

УДК 620.97

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Дмитриенко Виталий Николаевич¹,
dvn@sibtehproekt.com

Лукутин Борис Владимирович¹,
lukutin48@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью автономной электрификации объектов нефтегазовой транспортной системы. **Цель:** представление методики расчета энергии солнечного излучения, используемой автономными фотоэлектростанциями, позволяющей повысить точность моделирования инсоляции при проектировании автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями. Использование предлагаемой методики позволит эффективно моделировать режимы всех элементов автономной фотоэлектрической станции в суточном цикле с интервалом дискретизации равным одному часу.

Методы исследования. Методика оценки энергии солнечного излучения основана на использовании программных пакетов: PVsyst, Excel, компьютерных баз метеоданных NASA, Meteororm.

Результаты. В результате проведенной работы предлагается методика определения энергетического потенциала солнечного излучения, основанная на использовании программного комплекса PVsyst и понятия «характерные сутки» для получения почасовой зависимости мощности солнечного излучения, характерной для каждого месяца года. Данная методика имеет широкие возможности для исследования инсоляции конкретной местности, в частности ее можно использовать для оптимизации взаимодействия элементов автономных гибридных комплексов, таких как солнечно-дизельные (СЭС-ДЭС). Интервал дискретизации в один час позволит максимально эффективно оценить вклад энергии солнечного излучения в общий график электропотребления. На основе полученных данных можно оценить степень загрузки дизельной электростанции в течение года и, соответственно, количество потребляемого топлива за отчетный период времени. Это в свою очередь позволит планировать объем поставок дизельного топлива в конкретную местность. Тестирование данной методики на реальной фотоэлектростанции показало ее приемлемую точность, характеризующую относительной погрешностью около 10 %, по годовой выработке электроэнергии.

Ключевые слова:

Фотоэлектрические станции, солнечное излучение, программный комплекс, «характерные сутки», PVsyst, Meteororm.

Введение

В связи с потребностью освоения месторождений углеводородного сырья в отдаленных районах, не имеющих транспортной и энергетической инфраструктуры, необходимостью электрификации объектов нефтегазовой транспортной системы все большую актуальность приобретают автономные энергоустановки, использующие ресурсы различной физической природы.

Известные перспективы имеют возобновляемые энергоисточники – ветровые и фотоэлектрические электростанции. Их достоинствами являются: отсутствие потребности в топливе, большой срок службы, возможность длительной работы в автоматическом режиме, достаточно отработанные технологии энергопреобразования. Стремительное развитие фотоэнергетики в последние годы определяет практический интерес к ее использованию в автономных системах электроснабжения, в том числе в объектах нефтегазовой промышленности.

Исходной информацией для проектирования фотоэлектростанций, наряду с электрическими нагрузками, является энергетический потенциал солнечного излучения. Инсоляция существенно зависит от географической широты местности, времени года и суток, прозрачности атмосферы, характера подстилающей поверхности и других факторов.

Изучение фотоэлектрического потенциала с целью его адекватного представления в форме, удобной для последующих оптимизационных расчетов фотоэлектростанций, является актуальной задачей. Исследованиям в данной области посвящены многие работы [1–12].

Как правило, анализ энергии солнечного излучения проводится либо на основе данных метеостанции, установленной на рассматриваемой территории [3–5], либо с использованием открытой базы данных NASA-SSE [13]. В ряде работ приводятся астрономические алгоритмы [2, 6], позволяющие моделировать интенсивность солнечного излучения.

В настоящее время имеются программные пакеты, позволяющие анализировать системы электроснабжения с учетом энергоустановок возобновляемой энергетики. Широкое распространение получили: HOMER (Hybrid optimization modeling software), HOGA (Hybrid optimization by genesis algorithm), HYPORA (Hybrid power optimized for rural/remote areas) и ряд других. Основой построения большинства оптимизационных комплексов для анализа комбинированных энергетических систем с участием возобновляемых энергоисточников являются работы [14, 15].

Указанные программные комплексы решают задачу оптимизации стоимости генерируемой электроэнергии путем выбора наилучшего соотно-

шения установленных мощностей генерирующего и аккумулирующего оборудования.

Мощность генерации массива фотоэлектрических панелей определяется в соответствии с их общей площадью, коэффициентом полезного действия и среднемесячной удельной солнечной радиацией на горизонтальную поверхность. Использование в расчетах среднемесячной инсоляции противоречит суточному циклу работы фотоэлектростанции и ограничивает возможности имитационного моделирования режимов работы ее элементов.

Цель исследований

В работе предлагается методика построения временной зависимости мощности инсоляции на исследуемой территории для «характерных» суток каждого месяца, что позволит моделировать режимы всех элементов фотоэлектростанции на суточном цикле ее работы с определенным интервалом дискретизации, например часовым.

Объект исследований

В работе рассматривается моделирование энергетического потенциала солнечного излучения в течение суток с часовой дискретизацией. Применение полученных моделей инсоляции проиллюстрировано на примерах фотоэлектростанций, расположенных в Якутии.

Стремление анализировать режимы работы фотоэлектростанции в реальном масштабе времени требует наличия информации о зависимости энергии солнечного излучения от времени суток. Программный комплекс «PVsyst» [16] позволяет получать данные об уровне инсоляции на наклонную или горизонтальную поверхность с учетом реальной облачности за каждый час суток конкретного дня, месяца рассматриваемого года.

Исходной информацией для программного пакета PVsyst являются данные с метеостанций NASA-SSE и Meteonorm [17]. База Meteonorm включает погодные данные с 1200 метеостанций мира. Период наблюдений составляет 10...30 лет. Для максимального приближения данных к реальным значениям Meteonorm интерполирует значения с 3-х ближайших метеостанций, расположенных в районе исследуемой точки. PVsyst позволяет добавлять информацию в базу данных, для этого требуется указать метеостанцию в исследуемом районе.

Процесс моделирования работы фотоэлектрической системы начинается с задания географических координат места предполагаемого строительства фотоэлектростанции. Далее выбираются способы установки и ориентации фотоэлектрических панелей: угол наклона, азимут, тип крепления панелей: фиксированный угол, несколько углов, сезонный угол, одноплоскостной или двухплоскостной трекер. Следующим этапом моделирования является выбор типа и количества фотоэлектрических панелей и инверторов. Программный ком-

плекс позволяет учесть электрические потери в соединительных кабелях, трансформаторах, инверторах. Кроме этого, PVsyst позволяет учитывать потери, определяемые уровнем освещенности, температурой, рассогласованием массива фотоэлектрических панелей и др.

Комплекс имеет развитый интерфейс, что обеспечивает удобство пользования. Очевидно, что значение текущей инсоляции на рассматриваемом интервале времени имеет переменный характер, что не позволяет непосредственно использовать ее для проектных расчетов фотоэлектростанции. В частности, уровень инсоляции в один и тот же час в начале и в конце месяца будет отличаться в соответствии с изменением астрономического положения солнца.

Для ограничения объемов вычислений на разумном уровне целесообразно ввести понятие «характерные сутки» для каждого месяца с интервалом дискретизации степени инсоляции в 1 час. Тогда с помощью программного комплекса PVsyst можно получить данные о почасовой инсоляции на горизонтальную поверхность за каждый день рассматриваемого месяца в исследуемом районе (1).

Интегральный уровень инсоляции для рассматриваемого месяца для i -го часа характерных суток вычисляется по формуле:

$$P_{ixc} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{ij}. \quad (1)$$

где P_{ixc} – инсоляция на i -м часе характерных суток; P_{ij} – мощность инсоляции на приемную поверхность на i -м часе в j -й день месяца; n – количество дней в месяце; $i=(0...23)$ час суток; $j=(1-n)$ – день месяца.

Суммарная энергия инсоляции за характерные сутки месяца – W_{xc} определяется по выражению (2):

$$W_{xc} = \sum_{i=0}^{23} P_{ixc}. \quad (2)$$

Месячная энергия W_M , соответственно (3):

$$W_M = nW_{xc}. \quad (3)$$

Результаты исследования

Используя возможности PVsyst, на основе энергетических характеристик солнечного излучения в течение характерных суток, проведен анализ объемов генерируемой электроэнергии массива фотоэлектрических панелей с заданной установленной мощностью, размещенных определенным образом на местности с фиксированными географическими координатами.

Изменение мощности фотоэлектростанции в течение характерных суток с часовым интервалом дискретизации в сочетании с почасовым электропотреблением позволяет строить имитационные модели режимов работы генерирующего и аккумулирующего оборудования фотоэлектрической системы электроснабжения [18–20].

Таблица 1. Инсоляция на горизонтальную поверхность (характерные сутки), Вт/м²

Table 1. Horizontal irradiation (typical day), W/m²

п. Ючугей (метеостанция Верхоянск) /v. Yuchugey (Verkhoyansk weather station)												
Инсоляция на горизонтальную поверхность (характерные сутки), Вт/м ² /Horizontal solar irradiation (typical day), W/m ²												
	Янв. Jan.	Фев. Feb.	Март March	Апр. April	Май May	Июнь June	Июль July	Авг. Aug.	Сент. Sep.	Окт. Oct.	Нояб. Nov.	
0:00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,54	19,26	9,97	0,00	0,00	0,00	0,00	
1:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,21	1,98	0,00	0,00	0,00	0,00	
2:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,45	1,41	0,00	0,00	0,00	0,00	
3:00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	18,48	6,11	0,00	0,00	0,00	0,00	
4:00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,62	34,05	19,95	0,00	0,00	0,00	0,00	
5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,15	64,49	49,66	6,32	0,00	0,00	0,00	
6:00	0,00	0,00	0,00	15,76	85,89	118,9	97,33	30,48	0,00	0,00	0,00	
7:00	0,00	0,00	0,00	63,12	155,1	183	170,1	76,18	8,17	0,00	0,00	
8:00	0,00	0,00	16,06	141,25	245,2	258,9	247,5	139,3	39,31	0,00	0,00	
9:00	0,00	0,00	65,23	234,73	317,8	334,7	327,9	200	95,02	13,66	0,00	
10:00	0,00	11,90	136,34	329,47	401	394,1	406,4	268,2	137,7	48,63	0,00	
11:00	0,00	40,51	210,95	409,53	440,8	461,3	450,3	313,8	190,9	90,25	12,94	
12:00	5,63	71,51	272,29	464,19	483,9	489,7	487,8	357,2	242,2	128,90	31,54	
13:00	15,53	107,2	307,98	493,25	513,2	520	506,8	383,2	257,2	146,21	40,59	
14:00	13,92	117,9	318,92	489,49	520,3	543,7	509,5	381,9	274,5	140,50	34,39	
15:00	9,43	101,9	293,41	464,08	497,8	517,8	469,3	380,4	235,1	126,03	21,53	
16:00	2,65	66,95	247,83	407,48	458,7	483,9	417,7	347,1	207,3	86,78	6,60	
17:00	0,00	27,91	175,89	332,11	383,4	417,9	376,7	293,5	160,4	49,61	0,00	
18:00	0,00	5,05	100,65	247,82	311,9	342,8	305,9	227,5	97,47	13,11	0,00	
19:00	0,00	0,00	35,15	155,11	230,9	275,3	218,5	162,5	43,44	0,00	0,00	
20:00	0,00	0,00	3,16	75,06	154,8	199,9	150,7	97,06	9,44	0,00	0,00	
21:00	0,00	0,00	0,00	20,90	90,24	132,9	95,06	49,94	0,00	0,00	0,00	
22:00	0,00	0,00	0,00	0,87	43,60	78,71	53,23	14,20	0,00	0,00	0,00	
23:00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,51	41,26	25,17	0,32	0,00	0,00	0,00	
Итого кВт*ч/м ² день / In total kWh/m ² *day	0,05	0,55	2,18	4,34	5,40	5,95	5,41	3,73	2,00	0,84	0,15	

Иллюстрация возможностей PVsyst и предлагаемой методики анализа фотоэлектрических систем проведена на примере фотоэлектростанции п. Ючугей (Якутия). Установленная мощность станции 20 кВт. Для ее построения использованы поликристаллические панели, ориентированные на юг и установленные под углом 45° к горизонту.

Данные имитационного моделирования фотопреобразования приведены в табл. 1, где для каждого месяца определены характерные сутки с точ-

ки зрения интегральных значений инсоляции. Статистический подход к моделированию, заложенный в комплексе PVsyst, позволяет косвенно учесть реальную облачность и другие характеристики прозрачности атмосферы.

Расчетная выработка электроэнергии ФЭС п. Ючугей на основе данных инсоляции для характерных суток за каждый месяц приведена в табл. 2. В табл. 1, 2 отсутствуют данные за декабрь, в течение которого на рассматриваемой широте наблюдается полярная ночь.

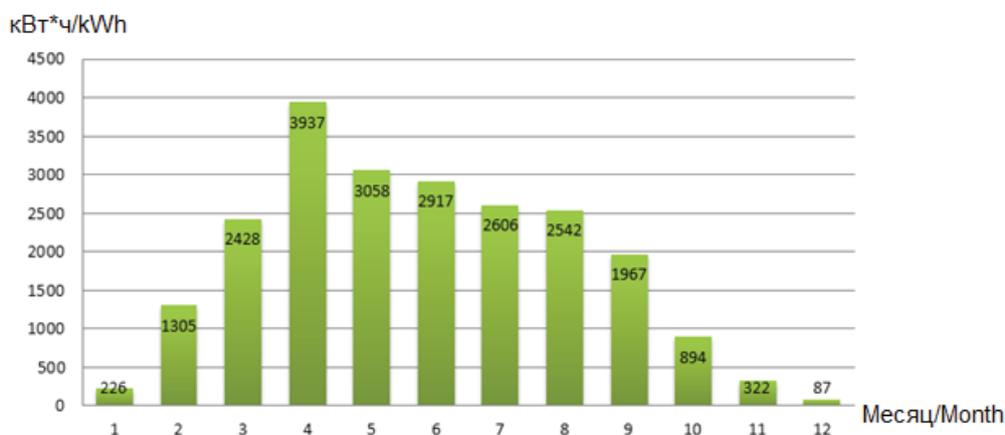


Рисунок. Реальные значения выработки электрической энергии ФЭС п. Ючугей

Figure. Actual PV plant electric power generation in Yuchugey village

Таблица 2. Расчетная выработка электрической энергии ФЭС, Вт

Table 2. Estimated PV plant electricity production, W

п. Ючугей (метеостанция Верхоянск), ФЭС установленной мощностью 20 кВт, угол наклона панелей 45° v. Yuchugey (Verkhoyansk weather station), PV station 20 kWp, tilt 45°											
Энергия выдаваемая в сеть (характерные сутки), Вт/Energy injected to the grid (typical day), W											
	Янв. Jan.	Фев./Feb.	Март- March	Апр. April	Май May	Июнь- June	Июль July	Авг. Aug.	Сент. Sep.	Окт. Oct.	Нояб. Nov
0:00	0	0	0	0	17	191	98	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	141	22	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	119	13	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	12	176	80	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	135	282	173	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	350	526	427	54	0	0	0
6:00	0	0	0	154	661	929	787	229	0	0	0
7:00	0	0	0	500	1008	1327	1211	547	57	0	0
8:00	0	0	295	2426	3778	3692	3287	1984	702	0	0
9:00	0	0	2697	6754	7054	6495	6356	4346	2978	456	0
10:00	0	727	7093	11232	10282	8748	9232	6804	4925	2852	0
11:00	0	2845	11393	14861	11987	11022	10979	8457	6982	5296	958
12:00	258	5954	14775	17093	13531	12045	12232	9927	8561	7106	3258
13:00	1493	8611	16538	18196	14454	12878	12729	10620	9184	8015	4372
14:00	1212	9505	17107	17872	14658	13617	12737	10642	9728	7975	3487
15:00	503	8358	15720	16899	13886	12828	11428	10524	8209	7219	1761
16:00	60	5613	13335	14544	12408	11549	9851	9389	7329	5020	310
17:00	0	2105	9254	11199	9614	9348	8400	7562	5591	2718	0
18:00	0	159	4852	7316	6836	6719	6029	5201	2961	538	0
19:00	0	0	1040	3104	3753	4164	3383	2794	817	0	0
20:00	0	0	40	546	1239	1475	1274	750	46	0	0
21:00	0	0	0	194	768	925	736	400	0	0	0
22:00	0	0	0	11	409	592	416	114	0	0	0
23:00	0	0	0	0	9	315	180	0	0	0	0
Итого кВт*ч/день/ In total kWh/day	3,53	43,88	114,14	142,90	126,85	120,10	112,06	90,34	68,07	47,19	14,15

Реальные ежемесячные данные выработки электрической энергии фотоэлектрической станцией за 2012 г. в графическом виде представлены на рисунке.

Сравнение расчетных и фактических объемов выработки электроэнергии рассматриваемой фотоэлектростанции представлено в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение выработки электрической энергии

Table 3. Comparison of electricity generation

Месяц Month	Реальные значения Real value	Расчетные значения PVsyst Calculated value	Относительная разница между реальной выработкой и расчетной, % Relative difference between the actual output and the estimated one, %
Янв./Jan.	226	101	55
Фев./Feb.	1305	1135	13
Март/March	2428	3277	35
Апр./April	3937	3953	0,4
Май/May	3058	3609	18
Июнь/June	2917	3285	13
Июль/July	2606	3154	21
Авг./Aug.	2542	2548	0,2
Сент./Sep.	1967	1862	5,3
Окт./Oct.	894	1340	50
Нояб./Nov	322	389	21
Дек./Dec.	87	0	-
Год./Annual	22289	24655	10,6

Расчеты проведены с помощью программного комплекса PVsyst с исходными данными, соответствующими реальным. В табл. 3 приведены объемы ежемесячной фактической выработки ФЭС п. Ючугей, расчетной выработки и относительной разницы между фактическими и расчетными значениями генерируемой электроэнергии за каждый месяц (4):

$$\Delta W_i = \frac{|W_{\Phi i} - W_{pi}|}{W_{pi}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где $W_{\Phi i} - W_{pi}$ – фактическая и расчетная электроэнергия за i -месяц.

Тестирование программного комплекса PVsyst показало, что расчетная погрешность по годовой выработке составляет около 10 %, что вполне приемлемо для оценки потенциала возобновляемых энергоисточников. Следует отметить, что данные о фактической выработке электроэнергии могут содержать ряд погрешностей технического характера, для оценки которых необходимы тщательно организованные наблюдения. В частности, объемы электроэнергии ФЭС автономной системы зависят не только от потенциальных возможностей фотопреобразователей, но и от уровня потребления или аккумуляции генерируемой электроэнергии. Тем не менее, данные коммерческого учета ФЭС п. Ючугей могут рассматриваться как критерий для сравнения с расчетными.

Заключение

На основании проведенной работы предлагается методика определения энергетического потенциала солнечного излучения, основанная на использовании программного комплекса PVsyst и понятия «характерные сутки» для получения почасовой зависимости мощности солнечного излучения, характерной для каждого месяца года. Данная методика позволяет разумными средствами осуществить

имитационное моделирование работы основных элементов фотоэлектростанции совместно с электрическими нагрузками, представляемыми графиком, обычно имеющим почасовую дискретизацию.

Тестирование данной методики на реальной фотоэлектростанции показало ее приемлемую точность, характеризующую относительной погрешностью около 10 %, по годовой выработке электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rajesh Kumar, Gupta R.A., Ajay Kumar Bansal. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm // Swarm and Evolutionary Computation. – 2013. – V. 8. – P. 33–43.
2. Aggarwal R.K. Estimation of Total Solar Radiation on Tilted Surface // Journal of Environmental Engineering and Technology. – 2013. – V. 2. – P. 4–6.
3. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in Oman / Ahmed Said Al Busaidi, Hussein A. Kazem, Abdullah H. Al-Badi, Mohammad Farooq Khan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 53. – P. 185–193.
4. Amit Kumer Yadav, Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model // Applied Soft Computing. – 2015. – V. 75. – P. 675–693.
5. Ershad A.M., Brecha R.J., Haliman K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan // Renewable Energy. – 2016. – V. 85. – P. 445–453.
6. Radosavljevic J., Dordevic A. Defining of the intensity of solar radiation on horizontal and oblique surface Earth // Facta Universitatis. – 2001. – V. 2. – P. 77–86.
7. Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab / Krismanidina, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping, Jeyraj Selvaraj // Procedia Environmental Sciences. – 2013. – V. 17. – P. 537–546.
8. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays // Power Electronics, IEEE Transactions. – 2009. – V. 24. – P. 1198–1208.
9. Effect of Distributed Photovoltaic Generation on the Voltage Magnitude in Self-Contained Power Supply System / B.V. Lukutin, E.B. Shandarova, A.F. Makarova, I.B. Shvartsman // TOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 6 May 2016. – V. 127. – Iss. 1. – Article number 012005.
10. Саврасов Ф.В., Лукутин Б.В. Расчет эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 6. – С. 17–21.
11. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса // Фундаментальные исследования – 2015. – № 4. – С. 61–66. URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37124> (дата обращения 24.12.2016).
12. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Солнечно-дизельные системы электроснабжения северных поселков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13070> (дата обращения 24.12.2016).
13. Aeidapu Mahesh, Kanwarjit Singh Sandhu. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: critical review and findings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1135–1147.
14. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage / R. Duflo-Lopez, J.L. Bernal-Agustin, J.M. Yusta-Loyo, J.A. Dominguez-Navarro, I.J. Ramirez-Rosado, J. Lujano, I. Aso // Applied Energy. – 2011. – V. 88. – P. 4033–4041.
15. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas // Energy Procedia. – 2012. – V. 20. – P. 258–270.
16. Программный продукт для проектирования фотоэлектрических систем. URL: <http://www.pvsyst.com/en/software> (дата обращения 24.12.2016).
17. Программный продукт, база метеоданных. URL: <http://www.meteonorm.com/en/downloads> (дата обращения 24.12.2016).
18. Руководящий технический материал РТМ 36.18.32.4–92 Указания по расчету электрических нагрузок. – М.: ВНИПИ ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ, 1992. – 52 с.
19. Алюнов А.Н. Онлайн Электрик: Интерактивные расчеты систем электроснабжения URL: <http://online-electric.ru> (дата обращения: 24.12.2016).
20. Фролов Ю., Шелякин В. Основы электроснабжения. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 480 с.

Поступила 04.04.2017 г.

Информация об авторах

Дмитриенко В.Н., аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического Института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лукутин Б.В., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического Института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.97

METHOD FOR ESTIMATING SOLAR RADIATION ENERGY FOR PHOTOVOLTAIC PLANTS

Vitaliy N. Dmitrienko¹,
dvn@sibtehproekt.com

Boris V. Lukutin¹,
lukutin48@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research is caused by the need for objects autonomous electrification of oil and gas transport system.

The aim of the research is to develop the calculation method for solar energy, used by autonomous photovoltaic plants, which allows increasing the accuracy of insolation modeling in design of autonomous power systems with photovoltaic power. Using the technique will allow simulating effectively all the elements of autonomous photovoltaic plant in a daily cycle with one hour sampling interval.

Methods. Method of assessing solar energy is based on the use of software packages: PVsyst, Excel, NASA meteorological data, Meteoronorm.

Results. The authors have proposed the method of determining solar radiation energy potential, based on the use of PVsyst software system and the «typical day» concept for obtaining the hour of the solar radiation power typical for each month of the year. This technique has great potential for research specific area solar insolation; in particular it can be used for optimization of elements interaction of autonomous hybrid systems, such as solar-diesel (PV-genset). One hour sampling interval will allow most effectively assessing the extent of solar energy penetration in the total load curve. Based on these results it will be possible to plan in advance the diesel power loading degree, and thus the amount of fuel consumed for the reference period. This in its turn will allow planning the amount of diesel fuel supply to a specific area. Testing this method on a real photovoltaic plant shown its reasonable accuracy, characterized by a 10 % relative error, at annual electricity production.

Key words:

Photovoltaic plants, solar irradiance, software system, «typical day», PVsyst, Meteoronorm.

REFERENCES

- Rajesh Kumar, R.A. Gupta, Ajay Kumar Bansal. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2013, vol. 8, pp. 33–43.
- Aggarwal R.K. Estimation of Total Solar Radiation on Tilted Surface. *Journal of Environmental Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, pp. 4–6.
- Ahmed Said Al Busaidi, Hussein A. Kazem, Abdullah H Al-Badi, Mohammad Farooq Khan. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in Oman. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 53, pp. 185–193.
- Amit Kumer Yadav, Chandel S.S. Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm or WEKA in ANN based prediction model. *Applied Soft Computing*, 2015, vol. 75, pp. 675–693.
- Ershad A.M., Brecha R.J., Haliman K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan. *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, pp. 445–453.
- Radosavljevic J., Dordevic A. Defining of the intensity of solar radiation on horizontal and oblique surface Earth. *Facta Universitatis*, 2001, vol. 2, pp. 77–86.
- Krismadinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping, Jeyraj Selvaraj. Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, vol. 17, pp. 537–546.
- Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R.. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions*, 2009, vol. 24, pp. 1198–1208.
- Lukutin B.V., Shandarova E.B., Makarova A.F., Shvartsman I.B. Effect of Distributed Photovoltaic Generation on the Voltage Magnitude in Self-Contained Power Supply System. *TOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 6 May 2016, vol. 127, Iss. 1, Article number 012005.
- Savrasov F.V., Lukutin B.V. The efficiency of calculation of using autonomous power supply systems with photovoltaic power plants in Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 6, pp. 17–21. In Rus.
- Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. The choice of capacity of generation equipment in autonomous solar-diesel plant of megawatt class. *Fundamental research*, 2015, no. 4, pp. 61–66. In Rus. Available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37124> (accessed 24 December 2016).
- Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Solar-diesel power systems of the northern settlements. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 3. In Rus. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13070> (accessed 24 December 2016)
- Aeidapu Mahesh, Kanwarjit Singh Sandhu. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1135–1147.
- Dufo-Lopez R., Bernal-Agustin J.L., Yusta-Loyo J.M., Dominguez-Navarro J.A., Ramirez-Rosado I.J., Lujano J., Aso I. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 4033–4041.
- Ranjewa M., Kulkarni A.K. Design Optimization of Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, pp. 258–270.
- Programny product dlya proektirovaniya Folelectricheskikh sistem [Software for PV system projects]. Available at: <http://www.pvsyst.com/en/software> (accessed 24 December 2016).
- Programny product, bazy meteorodannykh [Software, Meteorodata base]. Available at: <http://www.meteoronorm.com/en/downloads> (accessed 24 December 2016).
- Rukovodnyashchiiy tekhnicheskiiy material RTM 36.18.32.4–92. Ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok [Guidance mate-

- rial RTM 36.18.32.4–92. Guidelines for the electrical loads calculation]. Moscow, VNIPI TYAZHPROMELEKTROPROEKT Publ., 1992. 52 p.
19. Alyunov A.N. *Online Electric: Interaktivne raschety sistem elektrosnabzheniya* [Power supply system interactive calculation]. Available at: <http://online-electric.ru> (accessed 24 December 2016).
20. Frolov Yu., Shelakin V. *Osnovy elektrosnabzheniya* [Fundamentals of power supply]. St. Petersburg, Lan Publ. house, 2012. 480 p.

Received: 4 April 2017.

Information about the authors

Vitaliy N. Dmitrienko, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; head of the department, Ltd. SibTehProject.

Boris V. Lukutin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.