

УДК 620.97: 621.31

КАПЛУН В.В.<sup>1</sup>, КРАВЧЕНКО О.П.<sup>1</sup>, МАНОЙЛОВ Е.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет технологій та дизайну

<sup>2</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
м. Київ

## ОЦІНЮВАННЯ РІВНІВ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОЮ БАТАРЕЄЮ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ

**Мета.** Одержання математичних залежностей для визначення кількості електричної енергії, що генерується сонячною батареєю за обраний проміжок часу з використанням функції Гауса.

**Методика.** Апроксимація кривих значень потужностей для обґрунтування аналітичного виразу залежності потужності сонячної батареї від часу за допомогою функції Гауса з використанням власно розробленого програмного забезпечення.

**Результати.** На основі статистичних даних одержані математичні залежності для оцінювання рівня генерації електричної енергії сонячною батареєю. Запропонована методика дає можливість оцінювати кількість електричної енергії, що генерується сонячною батареєю за визначений проміжок часу.

**Наукова новизна.** Запропонований метод оцінювання енергетичного потенціалу сонячної батареї шляхом апроксимації часової залежності її потужності від рівня сонячної радіації, одержаної на основі статистичних спостережень з використанням функції Гауса.

**Практична значимість.** Використання середньодобових, середньомісячних або середньорічних рівнів сонячної радіації дає можливість розрахувати середні значення потужності сонячної батареї та кількість електроенергії, що генерується нею за визначений проміжок часу. Запропонована методика може бути використана при розробці алгоритмів керування системою електроживлення з поновлюваними джерелами енергії.

**Ключові слова:** сонячна батарея, рівень генерації електроенергії, середня потужність, мікроенергетична система, апроксимація статистичних даних, функція Гауса.

**Вступ.** Система електроживлення з використанням поновлюваних джерел енергії характеризується стохастичними залежностями рівнів генерації електроенергії у зв'язку з очевидною залежністю від природних факторів: сонячної радіації, сили вітру, тощо [1]. Разом з тим, використання таких джерел пов'язано з необхідністю визначення прогнозованих рівнів генерації електроенергії за обраний період часу, що дасть можливість оптимізувати режими роботи мікроенергосистем.

Основною потребою, що виникає при спробі ймовірнісного опису випадкових процесів є наявність статистичної інформації, яка базується на тривалих спостереженнях за функціонуванням цих процесів. На теперішній час найбільш повна статистична інформація оцінки кліматичних умов (а саме сили вітру та сонця) базується на метеорологічних даних кліматичних зон України. З метою формування оптимальних алгоритмів керування мікроенергетичних систем з декількома джерелами електроенергії необхідне узгодження енергетичних параметрів (потенціалу первинної енергії, рівнів генерації електроенергії, графіків електроспоживання, якості електричної енергії, надійності роботи електроенергетичної системи, тощо) для забезпечення мінімальної вартості електроенергії.

Можливості моделювання процесів генерації електроенергії у мікроенергетичних системах обмежені, оскільки відсутній простий математичний інструментарій для визначення енергетичного потенціалу поновлюваних джерел. В даній роботі запропонований метод оцінювання енергетичного потенціалу сонячної батареї (СБ) шляхом апроксимації часової залежності її потужності від рівня сонячної радіації, одержаної на основі статистичних спостережень з використанням функції Гауса.

**Постановка завдання.** Відомо, що для сонячної батареї потужність, яка нею генерується, нелінійно залежить від рівня сонячної радіації, температури, пори року і ін. [2]. Основна складність при моделюванні СБ як джерела живлення полягає в прогнозуванні величини електричної енергії, яку генерує сонячна батарея за визначений проміжок часу. Таке прогнозування необхідне для точної оцінки забезпеченості споживачів достатньою кількістю електроенергії та керування джерелами генерації електроенергії в мікроенергетичних системах, виходячи з максимального використання енергетичного потенціалу кожного окремого джерела.

Метою цієї роботи є одержання аналітичних виразів для визначення кількості електроенергії, що генерується СБ, за обраний проміжок часу на основі функції Гауса як зміну потужності в часі.

**Результати досліджень.** Рівняння (1) описує вольт-амперну характеристику (ВАХ) I-U ідеального сонячного елемента (СЕ) [3]:

$$I = I_{\phi c} - I_{\delta} = I_{\phi c} - I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

де:  $I_{\phi c}$  - фотострум, який генерується світлом;

$I_{\delta}$  - струм діода;

$I_0$  - темновий струм р-п переходу;

$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$  - заряд електрону;

$k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  - стала Больцмана.

На рис.1 наведена ВАХ ідеального сонячного елемента, який знаходиться в темряві (крива 1) та при освітленні (крива 2). При освітленні сонячного елемента всі точки кривої 1 зміщуються на одну і ту саму величину струму короткого замикання  $I_{кз}$ , для ідеального СЕ струм  $I_{кз} = I_{\phi c}$  [4]

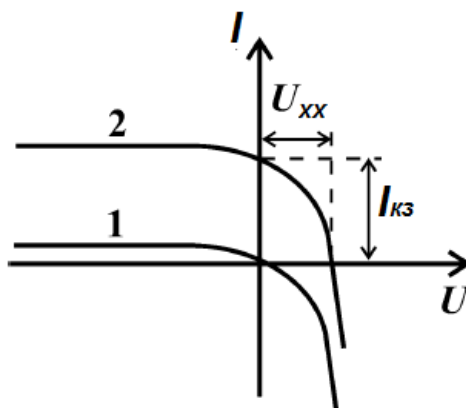


Рис.1. Вольт-амперна характеристика ідеального сонячного елемента (перший квадрант): 1 - в темряві; 2 - при освітленні

Еквівалентна схема ідеального СЕ являє собою паралельно з'єднаний генератор струму та ідеальний діод (рис.2).

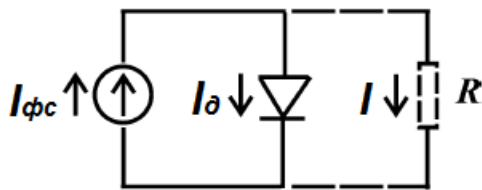


Рис.2. Еквівалентна схема ідеального сонячного елемента, R - опір навантаження

Формула (1) для ідеального діода неадекватно співвідноситься з даними для ВАХ, одержаних експериментальним шляхом. Тому перетворення рівняння діода здійснюється шляхом введення в знаменник експоненти коефіцієнта А, який враховує неідеальність ВАХ і визначається експериментально (2) [3]:

$$I = I_{\phi c} - I_{\delta} = I_{\phi c} - I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

Однак, цей вираз також не повністю узгоджується з експериментальними даними, оскільки через СЕ протікають порівняно високі величини густини струму, і навіть при малих величинах опору спостерігається значний спад напруги. Тому виникає необхідність урахування паралельного опору сонячного елемента  $R_{np}$  (опір витоку, який в ідеальному СЕ є нескінченно великим) і послідовного опору  $R_{nc}$  [5]. З урахуванням цієї обставини запропонована еквівалентна схема заміщення СЕ (рис. 3), що характеризується співвідношенням (3) для визначення ВАХ.

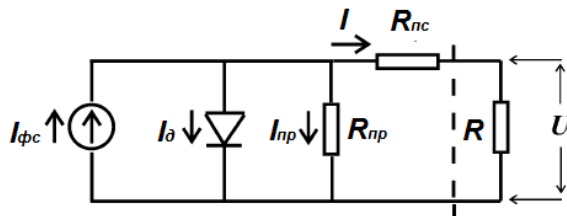


Рис.3. Еквівалентна схема сонячного елемента

$$I = I_{\phi c} - I_{\delta} = I_{\phi c} - I_0 \left( \exp\left(\frac{eU + IR_{nc}}{AkT}\right) - 1 \right) - \frac{IR_{nc} + U}{R_{np}} \quad (3)$$

У формулі (3) всі величини визначаються експериментальним шляхом для кожного окремого сонячного елемента. [6]

Як відомо, параметри СЕ залежать від рівня освітленості та від температури. В більшості випадків при визначенні параметрів СЕ використовують декілька ВАХ, що одержані при різних рівнях інтенсивності сонячної радіації [7,8,9]. Більш ефективною методикою для визначення параметрів СЕ є визначення цих параметрів з результатів вимірювання світлової ВАХ при фіксованому випромінюванні і температурі (параметри визначаються лише з однієї ВАХ) і, як було показано було в [10],  $I_{kз} \approx I_{\phi c}$ . Отже, прийнятним можна вважати, що фотострум  $I_{\phi c}$  прямо пропорційний величині освітленості СЕ [11]. Таким чином,

$$I_{\phi c|G} = \left( \frac{G}{G_0} \right) I_{\phi c|G_0}, \quad (4)$$

де:  $G$  - інтенсивність сонячного випромінювання в поточний момент часу,  $\text{В/м}^2$ ;  
 $G_0$  - стандартна інтенсивність сонячного випромінювання ( $1000 \text{ В/м}^2$ );  
 $I_{\text{фс}}|G$  - фотострум в поточний момент часу;  
 $I_{\text{фс}}|G_0$  - фотострум при стандартній інтенсивності сонячного випромінювання.

Потужність СБ обчислюється за формулою (5) [12]:

$$P_{\text{сб}} = \left( \frac{G}{G_0} \right) P_{\text{ном}} \alpha \quad (5)$$

де:  $P_{\text{ном}}$  - номінальна потужність СБ, яка декларується виробником за умови інтенсивності сонячної радіації  $1000 \text{ Вт/м}^2$  та температури навколишнього середовища  $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $\alpha$  - коефіцієнт втрат в СБ.

Таким чином, за наявності даних середньодобової, середньомісячної або середньорічної потужності сонячної батареї є можливість розрахунку її середньої потужності за визначений проміжок часу. Це можливо зробити на основі апроксимації кривих потужностей, з наступним визначенням аналітичного виразу кривої залежності потужності сонячної батареї від часу.

Для дослідження була обрана сонячна батарея  $\text{KV} - 180 \text{ W} / 24 \text{ V}$ . Для виконання апроксимації був використаний графік середньодобової потужності СБ  $\text{KV} - 180 \text{ W} / 24 \text{ V}$  за літній період [12] (рис.4).

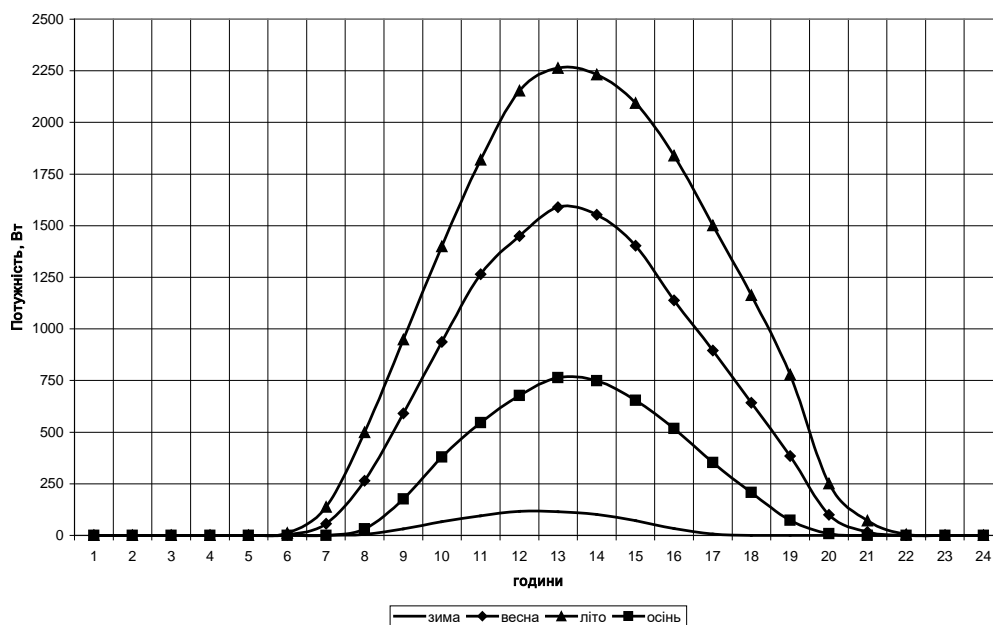


Рис.4. Середньодобова потужність СБ KV – 180 W / 24 V за сезонами року

Апроксимація кривої проводилася за допомогою функції Гауса шляхом підбору відповідних коефіцієнтів у формулі Гауса за методом найменших квадратів, використовуючи власно розроблене програмне забезпечення. Крива розподілу середньодобової потужності є нерівномірною на часовому проміжку, тому для точної апроксимації використовувалася сума значень кількох кривих розподілу Гауса (рис.5). Одержана апроксимаційна крива описується наступним аналітичним виразом (6):

$$P(t) = f_1(t) + f_2(t)$$

де:

$$f_1(t) = \frac{A_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}; \quad f_2(t) = \frac{A_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (6)$$

Для першої функції Гауса	Для другої функції Гауса
$A_1=1.41002020493764E+0004$	$A_2=5.36091577318218E+0003$
$\mu_1= 1.24576711783162E+0001$	$\mu_2=1.68368259498389E+0001$
$\sigma_1=2.59449100810093E+0000$	$\sigma_2=1.99220628650231E+0000$

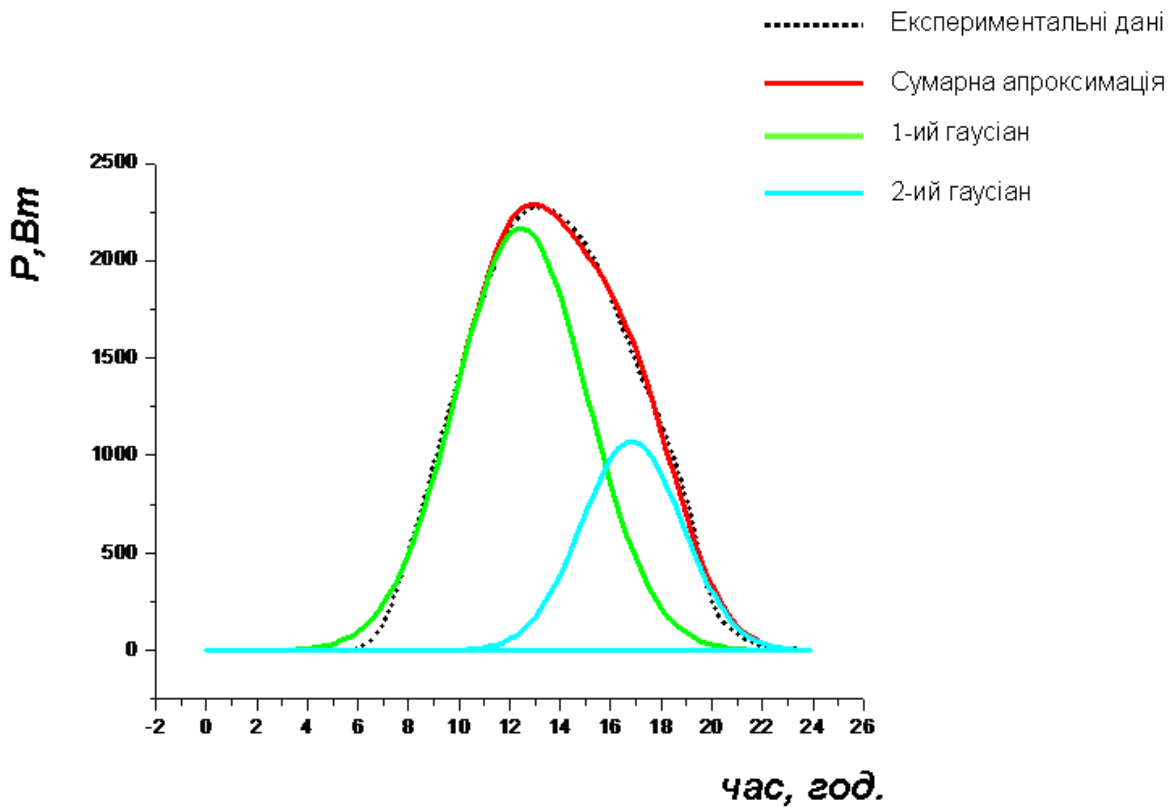


Рис.5. Потужність сонячної батареї для літнього періоду

Середньодобовий розподіл потужності СБ з інтервалом 30 хвилин зображений на рис.6, а в табл.1 наведена кількість електроенергії, що генерується СБ за визначений проміжок часу.

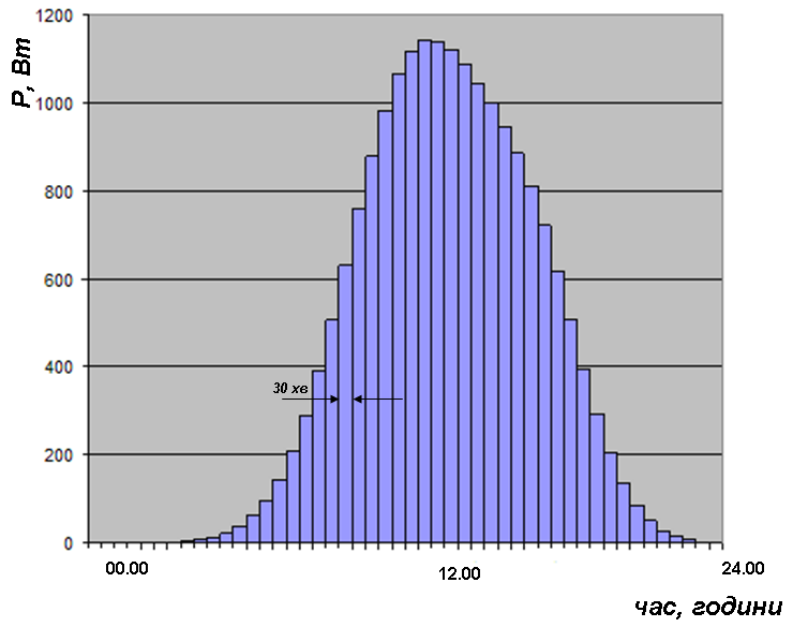


Рис.6. Середньодобовий розподіл потужності СБ з інтервалом 30 хвилин

Таблиця 1

Кількість електроенергії, що генерується СБ на 30-хвилинному інтервалі

Інтервал часу, год.	Енергія СБ, Вт×год.	Інтервал часу, год.	Енергія СБ, Вт×год.
0.0-0.5	0.017	12.0-12.5	1117
0.5-1.0	0.042	12.5-13.0	1142
1.0-1.5	0.099	13.0-13.5	1140
1.5-2.0	0.222	13.5-14.0	1119
2.0-2.5	0.482	14.0-14.5	1085
2.5-3.0	1.009	14.5-15.0	1044
3.0-3.5	2.032	15.0-15.5	998.103
3.5-4.0	3.944	15.5-16.0	946.757
4.0-4.5	7.378	16.0-16.5	885.89
4.5-5.0	13.3	16.5-17.0	811.47
5.0-5.5	23.104	17.0-17.5	721.633
5.5-6.0	38.676	17.5-18.0	618.269
6.0-6.5	62.39	18.0-18.5	507.066
6.5-7.0	96.988	18.5-19.0	396.091
7.0-7.5	145.292	19.0-19.5	293.586
7.5-8.0	209.748	19.5-20.0	205.918
8.0-8.5	291.806	20.0-20.5	136.403
8.5-9.0	391.253	20.5-21.0	85.216
9.0-9.5	505.625	21.0-21.5	50.16
9.5-10.0	629.925	21.5-22.0	27.8
10.0-10.5	756.802	22.0-22.5	14.501
10.5-11.0	877.323	22.5-23.0	7.116
11.0-11.5	982.291	23.0-23.5	3.285
11.5-12.0	1064	23.5-24.0	1.427
Сумарна кількість електроенергії за добу, Вт×год			19461.44

**Висновки.** Математичні вирази для визначення кількості електричної енергії, що генерується сонячною батареєю за обраний проміжок часу, одержані шляхом апроксимації кривих залежності потужності сонячної батареї від часу за допомогою функції Гауса з використанням власно розробленого програмного забезпечення на основі статистичних даних. Запропонований метод дозволяє визначити кількість електричної енергії за обраний проміжок часу на основі відповідних статистичних даних, що характеризують енергетичний потенціал сонця у регіоні. Це відкриває можливості для адаптивного моделювання комбінованих мікроенергетичних систем з джерелами електроенергії такого класу і оптимального управління ними. Крім того, запропонований підхід за аналогією може бути використаний для оцінювання рівнів генерації електроенергії вітроелектроустановками.

### Список використаних джерел

1. В.В. Каплун, О.П. Кравченко, В.В. Василенко, С.С. Макаревич, Р.В. Каплун, "Аналіз методів оптимізації мікроенергетичних систем (MicroGrid) на основі систем розподіленої генерації," // Вісник КНУТД №2(84), сс.5-17, 2015.
2. Handbook of photovoltaic science and engineering / A. Luque and S. Hegedus // 2nd edition, John Wiley & Sons, 2011.
3. Фаренбрух, А. Солнечные элементы: теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб; пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна/ Москва.: Энерго-атомиздат, 280 с., 1987.
4. Гременок В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский/ Минск: Изд. Центр БГУ, 222 с., 2007.
5. Колтун, М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун/ Москва: Наука, 280 с., 1984.
6. A.A. Jadallah, D.Y. Mahmood, Z.A. Abdulqader// Modeling and Simulation of a Photovoltaic Module in Different Operating Regimes/Acta Physica Polonica A, Vol. 128 , B-461-B-464.; 2015.
7. Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures, Technical Memorandum 73702, NASA, Cleveland, Ohio, 1977.
8. Бордина, Н.М. Определение параметров вольтамперной характеристики фотопреобразователя / Н.М. Бордина, А.К. Зайцева, В.Н. Стрельцова // Гелиотехника. – №1. – С. 17–23, 1977.
9. О корректности различных методов определения последовательного сопротивления фотодиодных структур / А.П. Горбань и др. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, № 19. – С. 85–90, 1991.
10. Determination of solar cell parameters from its current-voltage and spectral characteristics / M.Tivanov et al // Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 87. – P. 457–465, 2005.
11. Messenger Roger, Jerry Ventre // Photovoltaic Systems Engineering, 2nd Edition CRC Press, Florida, USA, 2003.
12. Голик О.П. Автоматизація процесу керування електропостачанням фермерського господарства від автономних джерел енергії / Дисертація канд. техн. наук; Кіровогр. нац. техн. ун-т.- Кіровоград, 2012.

### ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ КАПЛУН В.В.<sup>1</sup>, КРАВЧЕНКО О.П.<sup>1</sup>, МАНОЙЛОВ Е.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет технологий и дизайна

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев

**Цель.** Получение математических зависимостей для определения количества электрической энергии, генерируемой солнечной батареей за выбранный промежуток времени с использованием функции Гаусса.

**Методика.** Аппроксимация кривых значений мощностей солнечной радиации для обоснования аналитической зависимости мощности солнечной батареи от времени с помощью функции Гаусса с использованием собственно разработанного программного обеспечения.

**Результаты.** На основе статистических данных получены математические зависимости для оценки уровня генерации электрической энергии солнечной батареей. Предложенная методика дает возможность оценивать количество электрической энергии, генерируемой солнечной батареей за определенный промежуток времени.

**Научная новизна.** Предложенный метод оценки энергетического потенциала солнечной батареи путем аппроксимации временной зависимости ее мощности от уровня солнечной радиации, полученной на основе статистических наблюдений с использованием функции Гаусса.

**Практическая значимость.** Использование среднесуточных, среднемесячных или среднегодовых уровней солнечной радиации дает возможность рассчитать средние значения мощности солнечной батареи и количество генерируемой ею за определенный промежуток времени. Предложенная методика может быть использована при разработке алгоритмов управления системой электропитания с возобновляемыми источниками энергии.

**Ключевые слова:** солнечная батарея, уровень генерации электроэнергии, средняя мощность, микроэнергетическая система, аппроксимация статистических данных, функция Гаусса.

## **EVALUATION OF LEVELS ELECTRIC POWER GENERATION SOLAR PANELS ON THE BASIS OF STATISTICAL DATA**

KAPLUN V.V.<sup>1</sup> KRAVCHENKO O.P.<sup>1</sup>, MANOYLOV E.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kyiv National University of Technology and Design

<sup>2</sup> Lashkarov's Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv

**Purpose.** Obtaining mathematical expressions for definition the amount of electrical energy generated by the solar panel during the selected period of time using a Gaussian function.

**Methodology.** Approximation curves of solar radiation values of capacities for analytical studies based solar power from time to time by a Gaussian function with the use of own developed software.

**Results.** On the basis of statistical data obtained mathematical relationships to assess the level of electric power generation solar panel. The proposed method makes it possible to estimate the amount of electric power generated by the solar battery for a certain period of time.

**Originality.** The proposed method of assessing solar energy potential by approximating the time dependence of its power from solar radiation levels obtained through statistical surveys using a Gaussian function.

**Practical significance.** Using the average daily, monthly or annual average levels of solar radiation makes it possible to calculate the average values of solar power generated and the amount of it for a selected period of time. The proposed method can be used in the development of power system control algorithms with renewable energy sources.

**Key words:** solar panel, the level of electricity generation, the average micro power energy system, approximation of statistical data, the Gaussian function.