

## **ФОТОСОЛАРНА ИНСТАЛАЦИЯ ЗА НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ ЦЕЛИ**

**Иван Миленов, Васил Димитров**

[milenov55@abv.bg](mailto:milenov55@abv.bg), [vdimitroff@abv.bg](mailto:vdimitroff@abv.bg)

**ВТУ „Тодор Каблешков“, София, ул. Гео Милев 158  
БЪЛГАРИЯ**

***Ключови думи:** фотосоларни системи, енергийна ефективност*

***Резюме:** Използването на слънчевата енергия е изключително перспективно и предоставя неограничени възможности. Цел на доклада е проектиране и разработване на цялостна фотосоларна инсталация във ВТУ. Предвидени са всички необходими елементи и модули за получаване на стабилно изходно променливо напрежение независимо от интензивността на слънчевото греене. Произведената от фотосоларната централа ел. енергия се използва за осветление в лаборатория „Възобновяеми енергийни източници“ и за хранване на маломощни консуматори (напр. компютърна техника). С проектирането и изграждането на фотосоларната инсталация се създават условия за провеждане на научни изследвания и експерименти от докторанти и преподаватели, на лабораторни упражнения със студенти. Функционирането на фотосоларната инсталация води и до икономия на ел. енергия в рамките на произведената. Прекият икономически ефект ще е над 36 000 лв, тъй като животът на тези системи е над 20 г.*

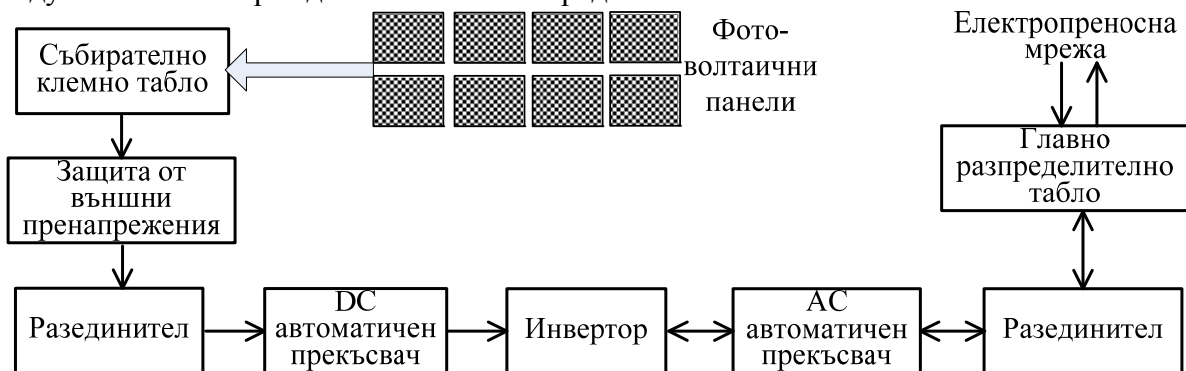
### **ВЪВЕДЕНИЕ**

Слънцето е най-големият напълно възобновяем източник за произвеждане на електрическа енергия. Технологиите за директно преобразуване на слънчевата светлина в електричество е наречена фотоволтаична. Тя се развива много бързо в последните години. Все по-широко приложение намират фотоволтаични системи в населените райони (за къщи, административни сгради, в промишлеността и др.), тъй като предлагат екологичен и много надежден метод за производство на електричество [1, 2, 3]. Такива системи се използват и в селското стопанство, в отдалечени райони и високопланински населени места, до които пренасянето на конвенционална ел. енергия се обуславя от много високи разходи.

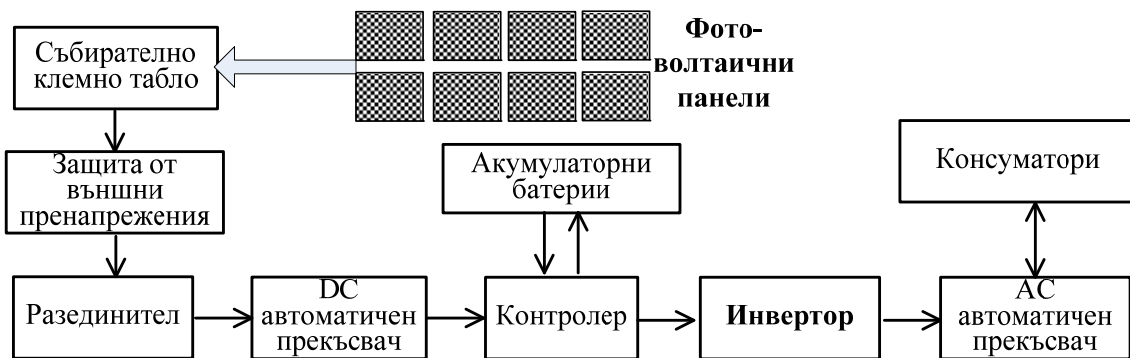
### **ЕЛЕМЕНТИ НА ФОТОСОЛАРНИТЕ ИНСТАЛАЦИИ**

Основният елемент на соларната инсталация са фотоволтаичните модули. Те преобразуват слънчевата светлина в постоянен ток. За преобразуването му в променлив се използва инвертор, който може да бъде свързан с електрическата мрежа или да хранва самостоятелен товар (консуматори). Следователно фотоволтаичните системи могат да бъдат класифицирани като свързани с електрическата мрежа (фиг. 1), автономни (фиг. 2) и хибридни (фиг. 3). Фотоволтаичните модули могат да бъдат

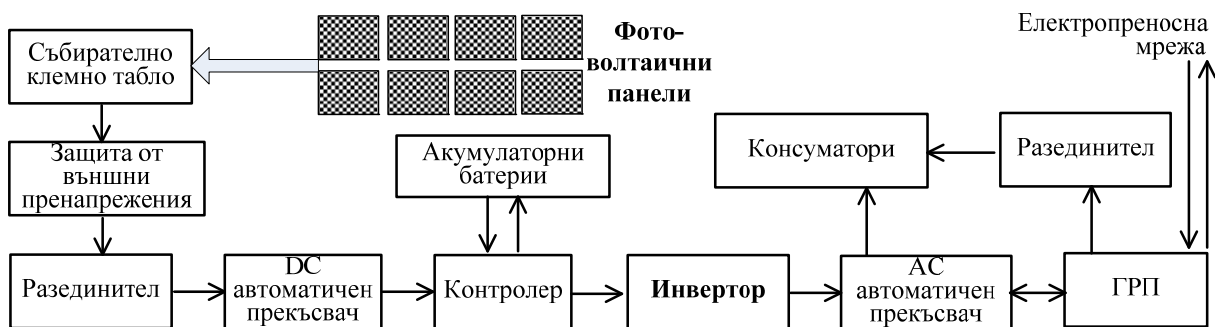
монтирани по няколко начина. Върху плосък покрив се избира оптималният ъгъл на наклон спрямо слънчевите лъчи (в зависимост от географската ширина). При наклонен покрив панелите се монтират успоредно на повърхността, като се оставя разстояние за охлаждане. В някои случаи се изгражда специална стряха или навес за монтаж на модулите или се вграждат в стените на сградата.



Фиг. 1 Свързана с мрежата фотосоларна инсталация



Фиг. 2 Автономна фотосоларна инсталация



Фиг. 3 Хибридна фотосоларна инсталация

За ефективността на фотоволтаичните панели е от значение разположението им спрямо слънцето. Увеличаване на изходната мощност на соларната система през различните часове на деня се постига чрез използване на следящи системи, които променят разположението на панела във всеки момент спрямо слънцето. Те, обаче, допълнително оскъпяват фотоволтаичната инсталация и често се прибегва до компромисен вариант, при който панелът е подвижен и ръчно се променя ъгълът всеки сезон или месец.

Соларните инсталации включват и други елементи в зависимост от вида на системата, нейното разположение и приложение. При автономните и хибридните системи се монтират акумулаторни батерии, които запасяват произведената и

неупотребена в момента електрическа енергия, за да се използва при нужда от консуматорите (напр. в тъмната част от денонощието, в облачни и дъждовни дни и т.н.). За регулиране на напрежението и тока при зареждане на батериите се използва контролер, чрез който те се предпазват от презареждане и се удължава срокът на експлоатацията им. Оборудването, осигуряващо баланс на системата, включва елементи за интегрирането на соларната инсталация към електрическата инсталация на сградата, комутационна и управляваща апаратура, прекъсвачи от двете страни на инвертора, защита от земно съединение, от мълнии, максималнотокова защита на панелите. Желателно е да бъде монтирана и измервателна апаратура за мониторинг на работата на системата и за индикация на консумацията на енергия.

Целта на доклада е да се проектира свързана с електрическата мрежа фотосоларна инсталация. За целта на покрива на сградата на първи учебен корпус на ВТУ „Тодор Каблешков“ са монтирани фотоволтаични панели за преобразуване на слънчевата енергия в електрическа, която се използва за собствени нужди на лаборатория „Възобновяеми енергийни източници“. Проектирането и изграждането на тази соларна система създава възможност за научни изследвания и експерименти от докторанти и преподаватели, както и за провеждане на лабораторни упражнения със студенти от специалности „Електроенергетика и електрообзавеждане“ и „Електромобили“.

## **ПРОЕКТИРАНЕ НА ФОТОСОЛАРНА ИНСТАЛАЦИЯ ВЪВ ВТУ**

Проектирането на фотосоларната инсталация включва определяне на размера и ориентацията на масива от фотovoltaични модули с цел да доставят очакваната електрическа мощност и енергия, както и избор на останалите компоненти от инсталацията.

*Определяне на консумираната мощност:* соларната система се използва предимно за експериментални и научни изследвания и за обучение на студенти. Избраната мощност е 3,36 kW, защото такива централи са широко използвани като системи за хранане на сгради. Осветлението на лаборатория „Възобновяеми енергийни източници“, компютърна техника и други маломощни консуматори са променливотоковият товар.

*Определяне на изходната мощност на фотоволтаичните модули:* соларната система произвежда електрическа енергия съобразно интензивността на слънчевата светлина, попаднала върху повърхността на масива от фотоволтаични панели. Тя се променя през деня и в различните дни, така че действителната изходна мощност варира непрекъснато.

Повечето соларни системи произвеждат по 55-110 W от квадратен метър площ, което се определя от разнообразието на използваните технологии и от ефективността на различните продукти. Ние разполагаме с 32 фотоволтаични модула Kaneka NB105, които са монтирани на покрива. Те са много подходящи за големи соларни централи, разположени на открито. Предлагат по-висока стойност на първоначалната мощност (до 136,5 Wp) и постигане на отлична ефективност при дифузна светлина. Тези модули генерират електрическа енергия дори при ниски стойности на слънчевото излъчване и са приложими при свързани с електрическата мрежа соларни централи. Изчислени са за тежки натоварвания от сняг до 2,400 Pa (2.4 kN/m<sup>2</sup>). Техническите им данни са показани в Табл. 1 [6]. Трябва да се има предвид, че изходните параметри са дадени като номинални от производителя при Стандартни условия на тестване (Standard Test Conditions – STC). Тези условия се създават лесно при заводски изпитания и позволяват лесно сравнение между различните продукти, но се налага да бъдат променени, за да се изчисли точно произведената електрическа енергия в резултат от общите външни условия. STC условия са:

- ◆ Температура на соларните клетки 25°C;
- ◆ Интензивност на слънчевото излъчване 1000 W/m<sup>2</sup> (често се отнася за пиково слънчево излъчване, сравнено с интензивността по обяд през лятото при ясно време);
- ◆ Слънчевият спектър е филтриран при преминаването през атмосферата, като коефициентът на въздушната маса е 1,5 (Air mass AM=1,5). Този коефициент определя дължината на прекия оптичен път през земната атмосфера, изразена като отношение спрямо дължината на пътя вертикално нагоре, т.е. в зенита.

Модулите Капека НВ105 имат толеранс на изменение на изходната мощност от -5% до +10% спрямо номиналната. При проектирането да се използва долната граница като отправна точка за изчисленията: приема се коефициент на производствен толеранс ( $K_{pt}$ ) 95%.

Изходната мощност на модула намалява с увеличаване на температурата [4]. При загряване вътрешната температура достига 50-75°C. За кристални модули се приема фактор на температурна редукция ( $K_{tr}$ ) 89% за пролетта и есента, при ясно време, по средата на деня.

Замърсяване и прах, натрупани върху повърхността на модула, водят също до редуциране на изходната мощност. Тъй като не е удобно да се извършва често почистване, нормално е да се приеме годишен фактор на редукция вследствие замърсяване ( $K_d$ ) 90%.

Таблица 1

STC мощност $P_{STC}$ ( $P_{max}$ )	105 Wp
STC номинално напрежение $U_{mpp}$	53,5 V
STC номинален ток	1,96 A
STC напрежение на празен ход (при отворена верига) $U_{oc}$	71,0 V
STC ток на късо съединение $I_{sc}$	2,40 A
Изменение на мощността (толеранс)	+10%...-5%
Номинална температура на работа на клетките (NOCT)	44°C
Температура на околната среда (от ... до)	-25...60 °C
Температурен коефициент на тока $I_{sc}$	+0,1%/K
Температурен коефициент на напрежението $U_{oc}$	-0,248V/K
Температурен коефициент на мощността $P_{max}$	-0,33%/K
Размери: 1210/1008/40 mm;                      Маса	18,0 kg

Максималната изходна мощност на соларната централа винаги е по-малка от сумата от максималната мощност на индивидуалните модули. Разликата е в резултат на незначителни несъответствия в изпълнението от отделните модули, нарича се фактор на не-съответствие и възлиза най-малко на 2% загуба на мощност в системата. Винаги има и загуби в окабеляването. Те трябва да бъдат сведени до минимум, но е трудно да се запазят под 3%. Ето защо е нормално да се приеме фактор на редукция от загуби на мощност ( $K_l, \Delta P$ ) 95%.

Постояннотоковата енергия, получена от соларната централа, се преобразува в променливотокова посредством инвертор. Има загуби на мощност при това преобразуване, както и загуби при пренасяне на енергията от покрива до лабораторията. Съвременните инвертори, използвани при фотоволтаични инсталации в сгради, се характеризират с върхов КПД 92-94%, посочен в техническата спецификация. Тези данни, обаче, също са измерени в добре контролирани заводски условия. В действителност в резултат на преобразуването и пренасянето на енергията могат да се приемат загуби 8-12%, т.е. за КПД на инвертора може да се използва стойност  $\eta_{inv} = 90\%$ . Следователно, изходната мощност на соларната централа трябва да бъде намалена с общия коефициент на редукция  $K_{red}$  изчислен по формулата:

$$(1) \quad K_{red} = K_{pt} \cdot K_{tc} \cdot K_d \cdot \eta_{inv} \cdot K_l ; \quad K_{red} = 0,65$$

Следователно номиналната мощност  $P_{STC}$  от един модул  $P^I$  е редуцирана:

$$(2) \quad P^I = K_{red} \cdot P_{STC} = 0,65 \cdot P_{STC}$$

За изходната мощност на соларната централа се полчава стойността:

$$(3) \quad P = n \cdot P^I = 32 \cdot 0,65 \cdot 105W = 2186W \approx 2,19kW$$

където  $n=32$  е броят на модулите.

През деня ъгълът на попадане на слънчевата светлина върху модулите се променя, което води до непрекъсната промяна на изходната мощност. Тя се увеличава от 0 (призори) постепенно до максимална стойност по обяд и след това отново намалява до 0 привечер. Въпреки че тази вариация се дължи отчасти на промяната на интензивността на слънчевото излъчване, изменението на ъгъла на лъчите спрямо модулите също оказва влияние. Наклонът и ориентацията на покрива имат не по-малко значение. За района на София максимална изходна мощност се получава при наклон на покрива  $32^\circ$ , ориентиран на юг (корекционен фактор  $K_o = 1.00$ ). Покривът на ВТУ не предлага възможност за южно изложение. Като оптимален вариант бе решено разположение на модулите на две групи по 16, съответно на изток и запад. Наклонът на покрива е  $26^\circ$ , следователно може да се приеме годишно редуциране на изходната енергия с 95% приблизително (корекционен фактор  $K_o = 0.95$ ).

Годишното производство на енергия зависи от продължителността на слънчевото излъчване през различните месеци на годината. По данни на метеорологичната обсерватория за района на София максималното годишно слънцегреене е  $t_s=1993 \text{ h}$  [5]. Следователно произведената от соларната централа енергия за 1 г. и средната стойност за 1 ден могат да бъдат определени по формулите:

$$(4) \quad E_y = P \cdot K_o \cdot t_s = 2,19kW \cdot 0,95 \cdot 1993 = 4146,5kWh$$

$$(5) \quad E_d = 4146,5kWh / 365 \approx 11,4kWh$$

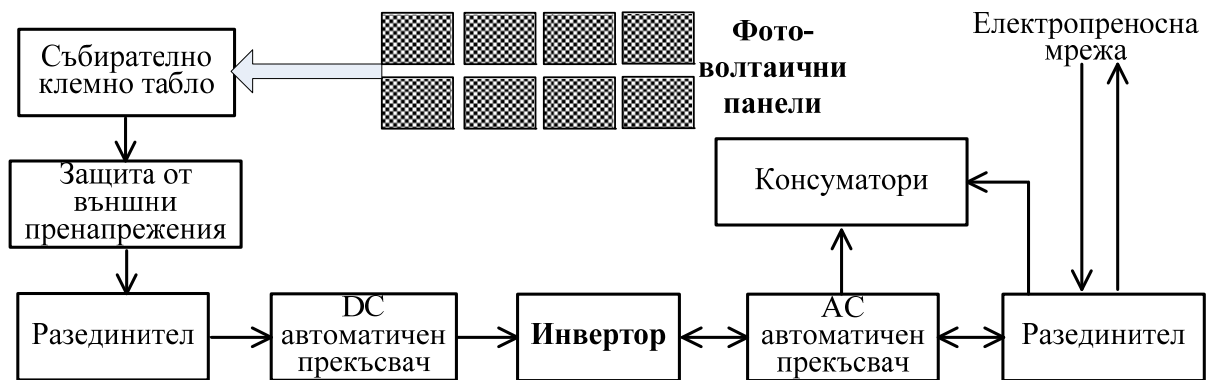
Тази енергия е достатъчна за храняване на описаните консуматори.

*Инвертор.* Входната му мощност не трябва да е по-малка от общата мощност на консуматорите. В соларната инсталация се използва инвертор IBC ServeMaster 3300MV. Неговите технически данни са показани в табл. 2 [7]. Инверторите от тази серия са произведени по иновативна технология и са подходящи за соларни централи с малка и средна мощност. Притежават два постоянно-токови входа с отделни устройства за следене на точката с максимална мощност (Maximum power point tracking – MPPT). Това създава възможност на инвертора винаги да използва максимално възможната мощност от соларните панели. Тези устройства компенсират загубите от частична сянка или в случай на промяна на параметрите на даден модул. Инверторът е с възможност за свързване към електрическата мрежа и не се влияе от промяната на напрежението в нея. Има много ниска консумация в режим на готовност и нощно време (8W и 0,2W съответно). Притежават комуникационен интерфейс и дисплей за мониторинг на работата на системата.

Схемата на проектираната соларна инсталация е показана на фиг. 4. Предвидени са всички необходими защити, както и комутационна и управляваща апаратура.

Таблица 2

Номинална входна мощност ( $P_{DC}$ )	3,6 kW
Номинална изходна мощност ( $P_{AC}$ )	3,3 VA
Номинално входно напрежение ( $U_{DC}$ )	310 V
MPP-напрежение	180-350 V
Максимално входно напрежение – самостоятелно/в паралел	450/410V
Изходно напрежение ( $U_{AC}$ )	230V+15%
Изходна честота ( $f$ )	(50±5)Hz
Номинален постоянен ток	5,8 A
Максимален постоянен ток $I_{DC}$ (2 входа)	2x10 A
Номинален променлив ток	14,5 A
Максимален променлив ток	15,5 A
Максимален КПД/ КПД по европейски стандарт	94,2/93,4%
Фактор на мощността при товар >20%	0,97
Коефициент на изкривяване на формата THD	5
Размери: 618/434/182 mm;	Маса: 20,0 kg
Интерфейс	RS-485; модем



Фиг. 4 Схема на проектираната фотосоларна инсталация

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Провеждането на научни изследвания и обучение на студенти изисква подходяща измервателна апаратура. Необходими са амперметри, волтметри, ватметри, чрез които може да се изследва ефективността на соларната централа при различни условия: влияние на ъгъла и интензивността на слънчевото излъчване, промяната на товара, почистването на панелите от замърсяване и др. Електромер отчита произведената електроенергия.

Използвайки комуникационния интерфейс RS485 на инвертора, стойностите на всички важни параметри могат да бъдат изпращани към компютър и следени в реално време:  $U_{DC}$ ,  $I_{DC}$ ,  $P_{DC}$ ,  $U_{AC}$ ,  $I_{AC}$ ,  $P_{AC}$ ,  $f$ ,  $t^{\circ}C$ , енергия (за ден, седмица, месец, година, обща). Състоянието на устройствата и съобщения за грешки също могат да бъдат изобразявани. Посредством модема, инсталиран в инвертора, всички величини могат да бъдат проследявани и през Интернет.

## ИЗВОДИ

В доклада е проектирана соларна централа, която се използва за научни изследвания и обучение на студенти. Чрез нея се намалява значително и разходът на енергия, тъй като тя захранва осветлението, компютърната техника и други маломощни консуматори в лаборатория „Възобновяеми енергийни източници“.

Изграждането на такава лаборатория подобрява значително качеството на обучение на студентите в тази все по-бързо развиваща се област, като се предоставят

възможности за провеждане на голям брой лабораторни упражнения с различна тематика, както и на научни изследвания от докторанти и преподаватели.

**ЛИТЕРАТУРА:**

- [1] Сибикин Ю.Д., М.Ю. Сибикин, „Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии“, Учебное пособие, Москва, Издательство КноРус, ISBN: 978-5-406-00378-0, 2010
- [2] Евтимов И., Р. Иванов, Г. Попов, „Възобновяеми енергийни източници“, Учебник, Русе, Издательство ПРИМАКС, ISBN: 978-954-8675-39-0, 2013
- [3] Bent Soresen, „Renewable energy, Conversion, Transmission, and Storage“, Academic Press, ISBN 978-0-12-374262-9, 2007.
- [4] Aldo Vieira da Rosa, “Fundamentals of Renewable Energy Processes”, Second Edition, ISBN: 978-0-12-374639-9, 2009.
- [5] <http://www.emde-solar.com>
- [6] <http://bgsolar.com/>
- [7] <http://3k-solar.bg/>
- [8] [http://www.energy.ca.gov/reports/2001-09-04\\_500-01-020.PDF](http://www.energy.ca.gov/reports/2001-09-04_500-01-020.PDF)

## SOLAR INSTALLATION FOR RESEARCH PURPOSES

**Ivan Milenov, Vasil Dimitrov**  
[milenov55@abv.bg](mailto:milenov55@abv.bg), [vdimitroff@abv.bg](mailto:vdimitroff@abv.bg)

**Todor Kableshkov University of Transport**  
**158 Geo Milev Str., Sofia1574,**  
**BULGARIA**

**Key words:** *Photovoltaic System, Energy Efficiency.*

**Abstract:** *The utilization of solar energy is a means of achieving sustainable energy development. In this paper, a solar PV installation is designed. It is mounted on the roof of the University building. All necessary components and modules to obtain stable output AC voltage regardless of the intensity of solar radiation are provided. Produced energy powers the lighting and other low-voltage consumers in the laboratory “Renewable energy sources”. This system is used for research and training of the students and improves the quality of students education. The lecturers and PhD students have the opportunity to set examinations on the solar PV system. This solar system also reduces electricity costs. The direct economic effect will be over 18 000 Euro as the life of these systems is over 20 years.*