

## Моделиране интензитета на слънчевата радиация

Константин Коев

*The intensity of solar radiation modelling: For the two years – 2009 and 2010, the intensity of solar irradiation data of working photovoltaic electric power plant has been investigated. A model of the time lapsed of intensity solar radiation by years is suggested and tested of MATLAB. The model is consists of two parts and ones are sums of exponential and Gaussian functions. The values of the model's coefficients are closed on.*

**Key words:** Photovoltaic Modules, Intensity of Solar Radiation, Model, MATALAB.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Основният фактор, който влияе върху производството на електрическа енергия от модули за преобразуването на слънчевата енергия в електрическа (PV-модули, фотоволтаични модули), е интензитетът на слънчевата радиация [1,3,4]. Географското положение на нашата страна определя сезонното изменение на интензитета на слънчевата радиация. Изследвани и моделирани са измененията на интензитета на слънчевата радиация, като основен фактор за работата на фотоволтаичните модули [1,7,9], с цел повишаване точността на анализирани и прогнозиране на производството на електрическа енергия и повишаване качеството на експлоатация на PV-модулите.

Целта на изследването е да се предложи подходящ математичен модел за интензитета на слънчевата радиация, като основен фактор за производство на електрическа енергия от фотоволтаични модули.

### ОБЕКТ И МЕТОДИКА

Избраният обект е разположен в района на гр. Русе, а основните му характеристики са дадени в [5].

За постигане на поставената цел е необходимо да бъдат решени следните задачи:

1. Анализ на измененията на часовете с разпределението по класове стойности на интензитета на слънчевата радиация, при които се гарантира производството на електрическа енергия, и избор на модел.
2. Статистически анализ за точността и коректността на модела.
3. Сравнителен анализ между предложения модел и други възможни модели.

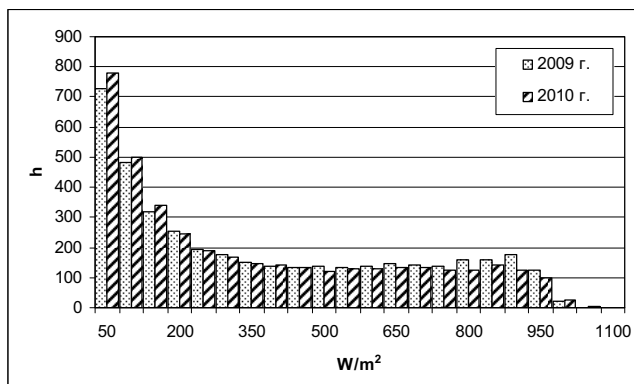
Интензитетът на слънчевата радиация се характеризира със случайни изменения във времето и представлява неуправляем фактор от гледна точка на изследователя [1,4,6]. Стойностите на интензитета на слънчевата радиация се измерват и записват чрез измервателно-информационна система на всеки 15 min.

Анализът на моделите ще се извършва с помощта на специализирани инструменти в програмния продукт MATLAB.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

Разглеждат се часовете с разпределенията на стойностите на интензитета на слънчевата радиация,  $W/m^2$ , по класове, за две години – 2009 и 2010 г. (фиг.1).

Характерна особеност е по-големият брой на часовете, през които интензитетът на слънчевата радиация е с малка стойност – (50...150)  $W/m^2$ . Известно е [4,5], че основните причини за това са географското разположение на изследвания обект и денонощното и годишно движение на Земята около Слънцето. Тези фактори определят математическия модел на дневното и годишното изменения на интензитета на слънчевата радиация – нормален (Гаусов) закон [7].



Фиг.1. Изменение на интензитета на слънчевата радиация по класове, общо за 2009 и 2010 г.

Характерно е, че през 2010 г. часовете с малък интензитет на слънчевата радиация - (50...150)  $W/m^2$ , са повече, отколкото през 2009 г. Часовете с по-голям интензитет на слънчевата радиация - (200...950)  $W/m^2$ , са повече на брой през 2009 г., отколкото през 2010 г., с изключение на стойността 400  $W/m^2$ . За нея часовете са 140 за 2010 г. и 139 за 2009 г. При интензитет на слънчевата радиация 1000 и 1050  $W/m^2$ , повече са часовете през 2010 г., съответно 24 и 3. Тези стойности са незначително по-големи, в сравнение с броя часове през 2009 г., съответно 20 и 1. Общият брой часове за 2010 г., през които интензитетът на слънчевата радиация се е изменял в границите (50...1050)  $W/m^2$ , е 3932, а през 2009 г. – 4048 часа.

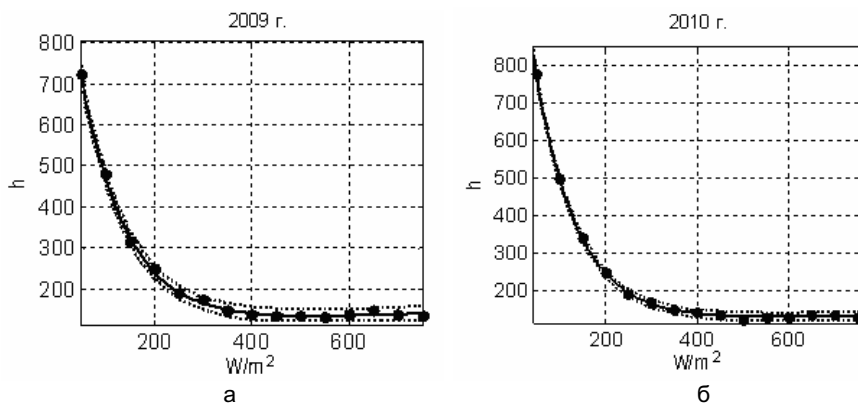
Представените разлики в броя часове, характеризиращи се с определена стойност на интензитета на слънчевата радиация, се дължат на конкретните климатични условия през двете изследвани години. В следствие на разликите, общо произведената електрическа енергия през 2009 г. е 147,81 MWh, а през 2010 г. – 138, 96 MWh.

Следователно, разликите в резултатите за двете години – 2009 и 2010, не са големи и може да се очаква, че моделите за описване на данните ще бъдат подобни или еднакви.

Предложени са модели за часовете с разпределението на интензитета на слънчевата радиация през 2009 и 2010 г., които представляват полиноми от 3-та степен[5]. Характерното за тях е, че някои от стойностите на часовете са отдалечени значително от кривите на полиномите. Това налага да се извърши допълнителна проверка на статистическите параметри на моделите и възможност да се предложат други по-точни модели.

С помощта на MATLAB е установено, че данните за часовете с разпределението на интензитета на слънчевата радиация през 2009 г. не се описват достатъчно точно и коректно с полиноми. Опитите за моделиране с полиноми от 6-та и по-висока степен са неуспешни, защото обемът на данните е недостатъчен и получените резултати са статистически некоректни. Подобни са резултатите и при други модели: рационални, степенни и логаритмични функции.

Графичният вид на разпределението на часовете с различен интензитет на слънчевата радиация наподобява намаляваща експоненциална зависимост до 750  $W/m^2$ . При по-големи стойности на интензитета на слънчевата радиация, часовете нарастват, а графиката се характеризира с локален максимум в интервала (850...900)  $W/m^2$ . След този екстремум часовете отново намаляват и достигат нула, при интензитет 1100  $W/m^2$  (фиг.1).



Фиг.2. Модел на изменение на часовете с разпределенията на стойностите на интензитета на слънчевата радиация, по класове за 2009 (а) и 2010 г.(б), в интервала (50...750)  $W/m^2$ .

Специфичният характер на изменение разпределението на часовете с интензитет на слънчевата радиация в интервала (50...1050)  $W/m^2$  и неуспешните опити за адекватно моделиране само с едно уравнение са причина да се потърси нов подход.

Графиката може да се раздели на две части по абцисната ос така, че да се получат две нови графики, които евентуално могат да се моделират по-точно, отколкото цялата графика. Разделната точка се приема да бъде същата, до която графиката наподобява намаляваща експоненциална зависимост - 750  $W/m^2$ .

Първо се моделира изменението на разпределението на часовете с интензитет на слънчевата радиация в интервала (50...750)  $W/m^2$ , поотделно за всяка от двете изследвани години - 2009 и 2010 г. (фиг.2). С помощта на MATLAB се търси подходящ модел. Кривата на предложения модел е представена с непрекъснатата линия, а разпределението на часовете - с черни точки (фиг.2, 3). В моделите интензитетът на слънчевата радиация е означен с  $x$ , а моделът  $f_1(x)$  представлява сума от две експоненциални функции с общо четири коефициента -  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  (табл.1). Техните стойности са определени при доверителна вероятност 95 %. Границите на тази вероятност са представени с прекъснатите криви линии (фиг.2, 3).

Сравнението между двете графики (фиг.2) показва, че почти всички точки за 2009 г. попадат в доверителния интервал от 95%. При 2010 г. някои от точките са на границата, а други - извън доверителния интервал. Това се дължи на факта, че интервалът на изменение на стойностите на коефициентите за модела за 2010 г. е малко по-тесен от същия интервал при модела за 2009 г. Независимо от това, стойностите на четирите коефициента за двата модела се различават незначително (табл.1). В последните четири реда на табл.1 са представени конкретните статистически оценки за качеството на моделите. Близките до единица стойности на R-square и Adjusted R-square са доказателство за точността на моделите, с която те описват данните [2,8]. Стойностите на другите две оценки SSE и RMSE са значително по-малки от стойностите им при моделиране с полиноми. Този факт допълнително потвърждава коректния избор на моделите.

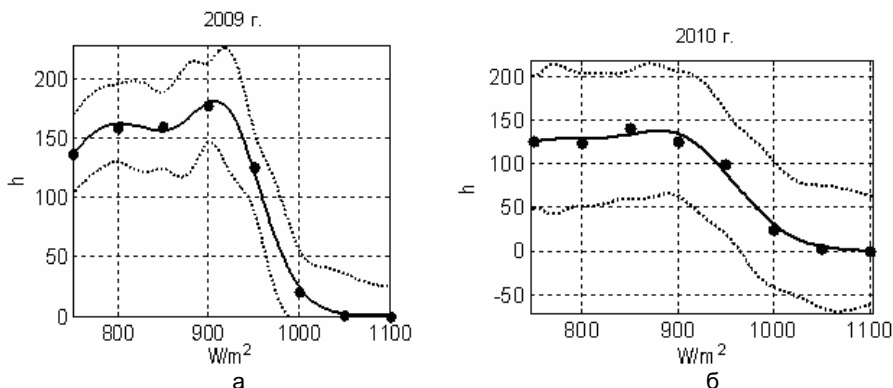
Втората част на графиките се описват с по-сложен модел  $f_2(x)$ . Той представлява сума от уравненията на два Гаусови закона, като всяко има по три коефициента -  $a$ ,  $b$  и  $c$  (табл.2). Характерното за коефициентите, както и при модела

Таблица 1

Параметри на модела $f_1(x)$		
$f_1(x)$	2009 г.	2010 г.
	$a \cdot e^{b \cdot x} + c \cdot e^{d \cdot x}$	
a	1041,000000	1150,000000
b	- 0,010640	- 0,011010
c	113,800000	115,600000
d	0,000292	0,000156
SSE	465,900000	202,200000
R-square	0,998800	0,999600
Adjusted R-square	0,998500	0,999500
RMSE	6,508000	4,288000

$f_1(x)$ , е че стойностите им са близки за двете години 2009 и 2010. Стойностите на статистическите оценки R-square, Adjusted R-square, SSE и RMSE, са доказателство за точността на моделите, с която те описват данните [2,8]. Предложеният модел много по-точно описва данните от моделите с полиноми.

Характерното за модела  $f_2(x)$ , за 2009 и 2010 г. (фиг.3), е, че стойностите на коефициентите имат по-голям интервал на изменение (по-широка област, оградена от 95 %-та доверителна област), в сравнение с тези за модела  $f_1(x)$ .



Фиг.3. Модел на изменение на часовете с разпределения на стойностите на интензитета на слънчевата радиация, по класове за 2009 г.(а) и 2010 г.(б), в интервала (750...1100)  $W/m^2$ .

Таблица 2

Параметри на модела $f_2(x)$		
$f_2(x)$	2009 г.	2010 г.
	$a_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2}$	
$a_1$	118,9000	94,6500
$b_1$	922,0000	909,9000
$c_1$	54,4300	79,8600
$a_2$	161,9000	124,0000
$b_2$	800,1000	761,5000
$c_2$	118,2000	133,0000
SSE	64,1100	317,0000
R-square	0,9985	0,9877
Adjusted R-square	0,9946	0,9569
RMSE	5,6620	12,5900

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложени са два модела  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  за часовете с разпределението на изменението на интензитета на слънчевата радиация в интервала (50...1100)  $W/m^2$ , по класове, за 2009 и 2010 г., за района на гр. Русе. Моделът  $f_1(x)$  се отнася за интензитет на слънчевата радиация в интервала (50...750)  $W/m^2$ , а моделът  $f_2(x)$  – при интензитет (750...1100)  $W/m^2$ .

Моделите описват по-точно и статистически коректно данните, в сравнение с моделите, използващи уравнения на полиноми (независимо от степента им), рационални, степенни и логаритмични функции.

Двата модела са сложни и математически представляват суми от две уравнения на една и съща функция, с еднакъв брой коефициенти, но с различни стойности, определени при доверителна вероятност 95 %. Моделът  $f_1(x)$  е сума от експоненциални функции, а  $f_2(x)$  – сума от уравнения на Гаусови разпределения.

Стойностите на коефициентите за всеки от двата модела, за 2009 и 2010 г., са близки, но интервалите им на изменение малко се различават.

Ако уравненията на Гаусовите разпределения се разглеждат като модифицирани експоненциални функции, то двата предложени модела  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  могат да се разглеждат като суми на експоненциални функции с различни по стойност коефициенти.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алкатири,Ф. Изследване на възможностите за енергоосигуряване с фотоволтаични системи на отдалечени потребители в условията на Република Йемен. Дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен “доктор”, Русе, 2010.
- [2] Андонов, К., Л. Михайлов, О. Диолов, К. Коев, Н. Евстатиева. Методи и средства за изследване в електроенергетиката. Русе, Издателски център на Русенския университет, 2010, ISBN 987-954-8467-07-0, с. 201.
- [3] Коев, К. и др. Изследване влиянието на някои фактори върху производството на електрическа енергия от фотоволтаични модули. Енергетика, (под печат).
- [4] Младенчева, Р. Фотоволтаични генератори. Ековат Технологии, С., 2007, с.
- [5] Недев, Н., К. Коев, Кр. Мартев. Изследване измененията на интензитета на слънчевата радиация В: Научни трудове на Русенския университет, том 50, серия 3.1. Русе, Печатна база на Русенския университет, 2011, с. ...
- [6] Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем. Мн.:ДизайнПРО, 2004, 640с.
- [7] Ashenayi, K. et al. Application of normal distribution in modeling global irradiation. System Theory, 1988, Proceedings of the Twentieth Southeastern Symposium on, 20-22 Mar 1988, p. 470 – 474.
- [8] Mayers, J. L., A. D. Well. Research Design and Statistical Analysis. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. Publishers. 2nd ed. 2003. Mahwah, New Jersey, p. 760.
- [9] Coskun, C. et al. Estimation of monthly solar radiation distribution for solar energy system analysis. Energy 36 (2011), p. 1319-1323.

## 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)

**Докладът е рецензиран.**