

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.3>

УДК 621.  
383.51

ТРИХЛЄБ А. С., ПАНАСЮК І. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

**Мета.** Дослідження процесу відновлення деградованих сонячних панелей з метою розроблення спрощених методів визначення місць деградації. Розроблення рекомендацій та обладнання для відновлення деградованих сонячних панелей.

**Методика.** Аналітичне дослідження літературних джерел, узагальнення літературних джерел, спостереження, порівняння, вимір, експеримент, матеріальне моделювання, фізичне моделювання.

**Результати.** Проаналізовано причини потенційно викликаної деградації (PID) сонячних панелей. Визначено, що PID виникає через незначні небажані струми між напівпровідником з одного боку та склом, антибліковим покриттям (ARC), рамою та кріпленням з іншого боку. Погіршення продуктивності пов'язане з міграцією іонів натрію зі скляної пластини через інкапсуляцію (зазвичай: EVA) і антиблікове покриття (ARC) до комірки. Це відбувається, коли напівпровідник у комірці набуває негативного потенціалу щодо інкапсуляції та опорної структури. Визначено фактори сприяння PID. Температура, і вологість сприяють PID, також інтенсивність ефекту залежність від розташування в рядку. Сформульовано умови уникнення або пом'якшення PID. Розглянуто обладнання для запобігання та реверсу PID. Створено стенди для відстеження зміни вольт-амперної характеристики та відновлення деградованих сонячних панелей. Розроблено метод органолептичного визначення місць деградації батарей Розроблено рекомендації, щодо відновлення сонячних панелей в польових умовах.

**Наукова новизна.** Виявлено взаємозв'язок між контактом панелей з елементами кріплення і інтенсивністю їх деградації. Встановлено, що частини панелей, які торкались конструкції кріплення, деградували сильніше інших конструкцій батареї. Ці частини шунтують інші частини елементів батареї.

**Практична значимість.** Розроблено метод органолептичного визначення місць деградації батарей Розроблено рекомендації, щодо відновлення сонячних панелей в природних умовах. Визначено що панелі, які мали підвищений потенціал відносно землі відновлювалися швидше, ніж на стенді.

**Ключові слова:** PID ефект; деградація сонячних панелей; відновлення сонячних панелей; метод органолептичного визначення місць деградації сонячних панелей.

**Вступ.** PID (Potential Induced Degradation) означає потенційно індуковану деградацію. Це важлива проблема погіршення продуктивності сонячних панелей. Деградація може досягати 30% або навіть до 80% в деяких випадках. Деградація відбувається в сонячних енергетичних системах і може бути оборотною або незворотною. Процес PID у фотоелектричному модулі може розвиватися дуже швидко та за найкоротший період вплине на продуктивність усієї фотоелектричної системи. Отже, це призводить до згубного впливу на фінансування, роботу та економіку проектів фотоелектричної системи на всіх рівнях встановлення: житловому, комерційному та комунальному.

У роботах [1–9] було виявлено фактори і розуміння механізму PID, які призводять до деградації модулів у польових умовах або під час лабораторних випробувань. У випадку стандартних комірок р-типу обговорювалися ефекти негативного потенціалу відносно землі та факторів навколишнього середовища (вологість і температура), а також параметри конструкції комірки та модуля [2, 5, 6], важлива роль відводиться іонам натрію, які накопичуються на поверхні фотоелемента [7–9]. Важливо розуміти та вирішувати проблему PID на ранніх стадіях, щоб забезпечити продуктивність фотоелектричного модуля протягом

усього терміну експлуатації системи – PID можна запобігти та відновити на рівні системи взагалі.


**Постановка проблеми.** Робота присвячена дослідженню процесу відновлення деградованих сонячних панелей з метою розроблення спрощених методів визначення місць деградації застосовуваних у лабораторії чи в польових умовах. Розробленню рекомендацій та обладнання для відновлення деградованих сонячних панелей. Створенню стенда для моніторингу процесу відновлення у лабораторних умовах.

**Результати дослідження.** У фотоелектричних системах, зазвичай сонячні панелі з'єднані послідовно для створення вихідної напруги, тоді як рами модулів заземлені з міркувань безпеки. Залежно від тип інвертора, що використовується в фотоелектричній системі, висока різниця електричного потенціалу між сонячними батареями та каркасом модуля може бути індукована на обох кінцях рядка модулів. Різниця електричних потенціалів викликає струми витoku від каркаса модуля до сонячних елементів (або навпаки, залежно від позиції модуля в рядку), що в результаті призводить до PID деградації. Модулі, розташовані у кінці ланцюга, набувають найбільшої різниці потенціалу між модулями та корпусом, в зв'язку з чим більш схильні до деградації [2, 6, 9–11],

На основі аналітичних даних [1–11] був проведений власноручний експеримент, строком 3 місяці. Були обрані списані тонкоплівкові сонячні панелі Q.SMART UF L (рис. 1), виготовлені по технології CIGS. Експеримент був проведений з 64 панелями. Схему сонячних панелей наведено на (рис. 2).

ENGINEERED, DESIGNED AND QUALITY TESTED BY Q-CELLS SE IN GERMANY			
Q.SMART UF L 115		Q.CELLS	
<b>PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS*</b>			
Nominal Power (+5 W) Measurement accuracy P <sub>mpp</sub> *: ± 3 %	P <sub>mpp</sub>	[W]	115
Short circuit current	I <sub>sc</sub>	[A]	1.69
Open circuit voltage	V <sub>oc</sub>	[V]	95.1
Current at maximum power	I <sub>mpp</sub>	[A]	1.54
Voltage at maximum power	V <sub>mpp</sub>	[V]	74.7
Maximum system voltage	V <sub>sys</sub>	[V]	1000 (IEC) 600 (CSA / UL)
Weight	M	[kg]	16.5

49209 G1.3




**DANGER!**  
 Risk of electric shock!  
 DO NOT connect or disconnect plug contacts while system is under load current. Refer to the Installation and Operation Manual before installing, operating or servicing this unit.

Series Fuse: 4 A

Field Wiring:  
 Copper only, 14 AWG min.  
 Insulated for 90 °C min.

Fire Rating Class C

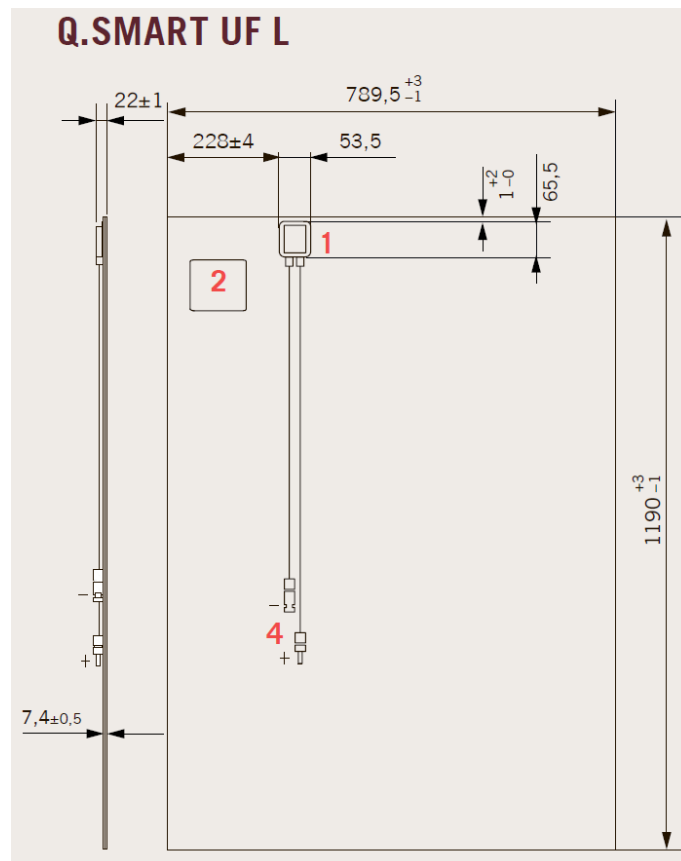
\*STC: 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, AM 1.5 Spectrum. Data given are rated (nominal) values.



ENGINEERED, DESIGNED, MANUFACTURED AND QUALITY TESTED BY Q-CELLS SE.  
 Made in Germany

EMAIL service@q-cells.com  
 WEB www.q-cells.com

Рис. 1. Характеристики сонячних панелей Q.SMART UF L 115



Позначки: 1 – розподільна коробка, 2 – паспортна табличка, 4 – роз'єми (+ і -)

Рис. 2. Схема сонячних панелей Q.SMART UF L 115

Для відстеження зміни вольт-амперної характеристики був побудований стенд моніторингу (рис. 3) з такими характеристиками:

- 1) напруга – 4000 В;
- 2) постійне освітлення (5 ламп розжарювання 200 Вт кожна);
- 3) постійна температура температура –  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .



Рис. 3. Стенд моніторингу

Генератор був зібраний з комплектуючих мікрохвильової печі. Магнетрон та елементи, що не використовуються в схемі були відключені. Полярність діоду була змінена, оскільки корпус мікрохвильової печі має позитивний потенціал, а вихід до магнетрона негативний. Після змін на корпусі став негативний потенціал, а в виході схеми позитивний. Також додані елементи, що обмежують струм високої напруги для дотримання техніки безпеки, а саме чотири послідовно підключених струмообмежувальних резисторів номіналом по 200 кОм на виході високовольтного генератора 4000 В. У первинний ланцюг трансформатора послідовно додано лампу розжарювання для зменшення струму підмагнічування трансформатора.

Освітлення забезпечували п'ять ламп розжарювання 200 Вт кожна та вмикалися за 2 хвилини до вимірювання. Вимірювання проводились влітку, а стенд розміщений у приміщенні, тому температура відносно стабільна ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

Корпус мікрохвильової печі заземлений. Місця найбільшої деградації панелей прокесні алюмінієвим скотчем та заземлені. Вихід панелей з'єднаний разом і підключений до виходу генератора +4000 В (рис. 4).

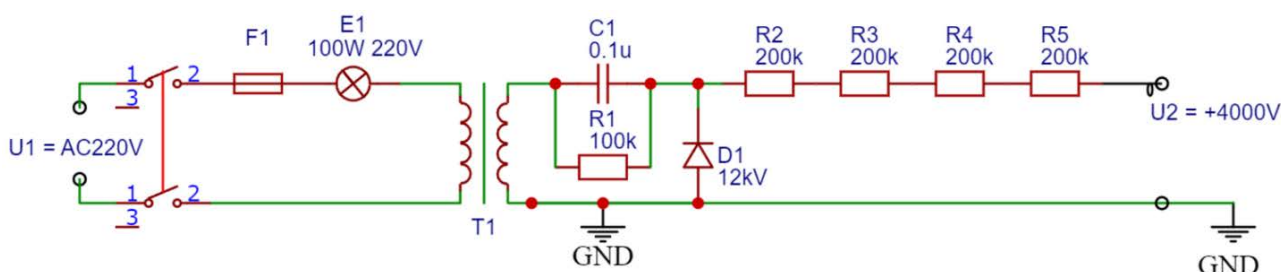


Рис. 4. Схема генератора відновлювального стенду

Дослідження проводились впродовж 3 місяців, заміри знімалися 2 рази на добу. В процесі відновлення підвищувалася напруга холостого ходу від 14 В до 22 В, струм короткого замикання залишався приблизно на одному рівні 140 мА. ВАХ вимірялась шляхом послідовного підключення виходу панелей к коміркам акумулятора. Так до відновлення, підключення більше п'яти комірок(11В) призводило до протікання струму з акумулятора до панелей та негативному ККД. При напрузі 11 В струм був 5мА до відновлення, та 140 мА після. Максимальна точка струму 85мА, при напрузі 27,6 В (рис. 5).

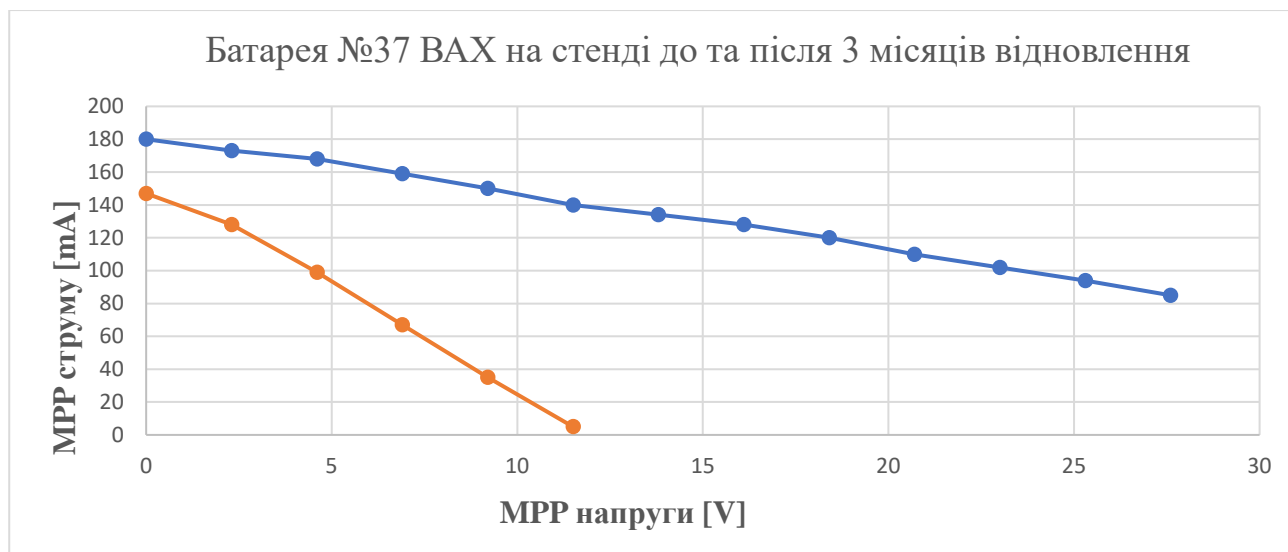


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика 37 батареї до та після відновлення протягом 3 місяців

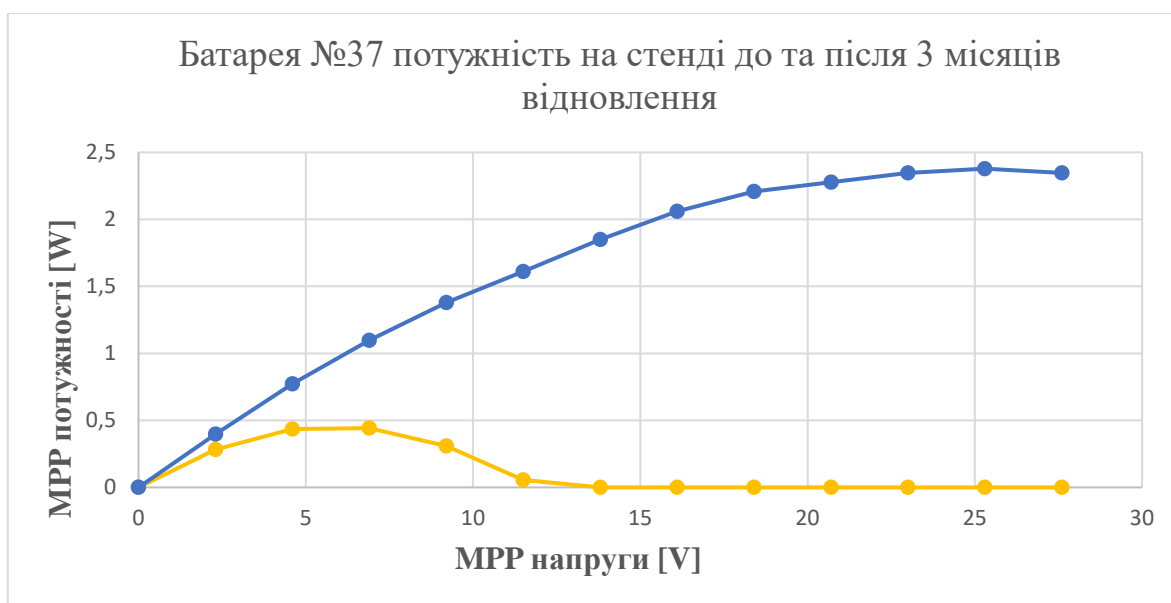


Рис. 6. Потужність 37 батареї до та після відновлення протягом 3 місяців

Максимальна точка потужності на стенді зросла з 0.44 Вт до 2.4 Вт, після 3 місяців відновлення (рис. 6).

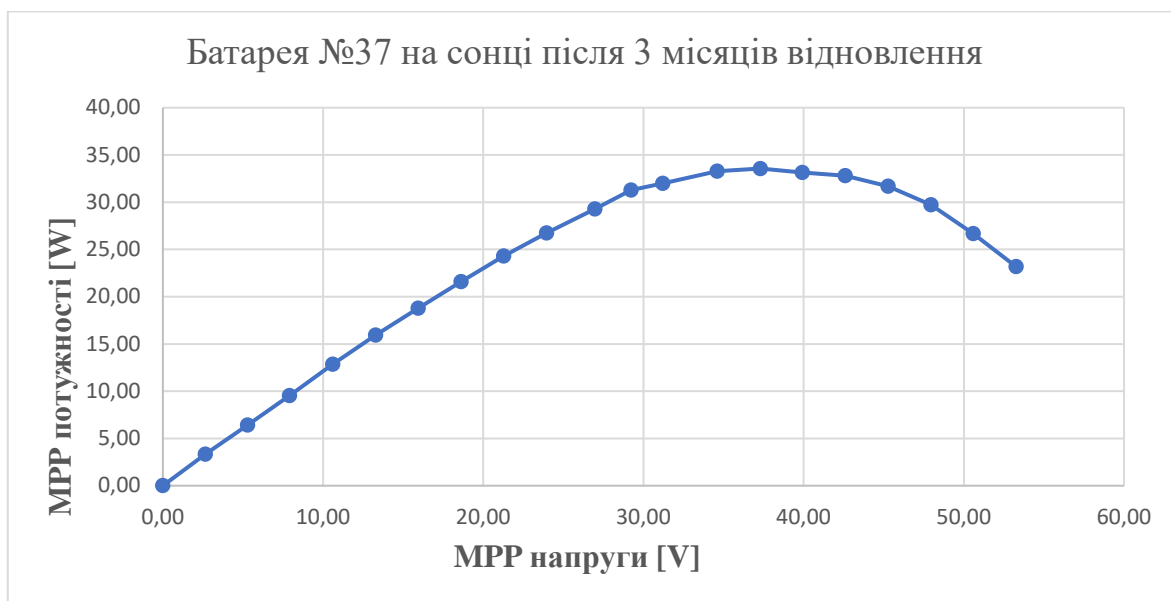


Рис. 7. Потужність 37 батареї направленої на сонце (сонячно, безхмарно 15:20 16.10.2022)

Максимальною точкою потужності є 33,5 Вт, що складає 30% від номінально заявленої.

На відміну від кремнієвих, інфрачервоне випромінювання тонко плівкових панелей не видно звичайною оптикою. Для того щоб побачити деградовані області, був проведений експеримент.

Холостий хід батареї – 92 В. Було зібрано блок живлення з вихідною напругою 100 В. Було підключено до батареї, плюс до плюсу, мінус до мінуса. Через батарею йшов струм 1700 мА. Дзеркальні фотоапарати та камери телефону не фіксували свічення батареї. Через кілька днів експериментів було помічено, що роса випарувалася на деяких ділянках поверхні

батареї, це були дзеркальні смуги, вони відповідали слідам кріплення батареї до рами, на зворотній стороні панелі. На дотик смуги були значно теплішими, ніж місця вкриті росою. Потім цей експеримент було повторено з іншими панелями, роса створювалась за допомогою розчину спирту та води. Таким чином вважаємо, що частини панелей, що торкались конструкції кріплення, деградували сильніше інших конструкцій батареї. Ці частини, ймовірно, мають омичний опір і шунтують інші частини елементів батареї.

В результаті цього експерименту розроблено метод органолептичного визначення місць деградації батарей, виготовлених за технологією CIGS за допомогою нанесення мікрокрапель водно-спиртового розчину на поверхню панелей. Лінії які гріються – це провідник, що має підвищену концентрацію іонів натрію (рис. 8).



**Рис. 8. Органолептичний метод виявлення місць деградації батарей, виготовлених за технологією CIGS**

З метою вивчення поведінки деградованих панелей у природних умовах було проведено експериментальні дослідження по їх відновленню у полі. Панелі були розложені на землі та підключені послідовно, мінус був заземлений (рис. 9).



**Рис. 9. Процес відновлення сонячних панелей у полі**

Умови були наступними:

- різна напруга на кожній панелі, оскільки підключені послідовно і заземлені. До 1500 В в останній.
- різна освітленість.
- значно різна температура протягом доби.
- раз на тиждень проводилась ротація, щоб перші панелі ставали останніми.

Напруга обмежена 1500 В, оскільки допустима напруга ізоляції проводів батареї – 1500 В. Було послідовно підключено 40 батарей в один ланцюг, напруга послідовного ланцюга 560 В у сонячний день. Робились щоденні виміри напруги, але оскільки освітленість щоразу змінювалася та її не вимірювали. то дані вимірів у цю роботу не наводяться.

Коли у сонячні дні напруга була між 1300–1500 В, то батареї з найбільшою напругою від'єднувалися від мережі, щоб не перевищити напругу ізоляції кабелів батареї. Щотижня змінювалася полярність підключення батарей, щоб батареї, підключені ближче до землі, підключалися до вищого потенціалу. Батареї відключені від ланцюга підключалися в окремі ланцюги.

В результаті проведених досліджень встановлено, що панелі, які мали підвищений потенціал відносно землі відновлювалися швидше, ніж на стенді.

#### **Висновок.**

1. Проведено експеримент по відновленню тонкоплівкових сонячних панелей, виготовлених за технологією CIGS шляхом подачі високої напруги позитивної полярності щодо землі.
2. Визначено що панелі, які мали підвищений потенціал відносно землі відновлювалися швидше в польових умовах, ніж на стенді.
3. Розроблено органолептичний метод виявлення місць деградації сонячних панелей.
4. Розроблено експериментальний стенд для моніторингу за процесом відновлення у лабораторних умовах.

#### **References**

#### **Література**

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. Hacke, et al. (2012). Considerations for a Standardized Test for Potential induced Degradation of Crystalline Silicon PV Modules. <i>PVMRW</i>.</li><li>2. Berghold, et al. (2010). Potential Induced Degradation of solar cells and panels. <i>25th EU PVSEC</i>.</li><li>3. Hacke, et al. (2010). Test-to-failure of crystalline silicon modules. <i>35th IEEE</i>.</li><li>4. Schütze, et al. (2011). Laboratory study of potential induced degradation of photovoltaic modules. <i>36th IEEE</i>.</li><li>5. Nagel, et al. (2011). Crystalline Si solar cells and modules featuring excellent stability against potential-induced degradation. <i>26th EU PVSEC</i>.</li><li>6. Pingel, et al. (2010). Potential Induced Degradation of Solar Cells and Panels. <i>35th IEEE</i>.</li><li>7. Koch, et al. (2011). Polarization effects and tests for crystalline silicon solar cells. <i>26th EU PVSEC</i>.</li><li>8. Hacke, et al. (2010). Characterization of Multicrystalline Silicon Modules with System Bias Voltage Applied in Damp Heat. <i>25th EU PVSEC</i>.</li></ol> | <ol style="list-style-type: none"><li>1. Hacke et al. Considerations for a Standardized Test for Potential induced Degradation of Crystalline Silicon PV Modules. <i>PVMRW</i>, 2012.</li><li>2. Berghold et al. Potential Induced Degradation of solar cells and panels. <i>25th EU PVSEC</i>, 2010.</li><li>3. Hacke et al. Test-to-failure of crystalline silicon modules. <i>35th IEEE</i>, 2010.</li><li>4. Schütze et al. Laboratory study of potential induced degradation of photovoltaic modules. <i>36th IEEE</i>, 2011.</li><li>5. Nagel et al. Crystalline Si solar cells and modules featuring excellent stability against potential-induced degradation. <i>26th EU PVSEC</i>, 2011.</li><li>6. Pingel et al. Potential Induced Degradation of Solar Cells and Panels. <i>35th IEEE</i>, 2010.</li><li>7. Koch et al. Polarization effects and tests for crystalline silicon solar cells. <i>26th EU PVSEC</i>, 2011.</li><li>8. Hacke et al. Characterization of Multicrystalline Silicon Modules with System Bias Voltage Applied in Damp Heat. <i>25th EU PVSEC</i>, 2010.</li></ol> |
|---|---|

9. Bauer, et al. (2012). On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells. *PSSR*.
10. Swanson, et al. (2005). The Surface Polarization Effect in high-efficiency Silicon Solar Cells. *15th IEEE*.
11. Hacke, et al. (2012). Testing and Analysis for Lifetime Prediction of Crystalline Silicon PV Modules Undergoing Degradation by System Voltage Stress. *38th IEEE*.
9. Bauer et al. On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells. *PSSR*, 2012.
10. Swanson et al. The Surface Polarization Effect in high-efficiency Silicon Solar Cells. *15th IEEE*, 2005.
11. Hacke et al. Testing and Analysis for Lifetime Prediction of Crystalline Silicon PV Modules Undergoing Degradation by System Voltage Stress. *38th IEEE*, 2012.

**TRYKHLIEB ANDRII**

Student, Department of Department of Computer Engineering and Electromechanics of the Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
E-mail: [jiepontuq@gmail.com](mailto:jiepontuq@gmail.com)

**PANASIUK IGOR**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Engineering and Electromechanics of the Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
Scopus Author ID: 56672850100  
Researcher ID: D-4255-2017  
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>  
E-mail: [panasjuk.i@knuud.edu.ua](mailto:panasjuk.i@knuud.edu.ua)

**TRYKHLIEB A. S., PANASIUK I. V.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

**RESEARCH OF THE PROCESS OF RESTORATION OF DEGRADED SOLAR PANELS**

**Purpose.** Study of the recovery process of degraded solar panels to develop simplified methods for determining the location of degradation. Development of recommendations and equipment for the restoration of degraded solar panels.

**Methodology.** Analytical study of literary sources, generalization of literary sources, observation, comparison, measurement, experiment, material modeling, physical modeling

**Findings.** The causes of potentially induced degradation (PID) of solar panels are analyzed. It is determined that PID occurs due to small unwanted currents between the semiconductor on one side and the glass, anti-reflective coating (ARC), frame and mount on the other side. The degradation in performance is due to the migration of sodium ions from the glass plate through the encapsulation (usually EVA) and anti-reflective coating (ARC) into the cell. This occurs when the semiconductor in the cell takes on a negative potential with respect to the encapsulation and support structure. PID contributing factors are identified. Temperature and humidity contribute to PID, and the intensity of the effect increases depending on the position in the row. Conditions for avoiding or mitigating PID are formulated. The equipment for PID prevention and reversal is considered. Benches have been created to track the change in the current-voltage characteristic and restore degraded solar panels. A method for organoleptic determination of battery degradation sites has been developed. Recommendations for the restoration of solar panels in the field have been developed.

**Originality.** The relationship between the contact of panels with fasteners and the intensity of their degradation was revealed. It was found that the parts of the panels that touched the fastening structure degraded more than other battery structures. These parts shunt other parts of the battery cells.

**Practical value.** A method for organoleptic determination of battery degradation sites has been developed. Recommendations for the restoration of solar panels in natural conditions have been developed. It was determined that the panels, which had an increased potential relative to the ground, recovered faster than on the stand. Keywords: PID effect, degradation of solar panels, restoration of solar panels, method of organoleptic determination of degradation sites of solar panels.

**Keywords:** PID effect; degradation of solar panels; restoration of solar panels; method of organoleptic determination of degradation sites of solar panels.