

2. *Миронов В. Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород : Российская академия наук, Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.

3. *Мікроскопія в нанотехнологіях* : монографія / В. С. Антонюк [та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 260 с.

4. *Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermal vacuum evaporation* / V. Antonyuk, S. Bilokin', M. Bondarenko, Yu. Bondarenko [etc.] // Journal of Superhard Materials. – 2015. – Vol. 37, Is. 2. – P. 112–119.

5. *Білокінь С. О.* Комплексне дослідження нанометричних елементів за допомогою атомно-силової мікроскопії / С.О. Білокінь, М.О. Бондаренко // Шевченківська весна : XII конф. (25–28 березня 2014 р.) : у 2 ч. Ч. 2. – К., 2014.

6. *Билоконь С. А.* Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии / С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, В. С. Антонюк // Наноинженерия. – 2012. – № 6 (12). – С. 41–45.

7. *Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа* / В. С. Антонюк, С. А. Билоконь [и др.] // Наноинженерия. – 2014. – № 3 (33). – С. 13–16.

8. *Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового микроскопа діелектричних поверхонь* / М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко // Журнал нано- та електронної фізики. – 2014. – Том 6, № 2. – С. 02018-1–02018-5.

УДК 621.472:629.78

**Р.В. Зайцев**, канд. техн. наук

**М.В. Кириченко**, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

### **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

**Р.В. Зайцев**, канд. техн. наук

**М.В. Кіріченко**, канд. техн. наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

### **РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБОРІВ**

**Roman Zaytsev**, PhD in Technical Sciences

**Mikhail Kirichenko**, PhD in Technical Sciences

National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine

### **THE DEVELOPMENT OF THE SEMICONDUCTOR DEVICES PARAMETERS AUTOMATION MEASUREMENT SYSTEM**

*Основным методом определения параметров полупроводниковых приборов является метод измерения и аналитической обработки их вольтамперных характеристик (ВАХ). Существующие на сегодняшний день измерительные комплексы для реализации этого метода представляют собой дорогие и сложные системы, которые экономически не выгодно использовать в условиях отечественного производства. В работе разработан экономичный автоматизированный измерительный комплекс ВАХ на основе микроконтроллерной системы управления с соответствующим программным обеспечением, позволяющий в связке с компьютером проводить экспрессную аттестацию фотоэлектрических преобразователей и полупроводниковых приборов по их вольтамперным характеристикам. Апробация комплекса показала его способность проводить измерения ВАХ с достаточно высокой точностью при средней погрешности измерения не больше 1 %.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый прибор, вольтамперная характеристика, автоматизация измерения, микроконтроллер.

*Основним методом визначення параметрів напівпровідникових приладів є метод вимірювання та аналітичного опрацювання їх вольтамперних характеристик (ВАХ). Наявні нині вимірювальні комплекси для реалізації цього методу являють собою коштовні та складні системи, використання яких в умовах вітчизняної промисловості є економічно не вигідним. У роботі розроблено економічний автоматизований вимірювальний комплекс ВАХ на основі мікроконтролерної системи керування із відповідним програмним забезпеченням, що дозволяє у зв'язі із персональним комп'ютером проводити експресну аттестацію фотоелектричних перетворювачів та напівпровідникових при-*

ладів за їх вольтамперними характеристиками. Апробація комплексу продемонструвала його здатність проводити вимірювання ВАХ з достатньо високою точністю при середній похибці виміру не більше 1 %.

**Ключові слова:** напівпровідниковий прилад, вольтамперна характеристика, автоматизація вимірювань, мікроконтролер.

*The basic method of semiconductor devices parameters determination is current-voltage characteristics (CVC) measurement and analytical processing. The existing measurement systems for realization of this method are expensive and complex systems that are not economically profitable in terms of Ukrainian production. In this paper we developed a cost-effective automated CVC measurement system, based on microcontroller control system with corresponding software that allows in conjunction with a computer to carry out the express certification of solar cells and semiconductor devices by their current-voltage characteristics. Approbation of the complex showed its ability to measure the CVC with high accuracy at an average measurement error is not more than 1%.*

**Key words:** semiconductor device, current-voltage characteristic, measurement automatization, microcontroller.

**Постановка проблеми.** Постойний рост объемов производства фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии обуславливает актуальность задачи проведения экспрессной, экономичной и достоверной аттестации таких приборов как на этапе разработки и совершенствования, так и на этапе производства. Основной и наиболее применяемой методикой аттестации ФЭП остается измерение световых вольт-амперных характеристик (ВАХ), аналитическая обработка которых позволяет получить выходные параметры и КПД приборов. В настоящее время за рубежом разработан целый ряд компьютеризированных комплексов, позволяющих производить автоматизированное измерение и аналитическую обработку ВАХ с высокой точностью. Однако данные комплексы отличаются крайне высокой ценой и высокой сложностью, что исключает их использование отечественными разработчиками.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Современные успехи в развитии микроэлектроники, в частности создание достаточно мощных и дешевых микроконтроллеров и компьютеров с ARM [1;2] и AVR [3–5] архитектурой позволили создать на их основе ряд автоматизированных измерительных систем для экспрессной аттестации ФЭП с различными рабочими параметрами, позволяющие проводить также обработку результатов измерений в режиме реального времени. Также в последние годы был совершен прорыв в разработке высокоэффективных сверхярких белых светодиодов со сплошным спектром излучения основанных на принципе «голубой светодиод+люминофор». Это позволило включить в состав автоматизированных измерительных комплексов имитаторы солнечного излучения на основе таких светодиодов, отличающиеся экономичностью в работе и улучшенным соответствием спектральных и энергетических характеристик излучения к солнечному [6].

**Нерешенные части проблемы.** Современные комплексы аттестации ФЭП представляют собой весьма сложные и дорогостоящие приборы [7–9], что не позволяет их применять повсеместно и экспрессно. Такие комплексы обычно представляют собой отдельные приборы, выполненные в едином корпусе и включающие, в том числе и встроенные компьютеры, обладающие зачастую избыточной вычислительной мощностью, что и обуславливает их повышенную стоимость приобретения и эксплуатации. Наряду с этим очевидно, что в каждой лаборатории присутствует широкий ассортимент универсальной вычислительной техники – персональных компьютеров (ПК), производительность которых на сегодняшний день позволяет выполнять практически любые сложные задачи. На основании этого актуальной задачей представляется разработка современного измерительного комплекса ВАХ в виде экономичной приставки к ПК, которая бы отличалась низкой ценой и при этом обеспечивала достаточную для большинства измерений точность и простоту использования.

**Целью исследования** является разработка экономичного автоматизированного измерительного комплекса ВАХ на основе микроконтроллерной системы управления с соответствующим программным обеспечением, позволяющего в связке с ПК проводить экспрессную аттестацию ФЭП и полупроводниковых приборов по их вольт-амперным характеристикам.

**Изложение основного материала.** С учетом изложенного предлагается конструктивно выполнить измерительный комплекс в виде приставки к ПК, состоящего из двух функциональных блоков: управляющего и измерительного, как это показано на рис. 1. Управляющий блок обеспечивает преобразование поступающего от ПК управляющего цифрового сигнала в аналоговую форму и его дальнейшую подачу на исполнительные элементы для создания требуемых физических условий проведения эксперимента. В измерительном блоке на аппаратном уровне реализованы принципы измерения физических параметров исследуемого образца, например, тока и напряжения, и их последующее преобразование в цифровую форму для дальнейшей передачи на ПК. Обмен цифровой информацией с установленной на ПК программой управления и обработки данных производится посредством подключения управляющего и измерительного блоков к ПК через стандартный USB концентратор.

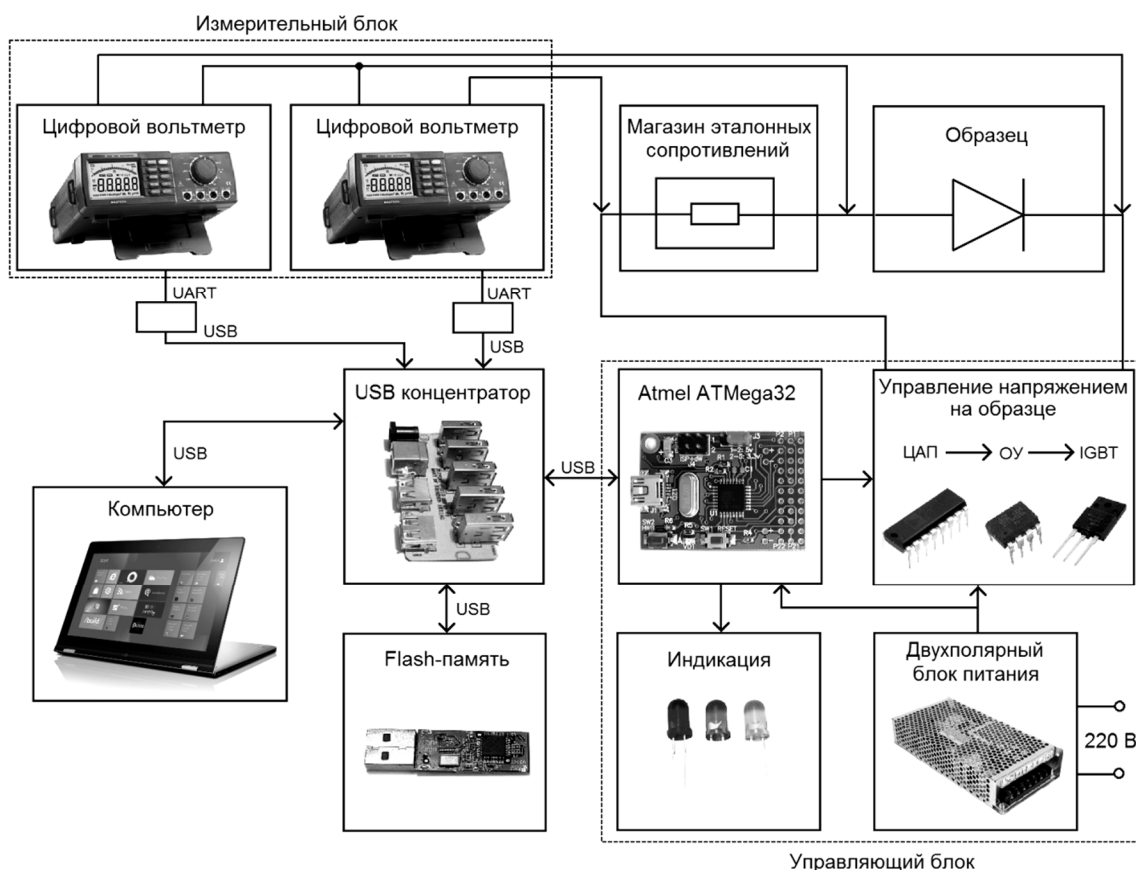


Рис. 1. Функциональная блок-схема измерительного комплекса для проведения исследований вольтамперных характеристик

Как видно из рис. 1, конструктивно управляющий блок основан на серийном микроконтроллере Atmel ATmega32, с прошивкой прозрачного программного обеспечения, аналогичного программам типа «framework», для обеспечения полного контроля над процессами со стороны программы управления и обработки данных на ПК.

К микроконтроллеру последовательно подключены 10-разрядный цифро-аналоговый преобразователь Analog Devices AD7533 (аналог КР572ПА1), необходимые операционные усилители, например, Texas Instruments LM358 (аналог 154УД3) и выходные ключи типа КТ816 и КТ817. Указанная последовательность включения позволяет на выходе блока задавать напряжение в диапазоне  $\pm 12$  В при токе до 1 А с минимальным шагом около 5 мВ, чего вполне достаточно для проведения исследований ВАХ широкого ассортимента ФЭП и полупроводниковых приборов различной конструкции.

Измерительный блок, во избежание внесения дополнительной погрешности, было решено выполнить на основе калиброванных измерительных приборов, изготавливаемых промышленно, например, типа Mastech MS8040, которые имеют цифровой выход по интерфейсу RS232C. При измерении ВАХ ФЭП данные приборы способны выполнять функции измерителей напряжения и тока, а подключенные к ним преобразователи UART-USB обеспечивают преобразование цифровых сигналов в форму, необходимую для дальнейшей передачи на ПК по интерфейсу USB.

Согласно вышеописанным конструктивным решениям был изготовлен образец измерительного комплекса для проведения исследования ВАХ, общий вид которого приведен на рис. 2. Для управления процессом обработки и хранения полученных результатов была разработана и написана на языке C# управляющая программа, вид главного окна которой приведен на рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид разработанного измерительного комплекса для проведения исследований вольтамперных характеристик

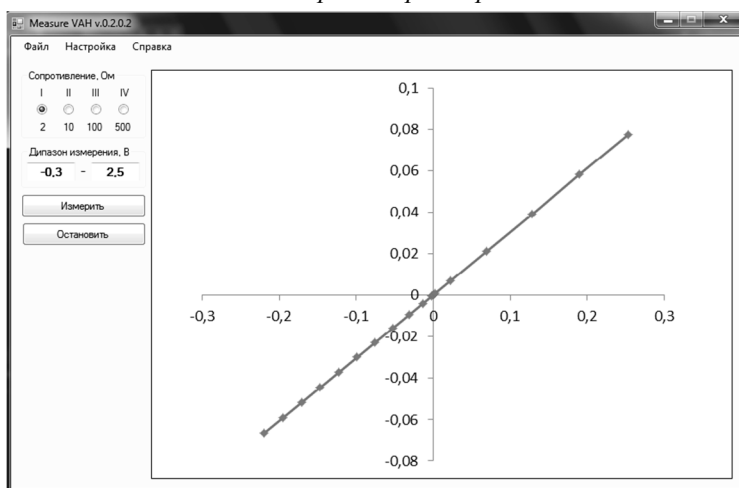


Рис. 3. Главное окно программы управления измерительным комплексом ВАХ

Апробация изготовленного образца измерительного комплекса проводилась путем измерения вольтамперных характеристик ключевых элементов электронной техники, таких как резисторы, диоды и фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии и их последующего сопоставления с ВАХ, измеренными с помощью классических приборов: характериографа, осциллографа, мостов постоянного тока и др.

Так, в табл. 1 приведены значения сопротивлений, полученные как в результате аналитической обработки экспериментальных ВАХ резисторов, так и измеренные с использованием моста постоянного тока.

Таблица 1

Значения сопротивлений резисторов, определенные при помощи моста постоянного тока P4833  $R_M$  и при помощи разработанного комплекса  $R_K$ , а также рассчитанные значения погрешности измерения комплекса  $\delta$

| $R_M, \text{ Ом}$ | $R_K, \text{ Ом}$ | $\delta, \%$ |
|-------------------|-------------------|--------------|
| 1991              | 2045              | 1,01         |
| 10,13             | 10,15             | 0,18         |
| 3,33              | 3,28              | 1,01         |

Из приведенных данных видно, что погрешность измерения сопротивления измерительным комплексом находится на уровне 1 %, что сопоставимо с точностью указания номинала большинства резисторов, применяемых при производстве изделий электронной техники.

На рис. 4 приведены экспериментальные ВАХ полупроводникового диода КД208, измеренные с помощью разработанного комплекса (рис. 4, а) и характеристикографа Л2-56 (рис. 4, б).

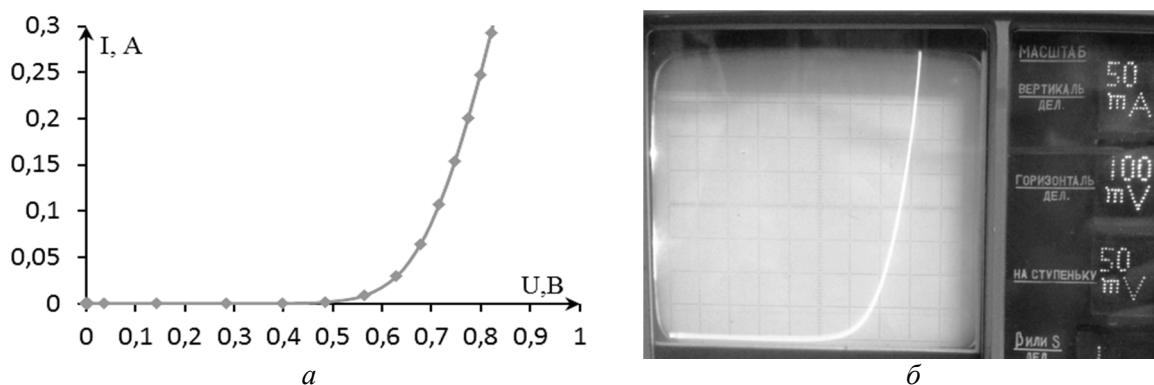


Рис. 4. Экспериментальные ВАХ полупроводникового диода КД208 измеренные: а – при помощи разработанного комплекса; б – при помощи характеристикографа Л2-56

Расчет усредненной погрешности измерения, проведенный для экспериментальных ВАХ полупроводникового диода, приведенных на рис. 4, показал, что погрешность измерения тока при исследовании ВАХ такого прибора не превышает 1 % при максимальном отклонении 1,3 %.

Важным этапом апробации изготовленного измерительного комплекса было исследование световых вольтамперных характеристик поликристаллических кремниевых ФЭП. В качестве объекта исследования использовались ФЭП на основе поликристаллического кремния производства Yingli Solar (КНР). Измерения проводились с использованием ранее разработанного [6] светодиодного осветителя при мощности излучения  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и спектральном составе излучения, приближенном к стандартному режиму AM1,5. На рис. 5 приведены световые ВАХ типичного образца исследованного ФЭП, полученные с помощью разработанного комплекса и с помощью метода противо-э.д.с., реализованного в ручном режиме [10]. Аналитическая обработка экспериментальных ВАХ ФЭП осуществлялась с помощью авторского специализированного программного обеспечения. Полученные в результате значения выходных и диодных параметров исследованного ФЭП приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что величины ключевых выходных параметров исследованного ФЭП, такие как ток короткого замыкания  $I_{кз}$  и фактор заполнения световой ВАХ FF и напряжение холостого хода  $U_{хх}$ , определенные по ВАХ измеренными различными методами являются практически идентичными. Определенные в результате аналитической обработки световых ВАХ значения диодных параметров ФЭ, таких как диодный ток насыщения  $I_0$ , коэффициент идеальности диода A, последовательное  $R_n$  и шунтирующее  $R_{ш}$  сопротивления, также

демонстрируют высокую сходимость результатов для разных методов измерения световых ВАХ. Численную оценку погрешности измерения проводили для величины КПД, которая, как известно, является интегральным показателем качества, характеризующим общее совершенство конструкции ФЭП [11]. Проведенный расчет погрешности определения величины КПД при измерении световых ВАХ различным способом позволил установить, что погрешность измерения при использовании образца измерительного комплекса не превышает 0,7 %, что сопоставимо с погрешностью, вносимой типовыми измерительными приборами при реализации метода противо-э.д.с. в ручном режиме.

Таблица 2

*Значения выходных и диодных параметров исследованного ФЭП, определенные с помощью разработанного комплекса и методом противо-э.д.с. в ручном режиме*

| Параметр       | Разработанный комплекс | Метод противо-э.д.с. в ручном режиме |
|----------------|------------------------|--------------------------------------|
| КПД, %         | 10,25                  | 10,18                                |
| $U_{xx}$ , мВ  | 585                    | 581                                  |
| $I_{кз}$ , мА  | 256                    | 256                                  |
| FF, отн. ед.   | 0,69                   | 0,69                                 |
| $P_{нм}$ , мВт | 102                    | 102                                  |
| $R_{п}$ , Ом   | 0,115                  | 0,114                                |
| $R_{ш}$ , кОм  | 15,3                   | 15,6                                 |
| A, отн. ед.    | 2,31                   | 2,29                                 |
| $I_0$ , А      | $1,37 \cdot 10^{-6}$   | $1,34 \cdot 10^{-6}$                 |

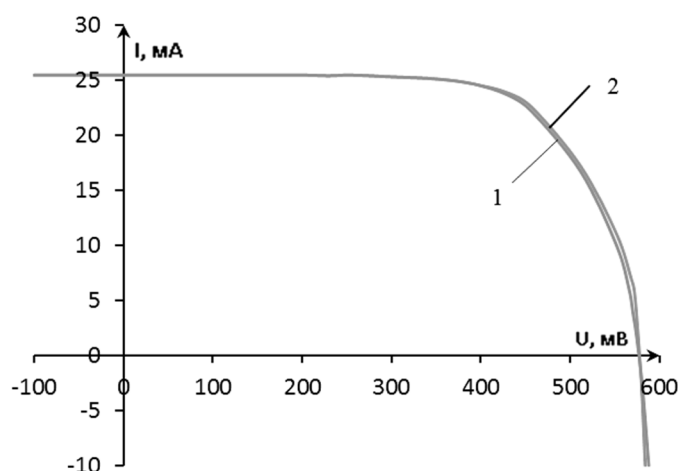


Рис. 5. Световые ВАХ типичного исследованного ФЭП: 1 – измеренная с помощью разработанного комплекса; 2 – измеренная методом противо-э.д.с. в ручном режиме

**Выводы.** Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный экономичный измерительный комплекс ВАХ способен обеспечить проведение экспрессной и экономичной аттестации широкого ассортимента приборов электронной техники, в частности фотоэлектрических преобразователей, с достаточно высокой точностью при средней погрешности измерения не больше 1 % путем измерения и последующей аналитической обработки темновых и световых вольтамперных характеристик исследуемых приборов. При этом предположительная стоимость такого комплекса не превышает 200 \$, что позволит широко его применять в связке с ПК на всех рабочих и исследовательских местах, требующих проведения промежуточного и конечного контроля полупроводниковых приборов.

#### Список использованных источников

1. Mostafa G. Development of an 8-bit RISC microcontroller learning kit using Atmel ATmega32 architecture // Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2013, International Conference on 19–21 Dec. 2013. – P. 154–159.

2. *Wei Zhang, Lin Yi* The design of ATmega32 MCU SPI and MAX191 serial A/D communication // Business Management and Electronic Information (BMEI), 2011 International Conference on 13–15 May 2011 (Volume 2). – P. 526–528.
3. *Zhu Zhengwei, Zhao Huihui, Shen Lin* Design of Multi-machine Communication System Based on TWI // Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on 25–27 June 2010. – P. 3590–3593.
4. *Joseph Yiu*. The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors, Third Edition / Burlington : Elsevier, 2007.
5. *Jonathan W. Valvano* Embedded Systems: Real-Time Interfacing to the Arm Cortex-M Microcontrollers // CreateSpace Independent Publishing Platform, 2011.
6. *Патент* України на корисну модель № 94622. Світлодіодно-галогеновий освітлювач. – Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.11.2014 р.
7. *Chin M., Kilpatrick S., Osgood R.* Metal-Insulator-Metal Diode Process Development for Energy Harvesting Applications / Army Research Laboratory, Annual Report. – 2010. – 24 p.
8. *Lee. K.-J., Kim J.-H., Kim H.-S. et al.* Study on a Solar Simulator for Dye Sensitized Solar Cells // International Journal of Photoenergy. – 2012. – Vol. 12. – P. 1–11.
9. *Pravettoni M., Galleano R., Dunlop E. et al.* Characterization of a pulsed solar simulator for concentrator photovoltaic cell calibration / Measurement science and technology. – 2010. – Vol. 21. – P. 1–8.
10. *Emery K.* Measurement and characterization of solar cells and modules // Handbook of photovoltaic science and engineering / Ed. by A. Luque and S. Hegedus. – Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003. – P. 702–752.
11. *Колтун М. М.* Солнечные элементы / М. М. Колтун. – М. : Наука, 1987. – 210 с.

УДК 621.316

**С.А. Іванець**, канд. техн. наук

**О.В. Красножон**, аспірант

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### **ОТРИМАННЯ АНАЛІТИЧНОГО ОПИСУ ПОВЕРХНІ КЕРУВАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**

**С.А. Іванець**, канд. техн. наук

**А.В. Красножон**, аспірант

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### **ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

**Serhii Ivanets**, PhD in Technical Sciences

**Oleksii Krasnozhon**, PhD student

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

### **OBTAINING OF AN ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE CONTROL SURFACE FOR THE SYSTEM TRACKING MAXIMUM POWER POINT OF A PHOTOVOLTAIC CELL**

*Проведено загальний аналіз алгоритмів функціонування систем відстеження точки максимальної потужності фотоелектричних перетворювачів. Запропоновано метод побудови таких систем, що ґрунтується на отриманні поверхні керування (завдяки інтерполяції та апроксимації) як функції двох змінних: густини потоку падаючого сонячного випромінювання та робочої температури фотоелектричного перетворювача. Обґрунтовано вибір поліномів для апроксимації інтерпольованих експериментальних даних, отриманих за допомогою моделювання роботи реально наявного фотоелектричного перетворювача. Наведено оцінювання похибок для запропонованих поліномів. Проаналізовано переваги та недоліки запропонованого методу.*

**Ключові слова:** максимальна потужність, поверхня регулювання, інтерполяція експериментальних даних, апроксимаційний поліном, поправочна функція, відносна похибка, реперна точка, функція двох змінних, дослідна модель фотоелектричного перетворювача.