

УДК 620.91

Ярымбаш Дмитро Сергійович, канд.техн.наук, доц. кафедри "Електропостачання промислових підприємств"
Тел. +38 0617 698-280. E-mail: yarymbash@gmail.com

Даус Юлія Володимирівна, асистент кафедри "Електропостачання промислових підприємств"
Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна. Вул. Жуковського, 64, 69000. Тел.
+38 0617 698-280. E-mail: zirochka3011@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОПАНЕЛЕЙ НА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

Запропоновано методику ідентифікації оптимального розташування фотоелектричних панелей, що враховує величину і характер зміни складових сонячної інсоляції, кут нахилу панелей та географічні координати місцевості, що володіє високою точністю та обчислювальною ефективністю.

Ключові слова: інсоляція, кут нахилу фотопанелі, взаємне розташування фотопанелей, географічні координати.

Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, доц. кафедры "Электроснабжения промышленных предприятий". Тел. +38 0617 698-280. E-mail: yarymbash@gmail.com

Даус Юлия Владимировна, ассистент кафедры "Электроснабжение промышленных предприятий"
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина. Ул. Жуковского, 64, 69000. Тел.
+38 0617 698-280. E-mail: zirochka3011@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОПАНЕЛЕЙ НА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Предложена методика идентификации оптимального расположения фотоэлектрических панелей, учитывающая величину и характер изменения составляющих солнечной инсоляции, угол наклона панелей и географические координаты местности, обладающая высокой точностью и вычислительной эффективностью.

Ключевые слова: инсоляция, угол наклона фотопанели, взаимное расположение фотопанелей, географические координаты.

Yarymbash Dmitry Sergeevich, Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of the Industrial Energy Supply chair, Tel. 38 0617 698-280. E-mail: yarymbash@gmail.com

Daus Julia Vladimirovna, teaching fellow of the Industrial Energy Supply chair
Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine. Str. Zhukovsky, 64, Zaporozhye, Ukraine, 69000.
Tel. 38 0617 698-280. E-mail: zirochka3011@gmail.com

PHOTOVOLTAIC PANELS IMPROVED UTILIZATION ON SOLAR POWER PLANTS

There is proposed a photovoltaic panels optimal location identifying method, that was obtained by energy flow and electric power generation characteristics identification by the methods of variables separation and approximation which takes into account the magnitude and nature of solar insolation constituents change on variously oriented in space panels and their mutual shading during the day, the panels angle and the area geographical coordinates, that maximizes the all total solar radiation incoming flow components use.

Method provides high accuracy and computational efficiency, and can be applied to determine the most advantageous photovoltaic panels placement and accurate power generation prediction by the solar power plant at the designing stage.

Keywords: insolation, the photovoltaic panels angle, the relative photovoltaic panels location, geographic coordinates.

Постановка проблемы

Одним из условий широкого внедрения солнечных электростанций является увеличение их инвестиционной привлекательности. Это возможно достигнуть как за счет снижения их стоимости (себестоимости), так и путем повышения эффективности использования фотопанелей. Основной характеристикой, позволяющей оценить эффективность использования фотопанелей является объем выработанной электроэнергии. Однако необходимо учитывать, что его оценка требует комплексного подхода, так как зависит от множества факторов, таких как интенсивность потока солнечного излучения, характер его изменения во времени, ориентация приемной поверхности по углу, условия затенения фотопанелей в течение всего периода их работы.

Существующие подходы [1–3] по оптимизации ориентации фотопанелей на Солнце по углу не учитывают все составляющие потока инсоляции и направлены на максимизацию только прямого солнечного излучения. Однако согласно [4] доля рассеянной и отраженной составляющих на территории Украины, в отдельных случаях может достигать 60 %. Таким образом, использование методик [1–3] может приводить к существенным погрешностям при определении оптимального угла наклона приемной поверхности.

Также не существует единого мнения об оптимальном расстоянии между рядами фотопанелей. Так на практике исходят из суждения, что для наибольшего использования приходящего потока солнечной энергии фотопанелью они должны быть установлены на максимальном удалении друг от друга, что может приводить к нерациональному использованию земельных ресурсов и избыточности занимаемых площадей.

В [5] предложен такой способ размещения панелей солнечных батарей, при котором последующий ряд панелей не должен затеняться предыдущим в момент времени, когда Солнце в наивысшей точке над горизонтом, то есть когда инсоляция максимальна. Однако при таком размещении снижается выработка электроэнергии в период восхода и захода Солнца, так как в это время взаимное затенение рядами существенно. Кроме того, предложенный подход требует ряда исходных данных и предварительных расчетов по определению высоты Солнца. Для определения оптимального расстояния между соседними рядами фотопанелей в [6] также предложена аналитическая формула его как функции от широты места установки солнечной электростанции, однако такой подход касается систем следящих за Солнцем, поэтому не может быть использован для стационарных систем, так как характеры изменения их положения в пространстве и времени отличаются.

Таким образом, не существует единого аналитического подхода к определению ни оптимального угла наклона фотопанелей, ни расстояния между ними. Поэтому для проектирования солнечных электроустановок актуальна разработка новой обобщенной инженерной методики определения оптимального расстояния между соседними рядами фотопанелей с учетом угла их наклона, взаимного затенения и места расположения, которая позволит максимально эффективно использовать фотопанели, минимизировать площадь занимаемую гелиополем, а также прогнозировать почасовую выработку электроэнергии.

Целью является разработка методики идентификации оптимального расположения фотопанелей, учитывающей характер изменения инсоляции на различно ориентированные по углу фотопанели и их взаимное затенение в течение суток, с целью повышения эффективности использования фотопанелей и точного прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанцией при ее проектировании.

В основе определения оптимальной ориентации приемной поверхности по углу лежит расчет интенсивности прямого, рассеянного и отраженного солнечного излучения на произвольно ориентированные поверхности, который согласно [1] проводится по следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} R_{drB\,tn} = R_{drH\,tn} \cdot \left(\cos \beta + \frac{\sin \beta}{\cos \theta} \cdot \left(\operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \theta - \frac{\sin \delta}{\cos \varphi} \right) \right), \\ R_{dfB\,tn} = R_{dfH\,tn} \cdot \cos^2 \beta, \\ R_{rfB\,tn} = (R_{drH\,tn} + R_{dfH\,tn}) \cdot \sin^2 \beta, \end{cases} \quad (1)$$

где $R_{drH\,tn}$, $R_{dfH\,tn}$, $R_{rfH\,tn}$ – интенсивности прямого, рассеянного и отраженного солнечного излучения на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м² [7];

θ – угол падения солнечных лучей на приемную поверхность горизонтальную к поверхности Земли, который зависит от широты местности φ , времени t и порядкового номера суток n ;

δ – склонение Солнца;

β – угол наклона приемной поверхности, град.

Согласно [1 - 3] угол наклона приемной поверхности должен быть таким, чтоб она была перпендикулярна солнечным лучам. Однако такой подход как было сказано выше, не позволяет полностью использовать все составляющие солнечной радиации. Следовательно, предлагается для максимизации приходящего потока суммарной солнечной энергии на наклонную поверхность оптимальное значение β находить из следующего условия:

$$\sum_{n=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (R_{drB\ tn} + R_{dfB\ tn} + R_{rfB\ tn}) = f(\beta) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Для различных вариантов регулирования угла наклона приемной поверхности (угол неизменен, и угол регулируется посезонно) применялся метод кубической сплайн-интерполяции и аппроксимации [8] для идентификации зависимости энергетического потока суммарного солнечного излучения от угла наклона приемной площадки на интервале $\beta \in 0...70$.

Оптимальное взаимное расположение фотопанелей предлагается найти исходя из объема выработанной за год электроэнергии ими, который согласно [9] определяется по формуле

$$W = \sum_{n=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} \left[(R_{drB\ tn} (1 + Ko \cdot (N_r - 1)) + (R_{dfB\ tn} + R_{rfB\ tn}) \cdot N_r) \cdot p \cdot \eta \cdot w \cdot l \cdot N_{fp} \right], \quad (3)$$

где N_r, N_{fp} – количество рядов и фотопаней в них соответственно;

p, η, w, l – номинальная мощность (Вт), коэффициент полезного действия (о.е.), ширина и высота (м) фотопанели соответственно;

Ko – коэффициент освещенности фотопанели, который был определен, используя тригонометрические функции исходя из характера движения солнечного луча в пространстве:

$$Ko = \frac{\kappa}{\cos \beta + \sin \beta / \operatorname{tg}(90 - \theta_m)}, \quad (4)$$

κ – кратность расстояния от высоты фотопанели l между нижними точками фотопанелей, расположенными в соседних рядах, о.е..

После идентификации зависимости годовой выработки электроэнергии фотопанелями (3) от расстояния между их рядами методом кубической сплайн-интерполяции было установлено, что выработка монотонно возрастает при увеличении расстояния между рядами фотопанелей в связи с улучшением условий их освещенности и ростом доли попадающей на их поверхность прямой составляющей солнечного излучения и достигнет максимального значения, оставаясь при дальнейшем росте расстояния практически неизменной, что обусловлено минимальным затенением панелей только в утренние и вечерние часы.

Для учета изменения занимаемой площади земли и характера изменения выработки электрической энергии от взаимного расположения фотопанелей предлагается дополнить уравнение (3) и оптимальное значение κ находить из следующего условия (4):

$$\left. \begin{array}{l} w_{fp} \rightarrow \max \\ \frac{w_{fp\ i+1} - w_{fp\ i}}{w_i} \leq \varepsilon \\ \varepsilon = 0,05 \\ S_{fp} = const \end{array} \right\} \quad (5)$$

где w_{fp} – удельная выработка электроэнергии с 1 м^2 площадь поверхности фотопанелей S_{fp} , кВт·час/ м^2 ;

ε – величина приращения удельной выработки электроэнергии с увеличением расстояния между рядами фотопанелей, %.

Рассмотрим географический центр Украины точку с координатами $48,35^\circ$ с.ш. $31,17^\circ$ в.д. (с. Добровеличковка Кировоградской области) на примере гелиополя, состоящего из 20 рядов по 43 фотопанели фирмы Квазар (Украина) типа KV-240 P: $p = 240$ Вт, $\eta = 13,2\%$. [10]

На рис.1 представлены расчетные и рекомендованные [1] значения оптимальных углов наклона фотопанели и соответствующий им энергетический поток суммарного солнечного излучения для точки с координатами $48,35^\circ$ с.ш. $31,17^\circ$ в.д.



Рис. 1. Результаты поиска оптимальной ориентации приемной поверхности по углу:
(1) – угол регулируется посезонно; (2) – угол неизменный

Было рассмотрено два варианта регулирования угла наклона фотопанели – угол изменяется посезонно и неизменный в течение года. Результаты расчетов показали, что использование расчетных углов наклона фотопанелей позволит увеличить энергетический поток суммарного солнечного излучения соответственно на 10,5 % и 13,1 % при посезонном регулировании угла наклона и без регулирования.

На рис. 2 представлены зависимости годовой выработки электроэнергии фотопанелями от кратности расстояния κ относительно высоты фотопанели между нижними точками фотопанелей, расположенными в соседних рядах при неизменном угле их наклона для расчетного и рекомендованного значений β .

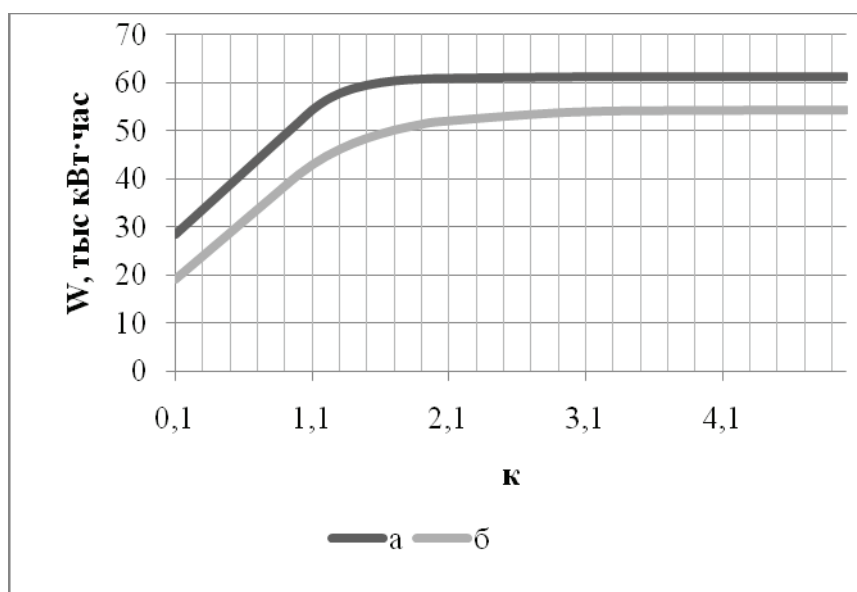


Рис. 2. Зависимость годовой выработки электроэнергии фотопанелями от расстояния между ними при отсутствии регулирования угла их наклона для расчетного (а) и рекомендованного (б) значений β

В табл.1 представлены оптимальные значения кратность расстояния κ от высоты фотопанели l между нижними точками фотопанелей, расположенными в соседних рядах, найденные по результатам расчета из условия (4) (B1), а также согласно методу, предложенному в [5] (B2) при рекомендованных и расчетных значениях углов наклона приемной поверхности при посезонном его регулировании и без регулирования.

Таблица 1

Результаты поиска оптимального взаимного расположения фотопанелей

Регулирование β	$\beta, \text{ }^\circ$		κ , о.е.	$S, \text{ м}^2$	$w, \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^2$	$w_{\text{оп}}, \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^2$
нет	расчетный	B1	1,2	1695	33,30	39,53
		B2	2,94	4054	15,12	42,95
	рекомендованный	B1	1,2	1675	26,65	31,27
		B2	2,94	4035	13,35	37,74
посезонно	расчетный	B1	1,1	1675	32,19	37,77
		B2	2,94	4058	15,38	43,71
	рекомендованный	B1	1,2	1687	27,14	32,07
		B2	2,94	4047	13,89	39,38

Из табл.1 видно, что для обоих вариантов регулирования угла наклона приемной поверхности максимальная удельная выработка электроэнергии w будет при выполнении условия (4) при расчетном значении угла наклона фотопанели при этом площадь занимаемого земельного участка будет минимальна. Наиболее эффективно преобразует солнечную энергию в электрическую фотопанель при В2 (наибольшее значение $w_{фл}$) однако площадь земли при этом практически в 1,5 раза больше чем для В1, вследствие чего и удельная выработка электроэнергии в два раза меньше.

Как видно из табл.2 для обоих вариантов регулирования угла наклона приемной поверхности максимальная удельная выработка электроэнергии w будет при выполнении условия (4) при расчетном значении угла наклона фотопанели при этом площадь занимаемого земельного участка будет минимальна.

Из табл. 2 видно, что наиболее эффективно преобразует солнечную энергию в электрическую фотопанель при В2 (наибольшее значение $w_{фл}$) однако площадь земли при этом практически в 1,5 раза больше чем для В1. Максимальная удельная выработка электроэнергии w с 1 м^2 занимаемого земельного участка для обоих вариантов регулирования угла наклона приемной поверхности будет достигаться при выполнении условия (4) при расчетном значении угла наклона фотопанелей, при этом площадь земли, отведенная под их установку будет минимальна.

Выводы

Разработана методика определения оптимального расположения фотопанелей относительно горизонта и друг друга, полученная путем идентификацией характеристик энергетического потока и выработки электрической энергии методами разделения переменных и аппроксимации, которая учитывает характер изменения потока инсоляции на различно ориентированные в пространстве фотопанели и их взаимное затенение в течение суток, которая позволяет максимально использовать все составляющие приходящего потока суммарного солнечного излучения.

Предложенная методика может быть использована для определения наиболее выгодного варианта расстановки фотопанелей и наиболее точного прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанцией при ее проектировании.

Выполнена идентификация зависимости энергетического потока суммарного солнечного излучения на наклонную поверхность от угла ее наклона, а также идентификация зависимости почасовой выработки электрической энергии фотопанелями от расстояния между соседними их рядами.

Для расчетного угла наклона приемной поверхности рекомендованное расстояние между соседними рядами фотопанелей составляет 1,1 высоты фотопанели при посезонном регулировании ее угла наклона и 1,2, если регулирования нет.

Список использованной литературы:

1. Солнечная энергетика: учеб.пособие для вузов / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецов, Н.К. Калинин; под ред. В.И. Виссарионова. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 276 с.
- 2 Кондратьев К. Я. Радиационный режим наклонных поверхностей / К. Я. Кондратьев, З. И. Пивоварова, М. П. Федоров. – М.: Гидрометеиздат, 1978. – 220 с .
- 3 Твайдел Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайдел, А. Уэйр; пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 386 с.
4. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set center [Электронный ресурс] — 2009.— Режим доступа к базе: <http://easweb/larc.nasa.gov/sse/>
5. Бурков Л. Н. Способ размещения панелей солнечных батарей // Патент России № 2285209. 2006. Бюл. № 28.
6. Аронова Е. С., Шварц М. З. Солнечная электростанция // Патент России № 2395758. 2010. Бюл. № 21.
7. Ярымбаш Д. С. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций / Д. С. Ярымбаш, Ю. В. Даус // Электроэнергетика и электротехника. – 2014. – № 1. – с 74-78.
8. Математика и САПР. Кн. 2 Вычислительные методы. Геометрические методы / [под ред. Н. Г. Волкова]. – М.: Мир, 1989. – 260 с.

9. Аронова Е. С. Оценка целесообразности использования технологий солнечной энергетики в исторической застройке Санкт-Петербурга и климатических условиях Северо-Запада [Текст] / Е. С. Аронова, В. А. Мургул // Архитектура и современные информационные технологии. – 2013. – № 2 (23). – С. 1–20.

10. Официальный сайт «Квазар микро» [Электронный ресурс] — 2014.— Режим доступа к базе: <http://www.kmcore.com/ru>.

11. Официальный сайт «Київенерго» [Электронный ресурс] — 2014.— Режим доступа к базе: <http://www.kmcore.com/ru>.

12. Официальный сайт инжиниринговой компании «Новые Энергетические Технологии» [Электронный ресурс] — 2014.— Режим доступа к базе: <http://iknet.com.ua/presentation/full/energetika>.

References:

1. Vissarionov V. I., Derjugina G. V., Kuznecov V. A., Malinin N. K. (2011), Solar Energy: textbook for universities [Solnechnaja jenergetika: ucheb.posobie dlja vuzov], Izdatelskiy dom MEI, Moscow, 276 p.

2. Kondrat'ev K. Ja., Pivovarova Z. I., Fedorov M. P. (1978), Inclined surfaces radiation regime [Radiacionnyj rezhim naklonnyh poverhnostej], Gidrometeoizdat, Moscow, 220 p.

3. Tvardell J., Yair A. (1990), Renewable energy. Trans. from Eng. [Vozobnovljaemye istochniki jenerгии], Jenergoatomizdat, Moscow, 386 p.

4. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set center available at: <http://easweb/larc.nasa.gov/sse/>.

5. Burkov L. N (2006), Solar panels placement method [Sposob razmeshhenija panelej solnechnyh batarej]. Patent RF, no 2285209. (in Russian)

6. Aronova E. S., Shvarc M. Z. (2010), Solar power plant [Solnechnaja jelektrostantsija]. Patent RF, no 2395758. (in Russian)

7. Jarymbash D. S., Daus Ju. V. (2014), Solar radiation intensity identification features for solar power stations designing [Osobennosti identifikatsii intensivnosti solnechnoy radiatsii pri proektirovanii solnechnyh elektrostantsiy], Jelektrojenergetika i jelektrotehnika, No. 1, P. 74–78.

8. Volkov N. G. (1989), Mathematics and CAD systems. Book 2 Numerical Methods. Geometric methods [Matematika i SAPR. Kn. 2 Vyichislitelnyie metodyi. Geometricheskie metodyi], Mir, Moscow, 260 p.

9. Aronova, E. S. (2013), The evaluation of the appropriateness for using solar energy technologies in the historical building of St. Petersburg and the climatic conditions of the North-West region [Otsenka tselesoobraznosti ispolzovaniya tehnologiy solnechnoy energetiki v istoricheskoy zastroyke Sankt-Peterburga i klimaticheskikh usloviyah Severo-Zapada], Arhitektura i sovremennye informacionnye tehnologii, No. 2(23), P. 1–20.

10. The holding company «KM Core» available at: <http://www.kmcore.com/ru>.

11. PJSC «Kyivenergo» available at: <http://www.kyivenergo.ua>.

12. The engineering company «New Energy Technologies» available at: <http://iknet.com.ua/presentation/full/energetika>.

Поступила в редакцию 05.01 2015 г.