

ИЗСЛЕДВАНЕ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА РАБОТА НА ФОТОВОЛТАИЧНА СИСТЕМА ЗА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ

доц. д-р Силвия Лецковска
доц. д-р Камен Сейменлийски
Бургаски свободен университет

STUDY THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF POWER SYSTEMS WITH PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Assoc. Prof. Silvija Letskovska, PhD
Assoc. Prof. Kamen Seymenliyski, PhD
Burgas Free University

Abstract: *In this article the problems related to the efficiency and productivity of photovoltaic panels have been considered. Basic standards and test conditions that determine their technical parameters are considered. Analysis of the efficiency of electrical power production from existing PV system in BSU is made. Data for power and average output power of the system are presented.*

Keywords: *photovoltaic, efficiency, solar energy, electrical power production.*

Въведение

При избор на фотоволтаични панели е много важно да се знаят параметрите, които характеризират модулите - мощност, напрежение, ток при различни режими на работа. Важно е да се знаят обаче и условията, при които са получени стойностите на тези параметри.

В слънчевата енергетика има различни стандарти и тестови условия, при които се определят ефективността и производителността на панелите [12]. Това са тестовите Normal Operating Cell Temperature (NOCT), PV-USA Test Conditions (PTC), Standard Test Conditions (STC), Low Irradiance Conditions (LIC), High Temperature Conditions (HTC) and Low Temperature Conditions (LTC). Международната Електротехническа Комисия (International Electrotechnical Commission) IEC публикува стандарта IEC 61853 „Photovoltaic Module. Power Rating“, който регламентира тестирането в различни климатични и географски условия и включва тестове HTC, LIC, HTC, NOCT и STC.

PV-USA Test Condition (PTC) не е включен в стандарта IEC.

Параметрите на Standard Test Conditions (STC) отразяват работата на панелите в идеални условия – осветеност 1000W/m^2 и температура на модула – 25°C . Спектърът на излъчване трябва да съответства на AM 1,5, а скоростта на вятъра да е нула. Условията на STC са рядкост при реална експлоатация.

Ако номиналната мощност на панела е 250Wp това не означава, че от него ще се получи мощност 250W, т.е. STC не отразява ефективността и производителността на слънчевия модул в реални условия.



Затова се правят опити да се определят условията, при които параметрите на модула са най-близки до тези, съответстващи на реалните.

През последните години все по-често за сравнение на модулите вместо Standard Test Conditions се ползват тестови условия PTC.

За оценката на влиянието на реалните условия на работа при производството на модулите се въведоха допълнителни параметри. Появи се понятието NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) – температура на модула при типични условия на експлоатация. Номиналната работна температура на слънчевия елемент (NOCT) се измерва при осветеност 800 W/m^2 и температура на въздуха 20°C , ъгълът на наклона на модула е 45° с ориентация на юг. Колкото е по-нисък NOCT, толкова по-добре работи модула в реални условия. NOCT не е условие за изпитване на модулите, това е само параметър.

Особено е, че конструкцията на модула и материалите, от които е изработен, влияят на способността му да се нагрява. В реални условия модулът има температура с $15\div 30^\circ\text{C}$ по-висока от температурата на околната среда. Добрите модули в реални условия не трябва да се нагряват над $40\div 45^\circ\text{C}$, за да не губят мощност от пренагряване. Не толкова качествените модули прегряват. Средно NOCT е около 48°C . В САЩ са тествани около 330 модула, които показват NOCT на ниво 45°C или по-малка, основно поликристални. Само 30 модула имат NOCT 49 или 50°C .

Пиковата мощност на всички модули се измерва при стандартни тестови условия (STC), които в реални условия на експлоатация фактически не съществуват – модулите се нагряват до $40\div 60^\circ\text{C}$, осветеността почти винаги е под 1000 W/m^2 (изключение правят студените ясни дни). Затова много производители дават и характеристики на модулите по NOCT – обикновено за температура на модула $45\div 47^\circ\text{C}$ и осветеност 800 W/m^2 , при това производителността на модулите е примерно на $25\div 30\%$ под пиковата. В студен ясен ден производителността на модулите може да достигне до 125% спрямо пиковата.

Анализът на резултатите от тестирането на стотици модули показва, че добри са не тези, които са моно- или поликристални, а тези, които са изработени качествено. Резултати от тестиране на модулите по PTC (които са близки до реалните условия на експлоатация) показват, че някои монокристални модули са по-добри от някои поликристални, а някои поликристални – по-добри от някои монокристални.

Повечето монокристални модули немного добре работят при нагряване – това се потвърждава от анализа на голямо количество данни при тест PTC за мощността на модули на различни производители.

Анализът на данните за мощността по PTC показва, че поликристалните модули имат по-малък коефициент PTC/STC от монокристалните. Това означава, че в горещо време много монокристални модули по-малко губят мощност и произвеждат по-голямо количество електроенергия.

Параметрите на изпитване на панели по PTC или PV-USA (Photovoltaics for Utility Systems Applications) Test Conditions показват резултати от тестове в условия, по-близки до реалните от STC.

PTC също предвижда осветеност 1000 W/m^2 , но температурата се нормира не от слънчевия елемент, както е при STC, а от околния въздух.

Панелите трябва да са на височина 10 m над нивото на земята, температурата на въздуха трябва да е 20°C и скоростта на вятъра 1 m/s . Параметрите по PTC са по-ниски с $10\text{-}15\%$ от тези на STC, което отразява влиянието на реалните условия на експлоатация.

Таблица 1

Модел	Производител	Тип	STC (W)	PTC(W)	PTC/STC, %
CS5A-210M	Canadian Solar	монокристален	210	190,8	90,86
YL250P-29b	Yingli	поликристален	250	226,2	90,48
SF-220P x-tra	Hanwha Solar One	поликристален	250	226,02	90,4
HSE250-60P	ChinaLand	поликристален	250	221,2	88,48
TPS105S-300W(72)	Shenzhen Topray Solar	монокристален	200	264,2	88
IM60C3-250	Motech Industries	поли	250	228,4	91,36

NOCT се използва за определяне на очакваната температура на модула при PTC, а след това с помощта на температурния коефициент на мощност (от спецификациите на модула) се определя мощността на модула при PTC.

$$(1) \quad T_{\text{cell, PTC}} = 20 + 1.389 (NOCT - 20) (0.9 - \eta)$$

Стойността на израза $(0.9 - \eta)$ отразява частта на слънчевата енергия, достигаща модула и преобразувана в топлина. Предполага се, че 10% от енергията се отразява. Част от енергията се преобразува в електричество – това е полезната функция на фотоволтаика (кпд на модула η).

Ако температурата на слънчевия елемент при условия PTC е определена, то може да се определи мощността по PTC от тази по STC с помощта на температурния коефициент по мощност:

$$(2) \quad P_{\text{PTC}} = P_{\text{STC}} \times [1 + \beta_p (T_{\text{cell, PTC}} - 25^{\circ}\text{C})]$$

Тъй като цената на модула зависи от неговата номинална мощност, полезно е да се сравняват модулите по коефициент PTC/STC. Добрите модули имат отношение над 88%. Обикновено поликристалните модули имат по-нисък коефициент PTC/STC от монокристалните, което означава че в горещите дни монокристалните по-малко ще губят мощност и ще произвеждат повече електроенергия.

II. Определяне на изходната мощност на фотоволтаичните елементи.

Размерите на фотоволтаичните елементи се определят аналитично, на база на техните физични и електрически свойства [5, 6, 11]. Като пример, от голямо значение е каква е изходната мощност на клетката в най-екстремните моменти на експлоатация. За определянето на максималната изходна мощност на слънчевия елемент P_e при отчитането на факторите, въздействащи на изходните му параметри, може да се използва следната зависимост:

$$(3) \quad P_e = P_0 \times S \times F_{\text{траб}} \times F_{\text{к}} \times F_3 \times F_{\text{б.д}} \times F_{\text{г.ф}}$$

Където:

- P_0 – изходна мощност на неостъклен елемент при перпендикулярно слънчево излъчване (с плътност на излъчването, равна на слънчевата константа) и еталонна температура (25°C);
- S – ефективна средночасова плътност на слънчевото излъчване с отчитане на покритието и неперпендикулярността на слънчевото излъчване спрямо елемента [13];



- F_k – фактор, отчитащ загуби от комутация (пад на напрежението в междуелементните съединения и проводниците, свързано с наличие на активно съпротивление и с изменението му). В повечето случаи F_k се приема от 0,95 до 1,00;
- $F_{\text{Траб}}$ – фактор, отчитащ намаляването на мощността при повишаване на работната температура.

През лятото слънчевите елементи се нагряват средно до $T_{\text{раб}}=65^\circ\text{C}$ и загубите в мощност на всеки елемент може да се определят от зависимостта:

$$(4) \quad P_{\text{Pe}} = \beta_p (T_{\text{раб}} - T_0)$$

Където:

- P_{Pe} – загуби на мощност в проценти спрямо относителната номинална мощност на елемента P_e ;
- β_t (%) – температурен коефициент на мощност;
- $T_{\text{раб}}$ и T_0 – работна и стандартна температура.

Реалното работно напрежение на слънчевия елемент $U_{\text{раб}}$ при нагряването му по време на работа (за лятото) може да се определи от зависимостта:

$$(5) \quad U_{\text{раб}} = U_{\text{опт}} - (T_{\text{раб}} - T_0)\beta_V$$

- $F_{\text{г.ф.}}$ – геометричен фактор, т.н. отношение на проекции. За плоски панели $F_{\text{г.ф.}}=1$, за цилиндрични и въртящи се $F_{\text{г.ф.}}=1/\pi$;
- $F_{\text{д.б.}}$ – фактор, отчитащ загубите в блокировъчните диоди и проводниците. С достатъчна точност може да се приеме за слънчеви панели с мощност до 1kW $F_{\text{д.б.}}=0,924$;
- F_3 – фактор, отчитащ засенчването, равен на отношението на действителния изходен ток на късо съединение към теоретично определения, получен за всички паралелно свързани елементи при липса на затъмнение. Токът на късо съединение е пропорционален на площта на осветения елемент, затова коефициентът F_3 може да се сведа до определяне на отношение между осветената и обща площ на елементите ($A_{\text{осв}}/A$). При липса на сянка и напълно осветен елемент F_3 е единица. Като се отчита наличието на снежна покривка през зимата и запрашеността през лятото може да се приеме коефициент $F_3=0,9$ [8].

На покрива на БСУ е изградена фотоволтаична централа, която има шест фотоволтаични поликристални панела, всеки с мощност 238Wp, брой елементи 60 и размер на клетките 6 инча.

Температурният коефициент на мощност за слънчевите елементи е $T_{\text{pm}}(\beta_p) = 0,43\%/^\circ\text{K}$. Тогава загуби на мощност в проценти спрямо относителната номинална мощност на елемента на база зависимост (4) ще са 17,2%.

Коефициентът $F_{\text{Траб.лято}}$ за лятото може да се определи на база цитираната по-горе зависимост:

$$F_{\text{Траб.лято}} = 1 - P_{\text{Pe}}/100 = 1 - 17,2/100 = 0,828$$

През зимата се приема $T_{\text{раб}} = 30^\circ\text{C}$. Тогава ще се получи $P_{\text{Pe}}=2,15\%$ и $F_{\text{Траб.зима}}=0,979$.

Работното напрежение при тези условия на един елемент ($U_{\text{опт}}=0,507$) през лятото и зимата при температурен коефициент на напрежение $\beta_V=0,005 \text{ V/}^\circ\text{K}$ ще се получи $U_{\text{раб.л}}=0,307 \text{ (V)}$.

III. Определяне на ефективността на фотоволтаичната система

Изследването се проведе при използване на изградената фотоволтаична централа на покрива на БСУ и специално разработена за целта метеорологична станция (BFU-METEO – система за мониторинг на параметрите на слънчевата радиация, температурата и вятъра). BFU-METEO дава възможност да се получават данни за параметрите на околната среда в реално време през пет минути [2-4, 10].



Фиг. 1. Фотоволтаична централа на покрива на БСУ

Така създадената система има възможности за запис, архивиране и анализ на данните, получени от сензорите. Използват се диаграми и графики, поддържа се файлов експортиране на данни за конкретен период от време.

Съхраняват се данни от сензорите за температура, слънчева радиация, скоростта на вятъра, а също и за произведената електрическа енергия от фотоволтаична централа, монтирана на покрива на сградата на всеки пет минути (Фиг. 1).

С цел извличане, обработка и възприемане на таблични данни и тяхното визуализиране допълнително бе разработена „Метео“ програма [9].

Тя е оптимизирана за работа с база данни на Access, която натрупва информация чрез експортирани Excel файлове от FRONIUS Solar.Access програмата. Това се постига чрез:

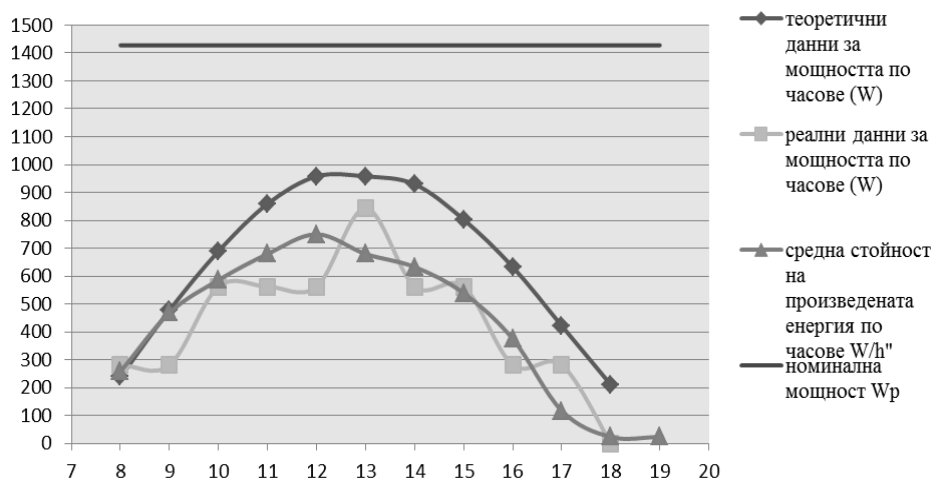
- Улеснено импортиране на Excel файл, експортиран от FRONIUS;
- Импортирането елиминира дублирането на дати;

- Гъвкав обхват на входните данни. Тази проверка е създадена с цел да се избегне допускането на грешка при извличане на желаните данни от метеорологичната станция;
- Графично изобразяване на избран период;
- Обхватът на графиката за Access файла може да е избран за дни, месеци или години;
- Дълготрайно съхранение на голяма база данни;
- Елиминиране на нуждата от ръчно оптимизиране на базата данни.

Основната „Метео“ програма осъществява създаването на голяма бази данни, която без затруднения може да се използва за дейности, изискващи информация за слънчева радиация, производство на електроенергия, температура и скорост на вятъра за определени времеви периоди – дни, месеци или години.

Извлечени данни от базата за определен времеви интервал дадоха възможност да се извърши анализ на ефективността на производство на електрическа енергия от съществуващата фотоволтаична система (ФС).

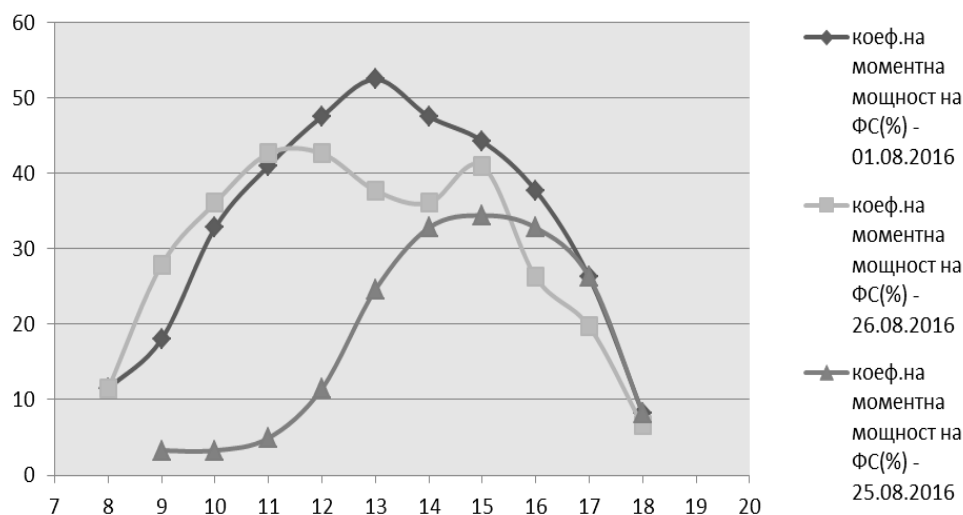
Като пример – на Фиг. 2 са представени данни за мощността и средната производителност на енергия по часове за конкретен ден, характеризиращ се със средна производителност на енергия.



Фиг. 2. Изменение на мощността на фотоволтаичната система по часове

Графиката представя и теоретично определената стойност на мощността, която би трябвало да се получи от фотоволтаичните панели, съгласно техническите им данни. Базата данни съхранява информацията за период от време в размер от няколко месеца.

На Фиг. 3 са представени получените резултати от наблюдения на произведената енергия за три характерни дни от месец август.



Фиг. 3. Изменение на коефициента на мощност

Сравнението е направено на база коефициента на моментна мощност – процентното съотношение на реалната и теоретична W_p – мощност.

Видно е, че коефициентът не надвишава 60% стойност, дори при максимални стойности на произведената електроенергия.

Резултатите от анализа показват, че техническите характеристики, определени от производителя на фотоволтаичните панели в стандартни условия не се постигат в реални – процентът на постигнатия капацитет на производство не надвишава 60%. По таблични данни произведената от панелите енергия би трябвало да е около 440 kW/h, а получената реална енергия и около 137 kW/h.

Заклучение

На база на проведеното изследване се установи, че инсталираните на покрива на БСУ фотоволтаични панели с обща инсталирана мощност 1428 W_p произвеждат за месец електрическа енергия със стойност значително по-ниска от очакваната на база на техническите параметри на панелите.

От направения анализ и получените резултати се вижда, че е необходимо да бъде увеличен броя на фотоволтаичните панели, за да се постигне желаната мощност, необходима за консуматорите. До сега системата е произвела общо 3427 kWh. Предстои разширяване на фотоволтаичната система с дванадесет панела, при което се очаква производството да нарастне тройно.



Литература

1. www.hyundaisolar.com
2. П. Рахнев и С. Лецковска, Слънчевите панели – настояще и бъдеще, МНК на БСУ“ - Предизвикателства пред висшето образование и научните изследвания в условията на криза”, БСУ, България, 2010.
3. Силвия Лецковска и Камен Сейменлийски, Система за мониторинг и оценка на енергийния потенциал от слънчева енергия, Годишник на БСУ, 2014, том XXX, стр. 208-213.
4. Елдар Заеров, Силвия Лецковска, Камен Сейменлийски, Бургаски свободен университет – производител на енергия, Научна конференция с международно участие – „Хоризонти в развитието на човешките ресурси и знанието”, 2015, БСУ
5. П. Рахнев, С. Лецковска, Д. Парашкевов, Температурни зависимости при соларните клетки, НК с международно участие „Образователни технологии” – Сливен, 2010;
6. Pavlik Rahnev, Silvija Letskovska, Dimitar Parachkevov, Problem in using polymer substrates for solar cells, SIELA 2009, ISBN 978-954-323-530-8
7. <http://slavapril.narod.ru>
8. Hofierka, J, and J. Kanuk. 2009. Assessment of photovoltaic potential in urban areas u sing open source solar radiation tools. Renewable Energy (34): 2206-2214.
9. Радостин Димитров, Система за анализ и визуализация на данни от БСУ – метеостанция, Годишник, ТОМ XXXIII, БСУ, 2016, стр. 415-422
10. Silviya Letskovska, Kamen Seymenliyski, Ginko Georgiev, Laboratory Equipment for Energy Accumulation from Renewable Sources, ICEST 2016, 28-30 June 2016, Ohrid, Macedonia
11. Я. Чарьев, К. Ходжанепесов, Влияния параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи, 10-й Международной научно-технической конференции „энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, 24-25 мая 2016 г., ISSN2304-4926
12. IEC, 'Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines for measurement, Data Exchange and Analysis, IEC Standard 61724', Geneva, Switzerland, 1998
13. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., Солнечная энергетика: – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.