

властивості. Задача розв'язується в два етапи: на першому розраховується проекційним методом розв'язування крайової задачі статична характеристика як залежність пускового моменту від величини ємності конденсаторів, а на другому для вибраного значення ємності здійснюється розрахунок перехідного процесу з метою дослідження перебігу перехідного процесу.

1. Велин Н.В. Статический возбудитель синхронного двигателя с глухо подключенным конденсатором // *Электротехника*. – 1973. – № 12. – С. 35–36. 2. Кириченко В.І., Бородай В.А., Яланський А.А. Улучшение пусковых свойств крупных синхронных машин // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. – 2003. – № 6[64] – С. 38–40. 3. Маляр В.С. Статичні характеристики синхронного двигуна з конденсаторами в колі збудження / В.С. Маляр, А.В. Маляр, І.А. Добушовська // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 1. – С. 57–62. 4. Пивняк Г.Г., Кириченко В.І., Бородай В.А. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных электродвигателей // *Технічна електродинаміка. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”*. – 2002, ч. 2. – С. 62–65. 5. Пивняк Г.Г. Повышение надежности и экономичности мощных синхронных приводов с тяжелым пуском / Г.Г. Пивняк, В.В. Кириченко, В.А. Бородай // *Проблеми автоматизированного электропривода. Теория и практика*. – 2007. – С. 553–555. 6. Фильц Р.В., Лябук Н.Н. Математическое моделирование явнопольных синхронных машин. – Львов: *Світ*, 1991. – 176 с.

УДК 519.711.3 : 621.311.243

В.І. Мороз, О.В. Турич

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

© Мороз В.І., Турич О.В., 2012

Проаналізовано відомі моделі елементів сонячних батарей. Визначено основні математичні рівняння, що описують фотоелектричні модулі. Також наведено основні переваги використання однодіодної схеми заміщення.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, сонячні батареї, напівпровідникові фотоелектричні системи.

The analysis of the existing models of solar cells is presented. The basic mathematical equations that describe the photovoltaic modules are given. The major advantages of the single diode equivalent circuit are shown.

Key words: Computer simulation, Photovoltaic cells, Solar power generation.

Постановка проблеми. У зв'язку з дефіцитом викопного палива, підвищенням цін на нафту, глобальним потеплінням і значним погіршенням стану навколишнього середовища та екосистем мають велике значення перспективні стимули для розвитку альтернативних джерел енергії з високим ККД і низьким рівнем викидів. Серед відновлюваних джерел енергії фотоелектричні пристрої (*photovoltaic* – PV) можна вважати найважливішими, тому що сонячна енергія повсюдно поширена, широко доступна і абсолютно безкоштовна. Останнім часом фотоелектричні системи виходять на передній план і в електричній промисловості, бо можуть генерувати постійний струм без негативного впливу на навколишнє середовище. Оскільки така система є напівпровідниковим приладом, фотоелектрична система є статичною, суцільною, і такою, що не містить рухомих частин, що робить її експлуатацію та технічне обслуговування низьковитратними. Хоча фотоелектрична система потребує для виготовлення значного капіталу і має не надто високу

ефективність перетворення сонячних променів, зростання цін на нафту робить сонячну енергію природно життєздатною для енергопостачання.

Аналіз останніх досліджень

Оснoву фотоелектричних систем становляють сонячні батареї або модулі, вихідні характеристики яких залежать від сонячної енергії, температури і напруги на виході модуля і є нелінійними. Математичні моделі, що нині використовуються в комп'ютерному моделюванні таких систем, були побудовані протягом чотирьох останніх десятиліть [1–3].

Задача досліджень

Задачею досліджень є порівняння наявних моделей сонячних батарей з метою вибору оптимальної моделі для подальшого використання в сонячних пошукових системах.

Виклад основного матеріалу

Робота сонячної батареї ґрунтується на принципі р–n-переходу. Фотоелектричні пристрої виготовляються у вигляді тонких пластин або тонкого шару напівпровідника. Електромагнітне випромінювання сонячної енергії може бути безпосередньо перетворене в електроенергію завдяки фотоелектричному ефекту. Фотоелектрична система має нелінійні $I(V)$ і $P(V)$ характеристики, які змінюються залежно від інтенсивності випромінювання і температури.

Схема заміщення фотоелектричної комірки зазвичай використовується для технологій відслідковування точки максимальної потужності (*maximum power point tracking* – MPPT). Еквівалентна схема моделі, яка складається з джерела фотоструму, діода, резистора, встановленого паралельно до джерела струму і резистора, що описує внутрішній опір комірки, показана на рис. 1 (а). Рівняння вольт-амперної характеристики (ВАХ) сонячного елемента задається так:

$$I = I_{PH} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{kT_c A}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{SH}}, \quad (1)$$

де I_{PH} – згенерований світлом струм (фотострум); I_s – насичення темного струму; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К – заряд електрона, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T_c – робоча температура середовища; R_{SH} – опір шунта; R_s – послідовний опір.

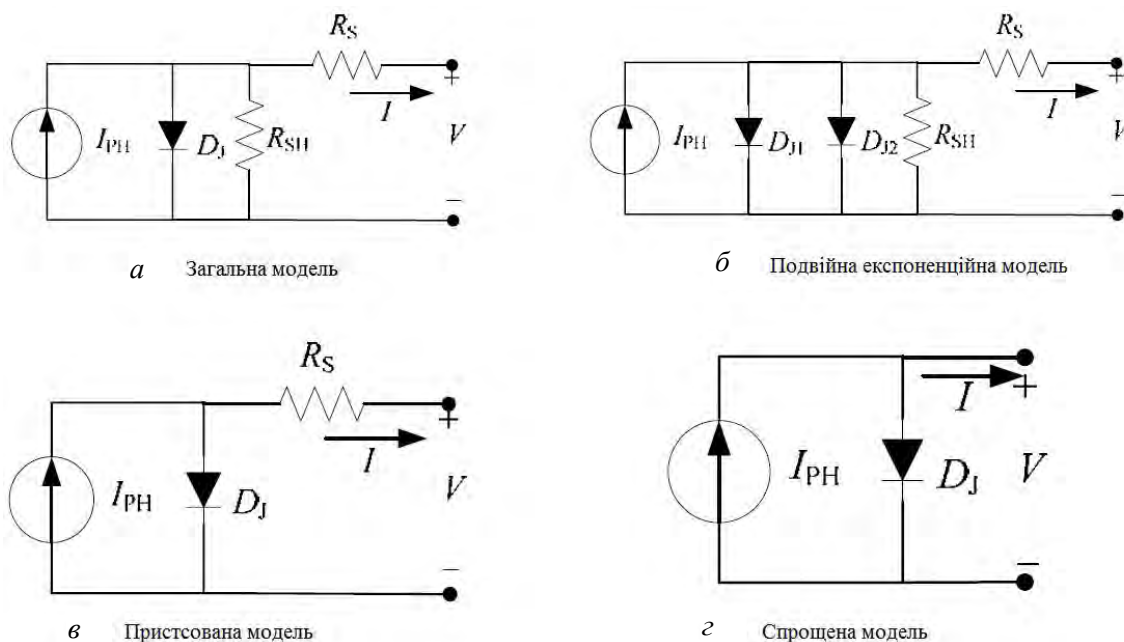


Рис. 1. Моделі сонячних батарей

Фотострум в основному залежить від сонячної енергії та робочої температури навколишнього середовища, що описується відповідним рівнянням:

$$P_H = [I_{sc} + K_i \cdot (T_C - T_{Ref})] \cdot \lambda, \quad (2)$$

де I_{sc} – струм короткого замикання фотоелемента при температурі 25 °С і освітленості 1 кВт/м²; K_i – температурний коефіцієнт короткого замикання; T_{Ref} – поточна температура; λ – сонячне опромінювання в кВт/м².

Водночас I_s змінюється залежно від температури, що описується такою залежністю:

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{Ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_G \left(\frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T_C} \right)}{k \cdot A} \right], \quad (3)$$

де I_{RS} – струм зворотного насичення за даної температури і сонячної радіації; E_G – напруга зовнішнього шару використаного напівпровідника. Конструктивний фактор A залежить від фотоелектричної технології [4] і його значення наводяться у відповідних таблицях.

Точніший математичний опис сонячних батарей дає так звана подвійна експоненційна модель, яка показана на рис. 1, б [5] і базується на описі комірок сонячної батареї, що побудовані з полікристалічного кремнію. Ця модель складається зі світлогенеруючого джерела струму, двох діодів, послідовного та паралельного опорів, проте формули кривої ВАХ є складнішими, що пояснюються неявним і нелінійним характером моделі. Рівняння вольт-амперної характеристики сонячного елемента для такої моделі має вигляд:

$$I = I_{PH} - I_s \cdot \exp \frac{V+IR_S}{kT_C A} - I_{S2} \cdot \exp \frac{V+IR_S}{kT_C A2} - \frac{V+IR_S}{R_{SH}}. \quad (4)$$

Тут I_s і I_{S2} – струми витоку першого та другого діодів відповідно; A і $A2$ – конструктивні фактори відповідних діодів. Ця модель рідко використовується в сучасних дослідженнях і не використовується для узагальненої моделі фотоелементів.

Шунтуючий опір R_{SH} визначає струм витоку на землю, який, зазвичай, є мізерним. Враховуючи, що фотоелектричні комірки є нечутливими до зміни R_{SH} , опір шунта витоку можна припустити безмежним. З іншого боку, невеликі зміни в R_S будуть істотно впливати на вихідну потужність фотоелемента. Відповідна модель сонячної батареї показана на рис. 1 (с) [4]. Для такої схеми рівняння (1) набуде такого вигляду:

$$I = I_{PH} - I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V+IR_S)}{k \cdot T_C \cdot A} \right) - 1 \right]. \quad (5)$$

Для ідеального фотоелемента значні втрати енергії та витік струму на землю відсутні, тобто, $R_S = 0$ і $R_{SH} = \infty$, через що схема подання сонячної батареї, яка зображена вище, може бути спрощена, як показано на рис. 1 (г) [6–7]. Тоді рівняння (1) набуде вигляду

$$I = I_{PH} - I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot V}{k \cdot T_C \cdot A} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

Ця математична модель доволі зручно описується, а тому застосовується найчастіше.

Широке розповсюдження фотоелементів в останні роки призвело до того, що розробники програмного забезпечення почали додавати їх математичні моделі до систем моделювання. Починаючи з версії 7 спрощена модель сонячної батареї з'явилась і в системі MATLAB, на рис. 2 показана схема для зняття її ВАХ.

Результати моделювання ВАХ фотоелемента сонячної батареї для різних видів комп'ютерних моделей показані на рис. 3. Як бачимо, ВАХ фотоелемента, змодельованого на основі дводіодної експоненційної моделі, незначно відрізняється від одnodіодної, тому в подальшій роботі над порівнянням алгоритмів відслідковування точки максимальної потужності сонячної батареї може бути використана одnodіодна модель.

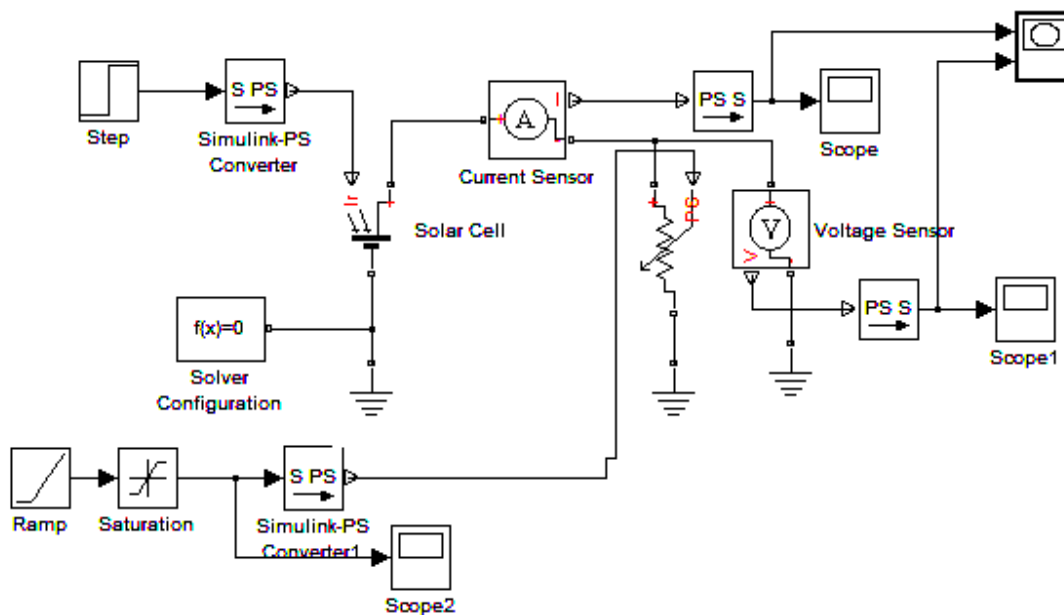


Рис. 2. Схема для зняття ВАХ з моделлю фотоелемента з бібліотеки MATLAB

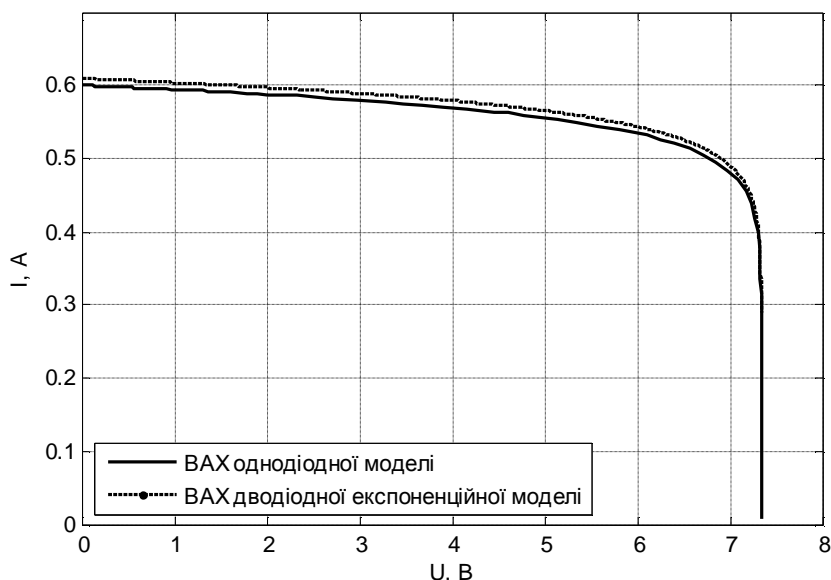


Рис. 3. ВАХ однодіодної та дводіодної експоненційної моделей у разі сонячного випромінювання 1000 кВт/м^2

Висновки

У роботі було зроблено огляд найчастіше вживаних сьогодні моделей сонячних батарей. Показано, що дводіодна експоненційна модель є точнішою, бо враховує всі струми витоку, проте є значно складнішою для реалізації та вносить додаткові нелінійності. Для використання на практиці у випадку допустимої точності у межах 5% можливим є використання спрощеної моделі сонячної батареї, у якій втрати енергії та витік струму на землю відсутні, тобто $R_S = 0$ і $R_{SH} = \infty$.

1. Angrist S.W., *Direct Energy Conversion*, Allyn and Bacon, Inc., 4th edition. – 1982. – P. 177–227.
2. Wasynczuk O. *Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems* // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1983. – Vol. PAS-102, No. 9, – P. 3031–3037.
3. Phang J.C.H., Chan D.S.H., and Philips J.R. *Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters* // *Electronics Letters*. – 1984. – Vol. 20, No. 10, – P. 406–408.
4. Hua C.C. and Shen C.M. *Study of*

maximum power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system // Proceedings of 29th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 1998. – Vol. 1. – P. 86–93.
5. Gow J.A. and Manning C.D. *Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies // IEE Proceedings- Electric Power Applications. – 1999. – Vol. 146, No. 2. – P. 193–199.*
6. Wasynczuk O. *Modeling and dynamic performance of a linecommutated photovoltaic inverter system // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1989. – Vol. 4, No. 3. – P. 337–343.* 7. Messenger R. and Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering, CRC Press, 2000. – P. 41–51.*

УДК 621.314.222.8

Л.О. Никонець., І.Р. Бучковський, М.Б. Сабат,
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕПМС

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ ВІЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ МЕРЕЖІ

О Никонець Л.О., Бучковський І.Р., Сабат М.Б., 2012

Синтез математичних моделей з використанням частотних характеристик, як вхідної інформації об'єкта, – один з пріоритетних напрямів електроенергетичної науки. Це дасть змогу розробити рекомендації для підвищення надійності роботи електрообладнання з обмотками високої напруги.

Ключові слова: *трансформатор, математична модель, внутрішні перенапруги, вимірювання, частотна характеристика.*

The synthesis of mathematical models with using frequency response as the input data object is one of the priorities for electricity science. It will help to develop recommendations to improve the reliability of the electrical windings of high voltage, whose reliability is insufficient.

Key words: *transformer, mathematical model, internal overvoltage, measurement, frequency response.*

Постановка проблеми

Будь-яке електрообладнання з обмотками високої напруги (ЕОВН) містить, як мінімум, обмотку, магнітопровід, ізоляцію, які розміщені в корпусі. Зазвичай на етапах проектування електрообладнання та дослідження режимів роботи електромереж не враховують взаємозв'язки між переліченими конструктивними складовими ЕОВН. Наприклад, ізоляцію проектують за заданими рівнями допустимих перенапруг, а проектуючи обмотки, магнітопроводи, їх конструкції та режими, абстрагуються від конструктивних особливостей ізоляції, умовно приймаючи, що значення опору ізоляції прямує до безмежності.

Фізичне явище внутрішнього резонансу [1], що здебільшого спричиняє пошкодження ЕОВН, може бути відтворене за допомогою математичної моделі, якщо вона містить всі елементи конструкції.

Аналіз сучасних досліджень та публікацій

Першу спробу створення моделі ЕОВН, яка містить всі елементи конструкції, зроблено в [2]. Ця модель вперше дозволила дослідити електромагнітні процеси окремо в повздовжній ізоляції та окремо в головній ізоляції трансформатора.