

## Изследване производителността на фотоволтаични модули

Недко Недев, Константин Коев

**An Investigation of the energy yield of photovoltaic modules:** A photovoltaic non-tracking installed system on the roof of a manufacture building, on an unpopulated place, is investigated. The total system pick power value is 117.24 kWp by poly- and monocrystalline modules. The general energy efficiency of these modules with the inverters is analyzed for 45 months. The values of the general energy efficiency of both modules are decreased for analysed term and local climatic conditions.

**Key words:** photovoltaic modules, solar irradiance, solar irradiation, general energy efficiency, electrical power generation.

### ВЪВЕДЕНИЕ

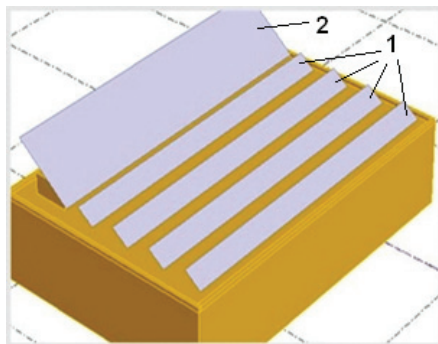
Един от параметрите, характеризиращи производството на електрическа енергия (производителност) от фотоволтаичните модули, е коефициентът на преобразуване на слънчевата енергия в електрическа (к.п.д.) [4]. Известно е [2,6,7,9], че фотоволтаичните модули, независимо от производствената технология, се характеризират с ниска стойност на к.п.д. - под 20 %, която, освен това, се изменя във времето. К.п.д. зависи от работните условия и техническото състояние на фотоволтаичните модули [1,3,5].

Продължителността на експлоатацията на фотоволтаичните модули с определена производителност, съответно стареенето и надеждността им, могат да се определят чрез анализ на техния к.п.д [3].

Целта на изследването е да се анализира изменението на к.п.д. на фотоволтаични модули за определен период от време и конкретни географски условия.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

#### Обект на изследването



**Фиг.1. Разположение на модулите върху покривната конструкция: 1 – поликристални модули; 2 – монокристални модули.**

Избраният обект е фотоволтаична система с обща изходна максимална мощност 117,24 kWp. Системата е разположена на покрив на производствена сграда, в промишлен район, извън населено място.

Обектът е разположен на терен с надморска височина 76 m. Инсталацията е изградена от 852 броя модули (фиг.1) – 528 от тях са поликристални: 484 броя тип Kyocera KC130GH-2P и 44 броя тип Kyocera KC130GH-2, а останалите 324 – монокристални, тип Solar Swiss SSM-150/24M. Поликристалните модули са с максимална мощност 130 Wp и разположени в 4 реда (фиг.1). Всеки от редовете е разделен на три секции, т.е. общо секциите са 12. Във всяка секция са монтирани по 44 модула, разположени на два реда.

Монокристалните модули са с максимална мощност 150 Wp и разположени в северната част на покрива. Модулите са подредени в 6 реда по 54 броя, като образуват масивна конструкция. Всичките 852 броя модули са ориентирани в посока югозапад, стационарно монтирани под наклон от 32° спрямо земната повърхност.

Големината на този ъгъл се определя от условието за максимално целогодишно електропроизводство в разглежданото географско местоположение [2,10].

### **Методика и средства за изследването**

Количеството произведена от фотоволтаичните модули електрическа енергия зависи основно от два фактора. Това са слънчевата радиация и температурата на модулите [1,2,5]. Вторият фактор зависи от слънчевата радиация, поради което тя най-силно влияе върху производителността на модулите.

Стойностите на интензитета на слънчевата радиация се измерват чрез вграден измервателен преобразувател в специализирана метеорологична станция Sunny Sensor Box, производство на SMA (Germany). Измервателният преобразувател работи с грешка  $\pm 8\%$ , при обхват на измерване (0...1500) W/m<sup>2</sup>. Информацията от преобразувателя се записва на определени интервали от време чрез модул Sunny Web Box, след което тя, чрез специализиран софтуер, се представя в удобен за анализ вид [8]. Максималните и средни стойности на интензитета на слънчевата радиация, а също и произведените от модулите количества електрическа енергия, се записват на всеки 15 min. Електрическата енергия се определя чрез информацията, получавана от инверторите.

Общият к.п.д., който характеризира производителността на системата (фотоволтаични модули и инвертори), количествено се определя по формулата [4]

$$\eta = \frac{W_t}{\int_t E \cdot A \cdot dt} \cdot 100, \% \quad (1)$$

където  $W_t$  е количеството произведена електрическа енергия за определен период от време  $t$ , kWh;

$E$  – интензитетът на слънчевата радиация, паднала върху модулите, W/m<sup>2</sup>;  
 $A$  – площта на фотоволтаичните модули, m<sup>2</sup>.

Изразът в знаменателя на формула (1) интегрира интензитета на падналата върху модулите слънчева радиация (solar irradiance)  $E$  за определен период от време  $t$ , т.е. това е енергията на слънчевата радиация (solar irradiation).

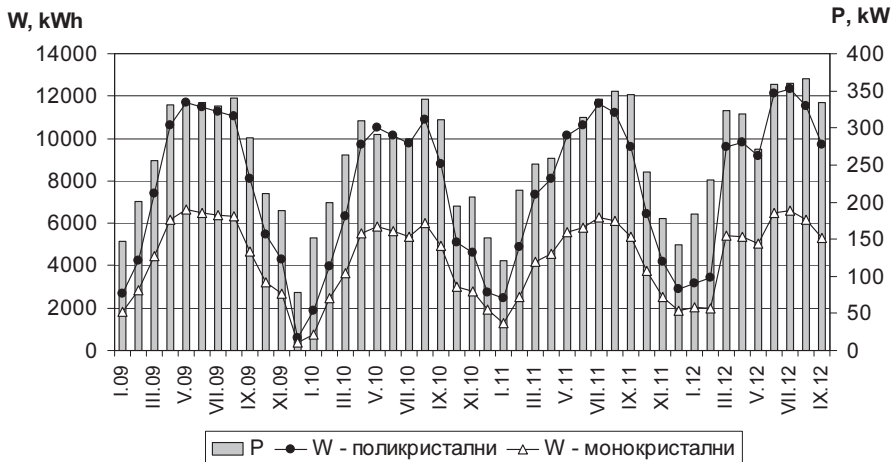
### **Резултати от изследването**

Интензитетът на слънчевата радиация и произведената електрическа енергия са представени със средните си месечни стойности. Те се получават от средните стойности за всеки ден от разглежданите 3 години и 9 месеца (от месец януари, 2009 г. до месец септември, 2012 г., включително), като се отчита продължителността на светлата част от денонощието. Произведената електрическа енергия е представена за двата вида фолтоволтаични модули – моно- и поликристални.

Представените резултати за слънчевата радиация и произведената електрическа енергия са непълни – липсват данни за втората половина на месец декември, 2009 г. (18 дена) и за 11 дена от месец януари 2010 г. - общо 29 дена. Причината е, че тогава работата на фотоволтаичната система е преустановена, за да се извършат необходимите дейности по присъединяването ѝ към регионалната електроразпределителна мрежа (20 kV).

Измененията на интензитета на слънчевата радиация  $E$ , паднала върху фотоволтаичните модули с обща площ  $A$  (т.е. това е мощността  $P = E \cdot A$ ), и на произведената от тях електрическа енергия  $W$ , са представени по месеци на фиг.2. Характерно е, че стойностите на двете величини, отделно за двата вида модули, се изменят идентично. Това означава, че производството на електрическа енергия силно зависи от слънчевата радиация. Последната, за разглежданите географски

ширини, се характеризира с годишна цикличност [2]. По тази причина графиките са с ясно изразени максимуми през летните месеци и с минимуми – през зимните.



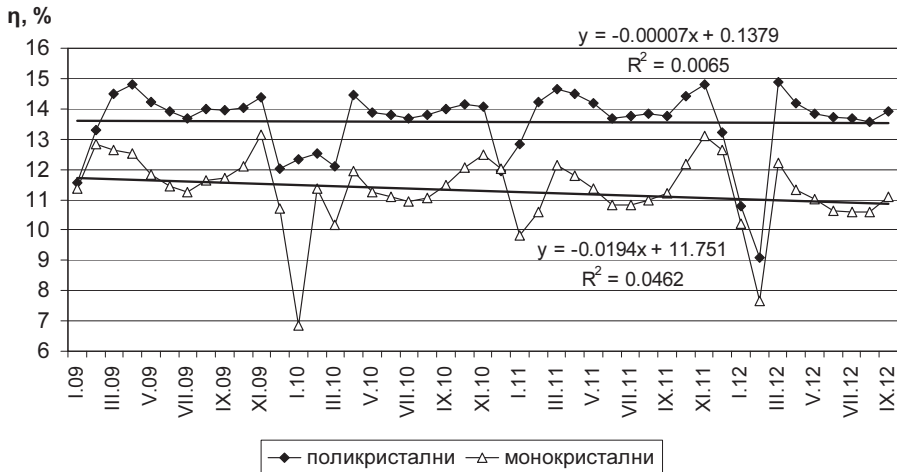
**Фиг. 2. Изменения по месеци на мощността на слънчевата радиация  $P$ , паднала върху общата площ на всички модули  $A$ , и на произведената електрическа енергия  $W$  от различните видове модули.**

В представените на фиг.2 данни за произведената електрическа енергия са изключени онези, които се отнасят за област от 54 монокристални фотоволтаични модула. Причината е, че тези модули се засенчват от някои конструктивни елементи. Разликата в произведените количества електрическа енергия от засенчваните 54 броя монокристални модули и други групи от 54 броя незасенчвани модули надхвърля 50 % за някои летни месеци. През зимния период тази разлика намалява значително или напълно липсва.

Общите количества произведена електрическа енергия от всички модули (моно- и поликристални, засенчвани и незасенчвани) по години, с изключение на дните, през които не е работила системата, са: за 2009 г. – 147 809,74 kWh, за 2010 г. - 138 964,10 kWh, за 2011 г. – 146 344,18 kWh, за 2012 г. (до края на месец септември) – 129 041,00 kWh. Следователно, към момента на изследването, най-голямо производство е реализирано през 2009 г. Отнесено към същата година, производството за 2010 г. е 94,0 %, за 2011 г. – 99,0 %, а за незавършената 2012 г. – 87,3 %. Тези данни дават обща представа за работата на фотоволтаичната система, при изменящи се условия на околната среда, но не са достатъчни за да се направят изводи за трайните необратими изменения в производителността на модулите. Тези изменения се дължат на промени в полупроводниковата структура на отделните клетки, изграждащи фотоволтаичните модули [5].

Измененията в техническите характеристики на фотоволтаичните модули могат да се установят чрез изследване коефициента на полезното им действие. Стойността му за цялата фотоволтаична система се определя по формула (1). Получените резултати се използват за построяване на графиките на изменението на к.п.д. по месеци за моно- и поликристалните модули (фиг.3). В представените данни не са включени резултатите за засенчваните 54 монокристални модула.

Общият к.п.д. на поликристалните модули (заедно с инверторите) е по-голям по стойност от този на монокристалните модули (фиг.3). Характерът на изменение на



Фиг.3. Изменение на общия к.п.д.  $\eta$  по месеци за двата вида модули.

графиките на к.п.д. е периодичен с период 1 г., подобно на графиките за производството на електрическа енергия (фиг.2). Графиките на фиг.3 се характеризират с локални и абсолютни екстремуми за всяка календарна година: максимумите са през пролетния и есенния сезони на годината, а минимумите – през зимния и летния периоди. Абсолютните максимуми на к.п.д. за монокристалните модули са през есента, а за поликристалните модули – през пролетта (за 2009, 2010 и 2012 г.). Абсолютните минимуми на стойността на к.п.д., и за двата вида модули, се получават през зимния период.

Средните стойности, около които варират стойностите на к.п.д. за разглежданите месеци, са представени с прави (фиг.3). Техните уравнения и статистическите оценки  $R^2$  също са показани. Сравняването на правите показва, че абсолютната стойност на к.п.д. намалява и за двата вида модули. Намалението е по-чувствително при монокристалните - с 1,3 %, общо за 45-те месеца, а при поликристалните модули е само с 0,3 %.

Производителят на поликристалните модули [7] е посочил стойност на к.п.д. 16 %, която намалява най-много с 10 % за 10 г., при STC (стандартни тестови условия), и най-много с 20 % за 20 г., при NOCT (нормална работна температура на модулите). STC се определят при интензитет на слънчевата радиация  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , коефициент на въздушната маса AM 1,5 и температура на клетката (модула)  $25^\circ\text{C}$ . NOCT се определя при  $E = 800 \text{ W/m}^2$ , коефициент на въздушната маса AM 1,5, скорост на вятъра 1 m/s и температура на околната среда  $20^\circ\text{C}$ .

Производителят на монокристалните модули [9] е посочил к.п.д. 14,4 %, който намалява най-много с 10 % за 10 г., при STC и най-много с 20 % за 25 г., при NOCT.

Коефициентът на въздушната маса AM се определя с отношението на дължините на пътя, който изминават слънчевите лъчи през земната атмосфера, за да достигнат земната повърхност, съответно при положение на слънцето, различно от зенита и когато то е в точката на зенита. Коефициентът AM 1,5 съответства на относителната дължина на пътя на слънчевите лъчи, когато слънцето се намира на ъгъл  $48,2^\circ$  от точката на зенита. Това положение на слънцето е средногодишното за

средните географски ширини (умерения климатичен пояс, в който се намира изследвания район) [5].

Големият спад на стойностите на к.п.д., за месеците Януари, 2010 г. и Януари и Февруари, 2012 г., се дължи на прекъсване работата на системата през 2010 г. и неблагоприятните климатични условия (задържала се върху модулите снежна покривка) през 2012 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното изследване за измененията на производството на електрическа енергия от фотоволтаичните модули и общият к.п.д. дава основание да се направят следните изводи:

1. Слънчевата радиация силно влияе на производството на електрическа енергия, която се характеризира с ясно изразени максимуми през летните месеци и минимуми – през зимните.
2. Общият к.п.д. на двата вида фотоволтаични модули (заедно с инверторите) се изменя периодично с период 1 г. и намалява за изследвания период (45 месеца), при конкретните климатични условия. К.п.д. на поликристалните модули намалява само с 0,3 %, а на монокристалните – с 1,3 %, което е 4,3 пъти по-голямо, в сравнение с поликристалните. Средногодишното намаляване на общия к.п.д. на поликристалните модули е 12,5 пъти по-малко и 2,9 пъти по-малко за монокристалните, в сравнение с даденото от производителя максимално средногодишно намаляване на стойността на к.п.д. на модулите - 1 % за 1 г., при STC-условия.
3. Абсолютните максимуми на стойностите на к.п.д. за монокристалните модули се получават през есента, а за поликристалните модули – през пролетта (с изключение на 2011 г.).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мартев Кр., К. Коев, Н. Недев. Изследване влиянието на някои фактори върху електропроизводството на фотоволтаични модули. В: Научни трудове на Русенския университет, том 49, серия 3.1, Русе, 2010, стр. 57-61.
- [2] Младенчева, Р. Фотоволтаични генератори. Ековат Технологии, С., 2007.
- [3] Dirk C. Jordan, Sarah R. Kurtz. Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review. Journal Article NREL/JA-5200-51664, June 2012, p. 30.
- [4] Jahn U., et al. International energy agency pvps task 2: analysis of the operational performance of the iea database pv systems. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, United Kingdom, May 2000, p. 5.
- [5] Tom Markvart, Luis Castañer. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. Elsevier Ltd., 2003, p. 984.
- [6] Şen, Z. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. London: Springer, 2008.
- [7] [www.kyocerasolar.de](http://www.kyocerasolar.de)
- [8] [www.sma.de](http://www.sma.de).
- [9] [www.solar-swiss.ch](http://www.solar-swiss.ch)
- [10] [www.sunsys.info](http://www.sunsys.info)

### За контакти:

Гл. ас. д-р инж. Константин Коев, Катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 661, e-mail: [kkoev@uni-ruse.bg](mailto:kkoev@uni-ruse.bg)

Маг. инж. Недко Недев, редовен докторант, Катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 330, e-mail: [nneдев@uni-ruse.bg](mailto:nneдев@uni-ruse.bg)

Докладът е рецензиран.