин, будинків тощо. Нерівномірність умов ро-

боти складових сонячного генератора може призвести до значного зниження енергії, що виробляється. У цілому вихідна ВАХ сонячного генератора через зазначені фактори не відповідає кривій навантаження, тому для забезпечення роботи генератора з максимальною ефективністю він підключається до силового перетворювача, який виконує необхідні перетворення вихідних напруги та струму навантаження.

Для дослідження роботи сонячного генератора у різних режимах необхідно скласти його математичну модель, параметри якої можуть бути взяті з паспортних даних постачальників фотогальванічних елементів. Існують різні способи падання дискретного елемента, які дозволяють у спрощеному вигляді врахувати втрати енергії у ньому та мають неявну взаємну залежність параметрів елементів, що призводить до ускладнення процесу розв'язання задачі моделювання.

Схема заміщення фотогальванічного елемента (рис. 1) являє собою джерело струму, який відповідає фотоструму і залежить від характеристик напівпровідникового матеріалу, з якого вироблений елемент, рівня освітлення та температури [2]:

$$I_{\Phi} = I_{\Phi\text{СУТ}} \frac{G}{G_{\text{СУТ}}} (1 + \alpha_1(T - T_{\text{СУТ}})),$$

де I_{Φ} – фотострум фотогальванічного елемента, А; $I_{\Phi\text{СУТ}}$ – фотострум при стандартних умовах тестування, А; G – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²; $G_{\text{СУТ}}$ – інтенсивність сонячного випромінювання при стандартних умовах тестування (СУТ або STC), Вт/м²; $\alpha_1 = dI/dT|_{\text{СУТ}}$ – температурний коефіцієнт струму.

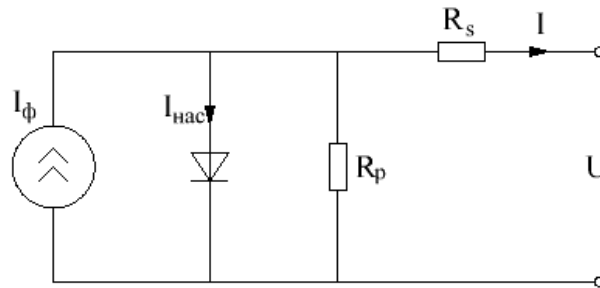


Рис. 1. Схема заміщення фотогальванічного елемента з урахуванням втрат енергії

Струм діода (див. рис. 1) враховує фізичні процеси, які відбуваються у кремнієвому р-п переході, і визначається як

$$I_d = I_{\text{нас}} \left(e^{\frac{V}{\eta V_t}} - 1 \right),$$

де $I_{\text{нас}}$ – струм насичення діода, $I_{\text{нас}}$ – зворотній струм насичення діода:

$$I_{\text{нас}} = C \cdot T^3 \cdot e^{\left(\frac{-E_{\text{енз}}}{kT} \right)},$$

V – напруга фотогальванічного елемента, В; $V_t = kT/q$ – термічна напруга, В; k – стала Больцмана; q – заряд електрона, Кл; $E_{\text{енз}}$ – ширина енергетичної зони матеріалу напівпровідника, Дж; C – температурний коефіцієнт.

Активні опори R_s та R_p додаються до схеми заміщення з метою врахування внутрішнього та контактних опорів елемента, а також струму витоку відповідно. Величина послідовно приєднаного опору впливає на нахил ВАХ у зоні великих напруг, що наближені до напруги холостого ходу, причому зі збільшенням величини опору зменшується нахил кривої та зростають втрати енергії у фотогальванічному елементі. З іншого боку, паралельно приєднаний опір впливає на нахил кривої в зоні струму короткого замикання, зі зменшенням якого збільшується струм, що проходить через опір та віднімається від вихідного струму елемента. Значення цих опорів безпосередньо впливають на ефективність роботи фотогальванічного елемента, яка визначається коефіцієнтом заповнення

$$FF = \frac{U_{\text{МП}} \cdot I_{\text{МП}}}{U_{\text{ХХ}} \cdot I_{\text{КЗ}}},$$

де $U_{\text{МП}}$, $I_{\text{МП}}$ – вихідні напруга та струм фотогальванічного елемента, що відповідають моменту роботи елемента з максимальною вихідною потужністю.

Вихідний струм сонячної батареї, схема заміщення якої наведена на рис. 1, згідно з роботою [2] розраховується як

$$I = I_{\Phi} - I_{\text{нас}} \left(e^{\frac{V}{\eta V_t}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p}.$$

Як бачимо, вираз для визначення струму являє собою нелінійну неявну функцію, тому що ні струм, ні напруга не можуть бути виражені в явному вигляді, проте таке описання підходить для дослідження процесів, що відбуваються у сонячних модулях, панелях, полосах або цілих полях.

Перейдемо до розрахунку параметрів схеми заміщення за рівняннями, що описують процеси фотогальванічного елемента. У паспортних даних наводяться лише ті параметри, що відповідають стандартним умовам тестування:

- напруга холостого ходу $U_{xx \text{ СУТ}}$;
- температурний коефіцієнт напруги холостого ходу $\alpha_U = dU_{xx}/dT|_{\text{СУТ}}$;
- струм короткого замикання $I_{кз \text{ СУТ}}$;
- температурний коефіцієнт струму короткого замикання $\alpha_I = dI_{кз}/dT|_{\text{СУТ}}$;
- вихідні напруга та струм фотогальванічного елемента, що відповідають точці роботи з максимальною вихідною потужністю $U_{\text{МП}}, I_{\text{МП}}$.

Невідомими параметрами залишаються фотострум та струм насичення діода, коефіцієнт ідеальності діода та активні опори. Для розрахунку фотоструму не вистачає його значення за стандартних умов тестування, яке можна прийняти таким, що дорівнює струму короткого замикання. Для визначення струму насичення діода не вистачає температурного коефіцієнта C , який можна розрахувати як

$$C = \frac{I_{\text{нас СУТ}}}{T_{\text{СУТ}}^3 \cdot e^{\frac{-E_{\text{енз}}}{kT_{\text{СУТ}}}},$$

де струм насичення за стандартних умов тестування [2]

$$I_{\text{нас СУТ}} = I_{\Phi \text{ СУТ}} \cdot e^{-\frac{U_{xx \text{ СУТ}}}{\eta n_s V_t \text{ СУТ}}}.$$

Коефіцієнт ідеальності діода можна визначити за таким виразом

$$\eta = \frac{\alpha_U - \frac{U_{xx \text{ СУТ}}}{T_{\text{СУТ}}}}{n_s U_t \text{ СУТ} \left(\frac{\alpha_I}{I_{\Phi \text{ СУТ}}} - \frac{3}{T_{\text{СУТ}}} - \frac{E_{\text{енз}}}{kT_{\text{СУТ}}^2} \right)}.$$

Для розрахунку значень активних опорів необхідно розв'язати систему двох нелінійних рівнянь [2]:

$$\begin{cases} R_p = \frac{U_{\text{МП СУТ}} + I_{\text{МП СУТ}} R_s}{I_{\Phi} - I_{\text{МП СУТ}} - I_{\text{нас СУТ}} \left(e^{\frac{U_{\text{МП СУТ}} + I_{\text{МП СУТ}} R_s}{\eta U_t \text{ СУТ}}} - 1 \right)}; \\ I_{\text{МП СУТ}} - U_{\text{МП СУТ}} \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_p} + \frac{R_s I_{\text{нас СУТ}}}{\eta U_t \text{ СУТ}} e^{\frac{U_{\text{МП СУТ}} + I_{\text{МП СУТ}} R_s}{\eta U_t \text{ СУТ}}}} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для розрахунку струму фотогальванічного елемента та активних опорів його схеми заміщення вводиться параметр χ , який має такий вигляд:

$$\chi = \frac{U_{\text{МП СУТ}} + R_s I_{\text{МП СУТ}}}{\eta U_t \text{ СУТ}},$$

тоді значення активних опорів можна розрахувати за такими рівняннями:

$$R_s = \frac{\chi \eta U_t \text{ СУТ} - U_{\text{МП СУТ}}}{I_{\text{МП СУТ}}}; \quad (2)$$

$$R_p = \frac{\chi \eta U_t \text{ СУТ}}{I_{\Phi} - I_{\text{МП СУТ}} - I_{\text{нас СУТ}} (e^{\chi} - 1)}. \quad (3)$$

Після підстановки цих рівнянь у формулу (1) та нехтуючи складовою R_s^2 , запишемо

$$2U_{\text{МП СУТ}}(I_{\text{МП СУТ}} - I_{\phi} - I_{\text{нас СУТ}}) + (I_{\phi} + I_{\text{нас СУТ}})\chi\eta U_{t \text{ СУТ}} + I_{\text{нас СУТ}}e^{\chi} \left(-\chi\eta U_{t \text{ СУТ}} + U_{\text{МП СУТ}} \left(2 - \frac{U_{\text{МП СУТ}}}{\eta U_{t \text{ СУТ}}} \right) \right) = 0.$$

Спростивши перші два доданки отриманого виразу, отримаємо нелінійне рівняння вигляду

$$U_{\text{МП СУТ}}(2I_{\text{МП СУТ}} - I_{\phi} - I_{\text{нас СУТ}}) + I_{\text{нас СУТ}}e^{\chi} \left(-\chi\eta U_{t \text{ СУТ}} + U_{\text{МП СУТ}} \left(2 - \frac{U_{\text{МП СУТ}}}{\eta U_{t \text{ СУТ}}} \right) \right) = 0,$$

яке можна розв'язати за допомогою W-функції Ламберта

$$f(\chi) = \chi e^{\chi},$$

тоді остаточно маємо вираз для визначення χ , після підстановки якого у рівняння (2) та (3) можна отримати формулу для обчислення активних опорів у явному вигляді [2]:

$$\chi = \text{lambertW} \left(\frac{U_{\text{МП СУТ}}(2I_{\text{МП СУТ}} - I_{\phi} - I_{\text{нас СУТ}})e^{\frac{U_{\text{МП СУТ}}(U_{\text{МП СУТ}} - 2\eta U_{t \text{ СУТ}})}{\eta^2 U_{t \text{ СУТ}}^2}}}{\eta U_{t \text{ СУТ}} I_{\text{нас СУТ}}} \right).$$

За допомогою W-функції Ламберта можна також записати в явному вигляді рівняння для розрахунку струму фотогальванічного елемента:

$$I = \frac{R_p(I_{\phi} + I_{\text{нас}}) - U}{R_s + R_p} - \frac{\eta U_t}{R_s} \text{lambertW}(\theta),$$

де

$$\theta = \frac{(R_p/R_s)I_{\text{нас}}e^{\frac{R_p R_s(I_{\phi} + I_{\text{нас}}) + R_p U}{\eta U_t(R_s + R_p)}}}{\eta U_t}.$$

Дослідження процесу роботи фотогальванічних елементів в умовах Дніпропетровської області було виконано шляхом математичного моделювання (рис. 2) вихідного струму панелі з урахуванням сезонної зміни температури навколишнього середовища та освітленості сонячних панелей. При цьому моделювання виконується за умови однакового рівня освітленості всієї сонячної панелі та однакової температури нагріву, що відповідає ідеалізованим умовам роботи фотогальванічних елементів. Струми I_{ϕ} та I_d подані у вигляді джерел струму, а навантаження – джерела напруги, значення якого змінюється від 0 до $U_{\text{хх}}$.

Вихідні дані щодо інтенсивності сонячного випромінювання та температурного режиму регіону для розрахунку взято з офіційного сайту Європейського союзу [3], які разом з отриманими результатами зведено до таблиці 1, де також наведена максимальна потужність, яку може генерувати одна сонячна панель. При розрахунку було прийнято, що середньодобове значення інтенсивності сонячного випромінювання дорівнює 10 годинам денного часу, панель має південну орієнтацію та встановлена під кутом 48° до горизонту. Як приклад вибрано сонячну панель KVAZAR KV250M з такими паспортними параметрами:

- номінальна потужність $P = 250$ Вт;
- напруга холостого ходу $U_{\text{хх СУТ}} = 37,3$;
- температурний коефіцієнт напруги холостого ходу $\alpha_U = dU_{\text{хх}}/dT|_{\text{СУТ}} = -0,33 \text{ \%}/^\circ\text{C}$;
- струм короткого замикання $I_{\text{кз СУТ}} = 8,75$ А;
- температурний коефіцієнт струму короткого замикання $\alpha_I = dI_{\text{кз}}/dT|_{\text{СУТ}} = 0,07 \text{ \%}/^\circ\text{C}$;

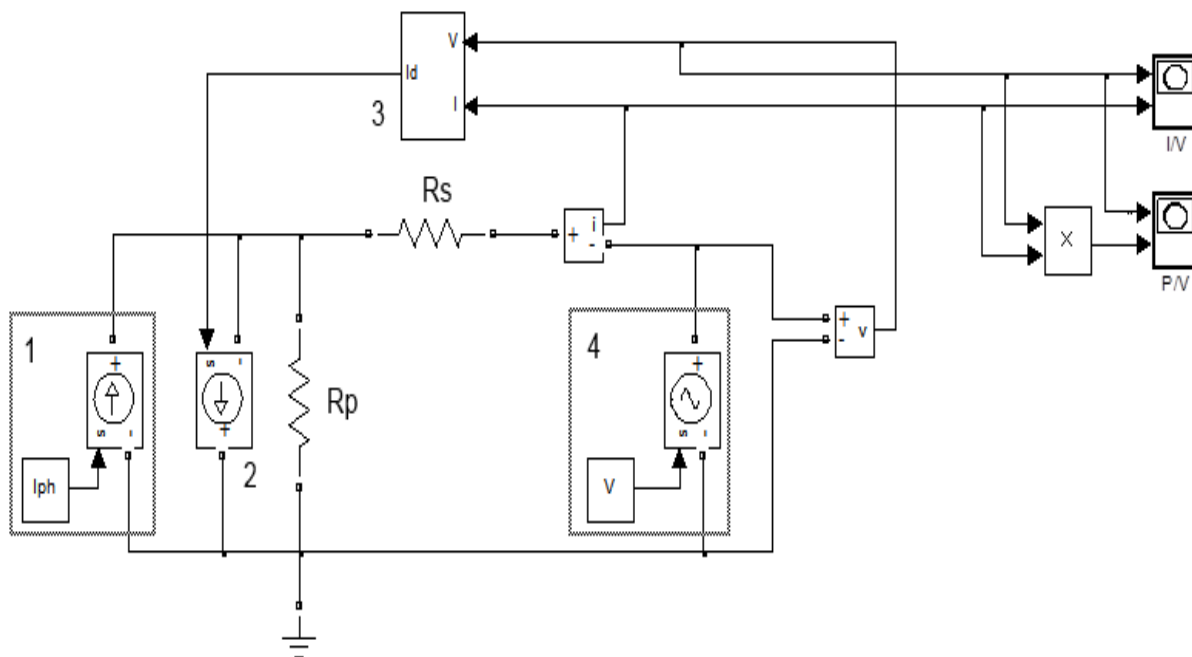


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі сонячної панелі:

- 1 – кероване джерело струму фотогальванічного елемента I_{ϕ} ;
- 2 – кероване джерело струму діода, що враховує фізичні процеси у кремнієвому р-п переході;
- 3 – підсистема, що розраховує значення струму діода;
- 4 – джерело напруги, яке являє собою представляє навантаження фотогальванічного елемента

- вихідні напруга та струм фотогальванічного елемента, що відповідають точці роботи з максимальною вихідною потужністю відповідно $U_{МП} = 30,7 \text{ В}$, $I_{МП} = 8,2 \text{ А}$;
- кількість фотогальванічних елементів $n_s = 60$.

Таблиця 1

Дані щодо інтенсивності сонячного випромінювання та температурного режиму регіону

Місяць	січ.	лют.	бер.	квіт.	трав.	черв.	лип.	серп.	вер.	жовт.	лист.	груд.
Середньодобова температура повітря, °С	-3,7	-9,3	0,5	13,5	16,5	23	22,1	22,6	17,2	12,4	4,5	-3,3
Інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м ²	160	276	495	656	765	778	786	766	592	405	195	112
Максимальна потужність, Вт	38,6	71,3	125,5	156,8	178,9	176,7	179	174,5	140	98,1	46,7	25,5

Наведені у таблиці дані, а також графіки залежностей вихідної потужності та струму від вихідної напруги відповідно до сезону (рис. 3 та 4) свідчать про те, що ефективно сонячні панелі можуть працювати лише у весняний та літній періоди часу, коли їх ефективність становить близько 60%, у той час, коли восени та взимку можна досягти ефективності лише 40 та 20% відповідно.

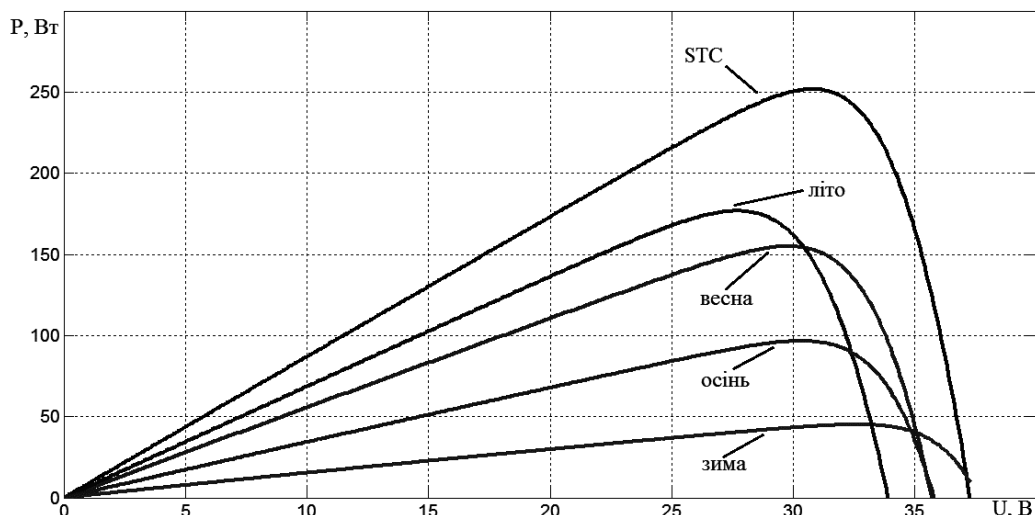


Рис. 3. Графіки залежності вихідної потужності від вихідної напруги сонячної панелі для різних сезонів

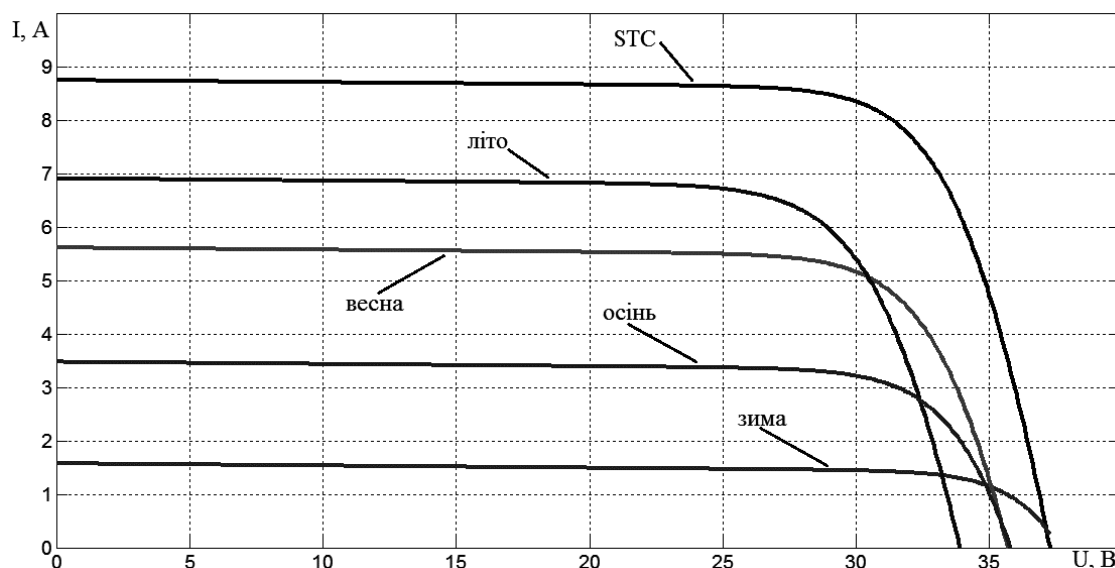


Рис. 4. Графіки залежності вихідного струму від вихідної напруги сонячної панелі для різних сезонів

Висновки. Наведена нелінійна математична модель та алгоритм розрахунку параметрів схеми заміщення сонячної панелі у явному вигляді дозволяють визначити ефективність роботи фотогальванічних елементів при зміні зовнішніх умов та величини навантаження, а також може бути використана для подальшого дослідження роботи системи, до виходу якої приєднано напівпровідниковий перетворювач енергії.

Список літератури

1. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering / A. Luque, S. Hegedus. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – 1168 p.
2. Femina N. Power electronics and Control Techniques for Maximum energy harvesting in Photovoltaic systems / N. Femina, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2013. – 356 p.
3. Офіційний сайт Європейського союзу – Інститут енергетики, Інтерактивна мапа [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доц. Азюковським О.О.