

**АНАЛИЗ НА ГОДИШНАТА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТ НА  
ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ С МОДУЛИ ОТ MonoSi, CdTe и CIGS****Пламен Цанков, Ивайло Лазаров***Технически университет - Габрово***ANALYSIS OF THE ANNUAL PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC  
SYSTEMS WITH MonoSi, CdTe AND CIGS PV MODULES****Plamen Tsankov, Ivaylo Lazarov***Technical University of Gabrovo***Abstract**

*The paper presents the performance analysis of three different photovoltaic systems – monoSi, 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 the 2021 year. The results for electricity production and specific yield by months and single sunny days are presented tabularly and graphically. Photovoltaic modules from monoSi obtain the highest values for electricity production and a specific yield of 1,08 kW/kWp, while for the CIGS modules the value is 1kW/kWp, and for the CdTe modules 0,9 kW/kWp.*

**Keywords:** photovoltaic module, monoSi, CdTe, CIGS, specific yield.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

В последните години нараства потреблението на електрическа енергия, която основно се произвежда от електрически централи, работещи с изкопаеми горива. Недостатък на изкопаемите горива е, че тяхната цена постоянно варира, изчерпаеми са, а произведената от тях електрическа енергия е свързана с отделянето на големи количества въглеродни емисии [1]. Това повишава търсенето на алтернативни, най-често възобновяеми енергийни източници. Слънчевите фотоволтаични системи се очертават като ефективна алтернатива за източник на електрическа енергия. Основните им предимства са: произведената от тях електрическа енергия е „чиста“ (директно преобразуване на падащата слънчева радиация в електрическа енергия); ниски разходи за поддръжка; възможност да бъдат използвани за различни приложения. Производителността на фотоволтаичните системи зависи технологията на фотоволтаичните мо-

дули, географското разположение и ориентацията им спрямо слънцето и от параметрите на околната среда, като температура, слънчева радиация и скорост на вятъра [2].

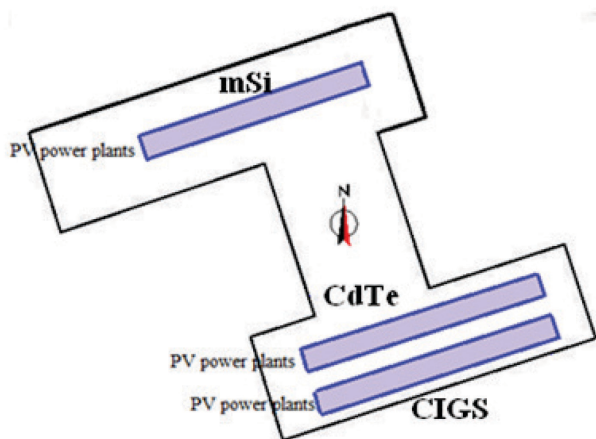
Според [3] общата инсталирана мощност от възобновяеми източници на енергия в България е 4211 MW, като инсталираната мощност от фотоволтаични електроцентрали е 1033 MW. Инсталираните мощности за фотоволтаичните електроцентрали с мощност до 1 MW е 121 MW, а на тези с мощност над 1 MW 911MW. Повечето фотоволтаични електроцентрали са изградени с модули от кристален силиций, поради което представлява интерес възможността за изследване на производителността на други технологии фотоволтаични модули за условията в България.

**ИЗЛОЖЕНИЕ**

От месец май 2020 г., на покрива на сградата на Технологичния парк на Технически университет – Габрово, като част от

проект център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии” е в експлоатация е фотоволтаична електроцентрала с обща мощност 30kWp. Фотоволтаичната система е изградена от три различни типа технология на фотоволтаични модули:

- Кадмиев телурид (CdTe) – два стринга, всеки с мощност 4,8 kWp. Всеки стринг се състои от 48 модула с единична мощност 100Wp. Общата инсталирана мощност е 9,6kWp;
- Монокристален силиций (mSi) – два стринга, всеки с мощност 4,5 kWp. Всеки стринг се състои от 18 модула с единична мощност 250Wp. Общата инсталирана мощност е 9 kWp ;
- Медно индиево – галиев селенид (CIGS) – един стринг с мощност 3,3 kWp и един стринг с мощност 6,6 kWp. Първият стринг се състои от 30 модула, а вторият стринг от 60 модула. Единичната мощност на всеки модул от CIGS е 110Wp. Общата инсталирана мощност е 9,9 kWp;



Фиг. 1. Ориентация на фотоволтаичните модули

Фотоволтаичните модули са монтирани върху метални рамки, като наклона им спрямо хоризонта е 33°. В резултат на конструктивни съображения, ориентацията на фотоволтаичните модули е отклонена с 18,4° на изток [4] (Фиг. 1).

Трите фотоволтаични подсистеми са свързани към мрежата посредством три трифазни инвертора, модел SUN2000-

10KTL-M0 (Huawei), които преобразуват постоянната мощност от трите фотоволтаични подсистеми с различен тип фотоволтаична технология в променлива мощност, която се отдава в електрическата мрежа.

В табл. 1 са представени стойностите за произведената електрическа енергия в kWh от трите вида фотоволтаични модули по месеци за 2021 г. Най-високи стойности за произведената енергия са получени през летните месеци юли и август, съответно за месец юли от mSi – 1818, 26kWh, и CIGS – 1863,25 kWh, а за месец август от mSi – 1716,18 kWh, и CIGS – 1751 kWh. От 15 май до началото на месец декември, поради повреда на фотоволтаичните модули от CdTe не са налични данни за произведена електрическа енергия.

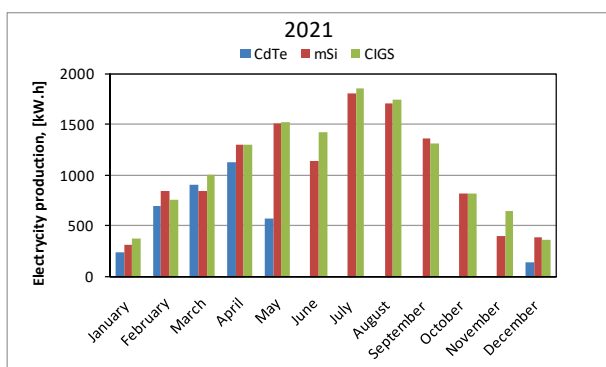
Таблица 1. Стойности за произведената електрическа енергия в kWh от три вида фотоволтаични модули за месеци от 2021 г.

Месец от 2021 г.	Вид на фотоволтаичния модул		
	CdTe	mSi	CIGS
януари	244,72	324,10	380,92
февруари	699,46	855,23	768,93
март	916,86	850,10	1011,58
април	1129,73	1312,34	1308,49
Май	574,74	1519,87	1525,97
юни	0	1143,71	1431,37
юли	0	1818,26	1863,25
август	0	1716,18	1751,66
септември	0	1365,12	1315,44
октомври	0	825,65	831,78
ноември	0	403,21	660,14
декември	153,39	401,02	370,10
ОБЩО	3 718,90	12 534,79	13 219,63

Най-ниски стойности за произведената електрическа енергия са отчетени през зимните месеци – януари и декември. За месец януари данните произведената електрическа енергия от трите вида фотоволтаични технологии са следните: CdTe – 244,72 kWh; mSi–324,1kWh; CIGS – 380,92 kWh. Отчетените данни за произведената електрическа енергия за месец декември са: CdTe – 153,39kWh; mSi – 401,02kWh; CIGS – 370,1kWh.

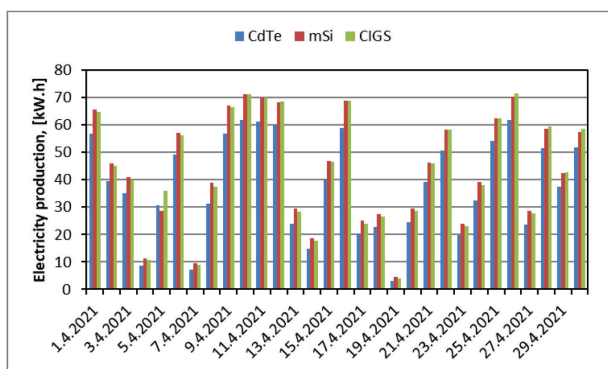
На фиг. 2. е показано графично сравнение на произведената електрическа енергия

от трите вида фотоволтаични технологии за месеците от 2021 г.



Фиг. 2. Произведена електрическа енергия от различните видове фотоволтаични технологии по месеци за 2021 г.

През месец декември 2021 г. не са работили всички фотоволтаични модули от кадмиев телурид CdTe. Високи стойности за произведената електрическа енергия са получени за месеци май и септември. За месец юни, са получени по-ниски стойности за произведената електрическа енергия, поради големия брой облачни дни. На фиг. 3 е показано производството на електрическа енергия на модулите от CdTe, mSi и CIGS по дни за месец април 2021 г.



Фиг. 3. Произведена електрическа енергия от модули от CdTe, mSi и CIGS за дните от месец април 2021 г.

За по-коректна сравнителна оценка на производителността на различните по тип и мощност фотоволтаични системи е извършено изчисление на параметъра „специфично електропроизводство (SpecificYield)”, който представлява отношение на отдадената от фотоволтаичната система електрическа енергия към електропреносната мрежа ( $E_{out}$ ) и номиналната ѝ мощност ( $P_{pv rated}$ ) [5].

$$Y_f = \frac{E_{out}}{P_{pv rated}}, \left[ \frac{kWh}{kW_p} \right] \quad (1)$$

В табл. 2. са дадени стойностите за „специфичното електропроизводство” за месеците от 2021 г.

Таблица 2. Стойности на специфичното електропроизводство в kWh/kW<sub>p</sub> за трите вида фотоволтаични модули по месеци за 2021 г.

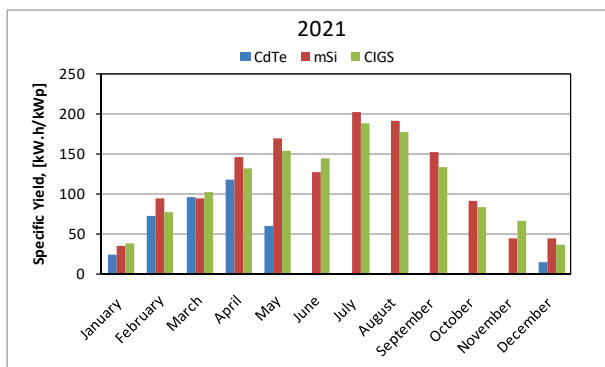
Месец от 2021 г.	Вид на фотоволтаичния модул		
	CdTe	mSi	CIGS
януари	25,492	36,011	38,477
февруари	72,860	95,026	77,670
март	95,506	94,456	102,180
април	117,680	145,816	132,171
май	59,869	168,874	154,138
юни	0.000	127,079	144,583
юли	0.000	202,029	188,207
август	0.000	190,687	176,935
септември	0.000	151,68	132,873
октомври	0.000	91,739	84,018
ноември	0.000	44,801	66,681
декември	15,978	44,558	37,384
ОБЩО	387,385	1392,756	1335,317

Най-високи стойности за специфичното електропроизводство са получени за фотоволтаичните модули от монокристален силиций (mSi) за месеци юли, август, май, септември и април.

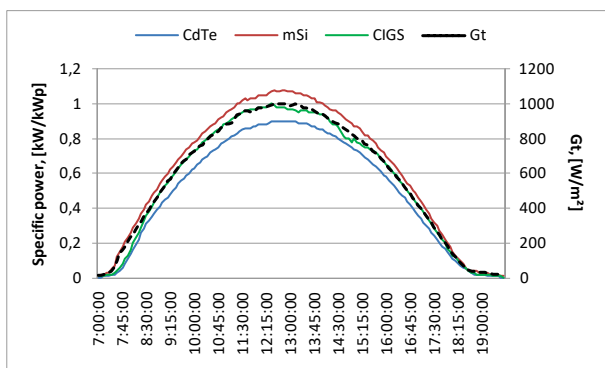
За месеците за които средномесечната температура е с по-ниски стойности (януари, март, ноември, декември) са получени по-високи стойности за специфичното електропроизводство за модулите медно индиево-галиев селенид.

На фиг. 4 е показано изменението на специфичното електропроизводство за 2021 година.

Направени са и изследвания на дневното изменение за всеки 10-минутен период на специфичното електропроизводство на различните видове фотоволтаични технологии за два изцяло слънчеви дни през 2021 г. На фиг. 5 е показано изменението на специфичната мощност за трите вида фотоволтаични технологии при изменение на слънчевата радиация за 10.04.2021 г.



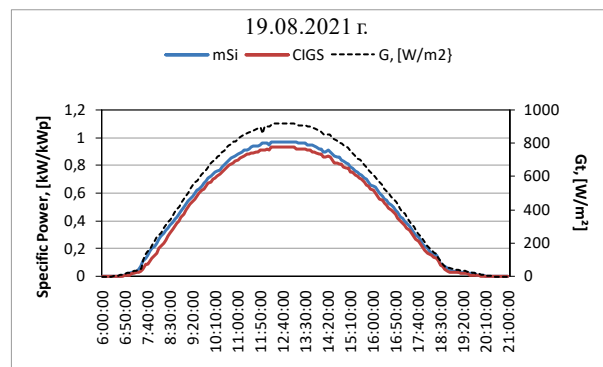
**Фиг. 4.** Изменение на специфичното електропроизводство на различните видове фотоволтаични технологии за 2021 г.



**Фиг. 5.** Изменение на специфичната мощност за трите вида фотоволтаични технологии и глобалната слънчева радиация за 10.04.2021 г.

Най-високи стойности за специфичната мощност са получени за модулите от монокристален силиций, като максимална стойност ( $1,08 \text{ kW/kW}_p$ ) е получена в 12:45h при стойност на слънчевата радиация  $1000 \text{ W/m}^2$ . За модулите от кадмиев телурид е отчетена максимална стойност за мощност  $0,9 \text{ kW/kW}_p$  в 13:00h при стойност на глобалната слънчева радиация  $989,7 \text{ W/m}^2$ . Отчетената максимална стойност за специфичната мощност за модулите от медно индиево-галиев селенид е  $1 \text{ kW/kW}_p$  в 12:25h при стойност на глобалната слънчева радиация  $993,4 \text{ W/m}^2$ .

На фиг. 6 е показано изменението на специфичната мощност за 19.08.2021 г. за два вида фотоволтаични технологии при изменение на слънчевата радиация. Получените стойности за специфичната мощност са по-ниски в сравнение с разгледаните за 10.04.2021 г. Стойностите за специфичната мощност за модулите от монокристален силиций са по-високи от тези на модулите от медно индиево-галиев селенид.



**Фиг. 6.** Изменение на специфичната мощност за два вида фотоволтаични технологии и глобалната слънчева радиация за 19.08.2021 г.

Отчетената максималната стойност за специфичната мощност за модулите от монокристален силиций е  $0,97 \text{ kW/kW}_p$ , в диапазона между 12:15 h и 13:10 h, като стойностите за глобалната слънчева радиация се изменят от  $911,7 \text{ W/m}^2$  до  $921,3 \text{ W/m}^2$ . Във времевия диапазон между 12:15 h и 13:10 h е отчетена максимална стойност за специфичната мощност  $0,93 \text{ kW/kW}_p$ , като стойностите за глобалната отново се изменят от  $911,7 \text{ W/m}^2$  до  $921,3 \text{ W/m}^2$ . За този период от годината модулите от кадмиев телурид не са работили, поради повреда и за тях не са отчетени данни.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършена е обработка и анализ на данните за производство на електрическа енергия от системата за мониторинг на фотоволтаична електроцентрала в Технологичния парк на Технически университет – Габрово с обща инсталирана мощност  $30 \text{ kW}_p$ , включваща три вида фотоволтаични технологии – кадмиев телурид (CdTe), монокристален силиций (mSi) и медно индиево – галиев селенид (CIGS), за първата цяла календарна година – 2021 от работата на електроцентралата. Отчетени са стойностите за произведената електрическа енергия и специфичното електропроизводство за месеците от 2021 г.

Анализът показва, че най-високи стойности за специфичното електропроизводство са получени за фотоволтаичните модули от монокристален силиций. За месец юли стойността за специфичното електропроизводство за модули от mSi превишава със 7,3% тази за модули от CIGS, а за месец август със 7,7%. Отчетено е изменението на

специфичната мощност на различните видове фотоволтаични технологии за два слънчеви дни от 2021 г., като максималните стойности за трите технологии са 1,08 kW/kW<sub>p</sub> за mSi модули, 1kW/kW<sub>p</sub> за CIGS и 0,9 kW/kW<sub>p</sub> за CdTe. За всичките видове фотоволтаични технологии, най-високите стойности за специфичната мощност са отчетени в обедните часове при слънчева радиация между 900 и 1000 W/m<sup>2</sup>. Най-високи стойности за специфичната мощност са отчетени за модулите от монокристален силиций, като за 10.04.2021 г., те са по-високи с 0,8% спрямо тези на модулите от медно индиево-галиев селенид и с 2% спрямо тези от кадмиев телурид.

Заклученията от анализа на годишната производителност на фотоволтаичните системи с модули от MonoSi, CdTe и CIGS доказват широките възможности на изградената система за мониторинг на фотоволтаичните електроцентрали в Технологичния парк на Технически университет – Габрово,

които могат да бъдат разширени за следващи времеви периоди и с отчитане на измерваните метеорологични параметри.

## REFERENCE

- [1] Haffaf A, Lakdja F, Djaffar O.A, Meziane R. Monitoring, measured and simulated performance analysis of a 2.4 kWp grid-connected PV system installed on the Mulhouse campus, France, Energy for Sustainable Development, 2021;(62):44-55.
- [2] Al-Otaibi A, Al-Qattan A, Fairouz F, Al-Mulla A, Performance evaluation on photovoltaic system on Kuwaiti schools' roof top, Energy Conversation and Management, 2015;(95):110-119.
- [3] <https://www.veiregistar.bg>
- [4] Tsankov, P. Reducing climate change by installing a new photovoltaic power plant in Bulgaria. CONTEMPORARY MATERIALS, 12(2). 2021, pp. 126-139. ISSN 1986-8677.
- [5] IEC 61724-1:2021 Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring.