

УДК 621.383

# Автоматизована система визначення параметрів моделі сонячних елементів

Гуменюк Д. В., ORCID [0000-0002-2983-8312](https://orcid.org/0000-0002-2983-8312)e-mail: [gumenyuk98@gmail.com](mailto:gumenyuk98@gmail.com)Кафедра КЕОА [keoa.kpi.ua](http://keoa.kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Київ, Україна

**Реферат**—Запропонована автоматизована система, що дозволяє вимірювати світлову та темнову вольт-амперну характеристику (ВАХ) сонячного елемента (СЕ). Вимірювання та обробка даних здійснюється за допомогою віртуального приладу, створеного в середовищі LabVIEW. За отриманими даними побудована модель СЕ, що надалі може використовуватися для визначення точки максимальної потужності за різного рівня освітленості і температури. Запропоновано підхід для обчислення параметрів моделі СЕ за ВАХ, на основі якого була визначена точка максимальної потужності (ТМП) для сонячного модуля. Розходження з експериментальними даними складає 6,6 %.

**Ключові слова** — альтернативна енергетика; сонячні елементи; автоматизоване визначення параметрів.

## I. ВСТУП

Інтенсивне використання традиційних видів палива й поглиблення глобальної енергетичної кризи спонукають до пошуку альтернативних, екологічно чистих, поновлювальних джерел енергії. Одним з перспективних напрямків розвитку енергетики є пряме перетворення енергії Сонця в електричну за допомогою сонячних панелей. Для їх ефективного функціонування необхідно підтримувати такий режим роботи, який забезпечує максимальну вихідну потужність, що надходить до навантаження. ТМП на вольт-амперній характеристиці сонячних батарей залежна передовсім від освітлення і температури. Для визначення ТМП в динамічних процесах зміни умов експлуатації сонячних елементів важливо знати головні параметри й характеристики сонячних елементів, на основі яких створюють алгоритми для систем слідкування за ТМП (англ. – «Maximum Power Point Tracking (MPPT)»).

Метою роботи є система автоматизованого визначення параметрів сонячних елементів для встановлення ТМП і оптимального опору навантаження, яка відрізняється від аналогічних інженерних рішень простою реалізацією, доступністю апаратно-програмних технологій обробки та візуалізації даних, сумісністю за основними конструкторсько-технологічними показниками з наявними системами MPPT.

## II. ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Методи слідкування за точкою максимальної потужності умовно можна розділити на 3 групи.

До першої групи належать методи, засновані на алгоритмі збурення і спостереження [1]. В даному алгоритмі довільно задається початкова точка на вольт-амперній характеристиці сонячного елемента. При зміні струму визначають, як змінюється потужність в порівнянні з попереднім кроком. Таким чином встановлюється точка, де потужність максимальна. Попри простоту втілення, за цим алгоритмом важко точно визначити ТМП. Точки, що знаходяться в околі, постійно перевірятимуться на наявність максимуму потужності, що зменшує ефективність алгоритму.

Методи другої групи базуються на тому, що положення точки максимальної потужності відоме заздалегідь і визначається у процентному відношенні до напруги розімкненого кола. Для сонячних елементів це значення складає 70 – 80 % від напруги розімкненого кола [2]. В процесі роботи сонячний елемент відключається від схеми слідкування за ТМП, вимірюється його напруга розімкнутого кола, і струм навантаження змінюється таким чином, щоб забезпечувати напругу на встановленому рівні. Недоліком є складність точного визначення ТМП, а також втрата потужності при відключенні елемента.

До третьої групи належать методи, де ТМП обчислюється на базі отриманої моделі сонячного елемента. Методи із цієї групи є найбільш простими для програмної реалізації на мікроконтролері (параметри моделі можуть зберігатися в пам'яті), а також дозволяють точно визначити ТМП. В роботах [3-5] описано підходи для визначення параметрів СЕ за точками зі світлової ВАХ, однак вони вимагають складних обчислень. В роботах [6-7] описано простий спосіб обчислення значень параметрів із використанням світлової



та темної характеристики СЕ, але установка, на якій проводилися дослідження, є застарілою і не автоматизованою. Система для автоматичного визначення ВАХ СЕ представлена у [8], однак параметри моделі сонячного елемента при цьому не визначаються.

Тому метою даної роботи є розробка автоматизованої системи, яка дозволяє визначати параметри сонячного елемента, що надалі можуть бути збережені в пам'яті мікроконтролера (МК) і використані для обчислення ТМП.

### III. ДОСЛІДЖУВАНІ ПАРАМЕТРИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Вольт-амперна характеристика сонячного елемента може бути описана рівнянням [9]:

$$I = I_{\phi} - I_{зв} \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_n)}{A k T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{ш}}, \quad (1)$$

де  $I_{\phi}$  – фотострум, що генерується елементом пропорційно до освітленості,  $I_{зв}$  – зворотний струм насичення,  $R_n$  – послідовний опір,  $R_{ш}$  – шунтувальний опір,  $q$  – заряд електрона,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура переходу,  $A$  – діодний фактор.

Виразу (1) відповідає еквівалентна схема заміщення (рис. 1).

Послідовний опір складається з опору контактів (опору переходу напівпровідник–метал) і опору напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений елемент. Зазвичай, його значення є нехтовно малим. При відносно великих рівнях засвітлення можна також знехтувати впливом шунтувального опору [10], поклавши  $R_{ш} \rightarrow \infty$ .

Спрощена схема заміщення СЕ, що використовується для розрахунків у даній роботі, наведена на рис. 2.

Вона описується рівнянням [9]:

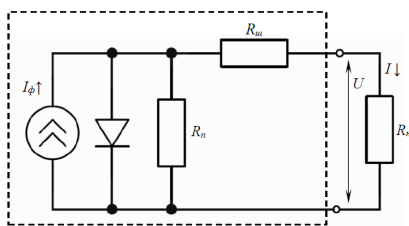


Рис. 1 Еквівалентна схема заміщення СЕ

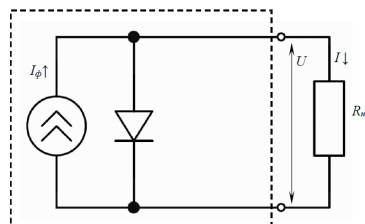


Рис. 2 Спрощена схема сонячного елемента

$$I = I_{\phi} - I_{зв} \cdot (e^{\alpha U} - 1), \quad (2)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{q}{A k T}.$$

Для визначення фотоструму  $I_{\phi}$  використовується світлова ВАХ сонячного елемента. За встановленим його значенням, можна обчислити фотострум за різних температур і освітленості [11]:

$$I_{\phi} = I_{\phi, н.у.} \cdot \frac{G}{G_c} + a_T \cdot (T - T_c), \quad (3)$$

де  $I_{\phi, н.у.}$  – фотострум, визначений за нормальних умов роботи,  $G$  – освітленість СЕ,  $G_c$  – освітленість за нормальних умов, при якій визначався  $I_{\phi, н.у.}$  (2000 люкс),  $T_c$  – температура за нормальних умов (20 °C),  $T$  – температура СЕ,  $a_T$  – температурний коефіцієнт фотоструму.

Зворотний струм насичення діоду  $I_{зв}$  та параметр  $\alpha$  обчислювалися за прямою гілкою темної ВАХ. Дана ВАХ описується рівнянням:

$$I = I_{зв} \cdot (e^{\alpha U} - 1). \quad (4)$$

При струмах  $I \gg I_{зв}$  залежність  $\ln(I) = f(U)$  представляє пряму, тангенс кута нахилу якої рівний  $\alpha$ , а відрізок, що відсікається від осі ординат, дає значення  $\ln(I_{зв})$ .

Таким чином, вимірявши пряму і зворотну ВАХ, можна отримати наближену модель СЕ, значення параметрів якої залежать від освітленості та температури.

Точка максимальної потужності розраховуватиметься з використанням максимуму залежності:

$$P = I \cdot U = U \cdot (I_{\phi} - I_{зв} \cdot (e^{\alpha U} - 1)). \quad (5)$$

### IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

Експериментальна установка складається з керувального пристрою (мікроконтролер STM32F401RE), цифро-аналогового перетворювача, схеми перетворення напруга–струм, вимірювача струму і напруги, досліджуваного зразка та ноутбука із середовищем графічного програмування LabVIEW. Блок-схема установки наведена на рис. 3. Дослідження проводились на полікристалічному сонячному модулі потужності 0,7 Вт.

Як керувальний пристрій використовувався відладочний модуль STM32F401RE Nucleo. Даний блок забезпечує керування ЦАП, датчиком струму INA226, підключенням схеми для вимірювання світлової чи темної ВАХ, а також запис і збереження в комп'ютері даних, отриманих від датчиків.

Цифрове значення напруги від STM32 передається на ЦАП AD5624R по інтерфейсу SPI. AD5624R – 12 бітний чотирьохканальний ЦАП з вбудованою опорною напругою 2,5 В [12]. В даній конфігурації забезпечується точність керування напругою у 1,2 мВ. При цьому точність задання струму – 40 мкА.

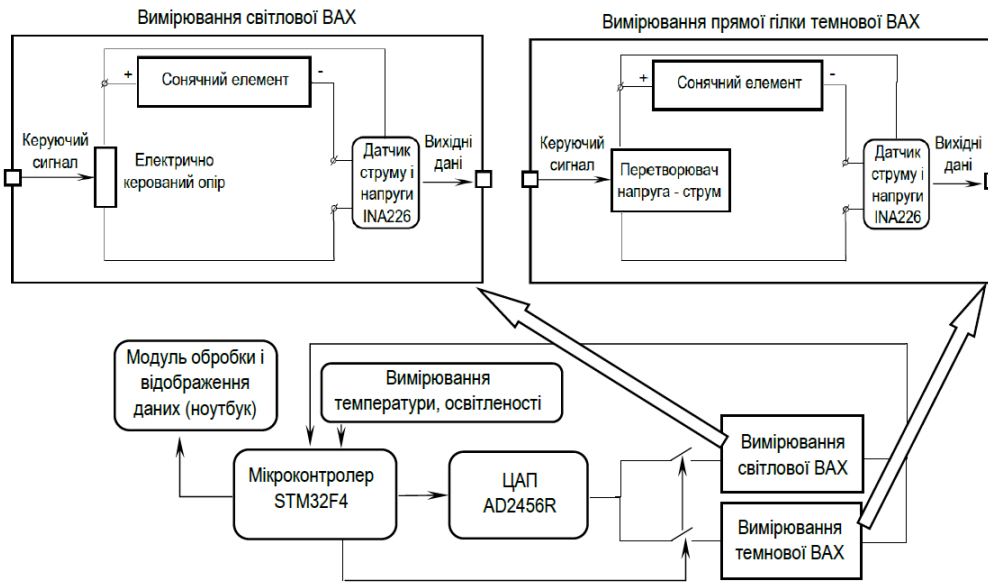


Рис. 3 Блок схема установки для автоматизованого вимірювання параметрів СЕ

Для вимірювання напруги на зразку та струму, що протікає крізь зразок, використовувався датчик INA226 [13]. Датчик вмикається в схему послідовно. Струм вимірюється як падіння напруги на шунтовому резисторі, що під'єднується до відповідних входів датчика, за допомогою вбудованого 16 бітного АЦП. В даній схемі використовується шунтовий резистор опором в 0,1 Ом, що дозволяє вимірювати струм до 800 мА з роздільною здатністю у 25 мкА. Покази датчика були відкалібровані за допомогою прецизійного вольтметра В7-46.

Як керований опір використовувався МОН-транзистор 2п7000. Освітленість вимірювалася датчиком GY-302, а температура – DS18B20.

Дані про вольт-амперну характеристику до комп'ютера надходять від мікроконтролера за протоколом UART. Для візуалізації і обробки даних був розроблений інтерфейс в програмі LabVIEW, що дозволяє будувати ВАХ в реальному часі і зберігати дані

у файл. Вигляд передньої панелі приладу показано на рис. 4.

V. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ

За допомогою описаної установки було отримано пряму гілку темної ВАХ (рис. 5).

Апроксимацією за методом найменших квадратів встановлено, що в напівлогарифмічному масштабі  $\ln(I) = f(U)$  залежність можна описати прямою:

$$\ln(I) = 2,066 \cdot U - 16,195. \tag{6}$$

Тоді  $a = 2.066$  (Кл/Дж),  $I_{зв} = 0.1$  (мкА).

Виміряна світлова ВАХ наведена на рис. 6 (ВАХ експериментальна). Значення фотоструму  $I_f$  за освітленості 2000 лк склало 19,8 мА. З отриманої експериментальної залежності видно, що точка максимальної потужності - 18,7 мА, 4,95 В, тобто 92,56 мВт.

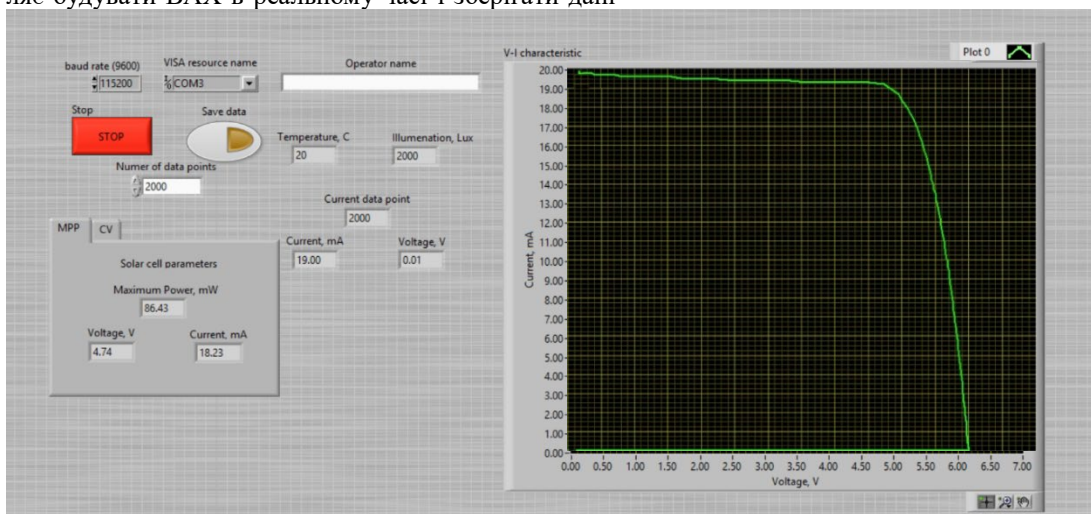


Рис. 4 Вигляд передньої панелі віртуального приладу для вимірювання ВАХ СЕ

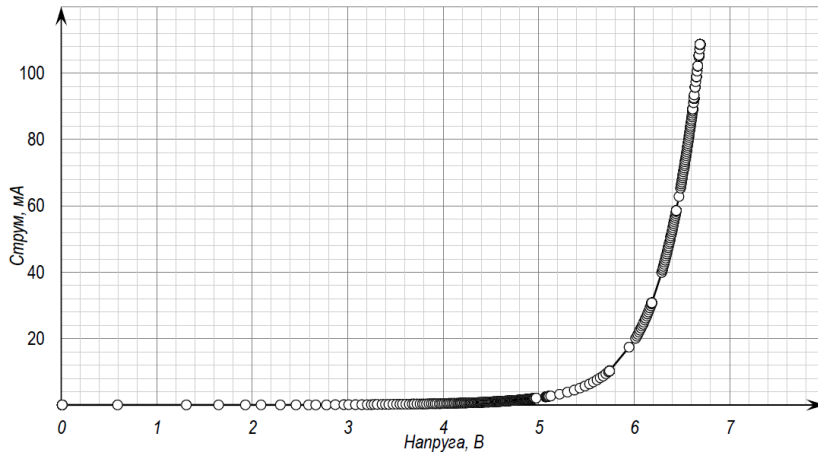


Рис. 5 Пряма гілка темної ВАХ

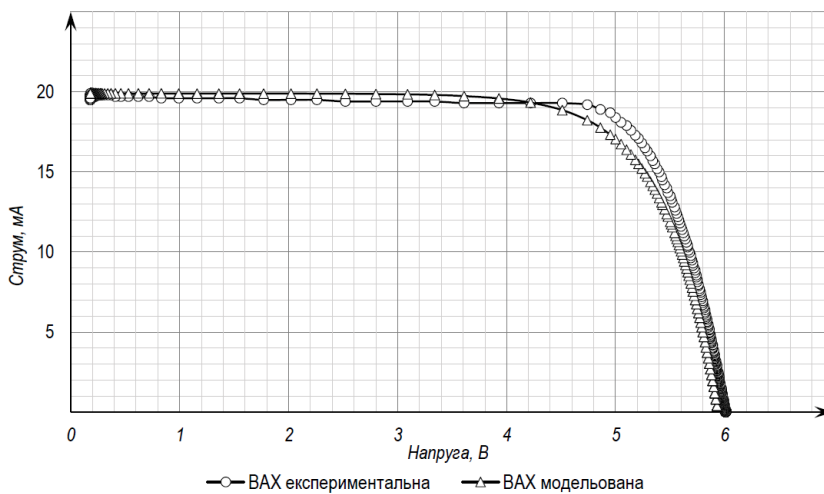


Рис. 6 ВАХ побудована за експериментальними даними (ВАХ експериментальна) та за розрахованою моделлю СЕ (ВАХ модельована)

Підставивши обчислені значення параметрів у (2), отримаємо рівняння моделі СЕ за освітленості 2000 лк і температури 20°C:

$$I = 19,8 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-6} (e^{2,066U} - 1). \quad (7)$$

ВАХ, що побудована за даним рівнянням, зображена на рис. 6 (ВАХ модельована). Змодельована ВАХ є наближеною до експериментально отриманої ВАХ.

Знайшовши максимум з рівняння:

$$P = U \cdot (19,8 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-6} (e^{2,066U} - 1)), \quad (8)$$

визначимо змодельоване значення точки максимальної потужності: 4,74 В, 18,23 мА - 86,43 мВт.

Маючи інформацію про ТМП можливо розрахувати значення оптимального опору для досліджуваного СЕ і подати відповідний керувальний сигнал на перетворювач напруги від СЕ.

Отримане значення ТМП за ВАХ моделі відрізняється від експериментально визначеного на 6,6%, що свідчить про відповідність моделі реальному СЕ.

## ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано підхід до слідкування за ТМП з використанням рівняння моделі сонячного елемента. Розроблена установка для автоматизованого вимірювання ВАХ сонячних елементів, а також програма для обробки і зберігання даних в середовищі LabVIEW. За вимірююю ВАХ розраховуються параметри моделі СЕ, що надалі дозволяють обчислювати ТМП за різних значень температури і освітленості.

Змодельоване значення ТМП, обчислене за запропонованою методикою, незначно (6,6%) відрізняється від експериментального. На подальших етапах буде продовжено дослідження методів обчислення параметрів СЕ, що дозволять отримати більш точну модель СЕ.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms," *Progress in Photovoltaics: Research and Innovations*, pp. 47 – 62, 2002, DOI: [10.1002/pip.459](https://doi.org/10.1002/pip.459).
- [2] Van der Merwe L, van der Merwe G, "Maximum power point tracking—implementation strategies,"



- Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 214–217, 1998.
- [3] Garrigos A. et al., “Real time estimation of photovoltaic modules characteristics and its application to maximum power point operation”, *Renewable Energy*, pp. 1059 – 1076, 2007.
- [4] Koval O.S., Tyvanov M.S., “Opredelenye parametrov solnechnogo elementa yz eho svetovoi volt-ampernoii kharakterystyky [Determination of parameters of a solar cell from its light current-voltage characteristic],” *Vestnyk BHU. Ser. 1. №2*, pp. 39 – 44, 2012.
- [5] Boiko B.T et al., “Plivkovi fotoelektrychni peretvoriuvachi na osnovi CuGaSe2 [Film photovoltaic converters based on CuGaSe2],” *Fizyka i Khimiia Tverdoho Tila T.2, №4*, pp.549 – 558, 2001.
- [6] Lyhachev V.A., Popov A.Y., *Laboratornaia rabota “Spektralnaia chuvstvytelnost y volt – ampernaia kharakterystyka solnechnogo elementa [Spectral sensitivity and volt - ampere characteristic of a solar cell]” po kursu “Fyzyka y tekhnolohyia pryborov osnovne nekrystallicheskykh poluprovodnykov” - M.: yzd-vo MЭУ, 1999.*
- [7] Fedchenko T. V., Levshov A. V., “Ekvyvalentnaia skhema fotoelektrycheskogo elementa y ee parametry [Equivalent circuit of a photovoltaic cell and its parameters]”, URL: <https://bit.ly/2VgLqOQ>.
- [8] Atia Y., Zahran M., “A novel system for photovoltaic solar cell test and characteristic measurements,” *Engineering Research Journal*, Vol. 32, №4, 2009.
- [9] Raushenbah. G “Spravochnik po proektirovaniyu solnechnykh batarej [Solar panel design guide],” *Energoatomizdat*, pp. 14-15, 1983.
- [10] Sharyfov B. N., Terehulov T. R., “Modelirovaniye solnechnoi paneli v prohramme MATLAB/Simulink, [Modeling a solar panel in MATLAB / Simulink]” *Vestnyk UTATU T. 19, № 4 (70)*, pp. 77 – 83, 2015. URL: <https://bit.ly/2VIXTaY>.
- [11] Treshch A. M “Modelirovaniye solnechnykh batarej v srede Matlab/Simulink [Simulation of solar panels in Matlab / Simulink environment],” *Doklady BGUIR, №7 (69)*, pp. 111-115, 2012. URL: <https://bit.ly/2YzbsWX>.
- [12] *Quad, 12-/14-/16-Bit nanoDACs with 5 ppm/°C On-Chip Reference AD5624R/AD5644R/AD5664R, Data Sheet Rev. C, Analog Devices.* URL: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5624\\_5664.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5624_5664.pdf).
- [13] *INA226 High-Side or Low-Side Measurement, Bi-Directional Current and Power Monitor with 12C Compatible Interface, Datasheet, Texas Instruments.* URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.

УДК 621.383

## Автоматизированная система определения параметров модели солнечных элементов

Гуменюк Д. В., ORCID [0000-0002-2983-8312](https://orcid.org/0000-0002-2983-8312)  
e-mail: [gumenyuk98@gmail.com](mailto:gumenyuk98@gmail.com)

Кафедра КЭВА [keoa.kpi.ua](http://keoa.kpi.ua)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Киев, Украина

**Реферат**—Предложена автоматизированная система, позволяющая измерять световую и темновую вольт-амперную характеристику (ВАХ) солнечного элемента (СЭ). Измерение и обработка данных осуществляется с помощью виртуального прибора, созданного в среде LabVIEW. По полученным данным построена модель СЭ, что в дальнейшем может использоваться для определения точки максимальной мощности при разных уровнях освещенности и температуры. Предложен подход для вычисления параметров модели СЭ по ВАХ, на основе которого была определена точка максимальной мощности (ТММ) для солнечного модуля. Расхождение с экспериментальными данными составляет 6,6%.

**Ключевые слова** — альтернативная энергетика; солнечные элементы; автоматизированное определение параметров.

UDC 621.383

## Automated System for Determining Parameters of a Solar Cell Model





D. V. Humeniuk, ORCID [0000-0002-2983-8312](https://orcid.org/0000-0002-2983-8312)

e-mail: [gumenyuk98@gmail.com](mailto:gumenyuk98@gmail.com)

Department of DECE [keoa.kpi.ua](http://keoa.kpi.ua)

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—An automated system is developed, which allows measuring the light and dark current-voltage characteristics (CVC) of a solar cell (SC). It consists of a STM32 based control unit, a digital-to-analog converter, a voltage-current transformation circuit, a current and voltage sensor and a laptop with a LabVIEW graphical programming environment. The digital voltage value from STM32 is transmitted to the AD5624R DAC via the SPI interface. AD5624R is a 12 bit DAC with built-in reference voltage 2,5 V. In this configuration, the accuracy of the voltage control is 1,2 mV and the accuracy of the current setting is 40  $\mu$ A. INA226 sensor was used to measure the voltage on the sample and the current flowing through it. The current is measured as the voltage drop across the shunt resistor, which is connected to the corresponding sensor inputs, using the built-in 16-bit ADC. A shunt resistor with a resistance of 0.1 Ohm is used, which allows measuring the current up to 800 mA with a resolution of 25  $\mu$ A. The readings of the sensor were calibrated using the precision voltmeter B7-46. Measurement and data processing is carried out with a virtual device created in the LabVIEW environment. As a microcontroller, the SM32F401RE Nucleo development board was used. This unit provides control of the DAC, the current sensor INA226, connection of the circuit for measuring light or dark CVC, as well as recording and storing the data received from sensors in the computer. By measuring the light and dark current-voltage characteristics it is possible to obtain an approximate solar cell model, the parameters of which depend on the illumination and temperature. Solar cell light CVC is used to determine the photocurrent. By its value at a certain temperature and luminosity, it's possible to define the photocurrent at different temperatures and luminosity levels. The saturation current and the parameter  $\alpha$  of the solar cell are calculated using the dark CVC. With the obtained data, a model of a solar cell is defined, which can be further used to determine the maximum power point at different levels of illumination and temperature. With information about the maximum power point, it is possible to calculate the optimal resistance value for the solar cell and to provide the corresponding control signal to the voltage converter. An approach for calculating the parameters of the SC model from its CVC is described and used to determine the MPP (maximum power point) of the solar cell module. The difference with the experimental data was 6.6%. In further research, the study of methods for calculating the parameters of the SC, which could provide a more accurate model, will be continued.

**Keywords** — *alternative energy; solar cells; automated determination of parameters.*

