

**АНАЛИЗ НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА ФОТОВОЛТАИЧНА
СИСТЕМА С МОДУЛИ ОТ CdTe, m-Si и CIGS
ПРИ ЗИМНИ УСЛОВИЯ****Ивайло Лазаров***Технически университет - Габрово***ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM
WITH CdTe, m-Si AND CIGS AT WINTER CONDITIONS****Ivaylo Lazarov***Technical University of Gabrovo***Abstract**

The paper presents the performance analysis of three different photovoltaic systems – m-Si, CdTe and CIGS installed in May 2020 as a part of a project “Competence center – Intelligent Mechatronic, Eco and Energy Saving Systems and Technologies. The analysis covers the results obtained for system monitoring for period November 2020 ÷ March 2021 year. The results for energy production, final yield, array yield, efficiency of photovoltaic modules are presented tabularly and graphically. Photovoltaic modules from m-Si obtained highest average values for energy production, final yield, array yield, efficiency of the photovoltaic modules.

Keywords: photovoltaic modules; CdTe; m-Si; CIGS.

ВЪВЕДЕНИЕ

Количеството енергия, достигащо до земната повърхност от Слънцето е огромна. Така, например, мощността на слънчевия радиация, попадаща в площ от 10 km² в безоблачен ден достига 7÷9 милиона киловата. Технологиите за получаване на енергия от Слънцето се основават на преобразуване на електромагнитното лъчение от Слънцето в топлина и светлина. Интензитетът на слънчевата светлина, която достига до Земята, варира в зависимост от часовия пояс през деня, годината, местоположението и метеорологичните условия. Общото количество енергия, изчислено за ден или година, се нарича облъчване (или "входяща слънчева радиация") и показва каква е мощността на слънчевата радиация. Слънчевата радиация се измерва в

[Wh/m²] за ден или за друг период. Интензитетът на слънчевата радиация в свободното пространство на разстояние, равно на средното разстояние между Земята и слънцето се нарича слънчева константа. Неговата стойност 1353 W/m² [1]. При преминаване през атмосферата слънчевата радиация отслабва, главно поради поглъщането на инфрачервеното лъчение от водни пари, а на ултравиолетово от озон и разсейване на емисии от атмосферни прахови частици и аерозоли.

Интерес представлява количеството на слънчевата енергия, която достига до земната повърхност до Слънцето през зимните месеци. Тогава слънчевите лъчи падат под много малък ъгъл спрямо Земята, като това води до разпръскването им (снопът от лъчи) на по-голяма повърхност – вода или суша, а не се

фокусира на по-малка площ, както е през лятото, когато снопът лъчи идва почти вертикално. Освен това продължителността на слънцегреенето е по-малка, което води до по-ниски стойности на падналата слънчева радиация. Всичко това води до намаляване на производителността на фотоволтаичните електроцентрали. Друга причина, която може да доведе до намаляване на производителността на фотоволтаичните модули е падналата върху тях снежна покривка [2].

През зимата фотоволтаичните електроцентрали могат да произвеждат задоволително количество електрическа енергия, поради това, че температурата на фотоволтаичните модули не е висока и е възможно в определени дни да работят до условия, близки до стандартните тестови условия STC [3].

Цел на настоящия доклад е да се анализира производителността на фотоволтаична система с модули от кадмиев телурид (CdTe), монокристален силиций (m-Si) и медно-индиев галиев селенид (CIGS) в периода ноември 2020 г. – март 2021 г.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследваната фотоволтаична електроцентрала се намира на територията на Технологичния парк на Технически университет – Габрово, част от проект „Интелигентни мехатронни еко- и енергоспестяващи системи и технологии”. Фотоволтаичната електроцентрала се състои от три подсистеми с различни технологии на фотоволтаичните модули [4]:

- кадмиев телурид (CdTe) – два стринга, всеки с мощност от 4,8kWp и обща инсталирана мощност от 9,6kWp.

- монокристален силиций (m-Si) – два стринга, всеки с мощност от 4,5kWp и обща инсталирана мощност от 9kWp.

- медно-индиев галиев селенид – един стринг с мощност 3,3kWp и един стринг с мощност 6,6kWp и обща инсталирана мощност от 9,9kWp.

Фотоволтаичните модули са монтирани на метална конструкция, като наклона

им спрямо хоризонта е 33°. Поради конструктивни съображения, ориентацията на фотоволтаичните модули е изместена с 18,4° на изток, спрямо чистия юг.

Връзката на фотоволтаичната система с електрическата мрежа се осъществява посредством три трифазни инвертора (модел SUN2000-10KTL-M0), по един инвертор за всяка подсистема.

Фотоволтаичната електроцентрала е оборудвана със система за мониторинг чрез която могат да се следят метеорологичните и електрическите параметри на фотоволтаичната система. Системата за мониторинг се управлява чрез интелигентен регистратор, модел Solar-Log 300, чрез който може да се осъществява дистанционен контрол и графично наблюдение на получените данни от мониторинга през компютър или мобилно устройство.

Показатели за оценка на производителността на фотоволтаичната система.

За оценка на производителността на фотоволтаичната система са използвани специфично електропроизводство на модулите (array yield Y_a), специфично електропроизводство на фотоволтаичната система (final yield Y_f) и ефективност на фотоволтаичните модули (η_{pv}), които са дефинирани в IEC Standart 61724 [5].

Y_a се дефинира като отношение на произведената от фотоволтаичните модули (E_{dc}) електрическа енергия за определен период от време (ден, месец, година) към максималната инсталирана мощност на фотоволтаичната система при стандартни тестови условия (STC). Стойностите за Y_a се изчисляват с уравнението:

$$Y_a = \frac{E_{dc}}{P_{pv rated}}, \frac{kWh}{kW_p} \quad (1)$$

Y_f се дефинира като отношение на отдадената електрическа енергия в електрическата мрежа от фотоволтаичната система за определен период от време (ден, месец, година) към макси-

малната инсталирана мощност на фотоволтаичната система при стандартни тестови условия (STC). Стойностите за Y_f се изчисляват с уравнението:

$$Y_f = \frac{E_{ac}}{P_{pv rated}}, \frac{kWh}{kW_p} \quad (2)$$

Ефективността на фотоволтаичните модули (η_{pv}) се определя със следния израз:

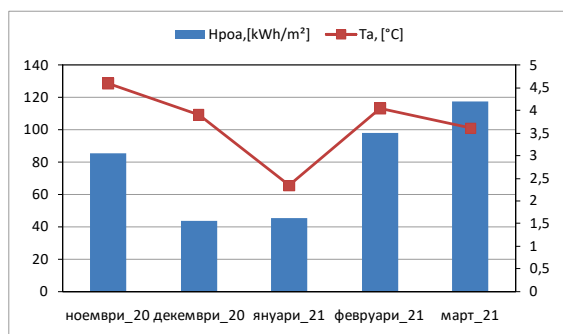
$$\eta_{pv} = \frac{E_{dc}}{H_{poa} \cdot S}, \% \quad (3)$$

където H_{poa} е слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули, Wh/m^2 ;

S - площта на фотоволтаичните модули, m^2 .

Стойности за слънчева радиация в равнината на фотоволтаичните модули и средната месечна околната температура

На фиг.1. са показани стойностите за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули и средната месечна околна температура за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.



Фиг. 1. Стойности за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули и средните месечни стойности на околната температура за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Най-ниски стойности за слънчевата радиация са отчетени през декември 2020 г. и януари 2021 г., съответно $43,48 kWh/m^2$ и $45,42 kWh/m^2$. За месец март 2021 г. са отчетени най-високите стойности за слънчевата радиация ($117,51 kWh/m^2$), като тази стойност е над

два пъти по-висока в сравнение със стойностите за декември 2020 г. и януари 2021 г.

Най-високи средни месечни стойности за околната температура са отчетени за ноември 2020 г. и февруари 2021 г. – $4,60^\circ C$ и $4,04^\circ C$. Стойностите за околната температура и слънчевата радиация не зависят една от друга.

В табл. 1. са показани стойностите слънчева радиация в равнината на модулите и средните месечни стойности за околната температура.

Таблица. 1. Стойности за слънчевата радиация в равнината на модулите и околната температура за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

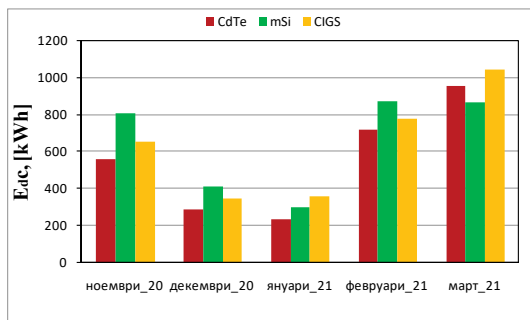
Месец, година	H_{poa} , [kWh/m ²]	T_a , [°C]
ноември 20	85,34	4,60
декември 20	43,48	3,90
януари 21	45,42	2,34
февруари 21	97,98	4,04
март 21	117,51	3,61

Произведена електрическа енергия от фотоволтаичните модули и отдадена електрическа енергия от фотоволтаичната система в електрическата мрежа

На фиг. 2. е показано сравнение за произведената от фотоволтаичните модули електрическа енергия (E_{dc}) за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г. За разглеждания период, фотоволтаичните модули от монокристален силиций (m-Si) са произвели най-много електрическа енергия. Изключение са месеците януари и март 2021 г., когато най-много електрическа енергия са произвели модулите от медно-индиев галиев селенид.

През месец март 2021 г. са получени най-високи стойности за произведената електрическа енергия за модули от кадмиев телурид и медно-индиев галиев селенид.

Тогава са отчетени и най-високи стойности за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули.



Фиг. 2. Произведена електрическа енергия от фотоволтаичните модули за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

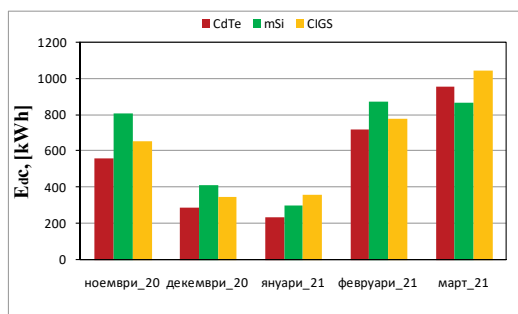
Най-ниски стойности за произведената електрическа енергия от трите вида фотоволтаични модули са отчетени за декември 2020 г. и януари 2021 г. Тогава отчетените стойности за слънчевата радиация са два пъти по-ниски в сравнение с останалите месеци от разглеждания период.

В табл. 2 са показани стойностите за произведената електрическа енергия от фотоволтаичните модули за разглеждания период.

Таблица 2. Стойности за произведената електрическа енергия от фотоволтаичните модули за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Месец година	CdTe	m-Si	CIGS
	E _{dc} , [kWh]	E _{dc} , [kWh]	E _{dc} , [kWh]
ноември 20	561,50	809,64	656,98
декември 20	291,10	415,35	350,71
януари 21	234,07	301,31	362,33
февруари 21	718,89	874,76	781,25
март 21	958,85	871,89	1049,15

На фиг. 3. е показано сравнение за отдадената електрическа енергия от трите фотоволтаични подсистеми в електрическата мрежа.



Фиг. 3. Отдадена електрическа енергия от фотоволтаичните подсистеми в електрическата мрежа за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

За разглеждания период, фотоволтаичната подсистема с модули от монокристален силиций (m-Si) е отдала най-много електрическа енергия в електрическата мрежа, като изключение са месеците януари и март 2021 г., когато най-много електрическа енергия е отдадена от подсистемата с модули от медно-индиев галиев селенид. През месец март 2021 г. са получени най-високи стойности за електрическа енергия за фотоволтаична подсистема с модули от медно-индиев галиев селенид.

Стойностите за отдадената електрическа енергия от трите подсистеми за дадени в табл. 3.

За по-коректна и точна оценка на производителността на фотоволтаичните модули и на съответните фотоволтаични подсистеми се използват показателите Y_a и Y_f .

Таблица 4. Стойности за отдадената електрическа енергия от фотоволтаичните подсистеми за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Месец година	CdTe	m-Si	CIGS
	E _{dc} , [kWh]	E _{dc} , [kWh]	E _{dc} , [kWh]
ноември 20	544,47	791,96	647,13
декември 20	280,16	404,46	345,41
януари 21	224,54	292,70	357,02
февруари 21	699,24	854,96	768,94
март 21	934,6	849,95	1032,87

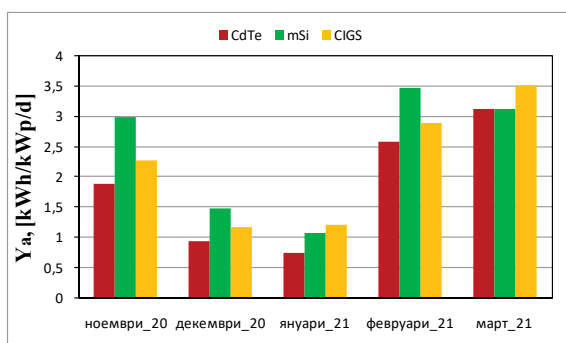
В табл. 4. са представени получените средни месечни стойности за Y_a за трите вида фотоволтаични технологии.

Таблица 5. Средни месечни стойности за Y_a за фотоволтаични модули от CdTe, m-Si, CIGS за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Месец година	Y_a , [kWh/kWp/d]		
	CdTe	m-Si	CIGS
ноември 20	1,89	3,00	2,28
декември 20	0,95	1,49	1,18
януари 21	0,76	1,08	1,22
февруари 21	2,59	3,47	2,91
март 21	3,12	3,13	3,52

За разглеждания период най-високи стойности за Y_a са получени за фотоволтаичните модули от монокристален силиций. Изключение се наблюдава през януари 2021 г. и март 2021 г. ,когато по-високи средни месечни стойности за Y_a са получени за модулите от медно-индиев галиев селенид, съответно 1,22kWh/kWp/d и 3,52kWh/kWp/d. За разглеждания период са получени най-ниски средни месечни стойности за Y_a за фотоволтаичните модули от CdTe. За декември 2020 г и януари 2021 г. тези стойности са по-малки от единица.

На фиг. 4. е показано сравнение на получените средни месечни стойности за Y_a за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.



Фиг.4. Сравнение на средните месечни стойности на „array yield” Y_a за трите вида фотоволтаични технологии за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

В табл. 6. са показани средните месечни стойности за Y_f за фотоволтаични подсистеми с модули от CdTe, m-Si, CIGS за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Таблица 6. Средни месечни стойности за Y_f за фотоволтаични подсистеми с модули от CdTe, m-Si, CIGS за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Месец година	Y_f , [kWh/kWp/d]		
	CdTe	m-Si	CIGS
ноември 20	1,83	2,93	2,24
декември 20	0,91	1,45	1,16
януари 21	0,73	1,05	1,20
февруари 21	2,52	3,39	2,86
март 21	3,05	3,07	3,47

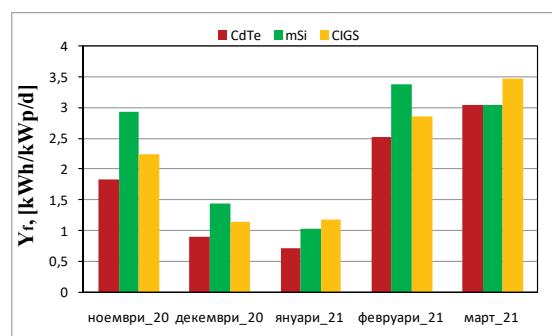
Най-високи стойности за Y_f , са получени за фотоволтаична подсистема с модули от монокристален силиций. Изключение се наблюдава през януари 2021 г.

и март 2021 г., когато са получени по-високи стойности за Y_f за фотоволтаичната подсистема с модули от медно-индиев галиев селенид.

Сравнение на получените средни месечни стойности за Y_f за трите фотоволтаични подсистеми е показано на фиг. 5.

Ефективност на фотоволтаичните модули.

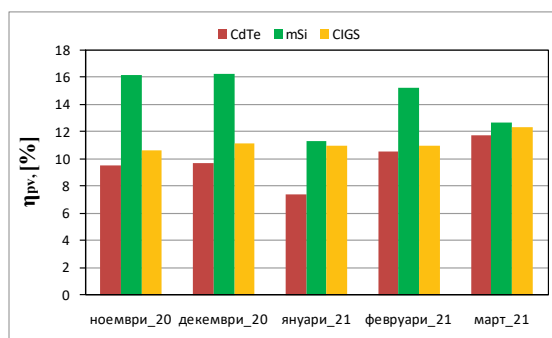
Получените стойности за ефективността на фотоволтаични модули от CdTe, m-Si и CIGS дадени в табл. 7.



Фиг. 5. Сравнение на средните месечни стойности за Y_f за фотоволтаични подсистеми с модули от CdTe, m-Si и CIGS за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Таблица 7. Стойности за ефективността на фотоволтаични модули от CdTe, m-Si, CIGS за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

Месец, година	CdTe	m-Si	CIGS
	η_{pv} , [%]	η_{pv} , [%]	η_{pv} , [%]
ноември 20	9,52	16,20	10,63
декември 20	9,69	16,31	11,14
януари 21	7,46	11,33	11,02
февруари 21	10,61	15,24	11,01
март 21	11,81	12,67	12,33



Фиг. 6. Сравнение на получените стойности за ефективността на фотоволтаични модули от CdTe, m-Si и CIGS за периода ноември 2020 г. ÷ март 2021 г.

За разглеждания период са получени най-високи стойности за ефективността за фотоволтаичните модули от монокристален силиций, като най-висока стойност е получена за декември 2020 г. – 16,31%, най-ниска стойност е получена за януари 2021 г. – 11,33%. От трите вида фотоволтаични технологии, най-ниски стойности за ефективността са получени за модулите от кадмиев телурид. За януари 2021 г., ефективността им е 7,46%, а за март 2021 г. достига до 11,81%. За модулите от CIGS не се наблюдава значително изменение на получените стойности за ефективността за разглеждания период. Сравнение на получените резултати за ефективността на трите вида фотоволтаични технологии е показано на фиг. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършена е обработка и е направен анализ на данните за производителността на фотоволтаична електроцентрала с фотоволтаични модули от CdTe, m-Si и CIGS за периода ноември 2020 г. – март 2021 г. Резултатите показват, че произведената електрическа енергия от фотоволтаичната система зависи от стойностите на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули. За февруари 2021 г. и март 2021 г., когато са отчетени високи стойности за слънчевата радиация, съответно 97,98 kWh/m² и 117,51 kWh/m² са получени най-високи стойности за произведената електрическа енергия и за трите вида фотоволтаични технологии. Стойностите за слънчевата радиация за декември 2020 г. и януари 2021 г. са най-ниски – 43,48 kWh/m² и 45,42 kWh/m². За тези месеци са отчетени и най-ниските стойности за произведената електрическа енергия от трите вида фотоволтаични технологии.

За разглеждания период най-високи стойности за произведената електрическа енергия, специфичното електропроизводство на фотоволтаичните модули Y_a , специфичното електропроизводство на фотоволтаичните подсистеми Y_f и ефективността на фотоволтаичните модули η_{pv} за трите вида технологии са по-

лучени за модулите от монокристален силиций и медно-индиев галиев селенид.

Средните месечни стойности за Y_f за за подсистемата с модули от медно-индиев галиев селенид достигат до 3,47 kWh/kWp/d за март 2021 г., а за подсистемата с модули от монокристален силиций Y_f е получена средна месечна стойност от 3,39 kWh/kWp/d. За фотоволтаичната подсистема с модули от кадмиев телурид са получени най-ниски стойности за Y_f , като за декември 2020 г. и януари 2021 г. тези стойности са съответно 0,91 kWh/kWp/d и 0,73 kWh/kWp/d.

Най-високи стойности за ефективността са получени за фотоволтаичните модули от монокристален силиций. За декември 2020 г. получената стойност за ефективността на модулите е 16,31%. Получената стойност за ефективността през същия месец за модулите от медно-индиев галиев селенид е 11,14%, а за тези от кадмиев телурид е 9,69%. През януари 2021 г. са получени най-ниски стойности за ефективността на модулите, като за m-Si тази стойност 11,33%, за CIGS – 11,02%, а за модулите от CdTe – 7,46%.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the European Regional Development Fund within the OP “Science and Education for Smart Growth 2014 – 2020”, Project CoC “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies“, № BG05M2OP001-1.002-0023.

REFERENCE

- [1] Bessel V., V. Kucherov, R. Mingaleeva. Study solar photovoltaic elements. Russian State University of Oil and Gas. 2016. Moscow. p.93.
- [2] <https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/photovoltaic-solarenergy/projects/snow-as-a-factor-in-photovoltaic-performance-andreliability/>
- [3] <https://www.sma-sunny.com/en/7-reasons-why-you-should-oversize-your-pv-array-2/>
- [4] Tsankov, P. Reducing climate by installing a new photovoltaic power plant in Bulgaria. CONTMPORARY MATERIALS, 12(2). 2021, pp. 126-139. ISSN 1986-8677.
- [5] IEC Standard 61724.