

**ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА РАЗТОЯНИЕТО МЕЖДУ РЕДОВЕТЕ  
ОТ ФОТОВОЛТАИЧНИ МОДУЛИ ПРИ ФОТОВОЛТАИЧНИ  
СИСТЕМИ ВЪРХУ ГОДИШНОТО ПРОИЗВОДСТВО НА  
ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА PVGIS-SARAH**

**Цвятко Колев Върбов**  
*Технически университет - Габрово*

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE INTER-ROW SPACING FOR  
GROUND MOUNTED PV SYSTEMS ON THE ANNUAL PRODUCTION OF  
ELECTRIC ENERGY USING PVGIS-SARAH**

**Tsvyatko Kolev Varbov**  
*Technical University of Gabrovo*

**Abstract**

*In this paper, an approach for calculating the effect of inter-row shading on the PV power production has been developed. This article discusses how to calculate the row spacing for PV systems mounted on flat roofs and ground. The information system PVGIS-SARAH was used to obtain the annual electricity production at different orientation of photovoltaic modules. Possibility for increasing the size and the annual electricity production of the photovoltaic system on a given terrain is shown.*

Keywords: PV Systems, PVGIS- SARAH, orientation of photovoltaic modules, inter-row spacing.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Общоприето е, че оптималният ъгъл на наклон на слънчевите панели, за да се постигне максимално годишно събиране на енергия, е ъгълът на географската ширина на мястото. Ако дадена повърхност е наклонена под ъгъл, равен на ъгъла на географската ширина, тя ще бъде обърната точно към Слънцето на слънчевото пладне (в средата на деня) на 21 март и 21 септември.

За щастие, уловената енергия не се променя много даже при значителни отклонения от оптималният ъгъл на наклон на фотоволтаичните панели (географската ширина на България е около  $43^\circ$ ). Тази гъвкавост дава възможност за избор на ъгъл на наклон на фотоволтаичните модули съобразен с увеличаване на сезонното производство на електрическа енергия, постигане на рав-

номерно производство или увеличаване на производството от дадена площ.

Достъпът до данни към географската фотоволтаична информационната система PVGIS дава възможност да се намери оптималният наклон фотоволтаичните модули и да се получи информация за произведената електрическа енергия при различна ориентация на фотоволтаичните модули. Чрез данните получени от информационната система PVGIS и изчисляване на разстоянието между редовете от фотоволтаични модули във фотоволтаичен масив може да се получи годишното производство на електрическа енергия от площта на терена на масива. В доклада се изследва влиянието на наклона на фотоволтаичните модули върху годишното производство на електрическа енергия за единица площ от терена на фотоволтаичния масив за конкретен район от територията на България.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Фотоволтаичната географска информационна система (PVGIS) дава информация за слънчевата радиация и географска оценка на разположение при определяне на ефективността на работа на фотоволтаичните системи. Използват се карти даващи информация за слънчева радиация върху хоризонтална и наклонена повърхност. Данните от PVGIS-SARAH са на основа на сателитни данни от периода 2005-2016г. и са в kWh/m<sup>2</sup>. Системата дава информация и за потенциала на получената електрическа енергия генерирана от фотоволтаична система за 1 kWp[4].

Направените изчисления са за координати: 42.875° с. ш. 25.307° и. д., надм. височина: 490 m (Корпус1 на Технически университет Габрово) .

Методика за изследване на годишното производство на електрическа енергия в зависимост на наклона на фотоволтаичните модули и разстоянието между тях чрез използване на информационната система PVGIS и програмата Excel

Събирането на данни от информационната система PVGIS и обработката на данните с програмата Excel е в следната последователност:

Получаване на информация за годишно производство на електрическа енергия при зададено географско положение, ъгъл на наклон и азимут чрез използване на информационната система PVGIS. Задават се загубите в %, които биха се получили в кабелите и инвертора. В конкретният случай са зададени загуби 6%. Данните са за силициевы фотоволтаични модули.

Запис на получената информация за годишно производство на електрическа енергия, според ъгъла на наклон и азимут в таблица на програмата Excel.

Изчисляване на разстоянието между редовете фотоволтаични модули в зависимост от наклона на модула.

Изчисляване на годишното производство на електрическа енергия от фотоволтаичния масив за една година в зависимост от наклона на модулите и разстоянието между редовете за единица площ от терена. Изготвяне графики от данните в таблицата отчитаща това годишно производство на

електрическа енергия при наклон на модулите от 0° до 90°.

Събирането на данни от информационната система PVGIS.

За географските координати на гр. Габрово информационната системата PVGIS дава оптимален наклон на фотоволтаичните модули равен на 35° и азимут 0° за получаване на максимално целогодишно количество електричество от фиксирани фотоволтаични модули.

В таблица 1 са показани стойностите в kWh получени за произведена електрическа енергия за година за зададеното географско положение и ъгъл на наклон при азимут 0° с информационната система PVGIS.

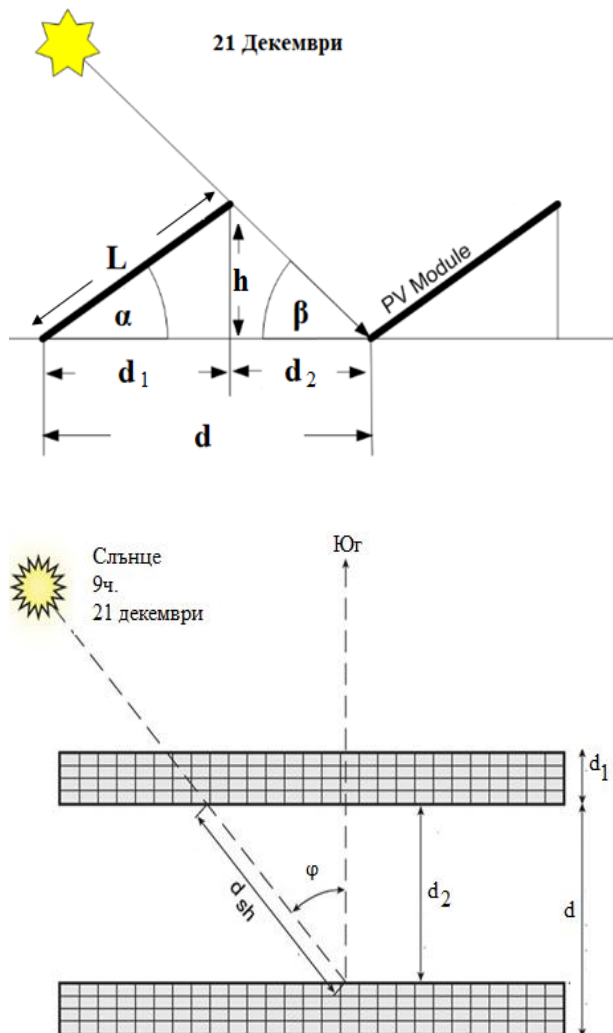
Таблица 1

наклон на модула α	производство на ел. енергия kWh/kWp
0	1137
5	1183
10	1212
15	1255
20	1280
25	1298
30	1309
35	1313
40	1309
45	1298
50	1280
55	1254
60	1221
65	1181
70	1133
75	1078
80	1016
85	948
90	874

Изчисляване на междуредовото разстояние при фотоволтаична система монтирана на плосък покрив или терен

От междуредово разстояние зависи правилният баланс между максимално количество произведена електрическа енергия от фотоволтаичната система и максимално количество електрическа енергия която можем да произведем от използваната площ. За изчисление на междуредовото разстояние се използват данни за положението на Слънцето в 9ч. при положение, че слънчевото пладне за 21 декември е точно в 12 часа. Разглежданият пример е за Габрово, където слънчевото пладне за 21 декември е по-точно в 12 часа и 16 минути. Първона-

чало трябва да изчисли ъгъла на Слънцето и азимута на Слънцето според местоположението за 9 ч (конкретно за Габрово ъгъла на Слънцето и азимута на Слънцето за 9 ч. и 15 мин.) [5].



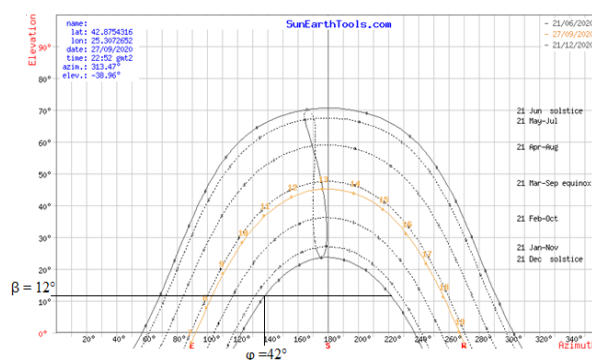
Фиг. 1 Графики за положение на Слънцето в 9ч. на 21 Декември.

Използвани са следните означения според фигура 1 при хоризонтални терени:

- наклон на фотоволтаичния модул спрямо хоризонта –  $\alpha$
- височина на фотоволтаичния модул на горната северна страна спрямо терена –  $h$
- дължина на фотоволтаичния модул –  $L$
- разстояние между редове -  $d$
- разстояние под фотоволтаичния модул –  $d_1$
- разстояние зад фотоволтаичния модул (пътека) –  $d_2$

- разстояние на засенчване зад фотоволтаичния модул (според началния час – 9ч.) –  $d_{sh}$
- ъгъл на Слънцето (според началния час – 9ч.) –  $\beta$
- слънчев азимут (според началния час – 9ч.) –  $\varphi$

Ъгълът на Слънцето и азимутът на Слънцето могат да се получат от слънчевата диаграма на пътя на Слънцето или от таблични данни [6]. На фигура 2 и таблица 2 са показани конкретните данни за координати: 42.875° с. ш. 25.307°



Фиг. 2 Слънчевата диаграма на пътя на Слънцето

Таблица 2

Дата:	21/12/2020		
координати:	42.8755317, 25.3072214		
местоположение:	42.87553170,25.30722140		
час	Ъгъл на Слънце	на Азимут на Слънце	на
9:00:00	9.69°	135.16°	
9:15:00	11.57°	138.09°	
12:15:00	23.69°	179.48°	
15:00:00	13.83°	218.05°	
15:15:00	12.08°	221.09°	

От таблица 2 за 9 ч. и 15 мин. са приети стойности за ъгъл на Слънцето  $\beta = 12^\circ$  и азимут  $\varphi = 42^\circ$  използвани при изчисленията.

Използвани са следните формули:  
Изчисляване на височината  $h$ :

$$h = \sin \alpha \cdot L \quad (1)$$

Изчисляване на разстоянието на засенчване  $d_{sh}$ :

$$d_{sh} = \frac{h}{\tan \beta} \quad (2)$$

Изчисляване на разстояние под фотоволтаичния модул:

$$d_1 = \cos \alpha \cdot L \quad (3)$$

Изчисляване на разстояние зад фотоволтаичния модул (пътека):

$$d_2 = d_{sh} \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

Изчисляване на междуредово разстояние:

$$d = d_1 + d_2 \quad (5)$$

#### Коефициенти свързани с работата на фотоволтаичната система

За анализ на работата на фотоволтаичната система се прави сравнение на фотоволтаичната система при различни наклони на фотоволтаичните модули спрямо хоризонтално разположение на модулите.

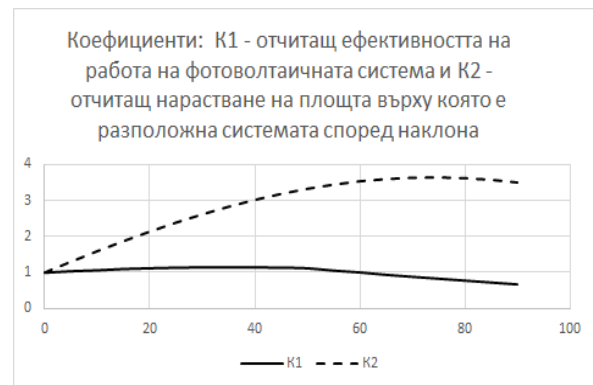
Коефициентът K1 отчита ефективността на работа на фотоволтаичната система според наклона на модулите спрямо хоризонтално разположение на модулите. Коефициентът K1 е отношение на произведената ел. енергия при конкретен ъгъл на наклон на фотоволтаичните модули спрямо произведената ел. енергия при хоризонтално разположение на модулите. Максималното производство на ел. енергия за конкретните координати е при оптимален ъгъл от 35°.

$$K1 = E_{\alpha} / E_0 \quad (5)$$

$$K2 = d / L \quad (6)$$

Коефициентът K2 отчита нарастване на площта заемана от фотоволтаичната система според наклона на модулите спрямо хоризонтално разположение на модулите. Коефициентът K2 е отношение на междуредовото разстояние  $d$  при конкретен ъгъл на наклон на фотоволтаичните модули спрямо дължината на фотоволтаичния модул  $L$ .

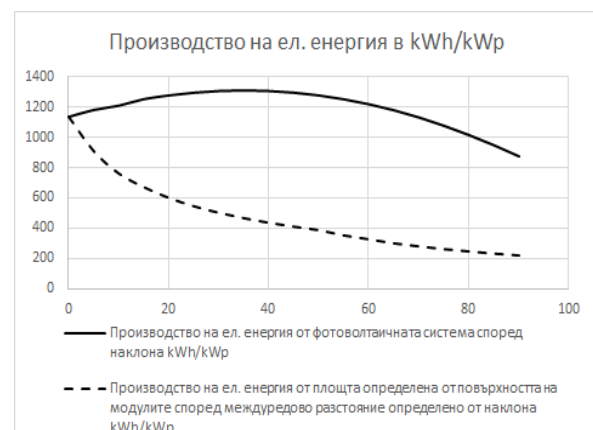
Площта нараства поради по-голямото засенчване при по-голям наклон на модулите.



Фиг. 3 Коефициенти свързани с работата на фотоволтаичната система

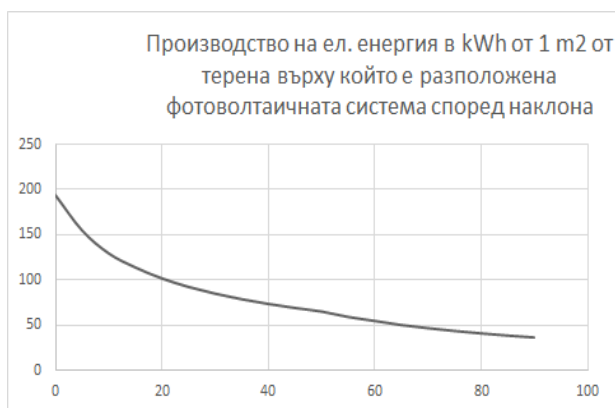
На фигура 3 е показан коефициентът K1 отчитащ ефективността на работа на фотоволтаичната система според наклона на модулите спрямо хоризонтално разположение на модулите. Също така на фигура 3 е показан и коефициентът K2 отчитащ нарастване на площта на която е разположена фотоволтаичната система според наклона на модулите спрямо хоризонтално разположение на модулите.

На фигура 4 е показано производство на ел. енергия при различни ъгли на наклон на модулите. Максималното производство на ел. енергия за конкретните координати е при оптимален ъгъл от 35°. На фигура 4 е показано и производство на ел. енергия според наклона на модулите спрямо площта определена от хоризонтално разположение на модулите. Производството на ел. енергия намалява при нарастване на ъгъла заради по-голямото междуредово разстояние.



Фиг. 4 Производство на ел. енергия според наклон и междуредово разстояние

На фигура 5 е показано производство на ел. енергия от 1 m<sup>2</sup> от площта на терена върху който е разположена фотоволтаичната система според наклона на модулите. За конкретния пример са използвани фотоволтаични модули от поликристален силиций (най-масово произвежданите) с мощност 280Wp размери 1650/990mm. Площта на модула е 1,63m<sup>2</sup>. Общата площ на фотоволтаична система с мощност 1kWp е 5,88 m<sup>2</sup>. Производството на ел. енергия намалява при нарастване на ъгъла заради по-голямото междуредово разстояние.



Фиг. 5 Производство на ел. енергия от 1 m<sup>2</sup> от площта на терена според наклон.

Таблица 3

наклон на модула α °	Eα – производство на ел. енергия kWh/kWp	коэффициент k1 -	коэффициент k2 -	производство от единица площ kWh/m <sup>2</sup>
0	1137	1	1	193,4
5	1183	1,04	1,30	154,6
10	1212	1,07	1,59	129,5
15	1255	1,10	1,87	114,1
20	1280	1,13	2,14	101,9
25	1298	1,14	2,38	92,6
30	1309	1,15	2,61	85,2
35	1313	1,16	2,82	79,1
40	1309	1,15	3,01	73,9
45	1298	1,14	3,18	69,4
50	1280	1,13	3,32	65,5
55	1254	1,06	3,44	59,6
60	1221	1,01	3,53	55,2
65	1181	0,94	3,59	50,7
70	1133	0,88	3,63	47,2
75	1078	0,83	3,64	44,2
80	1016	0,78	3,62	41,5
85	948	0,72	3,57	39,1
90	874	0,67	3,50	36,9

На таблица 3 са показани част от резултатите получени при изчисленията

Площта на фотоволтаичната система при наклон 0° (хоризонтално разположение) е 1137kWh за година. Площта на фотоволтаичната система при оптимален ъгъл от 35° е нараснала на 16,58 m<sup>2</sup> (2,82 пъти спрямо хоризонтално разположение) и производството на ел. енергия е нараснало до 1313kWh за година (1,155 пъти спрямо хоризонтално разположение). Площта на фотоволтаичната система при ъгъл от 15° е нараснала на 11 m<sup>2</sup> (1,87 пъти спрямо хоризонтално разположение) и производството на ел. енергия е нараснало на 1255kWh за година (1,1 пъти спрямо хоризонтално разположение). Намаляването на наклона на фотоволтаичните модули от оптимален наклон 15° е намалило производството на ел. енергия с 4,4%, но същевременно е намалила и площта върху която е разположена фотоволтаичната система с 33,6%. Намаляването на наклона на модулите на фотоволтаичната система води до чувствително намаляване на площта заемана от системата при минимално понижаване на произведената енергия.

Върху площ заемана от фотоволтаичната система при оптимален ъгъл може да се разположи по-голяма по мощност фотоволтаична система и да се произведе повече ел. енергия при минимално понижаване на ефективността на системата. Върху площ от 16,58 m<sup>2</sup> (площ на фотоволтаичната система 1 kWp при оптимален ъгъл от 35°) можем да разположим фотоволтаичната система 1,5 kWp при ъгъл на наклон на модулите от 15°, която да има производството на ел. енергия от 1882,5kWh. Производството е нараснало 43,4%, т.е. има много по-добро използване на терена за производство на ел. енергия. В таблица 3 е показано годишно производство на ел. енергия е 79,1 kWh/m<sup>2</sup> при оптимален ъгъл на наклон на фотоволтаичните модули, докато при ъгъл на наклон 15 ° годишното производство на ел. енергия е нараснало до 114,1 kWh/m<sup>2</sup>.

При по-малък наклон на фотоволтаичните модули от 15° може да има проблеми със по-голямо запрашване на модулите.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За района на град Габрово максимално производство на електрическа енергия от

фотоволтаична система е при оптималния наклон на фотоволтаичните модули 35 градуса и нула градуса азимут. От таблица 1 се вижда, че при 15 градуса наклон на модулите и азимут нула градуса, производство на електрическа енергия е намаляло с 4,4%. Същевременно площта на която е разположена фотоволтаичната система е намалена с 33,6%.

При наклон от 15 градуса на фотоволтаичните модули имаме по-добро използване на терените, на които е разположена фотоволтаичната система, поради по-малкото междуредово разстояние във фотоволтаичния масив.

Наклон от 15 градуса на фотоволтаичните модули води до възможност за нарастване на инсталираната мощност на фотоволтаичната и нарастване с 43,4% на производството на електрическа енергия от конкретен терен, при минимално понижаване на ефективността на работа на фотоволтаичната система. Това е особено актуално там където площта за разположение на фотоволтаични системи е ограничена или цената на терените е висока.

## REFERENCE

- [1] Ts. Varbov, Research of the influence of the orientation of the pv modules on the annual production of electric energy in PV systems using PVGIS-CMSAF, International scientific conference Unitech'17 17-18 November 2017, Gabrovo
- [2] Ts. Varbov, K. Ivanov, Engineering method for estimates of the economic efficiency of PV systems connected to electricity distribution network, Scientific conference with international participation "Stara Zagora 2004" June 3-4, 2004.
- [3] Ts. Varbov, K. Ivanov, Grid parity for PV systems, International scientific conference Unitech'15, Габрово, 20-23. November.2015
- [4] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
- [5] <http://esunsolar.in/how-to-calculate-inter-row-spacing-on-ground-or-flat-roof-top-solar-plant/>
- [6] [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=en](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=en)
- [7] Y. Stefanov, K. Ivanov, P. Petrov, A study for an optimization of a hybrid renewable energy system as a part of decentralized power supply International Jurnal Smart Grid and Clean Energy, Vol.6, Nr3, July 2017, ISSN 2315-4462, p.141-149
- [8] K. Ivanov, G.Velev, P. Petrov, Study of a PV plant connected to a side 20 kv, International scientific conference Unitech'19, Габрово, 15-16 November 2019, ISSN 1313-230X, p. i130 – i135.