

АНАЛИЗ НА ЕФЕКТА НА ЗАСЕНЧВАНЕТО НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ С ПОКРИТИЕ ОТ МЕДНО-ИНДИЕВ- ГАЛИЕВ-СЕЛЕНИД ВЪРХУ ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ИМ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Емил Станев*, Ивайло Стоянов

Технически Университет – Габрово, България
Кореспондиращ автор: emostanev@tugab.bg

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SHADING ON THE ELECTRICAL PERFORMANCE OF THIN-FILM COPPER INDIUM GALLIUM SELENIDE (CIGS) PHOTOVOLTAIC MODULES

Emil Stanev*, Ivaylo Stoyanov

Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Corresponding author: emostanev@gmail.com

Abstract

In the paper, the effects of shading on **copper indium gallium selenide (CIGS)** solar modules are presented. The influence of different degrees of shading of CIGS thin-film PV modules on their performance is analyzed after measuring their I-V and power characteristics. The results show that even small shading significantly affects the efficiency of the modules.

Keywords: photovoltaic modules, shading, photovoltaic efficiency, I-V curve measurement, thin-film (CIGS) solar modules.

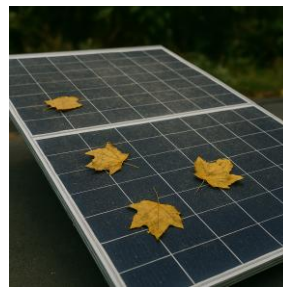
ВЪВЕДЕНИЕ

Фотоволтаичните модули с покритие от тънък слой медно-индиев-галиев-селенид (Copper Indium Gallium Selenide - CIGS) са сред най-ефективните тънко-слойни технологии за преобразуване на слънчева енергия в електричество. С високата регистрирана ефективност, технологията CIGS става много популярна поради своите приложения. [1, 2] Технология на CIGS се използва за производство на слънчеви плочки, които са CIGS клетки, капсулирани в трайни и леки полимерни листове, придавайки на плочките формата и цвета им. Тези клетки се представят по-добре при климат с екс-

тремни температури и при различни нива на слънчево облъчване поради температурния си коефициент. CIGS технологията може да се използва за производство на гъвкави фотоволтаични модули. CIGS технологиите се използват в търговски и полезни по мащаб приложения. Единственият недостатък е тяхната относително по-висока цена в сравнение с другите технологии. Въпреки бързото развитие на тези технологии, ефективността им все още е силно повлияна от фактори като географско местоположение, атмосферни условия и, в частност, засенчването. Един от ключовите фактори, които влияят върху ефективността на

тези клетки, е ефектът от засенчване – независимо дали е причинено от околната среда или от структурни елементи в инсталацията. Това води до неравномерно осветяване на панелите и загуби в производството на електрическа енергия. CIGS фотоволтаичните модули предлагат значителни предимства по отношение на гъвкавостта и ефективността при слабо осветяване. При CIGS има по-малко загуби на енергия, защото са по-чувствителни към светлината. Технологията прави CIGS подходящи за различни приложения и условия на засенчване [3]. Въпреки това, тяхната производителност също е чувствителна към степента на засенчване. Разположението на панелите (хоризонтално или вертикално) играе също така важна роля в начина, по който светлината се разпределя върху клетките.

При падане на сянка дори само на една част от слънчевия панел в масива, изходът от цялата система може да бъде потенциално компрометиран, това се нарича засенчване на фотоволтаичните панели. Когато слънчевият панел е частично засенчен, токът генериран от изцяло осветените клетки не може да протече през засенчените и се разсейва в тях под формата на топлинно излъчване, причинявайки ефекта на горещата точка. Това може да доведе до тяхното прегряване и стопяване и е една от най-разпространените причини за повреда на слънчевия панел или опасност от пожар. В резултат на това е важно да се използват байпасни диоди при конструирането на фотоволтаични системи, за да се гарантира, че токът може да протича като се шунтират неефективно работещите клетки и по този начин въздействието се намалява при различните ситуации на засенчване (Фиг. 1, Фиг. 2, Фиг. 3, Фиг. 4, Фиг. 5) [4].



Фиг. 1. Локално засенчване от натрупана мръсотия и листа



Фиг. 2. Засенчване от дървета



Фиг. 3. Засенчване от структурни елементи



Фиг. 4. Засенчване от сгради



Фиг. 5. Засенчване от облаци

В настоящия доклад се разглежда ефекта на засенчване на фотоволтаичен панел с покритие от Copper Indium Gallium Selenide върху електрическите му характеристики. Изследвани са волт-амперните и мощностните характеристики на фотоволтаичния панел, при хоризонтално, хоризонтално дифузно и вертикално засенчване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

При производството на електрическа електроенергия от фотоволтаични панели, голямо влияние могат да оказват различни източници на засенчване, като сгради, дървета, паднали листа, прах, сажди и облаци. Те блокират и засенчват слънчевата светлина, частично или напълно, върху фотоволтаичния панел, което води до понижаване стойностите на напрежението и тока на модулите, като това оказва негативно влияние върху изходните параметри [6, 7].

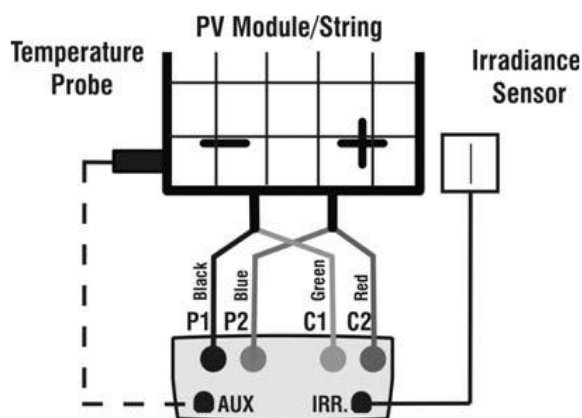
За изследване ефекта от засенчването, върху електрическите характеристики на фотоволтаични панели на базата на Copper Indium Gallium Selenide е използван уредът I-V500W (Фиг.6.). С него може да се снее волт-амперната крива и мощностната характеристика, както на един модул, така и на няколко модула свързани помежду си в PV инсталация до максимум 1500V и 10A или 1000V и 15A. За измерване на I-V кривата уредът I-V500W управлява вътрешна база данни на фотоволтаични модули, която може да бъде актуализирана по всяко време от потребителя.

Сравнението между измерените данни с номиналните стойности позволява незабавна оценка дали групата от модули или единичния модул, които се измерват, отговарят на заявените параметри на ефективност от производителя.



Фиг. 6. Измервателен уред I-V500W

Уредът извършва измерване на I-V кривата на свързания към него фотоволтаичен модул, след което измерва в реално време слънчевата радиация и температурата на модула – Фиг. 7.



Фиг. 7. Свързване на фотоволтаичен модул с уред I-V500W

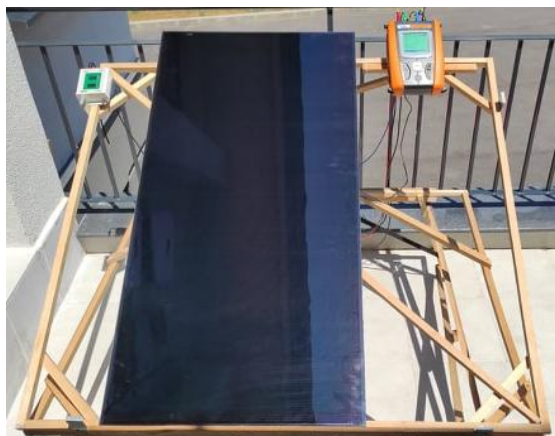
Резултатите от измерванията автоматично се привеждат към стандартните условия (STC) на излъчване при 1000 W/m^2 и температура 25°C . Таблица 1 представя техническа информация за обхватите и точността на измерванията, направени с помощта на инструмента за проследяване на криви I-V500W [5].

Таблица 1. Технически характеристики на уреда I-V500W

Измерван параметър	Обхват	Точност	Толеранс
DC Напрежение	15.0 ÷ 99.9 V	0.1 V	$\pm(0.5\%rdg + 2dgt)$
DC Ток	0.10 ÷ 15.00 A	0.01 A	$\pm(1.0\%rdg + 2dgt)$
DC Мощност	50 ÷ 99999 W	1 W	$\pm(1.0\%rdg + 6dgt)$
Радиация (с референтна клетка)	1 ÷ 100 mV	0.1 mV	$\pm(1.0\%rdg + 5dgt)$
Температура (с допълнителна сонда)	-20 ÷ 100 °C	0.1 °C	$\pm(1.0\%rdg + 1^{\circ}C)$

Проучени са необходимите каталожни данни на фотоволтаичните модули Copper Indium Gallium Selenide модел CIGS: CdF – 1100E1, 110Wr на производителя NuLKet, Тайван. Температурните коефициенти при STC са Alpha (I_{sc}) = 0.01 %/°C, Beta (V_{oc}) = -0.31 %/°C, Gama (P_{min}) = -0.23 %/°C.

Тези каталожни данни се задават в инструмента за измерване I-V500W преди започване на измерванията.

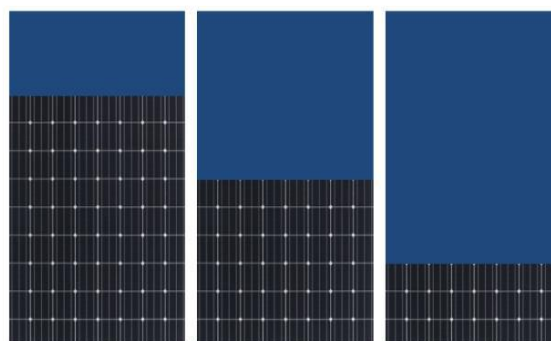


Фиг. 8. Опитна установка с фотоволтаичен панел с покритие от тънък CIGS

Извършени са измервания при различно хоризонтално, хоризонтално дифузно и вертикално засенчване на фотоволтаичен панел, който е с размери 120x60 см - Фиг.8. Измерванията са извършени съответно при следните стойности на засенчване от панела:

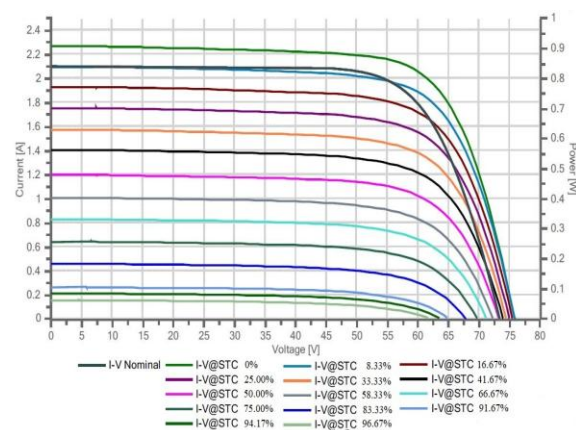
Хоризонтално засенчване (Фиг.9): 10см (8,33), 20 см (16,67%), 30 см (25,00%), 40 см (33,33%), 50 см (41,67%), 60 см (50,00%), 70 см (58,33%), 80 см (66,67%), 90 см (75,00%), 100 см (83,33), 110 см (91,67%), 113 см (94,17%), 116 см (96,67%), 119 см (37,5%) - След тази стойност се достига токовата граница на възможност за отчитане – current Lim.

Хоризонтално дифузно засенчване: 10см (8,33), 20 см (16,67%), 30 см (25,00%), 40 см (33,33%), 50 см (41,67%), 60 см (50,00%)

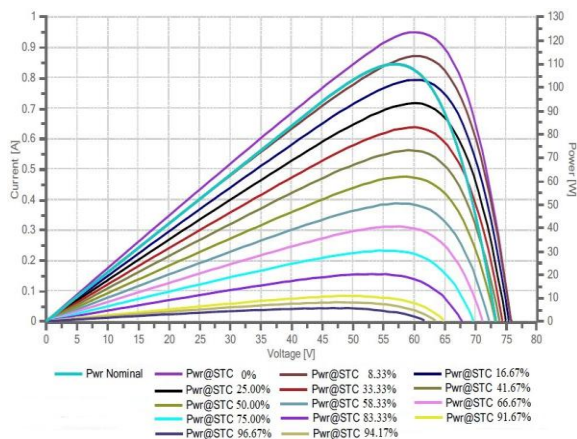


Фиг. 9. Хоризонтално засенчване

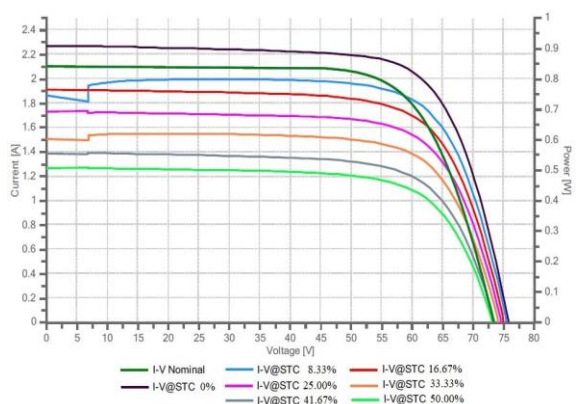
Получените I-V и мощностни характеристики на хоризонтално и хоризонтално дифузно засенчения панел от CIGS са показани съответно на Фиг. 10, Фиг. 11, Фиг. 12 и Фиг. 13.



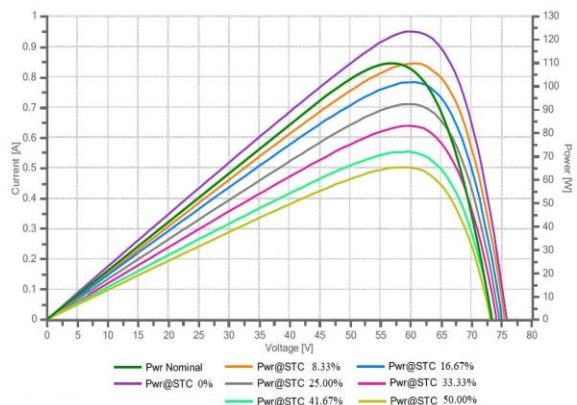
Фиг. 10. I-V характеристика на хоризонтално засенчен панел от CIGS



Фиг. 11. Мощностна характеристика на хоризонтално засенчен панел от CIGS

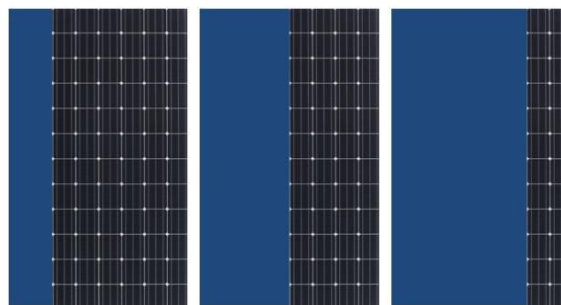


Фиг. 12. I-V характеристика на хоризонтално дифузно засенчен панел от CIGS



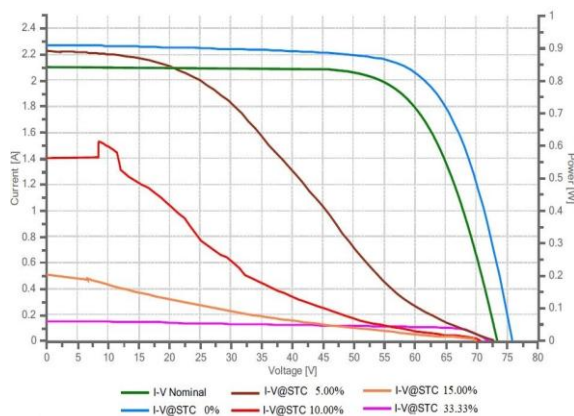
Фиг. 13. Мощностна характеристика на хоризонтално дифузно засенчен панел от CIGS

Вертикално засенчване (Фиг. 14): 3 см (5,00%), 6 см (10,00%), 9 см (15,00%), 20 см (33,33%), 30 см (50,00%) - след тази стойност се достига токовата граница на възможност за отчитане – current Lim.

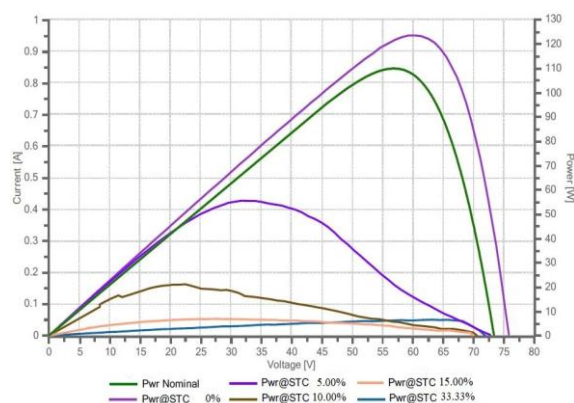


Фиг. 14. Вертикално засенчване

Получените I-V и мощностни характеристики на вертикално засенчения панел от CIGS са показани съответно на Фиг. 15 и Фиг. 16.

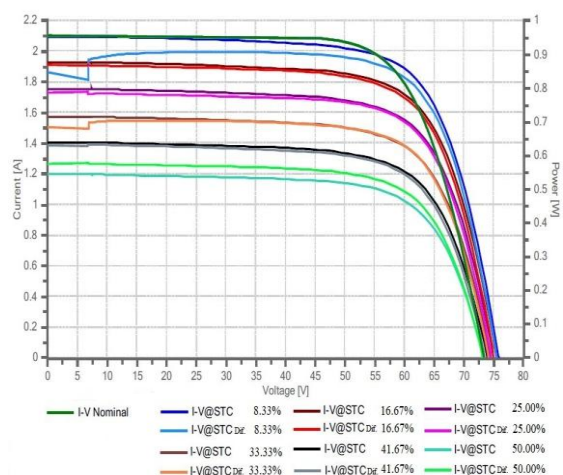


Фиг. 15. I-V характеристика на вертикално засенчен панел от CIGS

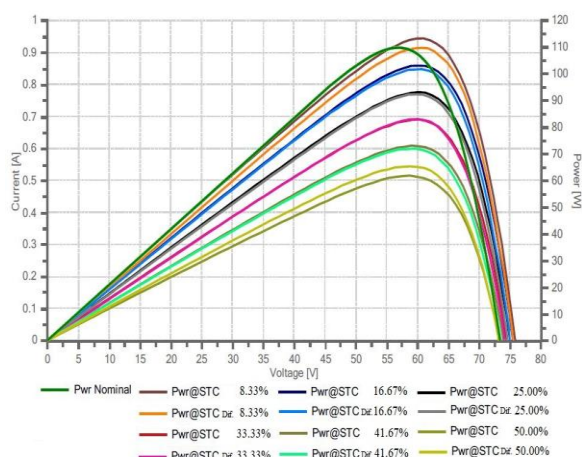


Фиг. 16. Мощностна характеристика на вертикално засенчен панел от CIGS

На Фиг. 17 и Фиг. 18 са представени графики за сравнение между хоризонтално и хоризонтално дифузно засенчване:



Фиг. 17. I-V характеристика на хоризонтално и хоризонтално дифузно засенчен панел от CIGS



Фиг. 18. Мощностна характеристика на хоризонтално и хоризонтално дифузно засенчен панел от CIGS

Резултатите от измерванията за тествания панел с Copper Indium Gallium Selenide са показани в Таблица 2, Таблица 3 и Таблица 4, където:

- Толеранс - толеранса на P_{max} спрямо предоставения от производителя на модула;
- P_{max} - максимална номинална мощност на модула;
- V_{oc} - напрежение на отворена верига;
- V_{mpp} - напрежение на точката на максимална мощност;
- I_{mpp} - ток на точката на максимална мощност;
- I_{sc} - ток на късо съединение;
- FF - коефициент на запълване.

Таблица 2. Хоризонтално засенчване

Засенчване %	Толеранс [%]	P_{max} [W]	V_{oc} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{sc} [A]	FF [%]
CIGS – 0	12.09	123.30	75.84	59.30	2.08	2.27	72.00
CIGS – 8.33	2.91	113.20	75.86	60.96	1.86	2.09	71.00
CIGS – 16.67	-6.53	102.82	75.50	60.12	1.71	1.92	71.00
CIGS – 25.00	-15.35	93.11	75.01	60.17	1.55	1.75	71.00
CIGS – 33.33	-24.65	82.88	74.43	60.20	1.38	1.57	71.00
CIGS – 41.67	-33.77	72.86	73.99	59.04	1.23	1.40	70.00
CIGS – 50.00	-43.82	61.80	73.29	58.77	1.05	1.19	71.00
CIGS – 58.33	-54.27	50.31	72.31	56.91	0.88	1.00	69.00
CIGS – 66.67	-63.19	40.49	71.16	57.68	0.70	0.83	69.00
CIGS – 75.00	-72.56	30.18	69.75	54.38	0.56	0.64	68.00
CIGS – 83.33	-81.84	19.97	67.74	53.12	0.38	0.45	65.00
CIGS – 91.67	-90.20	10.78	64.82	47.70	0.23	0.26	64.00
CIGS – 94.17	-92.70	8.03	63.52	48.37	0.17	0.21	61.00
CIGS – 96.67	-94.94	5.57	61.70	46.78	0.12	0.15	59.00
Номинални стойности	$\pm 10\%$	110.00	73.40	56.90	1.93	2.10	71.00

Таблица 3. Хоризонтално дифузно засенчване

Засенчване %	Толеранс [%]	P_{max} [W]	V_{oc} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{sc} [A]	FF [%]
CIGS – 0	+12.09	123.30	75.84	59.30	2.08	2.27	72.00
CIGS – 8.33	- 0.33	109.63	75.39	60.59	1.81	1.82	80.00
CIGS – 16.67	- 7.60	101.64	75.09	60.70	1.67	1.91	71.00
CIGS – 25.00	- 16.16	92.22	74.58	59.75	1.54	1.73	72.00
CIGS – 33.33	- 24.60	82.94	74.10	59.89	1.38	1.49	75.00
CIGS – 41.67	- 34.67	71.87	73.55	59.58	1.21	1.38	71.00
CIGS – 50.00	- 40.82	65.10	73.15	57.57	1.13	1.26	70.00
Номинални стойности	$\pm 10\%$	110.00	73.40	56.90	1.93	2.10	71.00

Таблица 4. Вертикално засенчване

Засенчване %	Толеранс [%]	P_{max} [W]	V_{oc} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{sc} [A]	FF [%]
CIGS – 0	+12.09	123.30	75.84	59.30	2.08	2.27	72.00
CIGS – 5.00	- 49.63	55.40	72.81	31.81	1.74	2.21	34.00
CIGS – 10.00	- 80.80	21.12	70.58	22.47	0.94	1.41	21.00
CIGS – 15.00	- 93.78	6.84	70.07	27.47	0.25	0.48	21.00
CIGS – 33.33	-94.08	6.51	71.81	63.19	0.10	0.15	62.00
Номинални стойности	$\pm 10\%$	110.00	73.40	56.90	1.93	2.10	71.00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ефекта при хоризонтално и хоризонтално дифузно засенчване на фотоволтаичен модул с тънък слой CIGS може да се види на Фиг. 10, Фиг. 11, Фиг. 12, Фиг. 13 и Таблица 2. Анализът показва,

че хоризонталното засенчване оказва по-малко негативно влияние върху ефективността на фотоволтаичния панел спрямо вертикалното. При хоризонталното засенчване се наблюдава равномерно изменение в I-V и мощностните характеристики. Фиг. 15 показва, че дори при минимално вертикално засенчване в диапазона от 5%, I-V характеристиката се изменя значително и максималната мощност - P_{max} спада повече от наполовина. При по-нататъшно увеличаване на засенчването над 10%, се наблюдава рязко нарушаване на вида на графиката и възможността за производство на електрическа енергия от фотоволтаичния панел. В мощностните характеристики на Фиг. 16 се вижда изменението в положението на точката на максимална мощност при увеличаване на вертикалното засенчване над 5%. Разликата в получените резултати при хоризонтално и вертикално засенчване се дължи на структурата при свързване на отделните фотоволтаични клетки в изследвания панел с тънък слой от медно индиев галиев селенид (Copper Indium Gallium Selenide - CIGS). На Фиг.17 и Фиг.18, където е направено сравнение между хоризонтално и хоризонтално дифузно засенчване се вижда, че разликите са минимални и са в рамките на статистическата грешка, при минимални изменения в условия на околната среда при извършване на измерванията.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027", Project No. BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence "Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Green, Martin A.; Hishikawa, Yoshihiro; Warta, Wilhelm; Dunlop, Ewan D.; Levi, Dean H.; Hohl-Ebinger, Jochen; Ho-Baillie, Anita W.H. (July 2017). "Solar cell efficiency tables (version 50)". Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 25 (7): 668–676. doi:10.1002/pip.2909
- [2] "New world record for CIGS solar cells". ScienceDaily. Retrieved 2024-02-29.
- [3] <https://solarmagazine.com/solar-modules/cigs-thin-film-solar-modules/>
- [4] <https://bg.dsissolar.com/info/shading-effect-on-output-of-solar-pv-system-50730909.html>
- [5] <https://www.ht-instruments.com/en/products/photovoltaic-testers/i-v-curve-tracers/i-v500w>
- [6] Aramesh, M.; Kasaeian, A.; Pourfayaz, F. A detailed investigation of the walls shading effect on the performance of solar ponds. Environ. Prog. Sustain. Energy 2018, 38, e13014. [CrossRef]
- [7] Teo, J.; Tan, R.; Mok, V.; Ramachandramurthy, V.K.; Tan, C. Impact of partial shading on the PV characteristics and the maximum power of a photovoltaic string. Energies 2018, 11, 1860. [CrossRef].