

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Гнатів А.В., Аргун Щ.В., Дзюбенко О.А., ХНАДУ

Анотація. Визначено оптимальні параметри активного навантаження для монокристалічних та полікристалічних сонячних батарей (СБ), що відповідають критерію передачі максимальної потужності в навантаження. Розкрито та проаналізовано класифікацію СБ. Результати експериментальних досліджень подано у вигляді вольт-амперних характеристик та залежності потужності СБ від струму навантаження.

Ключові слова: енергозберігаючі технології, сонячна батарея, сонячний елемент, альтернативні джерела електроенергії, енергія сонця, сонячна панель.

Вступ

У наш час відновлювальні види енергії, у тому числі й сонячна, розвиваються досить інтенсивно, тому триває активний пошук способів підвищення продуктивності існуючих систем, що дозволять максимально ефективно перетворити енергію сонця в електричну енергію. Тут можна виділити два напрями – пряме перетворення сонячного випромінювання в електричний струм і багатокрокове (тобто перетворення сонячної енергії в тепло, далі – в механічну роботу, а потім – в електроенергію). Поки у другому напрямі досягнуто більш високих результатів – промислові геліоустановки з концентраторами, турбінами або двигунами Стірлінга показують непогану продуктивність.

Наприклад, в Нью-Мексико геліостанції з сонячними концентраторами і двигунами Стірлінга отримують ККД на виході 31,25 % [1]. Подібні геліоустановки є надзвичайно складними і дорогими. Вони є ефективними в умовах дуже високої сонячної активності й поки не набули достатнього розповсюдження у світі. Тому прямі перетворювачі сонячного випромінювання – сонячні батареї (СБ) по застосуванню займають лідируюче положення у світі сонячної енергетики. Продуктивність серійних промислових сонячних панелей на сьогодні, залежно від технології, знаходиться в діапазоні від 5 % до 22 %, але технології розвиваються й удосконалюються – вже розробляються і тестуються нові сонячні елементи (СЕ) з ККД в межах ~40 % [2].

Аналіз публікацій

На цей час ринок СБ складається з декількох різних зразків, що відрізняються технологією виготовлення і матеріалами, з яких їх

виробляють. На рис. 1 наведено класифікацію СБ [3–6].

Батареї, основа яких – кремній, на сьогодні є найбільш популярними та поширеними. Пояснюється це широким розповсюдженням кремнію в земній корі, його відносною дешевизною і високим показником продуктивності, в порівнянні з іншими видами СБ.

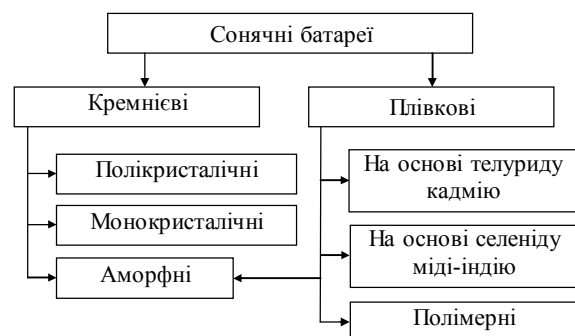


Рис. 1. Класифікація сонячних батарей

Переважна більшість чарунок сонячних перетворювачів сучасних серійних СБ (або фотомодулів) виготовляється з монокристалічного (C-Si), або полікристалічного (MC-Si) кремнію. На сьогодні такі кремнієві фотоелектричні модулі займають близько 90 % ринку фотоелектричних перетворювачів, з яких приблизно 2/3 припадає на полікристалічний кремній і 1/3 на монокристалічний. Далі йдуть сонячні модулі, фотоелементи яких виготовлені за тонкоплівковою технологією – методом осадження, або напилення фоточутливих речовин на різні підкладки. Суттєва перевага модулів з цих елементів – це нижча вартість продукції, адже для них потрібно приблизно в 100 разів менше матеріалу, порівняно з кремнієвими пластинами.

Найменш поширені – багатоперехідні СЕ з так званих тандемних або багатоперехідних чарунок (multijunction cells) [7].

Розглянемо більш детально зазначені СБ. Монокристалічні СБ являють собою кремнієві чарунки, об'єднані між собою. Для їх виготовлення використовують максимально чистий кремній, отриманий за методом Чохральського [7]. Після затвердіння готовий монокристал розрізають на тонкі пластини товщиною 250–300 мкм і пронизують сіткою з металевих електродів (рис. 2, а). Технологія є порівняно дорогою, тому й коштують монокристалічні батареї дорожче, ніж полікристалічні або аморфні. Вибирають цей вид СБ через високий показник ККД (приблизно 17–22 %) [7, 8].

Для отримання полікристалів кремнієвий розплав піддається повільному охолодженню. Така технологія вимагає менших енерговитрат, отже і собівартість кремнію, отриманого з її допомогою, є меншою. Єдиний, але суттєвий мінус, – полікристалічні СБ мають нижчий ККД (12–18 %), рис. 2, б. Причина полягає в тому, що всередині полікристала утворюються області із зернистими межами, які і призводять до зменшення ефективності елементів [9].

Якщо проводити розподіл залежно від використовуваного матеріалу, то аморфні батареї відносяться до кремнієвих, а якщо за технологією виробництва – до плівкових (рис. 2, в).

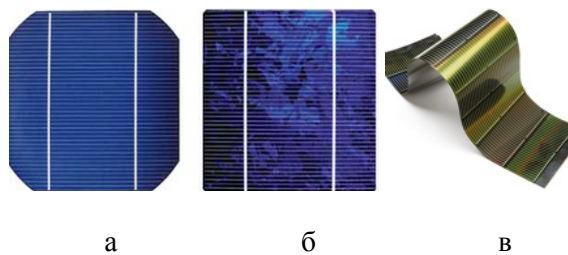


Рис. 2. Кремнієві сонячні батареї: а – монокристалічні; б – полікристалічні; в – аморфні

У разі виготовлення аморфних панелей, використовується не кристалічний кремній, а сілан або кремнієводень, що тонким шаром наноситься на матеріал підкладки. ККД таких батарей становить всього 5–6 %, у них дуже низький показник ефективності, але, незважаючи на ці недоліки, вони мають і ряд переваг [1, 10]:

- показник оптичного поглинання в 20 разів вище, ніж у полі- і монокристалів;
- товщина елементів менше 1 мкм;
- в порівнянні з полі- та монокристалами

має більш високу продуктивність при похмурій погоді;

- підвищена гнучкість.

Крім описаних вище видів кремнієвих СБ, існують і їх гібриди. Так, для більшої стабільності елементів використовують двофазний матеріал, що являє собою аморфний кремній із включеннями нано- або мікрокристалів. За властивостями отриманий матеріал схожий з полікристалічним кремнієм.

Другим пунктом наведеної класифікації йдуть плівкові СБ (класифікуються залежно від технології виробництва). Розробка плівкових батарей зумовлена потребами в зниженні вартості СБ та необхідністю поліпшення їх продуктивності й технічних характеристик. Оскільки вони набули меншого поширення і застосування, то в їх описі обмежимося тільки перерахуванням їх основних видів [7]:

- на основі CdTe;
- на основі селеніду міді-індію;
- на основі полімерів.

У табл. 1 наведено узагальнені дані про ККД різних видів СБ [1].

Таблиця 1 – ККД різних видів сонячних батарей

Вид сонячної батареї	ККД
Моно	17–22 %
Полі	12–18 %
Аморфні	5–6 %
На основі телуриду кадмію	10–12 %
На основі селеніду міді-індію	15–20 %
На основі полімерів	5–6 %

Аналізуючи наведені дані, стає очевидним, що найбільш прийнятними і доступними є полі- і монокристалічні СБ. Як вже зазначалося раніше, вони займають близько 90 % ринку СБ і є найбільш доступними. Тому при подальших дослідженнях будемо спиратися тільки на ці два типи СБ.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є визначення оптимального параметра активного навантаження для монокристалічних та полікристалічних сонячних батарей, що відповідає критерію передачі максимальної потужності в навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: розкрити та проаналізувати класифікацію СБ; подати результати експериментальних досліджень СБ; провести аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень СБ.

Визначення оптимальних параметрів навантаження СБ

У роботі [7] сформульовані основні вимоги ефективної роботи СЕ. По-перше, для забезпечення поглинання максимально можливої кількості енергії випромінювання, що потрапляє на СЕ, оптичний коефіцієнт поглинання фотоелектричного шару повинен бути близьким до одиниці. По-друге, фотогенеровані носії повинні ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін фотоелектричного шару, що містить *p-n*-перехід. По-третє, СЕ повинен мати оптимальну висоту бар'єра в *p-n*-переході, достатню для забезпечення високого значення напруги холостого ходу U_{xx} , але не дуже велику. Це необхідно для того, щоб запобігати поглинанню фотонів сонячного спектра. По-четверте, повний опір зовнішнього кола, включеного послідовно з СЕ, має відповідати критерію передачі максимальної потужності в навантаження, тобто бути рівним опору самого СЕ.

Виконання перших трьох пунктів не залежить від звичайного споживача, бо визначається виробником СБ. Виконання ж четвертого пункту – це вже задача споживача (завдання програмно-апаратних засобів, що контролюють навантаження та характеристики роботи СБ під час їх експлуатації).

Отже виникає нагальне питання: яким повинно бути зовнішнє навантаження СБ та як воно повинно змінюватися залежно від конкретних умов експлуатації (інтенсивності сонячного освітлення, кута нахилу панелі, температури нагрівання панелі тощо)? Звісно, щоб проаналізувати всі наявні зовнішні чинники експлуатації СБ, потрібно провести досить велику кількість експериментальних та теоретичних досліджень. Тому будемо досліджувати їх по черзі та приводити їх результати в науково-технічній періодиці у міру їх виконання.

У цій роботі подамо результати перших із запланованих досліджень, а саме вольт-амперні характеристики та залежність потужності згенерованої електроенергії від активного навантаження, що підключається до СБ. Це дозволить визначитися зі значенням навантаження, за якого буде спостерігатися найбільше значення згенерованої електричної потужності, а отже, буде виконуватися критерій передачі максимальної потужності в навантаження [7].

Для проведення досліджень було обрано найбільш поширені та доступні в Україні СБ – це монокристалічна та полікристалічна потужністю 100 Вт та 110 Вт відповідно.

Технічні характеристики вибраних СБ приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики сонячних панелей

Параметр	Монокристал	Полікристал
Модель:	FS-100M/100\W	FS-110P/110W
Вага, кг:	8,45	9,18
Номинальна потужність, Вт:	100	110
Номинальна напруга $U_{ном}$, В:	17,50	17,50
Номинальний струм $I_{ном}$, А:	5,72	7,72
Напруга при розімкненому контурі U_{xx} , В	21,60	21,60
Струм короткого замикання $I_{кз}$, А	6,46	7,10
Габарити ВхДхШ, мм:	1070x670x35	1170x670x35

За наведеними технічними характеристиками можна визначити внутрішній опір досліджуваних батарей

$$R_{вн} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}. \quad (1)$$

Відповідно до (1) внутрішній опір панелей дорівнює: $R_{вн(моно)} = 3,34$ Ом; $R_{вн(полі)} = 3,04$ Ом. Ці значення опору дають уявлення, яким повинно бути навантаження для отримання ефективної роботи СБ [7].

Ще одним важливим параметром СБ (або

СЕ) є коефіцієнт заповнення FF – параметр, який, в поєднанні зі струмом короткого замикання (фотострумом) і напругою холостого ходу, визначає максимальну потужність на виході СЕ.

FF визначається як відношення номінальної потужності СЕ до добутку U_{xx} на $I_{кз}$ і дорівнює максимальній площі прямокутника, який можна вписати у вольт-амперну криву СЕ [7].

$$FF = \frac{I_{ном} \cdot U_{ном}}{I_{кз} \cdot U_{кз}}. \quad (2)$$

Відповідності до (2) коефіцієнт заповнення досліджуваних панелей дорівнює: $FF_{\text{(моно)}} = 0,72$; $FF_{\text{(полі)}} = 0,88$.

Перейдемо до експериментальних досліджень.

Умови експерименту

1. Обрано сонячний день (місяць – липень), час відповідає найбільшій інтенсивності сонячного випромінювання (м. Харків), діапазон 12:30–14:00.

2. Навантаження, що підключається до СБ відповідно до схеми експерименту (рис. 3), змінюється в діапазоні від 2 до 10 Ом. Крок зміни – 0,5 Ом.

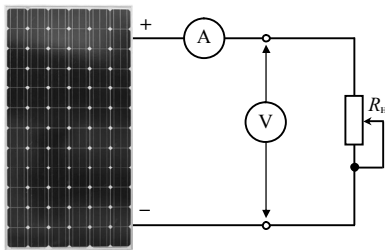


Рис. 3. Схема експерименту

3. Температура поверхні СБ становить $\sim 45^\circ\text{C}$.

4. Вимірювання проводяться під час короткочасного замкнення кола навантаження СБ, що дозволяє позбутись залежності опору навантаження від температури.

5. Вимірювання струму та напруги відпо-

відно до рис. 3 проводяться цифровими мультиметрами APPA 82.

6. Кут нахилу СБ $35^\circ \pm 40^\circ$ (обрано оптимальний кут для даної широти).

7. Для зменшення похибки вимірювання проводились у прямому та зворотному напрямку циклічно, що відповідає поступовому збільшенню та зменшенню опору навантаження.

Результати вимірювань

Проведено серію вимірювань, усереднені значення яких подано у вигляді графіків на рис. 4, де «Полікристал 1» та «Монокристал 1» відповідають прямому способу вимірювання, а «Полікристал 2» та «Монокристал 2» – зворотному.

Перша точка (найменше значення стуму) відповідають активному опору навантаження 10 Ом, остання – 2 Ом. Більші та менші значення опору навантаження для вибраних панелей досліджувати недоцільно, у зв'язку з малою ефективністю роботи панелі в цих діапазонах навантаження, що наочно видно на отриманих графіках.

Аналіз експериментальних досліджень

Проводячи аналіз отриманих результатів (рис. 4), стає очевидним, що СБ мають найбільшу ефективність своєї роботи (відповідно до максимальної згенерованої потужності) в діапазоні активного навантаження від 3 Ом до 3,5 Ом.

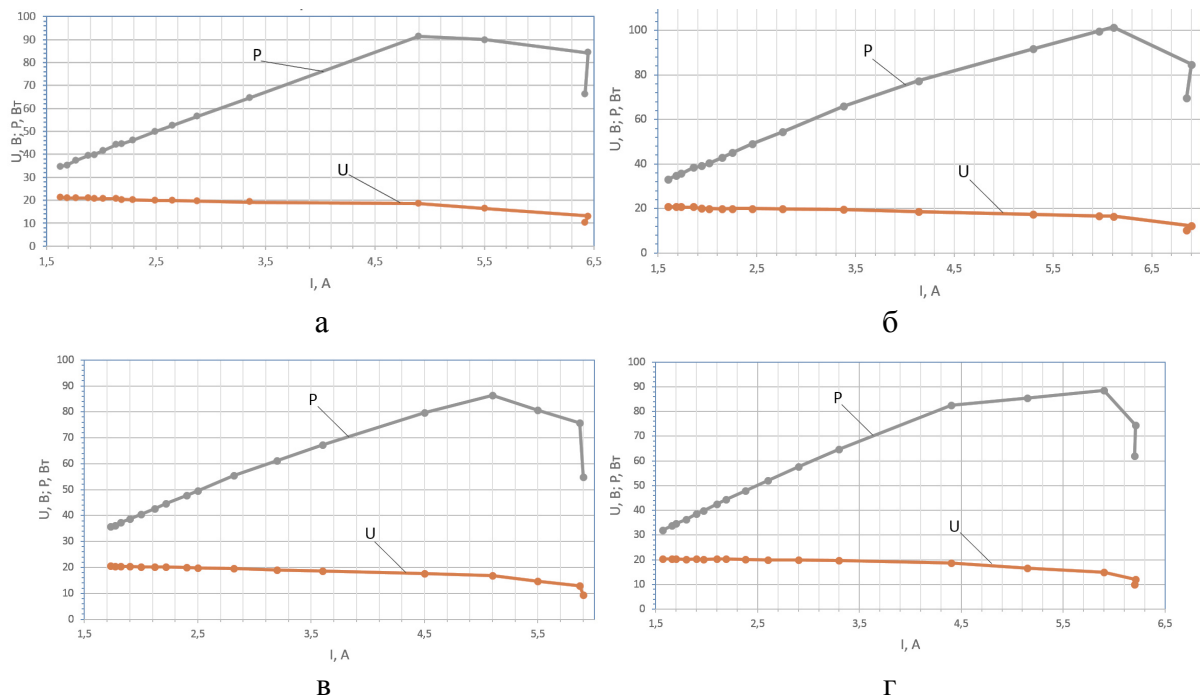


Рис. 4. Експериментальні характеристики СБ: а – полікристал 1; б – полікристал 2; в – монокристал 1; г – монокристал 2

Отже, при використанні такого типу та номінальної потужності СБ необхідно підтримувати навантаження, що до них підключається в зазначеному діапазоні. Використовувати вказані СБ з навантаженням, що виходить за ці межі, є неефективним.

Отримані результати цілком збігаються з вище зазначеним критерієм передачі максимальної потужності в навантаження. Відповідно до приведених технічних характеристик розраховано внутрішній опір СБ, який для монокристалічної батареї становить 3,34 Ом, а для полікристалічної – 3,04 Ом.

Якщо досліджувані типи СБ складати в системи з відповідним послідовно-паралельним з'єднанням, то потрібно визначити внутрішній опір системи СБ. Тоді навантаження, що підключається до такої системи, повинно відповідати критерію передачі максимальної потужності й розраховуватись з урахуванням того, що одна монокристалічна СБ має внутрішній опір 3,34 Ом, а полікристалічна – 3,04 Ом.

Також слід зазначити, що на ефективність роботи СБ впливає її нагрівання, тобто чим вищою є температура поверхні СБ, тим меншою – її ефективність. Ще один не менш значущий чинник – це кут нахилу СБ відповідно до променів сонячного випромінювання.

Під час експериментальних досліджень кут нахилу підтримувався в межах $35\div 40^\circ$, (що є оптимальним показником для широти, на якій знаходиться м. Харків; місяць – липень).

Висновки

Проведено визначення оптимального параметра активного навантаження для монокристалічних та полікристалічних СБ, що відповідає критерію передачі максимальної потужності у навантаження. Розкрито та проаналізовано класифікацію СБ. Подано результати експериментальних досліджень СБ у вигляді вольт-амперних характеристик та залежності потужності СБ від струму навантаження. Проведено аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень, який показав, що для найбільш ефективної роботи СБ її активне навантаження повинно підтримуватися в межах 3–3,5 Ом.

Література

1. Типы солнечных батарей и их КПД / Материали сайту. – 2015. – Режим доступу: http://utem.org.ua/materials/show/typy_solnechnyh_batarey.

2. Ginley D. S. Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability / D.S. Ginley, D. Cahen. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. – 754 с.
3. Разбираемся в многообразии видов солнечных панелей / Материали сайту. – 2016. – Режим доступу: <http://altenergiya.ru/sun/mnogoobrazie-vidov-solnechnyx-panelej.html>.
4. Green M.A. Third generation photovoltaics: advanced solar electricity generation / M.A. Green // Springer-Verlag, Berlin. – 2003. – 160 с.
5. Marti A. Next Generation Photovoltaics / A. Marti, A. Luque. – Bristol: Institute of Physics Publ., 2004. – 344 с. .
6. Bauer T. Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design / T. Bauer. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – 202 с.
7. Миличко В.А. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В.А. Миличко // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186, № 8. – С. 801–852.
8. Андреев Г. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Г. Андреев. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
9. Wei C. Y. Efficiency improvement of HIT solar cells on p-type Si wafers / Wei C. Y. // Materials. – 2013. – Vol. 6, №. 11. – С. 5440–5446.
10. Hamakawa Y. (Ed.) Thin-Film Solar Cells: Next Generation Photo-voltaics and Its Applications / Y. Hamakawa. – Berlin: Springer, 2004. – 244 с.

References

1. Typy solnechnykh batarei i ikh КПД. [Types of solar cells and their efficiency]. (2015). utem.org.ua. Retrieved from: http://utem.org.ua/materials/show/typy_solnechnyh_batarey [in Russian].
2. Ginley, D.S., Cahen, D. (2011). Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
3. Razbiraemsia v mnogoobrazii vidov solnechnykh panelei [Understand the diversity of types of solar panels] (2015). altenergiya.ru. Retrieved from: <http://altenergiya.ru/sun/mnogoobrazie-vidov-solnechnyx-panelej.html> [in Russian].

4. Green, M.A. (2003). Third generation photovoltaics: advanced solar electricity generation. Springer-Verlag, Berlin.
5. Marti, A., Luque, A. (2004). Next Generation Photovoltaics (Bristol: Institute of Physics).
6. Bauer, T. (2011). Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design (Berlin: Springer-Verlag).
7. Milichko, V.A. (2016). Solnechnaia fotovoltaika: sovremennoe sostoianie i tendentsii razvitiia [Solar photovoltaics: current state and development trends]. *Uspekhi fizicheskikh nauk. - Saccseses of physical sciences*, 186, 8, 801-852 [in Russian].
8. Andreev, G. (1989). *Fotoelektricheskoe preobrazovanie kon-tsentrirovannogo solnechnogo izlucheniia*. [Photoelectric conversion of concentrated solar radiation]. Leningrad: Nauka [in Russian].
9. Wei, C. Y. (2013). Efficiency improvement of HIT solar cells on p-type Si wafers. *Materials*, 6, 11, 5440-5446.
10. Hamakawa, Y. (2004). Thin-Film Solar Cells: Next Generation Photo-voltaics and Its Applications (Berlin: Springer).

Гнатів Андрій Вікторович, д.т.н., проф.,
тел. +38 066-743-08-87, kalifus76@gmail.com

Аргун Щасяна Валіковна, к.т.н., доц.,
тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com

Дзюбенко Олександр Андрійович, к.т.н.,
доц., тел. +38 0667684116
dzyubenko.alan@gmail.com
кафедра автомобільної електроніки,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет, 61002, Україна,
м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

DETERMINATION OF OPTIMAL LOAD PARAMETERS FOR EFFICIENT OPERATION OF SILICON SOLAR BATTERY

Hnatov A., Arhun Shch., Dziubenko O.,
KhNAHU

Abstract. Problem. Currently, the most commonly used method is the so-called direct method of converting solar radiation into electric current using a variety of solar batteries (SB). The most widely used in the application were silicon SB. Consequently, the question arises as to which optimal parameters should have an electrical load in order to ensure the efficient operation of SB. **Goal.** Determination of the

optimal active load parameter for monocrystalline and polycrystalline SB, which meets the criterion for transmitting maximum power to load. **Methodology.** The analytical methods of research on the development and application of methods and devices for transforming the energy of the sun into electricity were used. Experimental methods of research and mathematical methods of processing experimental research were used. **Results.** The analysis of existing types of silicon SB is carried out, their classification is presented. The determination of the optimal active load parameter for monocrystalline and polycrystalline SB is carried out, which corresponds to the criterion of transfer of maximum power to load. The results of experimental studies are presented as volt-ampere characteristics and the dependence of the power of SB on the load current. An analysis of the results of experimental studies showed that for the most efficient operation of the SB, its active load should be maintained in the range from 3 ohms to 3,5 ohms. **Originality.** The method for determining the optimal electrical load parameters for silicon monocrystal and polycrystalline SB has been improved. The method of correlation of electric loading of SB to their own active resistance is presented. **Practical value.** The obtained results allow us to determine the optimal electrical load parameters for silicon monocrystalline and polycrystalline SB. If the types of SB in question are compiled into systems with a corresponding serial-parallel connection, then it is necessary to determine the internal resistance of such a system. Applying this principle, you can determine the optimal load parameters for any silicon solar system.

Key words: energy-saving technologies, solar battery, solar cell, alternative sources of electricity, solar energy.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Гнатів А.В., Аргун Щ.В., Дзюбенко А.А.,
ХНАДУ

Аннотация. Определены оптимальные параметры активной нагрузки для монокристаллических и поликристаллических солнечных батарей (СБ), соответствующие критерию передачи максимальной мощности в нагрузку. Раскрыта и проанализирована классификация СБ. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде вольт-амперных характеристик и зависимости мощности СБ от тока нагрузки.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, солнечная батарея, солнечный элемент, альтернативные источники энергии, потребление энергии солнца, солнечная панель.