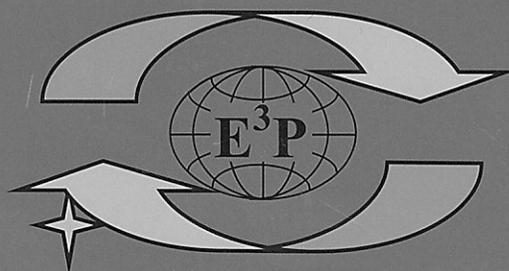


# ЕКОЛОГИЧНО ИНЖЕНЕРСТВО И ОПАЗВАНЕ НА ОКОЛНАТА СРЕДА



## ECOLOGICAL ENGINEERING AND ENVIRONMENT PROTECTION

ГОДИНА

14

YEAR

КНИЖКА

3/2015

ISSUE

## СЪДЪРЖАНИЕ

Редакционен коментар		Екологични изследвания и опазване на горски екосистеми на Витоша	
И. Симеонов	3-4	Н. Стоянова, Б. Христова	36-41
<b>I. ЧОВЕК И БИОСФЕРА</b>		<b>III. ВЕИ И БИОГОРИВА</b>	
Лидарна регистрация на аерозоли от горски пожари близо до София (август 2013)		Микробни горивни клетки с денитрифицираща система	
А. Делева	5-14	Ц. Първанова-Манчева, Е. Василева, В. Бешков	42-46
Антропогенните микродетрити като фактор за съвременното седименто- и почвообразуване		Сравнително изследване на фотоволтаични системи с различни видове панели	
А. Сотиров, Н. Пищалов, Д. Малууд, М. Йерусалимова, С. Савова, Р. Везенкова, М. Евтимова, Д. Велинов, Д. Кирилов	15-21	З. Зарков, Л. Стоянов, Х. Кънчев, В. Миленов, В. Лазаров	47-56
Пространствено-времево разпределение на наводнения и пожари на територията на България за периода 2004 - 2015 г. по данни от MODIS		<b>IV. ТЕХНОЛОГИИ ЗА ПРЕЧИСТВАНЕ</b>	
М. Димитрова, Р. Недков	22-28	Характеристика и оценка на утайки от пречиствателна станция Казанлък за използването им в практиката	
<b>II. ЛЕСОБИОЛОГИЯ</b>		С. Маринова, Н. Катиджотес, В. Колчаков, Е. Златарева, В. Петрова	57-63
Изследване на хумусно-карбонатни почви в предпланинската част на Западна Стара планина		Влияние на съотношението C/N върху процес на анаеробна биодegradация на говежди тор	
С. Богданов, С. Савев, Е. Цавков	29-35	В. Хубенов, Д. Денчев, И. Симеонов	64-72

## СРАВНИТЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ С РАЗЛИЧНИ ВИДОВЕ ПАНЕЛИ

Захари Зарков, Людмил Стоянов, Християн Кънчев, Валентин Миленов,  
Владимир Лазаров

## COMPARATIVE STUDY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH DIFFERENT TYPES OF MODULES

Zahari Zarkov, Ludmil Stoyanov, Hristiyan Kanchev, Valentin Milenov,  
Vladimir Lazarov

**Abstract:** The purpose of the work is to compare the characteristics of photovoltaic (PV) generators built with panels manufactured by different technologies and operating in real conditions. The paper shows results from an experimental study of PV systems with different module types (mono-Si, poly-Si,  $\mu$ c-Si, CIGS and CdTe). The experiment was carried out at a research platform for PV systems developed by the authors, built and located at an experimental site near the Technical University of Sofia. Comparisons are made between the performances of the studied PV generators for the same operating conditions. Some differences of the operation of the PV systems in sun tracking mode and in fixed angle mode are also shown.

**Keywords:** PV systems, photovoltaic modules, comparison

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Потреблението на електрическа енергия в световен мащаб се увеличава значително с всяка изминала година (очаква се то да достигне 33000TW до 2030 г.), конвенционалните източници (нефт, въглища, природен газ) се изчерпват, а околната среда се замърсява вследствие на човешката дейност. Всичко това води до бурно развитие на възобновяемите източници на енергия. Техен представител са и фотоволтаичните системи (ФВ), които намират широко приложение в целия свят. В края на 2013г. беше достигната 140GW обща инсталирана мощност на фотоволтаици в света [1].

Развитието на ФВ системи е съпроводено със създаване на нови технологии за производството им, усъвършенстване на използваните материали, прилагане на разнообразни и ефективни конструкции, всичко това с цел увеличаване на производителността им. Наред с утвърдените технологии за производство на клетки от кристален силиций в двете му разновидности – моно (mono-Si) и поликристален (poly-Si), са разработени и технологии за производство на ФВ модули по т.нар. „тънкослойни технологии“ [2]. При тях се използва значително по-малко материал за производството на клетките, което води до намаляване на цената. Това предимство се съпровожда и от някои недостатъци, като по-ниският к.п.д. на преобразуване на слънчевата светлина и по-бърза деградация на параметрите. Една

от съвременните тънкослойни технологии е т.нар. микрокристален (микроморфен) силиций ( $\mu$ c-Si). При нея се постига к.п.д. над 9%, дължащ се на по-доброто преобразуване на светлината. Тънкослойните технологии позволяват да се използват и други материали, като: кадмиев телурид (CdTe), медно-индиево-галиев селенид (CIGS), галиев арсенид (GaAs) и др. [2], [3].

Сравненията между характеристиките на ФВ модули, произведени по различните технологии, са интересен и важен проблем, на който са посветени редица изследвания. В [4] и [5] са показани резултати от сравнителни изследвания на фиксирани и следящи ФВ системи, но само с един тип панели от кристален силиций. В [6] са показани резултати от изследване на ФВ генератори с панели от монокристален, поликристален и аморфен силиций, разположени на едноосно следяща система. В [7] е направено сравнително изследване на производителността на ФВ генератори с различни типове панели, но само при фиксирани системи.

Целта на това изследване е да се направят сравнения на характеристиките на ФВ системи, които използват панели, произведени по различни технологии, при работа в реални условия. Сравненията са направени на базата на резултати от експериментални изследвания на фиксирани и следящи ФВ системи.

## 2. ОПИСАНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНИТЕ СИСТЕМИ

За изграждане на експерименталните ФВ системи са използвани панели, произведени по различни технологии, и с параметри, показани в Табл.1.

Изградените фотоволтаични генератори имат приблизително еднаква инсталирана мощност – около 1200W, която се постига с различен брой панели. Системите са свързани към електрическата мрежа посредством инвертори

тип SB1200 (Фиг.1). За удовлетворяване на изискванията за входно напрежение на инверторите панелите от всяка технология са свързани в различни конфигурации, както е показано на Фиг.2.

Броят на последователно свързаните панели зависи от входното напрежение на избрания инвертор  $U_{вх}$ . При системите с монокристален Si и поликристален Si пет модула са свързани последователно и напрежението на празен ход достига 186 V.

Таблица 1. Параметри на ФВ модули.

Технология	mono-Si	poly-Si	μc-Si	CIGS	CdTe
Максимална мощност при STC*, W	240	240	128	110	75
Максимален к.п.д при STC, %	14.81	14.63	9.01	11.70	10.42
Площ на модула, m <sup>2</sup>	1.62	1.64	1.42	0.94	0.72
Брой клетки в модула	60	60	45	149	116

\*STC –Standart Test Condition, (Стандартни Тестови Условия)

При системите с CIGS и CdTe последователно свързаните модули са 3 и напрежението е 269V, а при μc-Si имаме пет последователно свързани модула, като напрежението е 299 V. Броят на стринговете във всяка система е избран така, че да се постигне приблизително желаната мощност 1200 W.

Волт-амперната характеристика (ВАХ) представлява зависимостта на тока I от напрежението U на фотоволтаичните клетки, панели или генератори I(U). На Фиг.3 в обща координатна система са представени ВАХ на петте фотоволтаични генератора, свързани съгласно схемите от фиг.2. Характеристиките показват, че се оформят две групи ФВ

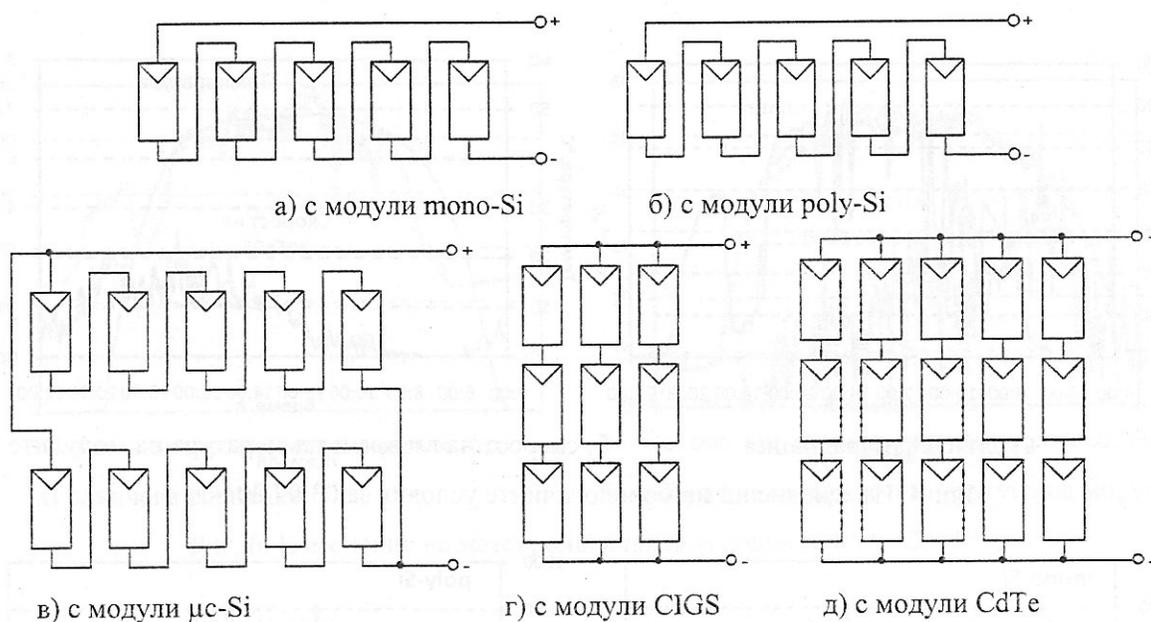
генератори – с кристалните силициеви панели, които работят с по-голям ток и по-ниско напрежение от втората група генератори с тънкослойни панели от CdTe, CIGS и μc-Si.

## 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

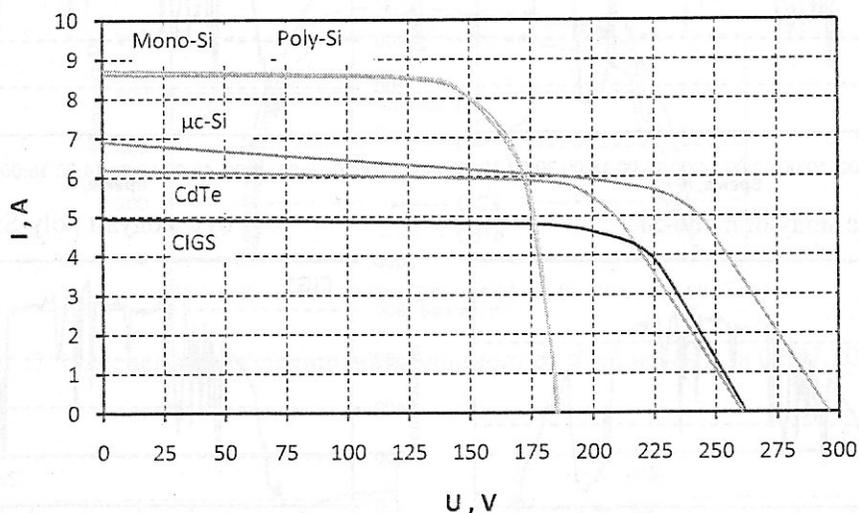
С изградените ФВ системи се провеждат непрекъснати експериментални наблюдения, като данните се събират и обработват. По-долу са показани част от резултатите, получени при експерименталните изследвания при летни метеорологични условия – през месеците юли и август. Представени са резултати в режим на слънцеследене и режим с фиксиран наклон.



Фиг. 1. Схема на свързване на фотоволтаичните генератори към мрежата.



Фиг. 2. Схеми на свързване на модулите в петте ФВ генератора.



Фиг. 3. Волт-амперни характеристики на фотоволтаичните генератори.

На Фиг. 4 е показано изменението на слънчевата радиация  $G_a$ , попаднала върху повърхността на ФВ модули за 03.07.2014г. при използване на слънцеследящите системи, както и скоростта на вятъра и температурите на модулите от петте генератора, които са приблизително еднакви. От представените данни се вижда, че денят е бил с променлива облачност и слаб вятър следобед. Фиг.5 показва изменението на генерираната електрическа мощност от ФВ системи за същия ден.

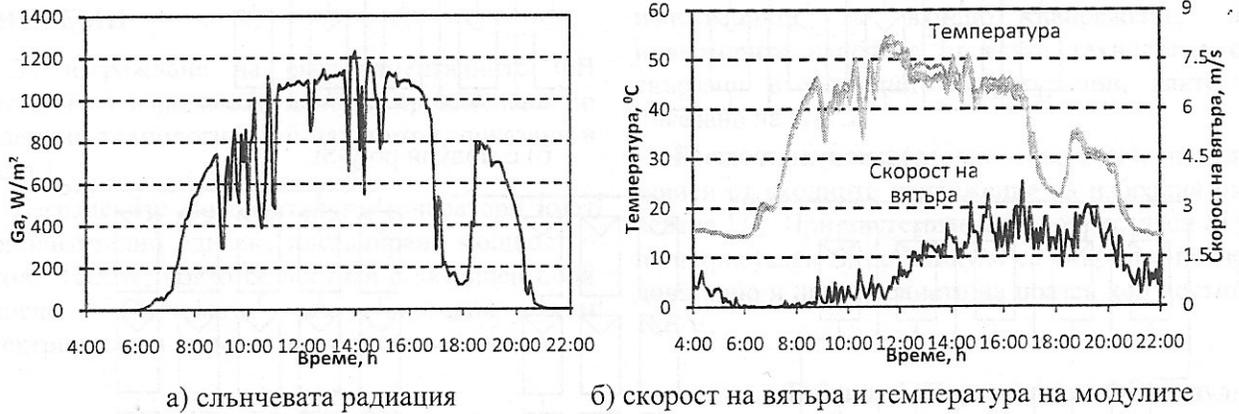
На Фиг. 6а е показано изменението на слънчевата радиация, попаднала върху повърхността на ФВ модули за ясен слънчев ден

(05.07.2014г.) в режим на слънцеследене. На Фиг.6б се вижда изменението на температурата на модулите и скоростта на вятъра за същия ден.

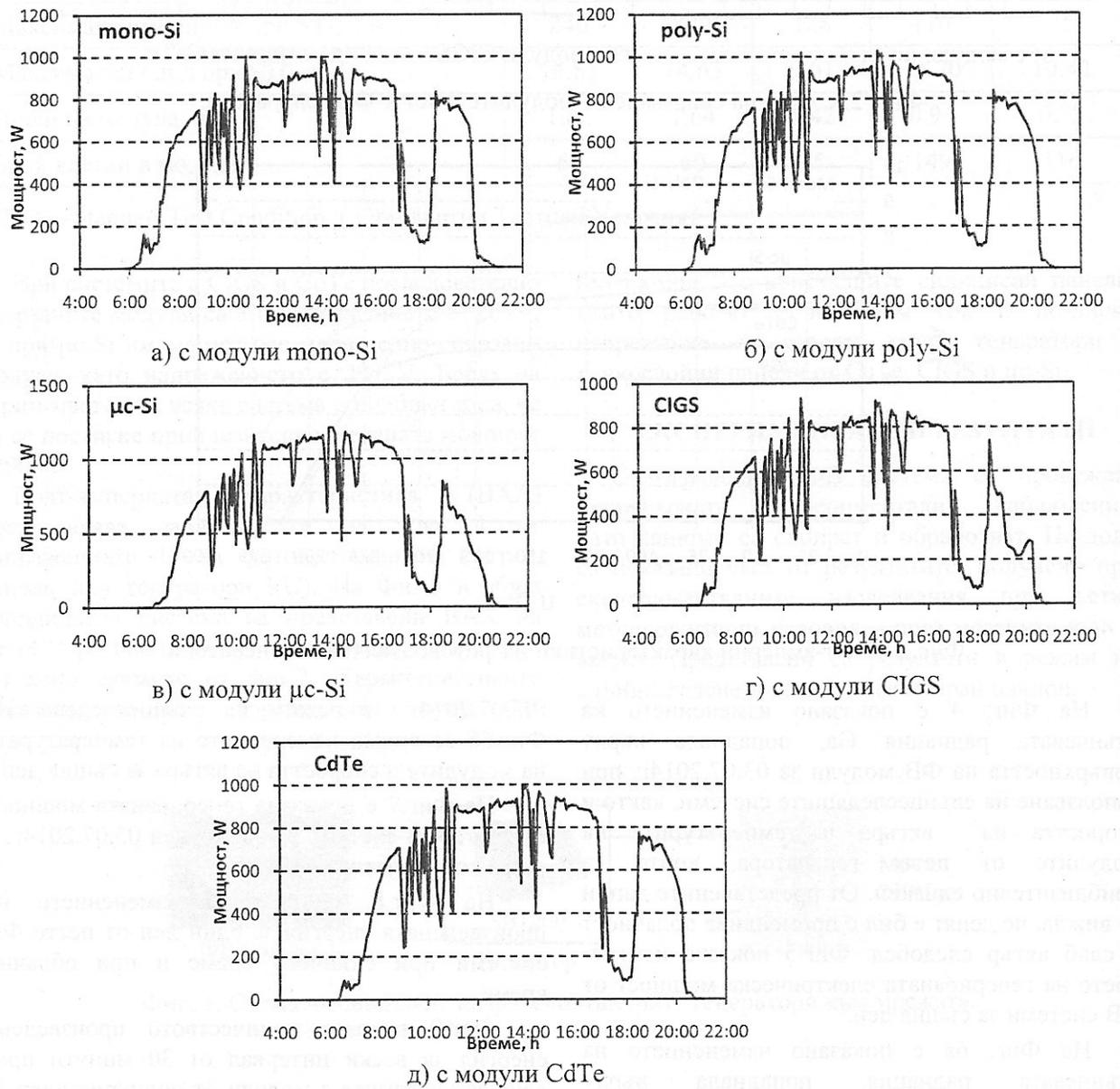
На Фиг.7 е показана генерираната мощност от петте ФВ системи за същия ден 05.07.2014г. в обща координатна система.

На Фиг.8 е показано изменението на произведената енергия за един ден от петте ФВ системи при слънчево време и при облачно време.

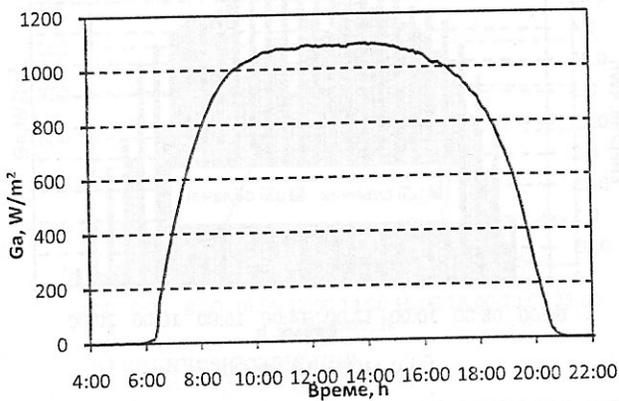
Фиг.9 показва количеството произведена енергия за всеки интервал от 30 минути през деня за системите с модули от поликристален Si и микрокристален Si.



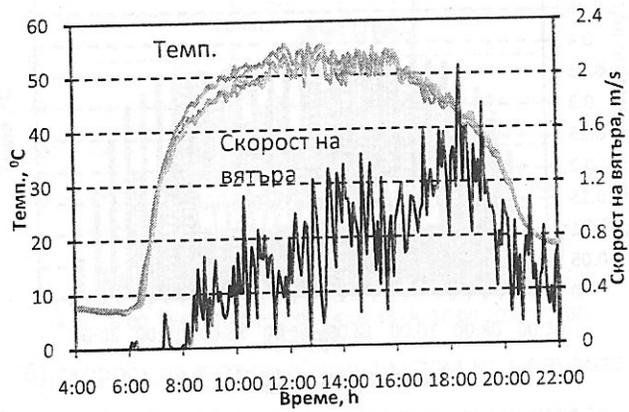
Фиг.4. Изменение на метеорологичните условия за 03.07.2014г.



Фиг.5. Изменение на генерираната мощност от ФВ системи за 03.07.2014г.

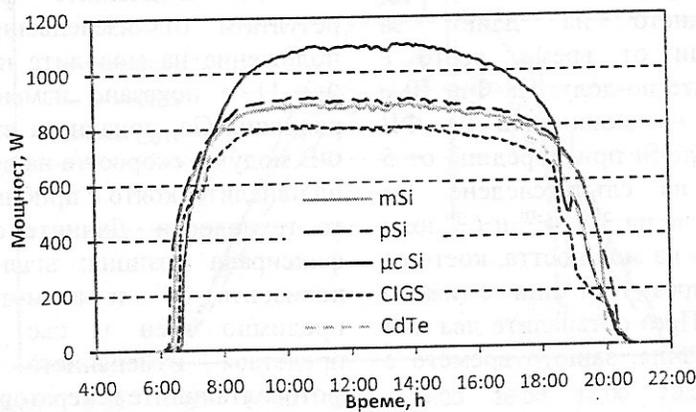


а) слънчева радиация

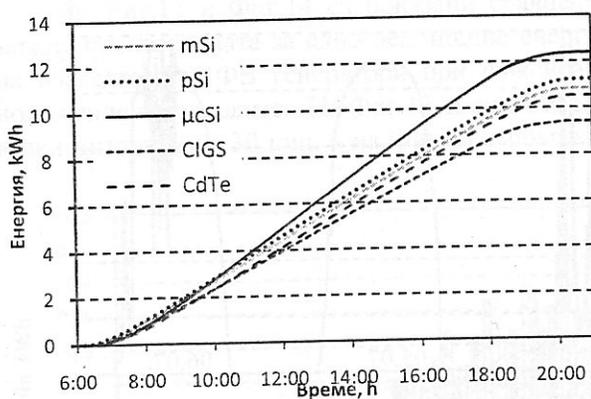


б) скорост на вятъра и температура на модулите

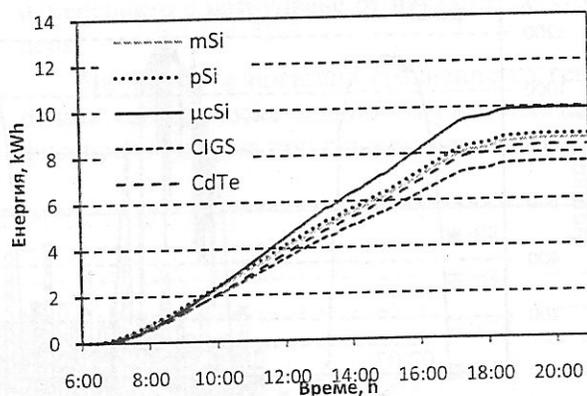
Фиг. 6. Изменение на метеорологичните условия за 05.07.2014г.



Фиг. 7. Изменение на генерираната мощност от ФВ системи за 05.07.2014г.

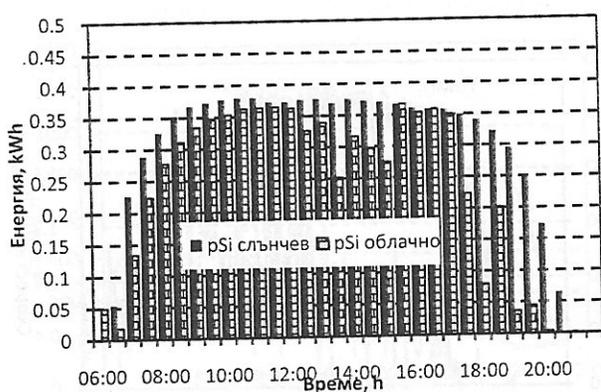


а) при слънчев ден

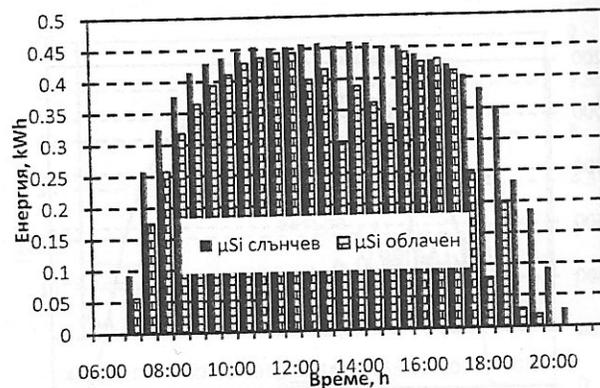


б) при облачен ден

Фиг. 8. Изменение на произведената енергия за 5-те ФВ системи.



а) с модули poly-Si

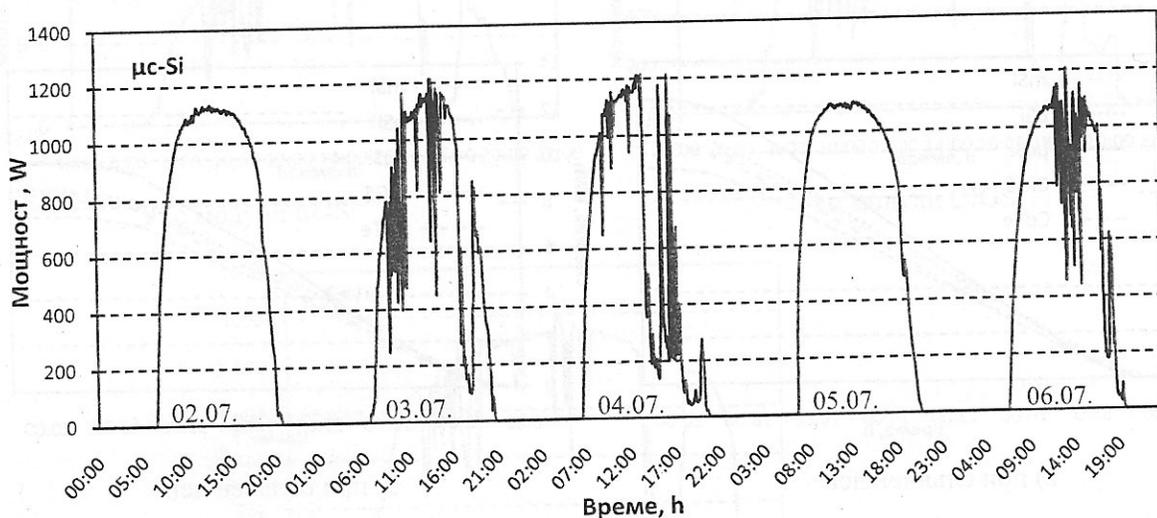


б) с модули μc-Si

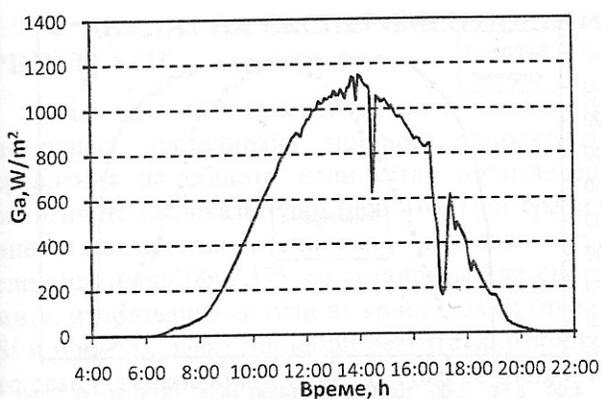
Фиг. 9. Произведена енергия за всеки 30min при слънчев и при облачен ден от два типа ФВ генератори.

Реализираната информационна система позволява и събирането на данни за продължителни периоди от време, което е илюстрирано с графиките по-долу. На Фиг.10 е показано изменението на мощността на ФВ генератор с модули от μc-Si при поредица от 5 деноношия в режим на слънцеследене. От графиките се забелязва, че на 3-ти, 4-ти и 6-ти юли има сериозни изменения на мощността, което се дължи на факта, че през тези дни е имало променлива облачност. През останалите два дни графиките са без колебания, защото времето е било изцяло слънчево.

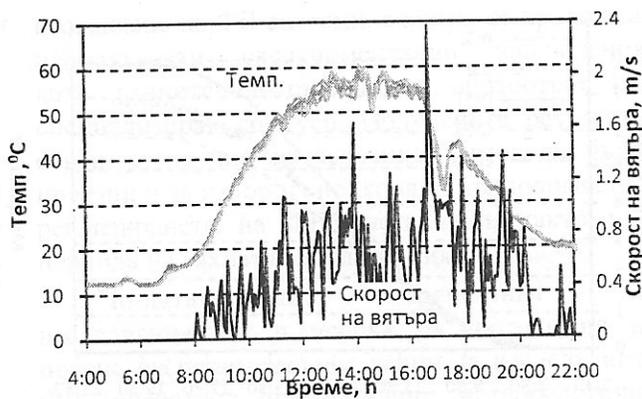
На следващите фигури са показани резултати от изследванията при фиксирано положение на модулите на ФВ генератори. На Фиг.11 е показано изменението на слъчевата радиация  $G_a$ , попаднала върху повърхността на ФВ модули, скоростта на вятъра и температурата на панелите, която е приблизително еднаква за 5-те технологии. Данните са за 26.07.2014 при фиксирана позиция: ъгъл на наклона спрямо хоризонта  $35^\circ$  и азимут юг. Денят е бил предимно ясен и със слаб вятър. Фиг.12 представя изменението на мощността на фотоволтаичните генератори за същия ден.



Фиг. 10. Изменение на мощността на ФВ генератор с μc-Si модули за 5 деноношия.

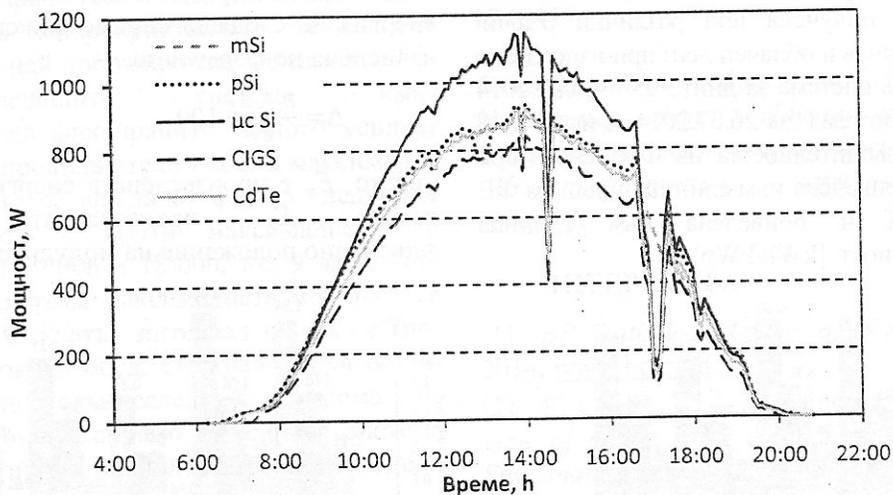


а) слънчева радиация



б) скорост на вятъра и температура на модулите

Фиг.11 Изменение на слънчевата радиация, скоростта на вятъра и температурата на модулите за 26.07.2014г. при фиксирано положение на модулите.

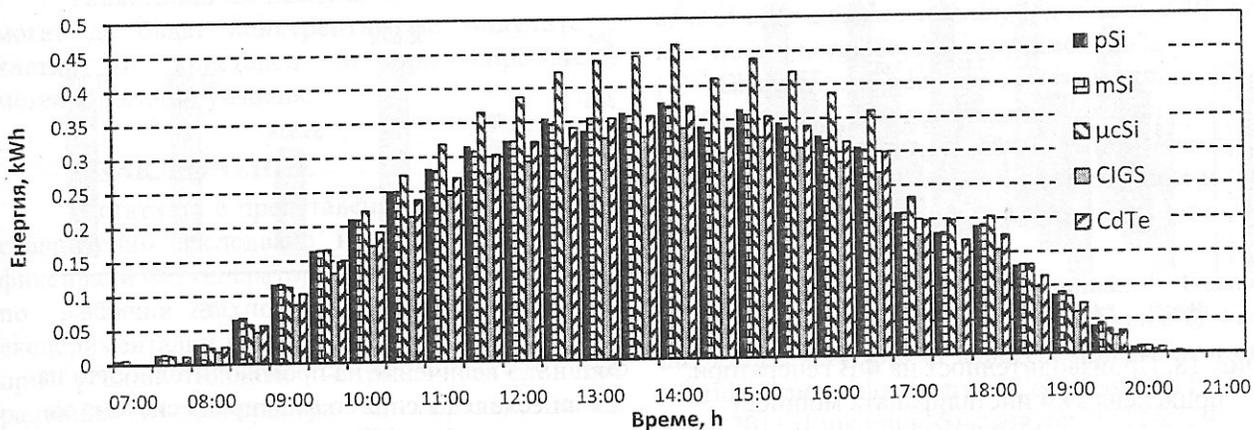


Фиг. 12. Мощност на ФВ генератори за 26.07.2014г. при фиксирано положение на модулите.

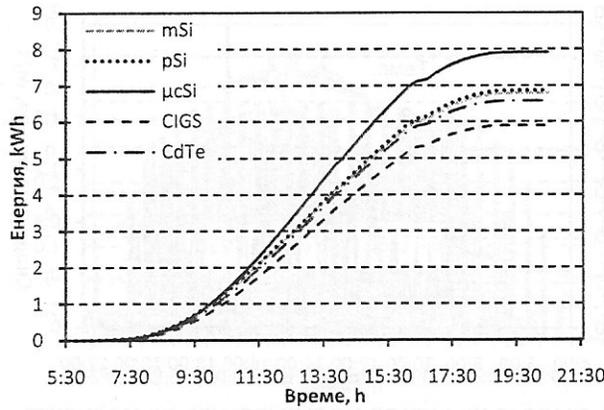
На Фиг.13 и Фиг.14 са показани сравнения между произведената за едно денонощие енергия на изследваните ФВ генератори при фиксирано положение на панелите. На Фиг.13 енергията е за всеки интервал от 30 min, а на Фиг.14 е показано

изменението с натрупване от началото до края на деня.

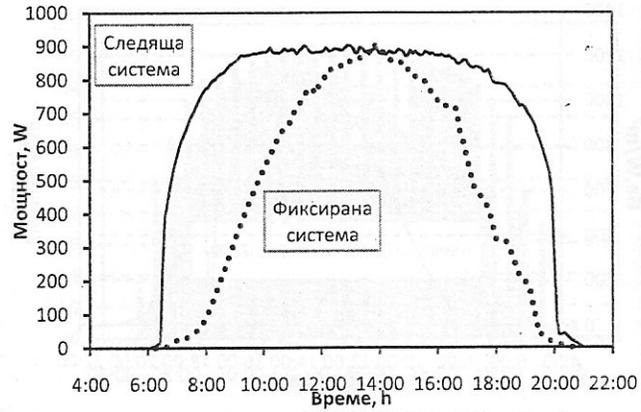
На Фиг.15 е показано сравнение на генерираната електрическа мощност между следяща и фиксирана система при слънчев ден.



Фиг.13. Сравнение на произведената за 30 min енергия при различните ФВ системи.

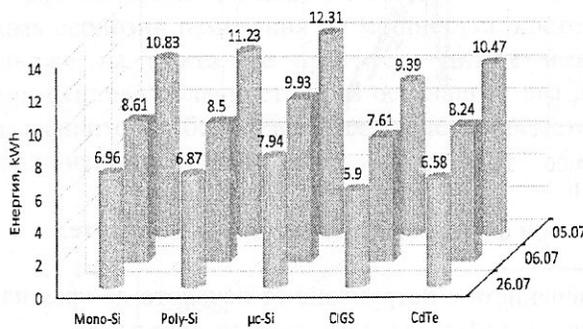


Фиг. 14. Изменение на произведената енергия за един ден при фиксирани системи.



Фиг. 15. Сравнение на мощността при слънцеследяща и фиксирана система.

Фиг.16 обобщава данните за произведената енергия за 24h, получена при различни реални условия (при слънчев и облачен ден) при използване на слънцеследяща система за дните 05 и 06.07.2014 и на фиксирана система за 26.07.2014. Фиг.17 и 18 представят производителността на ФВ генератори за същите дни, приведена към единица площ на ФВ панели [kW/m<sup>2</sup>] и приведена към единица инсталирана мощност [kWh/kWp].

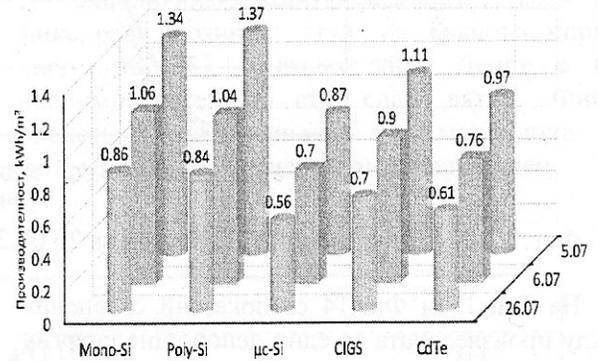


Фиг. 16. Произведена енергия за 24h. през три различни дни.

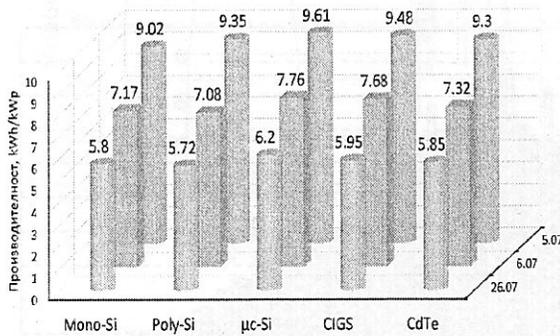
Фиг.18 показва увеличението на произведената енергия на следяща спрямо фиксирана система, изчислена по формулата

$$\Delta = \frac{E_{tr} - E_f}{E_f} \cdot 100, \quad (1)$$

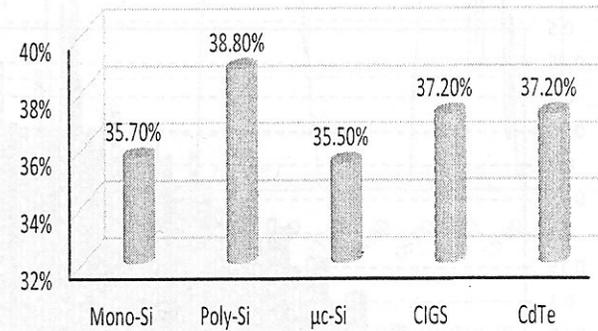
където:  $E_{tr}$  е произведената енергия при следящ режим,  $E_f$  – произведената енергия при фиксирано положение на модулите.



Фиг. 17. Производителност на ФВ генератори, приведена към единица площ [kWh/m<sup>2</sup>].



Фиг. 18. Производителност на ФВ генератори, приведена към инсталираната мощност [kWh/kWp].



Фиг. 19. Увеличение на производителността на слънцеследяща спрямо фиксирана система за 5-те ФВ генератора.

#### 4. АНАЛИЗ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Тъй като ФВ генератори са с близка, но нееднаква инсталирана мощност, директните сравнения на общото количество произведена енергия не са показателни (фиг.16). При сравнението на производителността, приведена към единица площ (фиг.17), се установява, че системите, използващи модули от кристален Si (моно-Si и poly-Si), дават по-добри резултати, отколкото тези с тънкослойни панели. Това се дължи на техния по-висок коефициент на полезно действие. При сравнението на количеството енергия на единица инсталирана мощност (фиг.18) се вижда, че системите с тънкослойни модули изпреварват тези с модули от кристален силиций, като микрокристалната технология (μc-Si) показва най-добра производителност.

Слънцеследящите системи имат предимство пред фиксираните, защото успяват да поддържат продължително време максимална мощност. Както се вижда от фиг.15 следящата система работи с почти максималната си мощност между 9:00h и 18:00h, т.е. 9 часа. При фиксираната система максималната мощност се достига само за кратък интервал от време (по-малко от 1h) около обед. Очаквано, производителността при слънцеследяща система се увеличава с 36-38% спрямо фиксирана система за всички типове използвани ФВ панели (фиг.19).

Резултатите за производителността на някои от ФВ системи показват разлики от дадените от производителите. Това се дължи на факта, че панелите работят при условия, които са много различни от стандартните тестови условия, при които се дават характеристиките на производителите.

Тънкослойните модули от CdTe и CIGS могат да бъдат конкурентни на модулите с клетки от кристален Si при определени метеорологични условия.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представено експериментално сравнително изследване на слънцеследящи и фиксирани ФВ генератори с панели, произведени по различни технологии. Проведени са и експериментални изследвания на ФВ генератори при реални условия – различна слънчева радиация и температура на модулите и на околната среда. Използвана е платформа за

изследване на ФВ системи, с която се провеждат непрекъснати експериментални наблюдения, като данните се събират и обработват със специализиран софтуер. Получените резултати, освен за научни изследвания, могат да бъдат полезни и за избор на подходяща технология при реализирането на ФВ инсталации, както и в периода на тяхната експлоатация.

По-нататъшната перспектива на изследванията е в посока на натрупване на повече експериментални данни за изследваните ФВ генератори при различни метеорологични условия (есенни, зимни), както и при различни наклони. Освен това интерес представлява проследяването на стареенето на модулите и промяната на техните характеристики във времето.

**Благодарности.** Авторите благодарят на Национален фонд "Научни изследвания" за финансовата подкрепа по договор ДУНК 01/3 "Университетски научно-изследователски комплекс".

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] BP Statistical Review of World Energy, June 2014. [www.bp.com](http://www.bp.com)
- [2] El Chaara L., L.A. Lamonta, N. El Zeinb, *Review of photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 2165–2175.
- [3] Shah A.V. et al. *Thin film silicon solar cell technology*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004, pp. 113–142.
- [4] Senpinar A., M. Cebeci. *Evaluation of power output for fixed and two-axis tracking PV arrays*, Applied Energy 92, 2012, pp. 677–685
- [5] Eke R., Ali Senturk, *Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system*, Solar Energy 86, 2012, pp. 2665–2672.
- [6] Ghazali A., Abdul Malek Abdul Rahman, *The Performance of Three Different Solar Panels for Solar Electricity Applying Solar Tracking Device Under the Malaysian Climate Condition*, Energy and Environment Research; Vol. 2. No. 1; 2012, pp.235-243.
- [7] Colli A., M. Marzoli, W. Zaaiman, S. Guastella, W. Sparber. *Comparative Performance of Various PV Technologies in Different Italian Locations*, World Renewable Energy Congress 2011, 8-13 May, 2011, Linkoping, Sweden, pp. 2722-2729.

**Захари Зарков**, доц., д-р в Технически университет-София, email: [zzza@tu-sofia.bg](mailto:zzza@tu-sofia.bg);

**Людмил Стоянов**, доц. д-р в Технически университет-София, email: [ludiss@tu-sofia.bg](mailto:ludiss@tu-sofia.bg);

**Християн Кънчев**, гл. ас. д-р в Технически университет-София, email: [hkanchev@tu-sofia.bg](mailto:hkanchev@tu-sofia.bg);

**Валентин Миленов**, докторант, асистент в Технически университет-София, email: [valmil@tu-sofia.bg](mailto:valmil@tu-sofia.bg);

**Владимир Лазаров**, проф. д-р в Технически университет-София, email: [vl\\_lazarov@tu-sofia.bg](mailto:vl_lazarov@tu-sofia.bg);

**Assoc. Prof. Zahari Zarkov, PhD**, Technical University of Sofia, email: [zzza@tu-sofia.bg](mailto:zzza@tu-sofia.bg);

**Assoc. Prof. Ludmil Stoyanov, PhD**, Technical University of Sofia, email: [ludiss@tu-sofia.bg](mailto:ludiss@tu-sofia.bg);

**Assist. Prof. Hristiyan Kanchev, PhD**, Technical University of Sofia, email: [hkanchev@tu-sofia.bg](mailto:hkanchev@tu-sofia.bg);

**Assist. Prof. Valentin Milenov, PhD Student**, Technical University of Sofia, email: [valmil@tu-sofia.bg](mailto:valmil@tu-sofia.bg);

**Prof. Vladimir Lazarov**, Technical University of Sofia, email: [vl\\_lazarov@tu-sofia.bg](mailto:vl_lazarov@tu-sofia.bg);