

ЕФЕКТИВНОСТ НА СИСТЕМИ ЗА СЛЪНЧЕВО ПРОСЛЕДЯВАНЕ

доц. д-р Радостин Симеонов Долчинков
гл. ас. Пенка Вълкова Георгиева
Бургаски свободен университет

EFFECTIVENESS OF SUN TRACKING SYSTEMS

Radostin Dolchinkov
Penka Georgieva
Burgas Free University

Abstract: In this paper a short survey on photovoltaic systems is presented. Major problem in present photovoltaic systems is their effectiveness. One way to increase effectiveness is to adjust movements of the system according to the sun position. Therefore an algorithm for precise sun tracking is proposed and experimental results are given in this work.

Key words: sun tracking system, photovoltaic system, azimuth, zenith

1. Слънцето – чист и надежен източник на енергия

Слънчевата енергия представлява голям енергиен ресурс за България. Поради географското положение на страната, условията за използване на слънчева енергия са изключително благоприятни, особено в южните и източните райони. България може да се раздели на три слънчеви зони, като средната годишна продължителност на греенето е около 2150 часа (около 49% от максимално възможното). Въпреки че 77% от площта ѝ е заета от гори, обработваема земя и природни резервати, останалата територия би могла да се използва за изграждане на слънчеви централи. Производството на електроенергия от слънцето е сред най-актуалните направления в развитието на съвременната енергетика. Географските условия на България обуславят ресурс от 1300-1700 kWh/m² средногодишен лъчист поток (количество лъчиста енергия за всички дължини на вълните, падащ върху единица площ от повърхността на страната). Страната ни има достатъчно потенциал за използване на слънчева енергия, като в това отношение е сред слънчевите страни по света: средногодишното слънцегреене над Сандански е 2600 часа, над Пловдив 2250 часа, а над София – 2050 часа. Средният брой слънчеви дни в годината е 200.

В последните години развитието на технологии за директно преобразуване на слънчевата енергия в електрическа достигна пиков момент. Освен това правителствата на редица страни по света, в това число и на България, водят политика на стимулиране на инвестициите в строителството на съоръжения за производство на електроенергия от ВЕИ. На 19 юни 2007 г. Парламентът на Република България приема ЗАКОН ЗА ВЪЗОБНОВЯЕМИТЕ И АЛТЕРНАТИВНИТЕ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ И БИОГОРИВАТА, с който производството на електроенергия от ВЕИ става държавна политика.[1]

Тъй като в България годишното слънчево греене значително надвишава средноевропейските показатели, то инвестициите в соларни фотоволтаични паркове, дори без никакви субсидии, са много изгодно капиталовложение. Слънчевото греене като ресурс е практически неограничен и напълно безплатен.

II. Фотоволтаични системи

Единственият и практически неизчерпаем източник на суровина за производството на електричество посредством фотоволтаични клетки е слънцето. Нещо повече, фотоволтаичните клетки използват и дифузната светлина. Така дори при облачно време те могат да произвеждат електрически ток.

При работата си соларните модули не вдигат шум и не отделят вредни емисии. Електропроизводството от възобновяеми източници води до спестяване на фосилни горива (въглища) и разбира се до намаляване на неблагоприятните ефекти от тяхното изгаряне - увеличението на парниковите газове и опепеляването.[2]

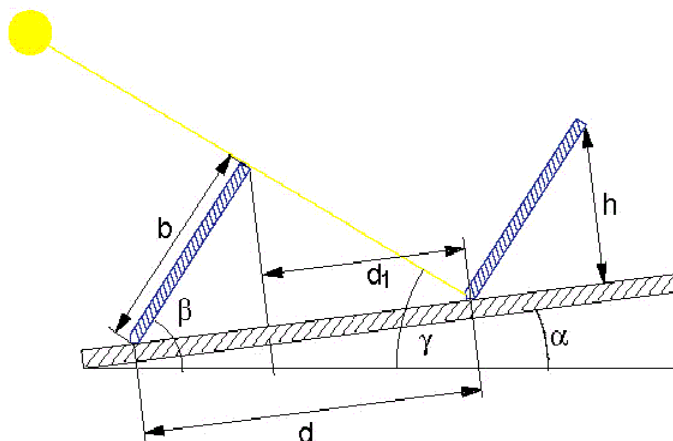
Фотоволтаичните системи биват следящи и стационарни. Следящите се делят на едноосно следящи и двуосно следящи. Стационарните системи се монтират на неподвижни конструкции, които се регулират при монтажа по азимут и наклон.

Според предназначението си фотоволтаичните системи биват два вида: свързани към мрежата и самостоятелни системи за независимо захранване.

Фотоволтаичните модули според вида си биват монокристални, поликристални и аморфни. Моно и поликристалните модули се отличават с по-високата си ефективност, коефициентът на полезно действие варира от 12-18%. Аморфните или още наречени тънкослойни панели, са с най-ниска цена от предлаганите на пазара. Цената им е ниска, но КПД на най-добрите достига едва 9%, за да се достигне еквивалентна мощност с моно и поликристалните модули, трябва да се монтират двойно повече модули

За повишаване на ефективността на фотоволтаичните системи е важно, управлението на съответните модули да постигне отдаване на максимална мощност (Maximum Power Point Tracker – MPPT). Тази мощност се изменя в зависимост от промяната на слънчевата радиация и температурата на модулите, които са различни за отделните части на деня.

При проектиране и изграждане на фотоволтаична система е необходимо да се намери равен терен или ако не е такъв да се нивелира. Ако самото място е наклонено цялостно на 20-30 градуса това ще доведе до спестяване на площта необходима за конструкцията. На фигура 1 е показано разположение на модули на PV система, като за границите на България те трябва да са наклонени на ъгъл от 30 градуса спрямо хоризонта.

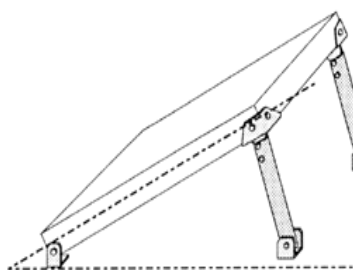


Фиг. 1. Разположение на модулите на фотоволтаична система

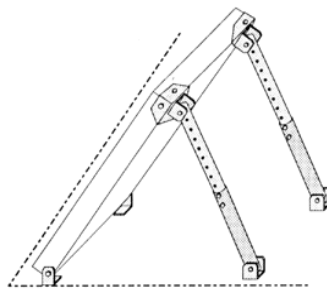
Ефикасността на системата за съхранение на слънчева енергия зависи до голяма степен от разположението на дадено устройство за съхранение на енергия, така както и потока от слънчева енергия при които оптималните теоретични резултати могат да се получат, когато устройството е позиционирано перпендикулярно на слънчевите лъчи.

На фигура 2 е дадено разположението на панелите през лятото, а на фигура 3 е показано разположението на панелите през зимата.

Хелиоцентричната позиция на нашата планета не е постоянна, нито пък ориентирането ѝ при ротация, следователно оптималното положение на устройство за улавяне на слънчева енергия може да бъде получено при механизъм на различно позициониране. Системите с вграден механизъм за проследяване траекторията на слънцето, познати още като тракери или позиционери, имат за цел да максимизират



Фиг. 2. Лятно разположение



Фиг. 3. Зимно разположение

производството на електроенергия чрез завъртане на фотоволтаичните панели в оптимална позиция. Насочването на модулите се реализира на базата на измерени стойности на слънчевата радиация или чрез контролер, конфигуриран за конкретното географско местоположение на всеки тракер. Използването на позициониращи конструкции увеличава ефективността на панелите с около 25% за едноосно следящите фигура 4 и с около 30-35% за двуосно следящите системи.



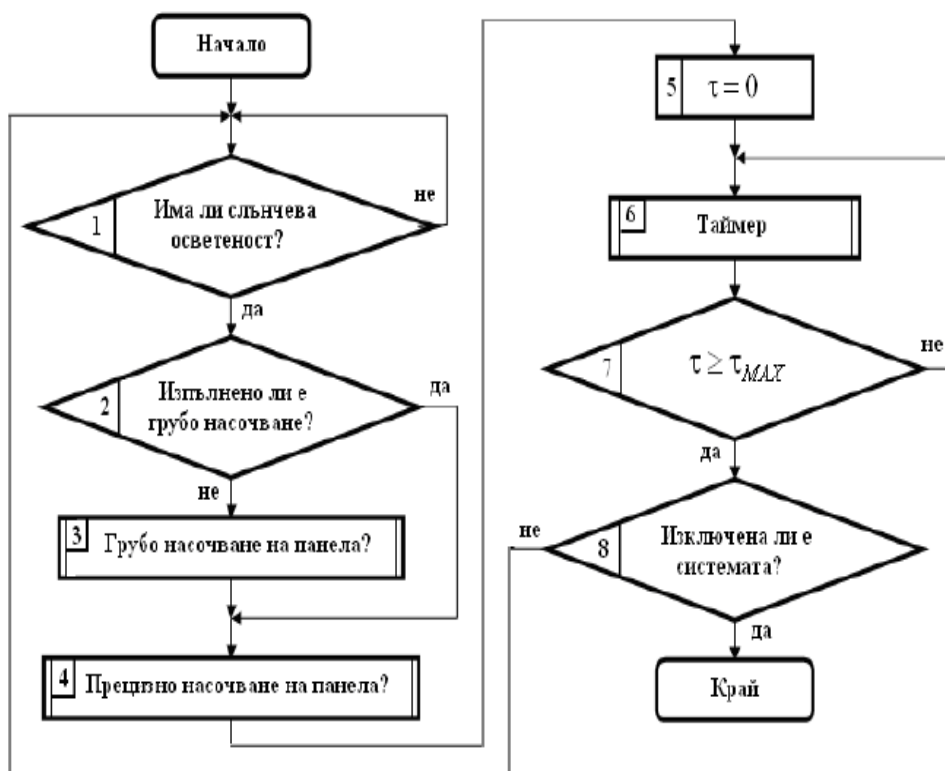
Фиг. 4. Едноосна следяща система

III. Методи за насочване на фотоволтаични панели

Съществуват различни методи за насочване на фотоволтаичните панели. Примерен алгоритъм за работа на електронна система за автоматично насочване на фотоволтаичен панел е даден на фигура 5.

Наклонът на фотоволтаичния панел към слънчевите лъчи е един от основните фактори, определящи неговия коефициент на полезно действие (фиг. 5, блокове: 2, 3, 4 и 6). Тази особеност се използва за увеличаване на добива на електроенергия. За точното позициониране на панела е необходимо наличие на система за управление.[7]

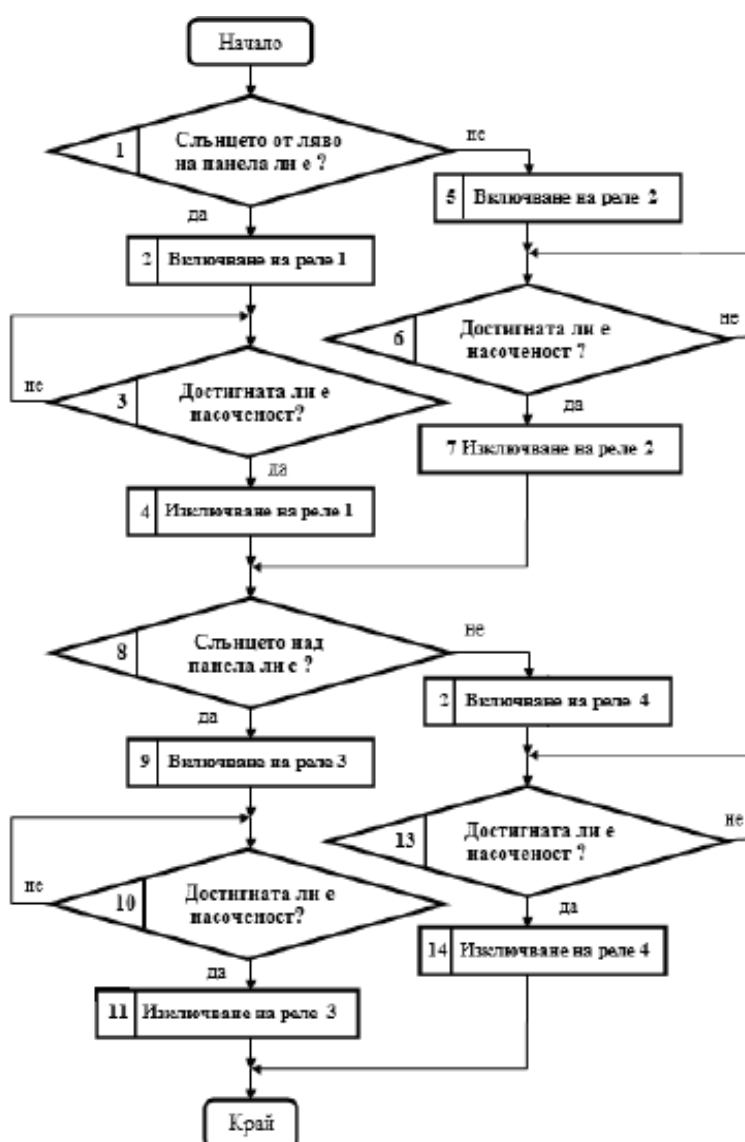
Управлението се базира на информацията, получена от първичния преобразовател за оценка местостоеенето на слънцето относно панела.



Фиг. 5. Алгоритъм за работа на електронна система за автоматично насочване на фотоволтаичен панел

Първо се проверява има ли осветеност на панела от слънцето (блок 1). Ако няма осветеност, се изчаква нейното появяване. При наличие на осветеност се проверява, извършено ли е грубо насочване на панела (блок 2). Ако то не е изпълнено, се извиква подпрограмата за грубо насочване (блок 3). След неговото изпълнение се преминава към подпрограмата за прецизно насочване (блок 4). Изпълнението на тази подпрограма е възможно и веднага след блок 2, ако се констатира, че панелът е вече грубо насочен.

На фигура 6 е представен алгоритъмът на подпрограмата за насочване на панела. Алгоритъмът е един и същ за „грубо“ и „прецизно“ насочване. Подпрограмите се различават по използваните критерии – за груба оценка или за прецизна оценка (блокове 1, 3, 6, 8, 10 и 13). В блок 1 се проверява, от коя страна на панела се намира слънцето по хоризонтала. Ако е от лявата страна се включва реле 1 (блок 2), ако е от дясната реле 2 (блок 5), при което панелът се завърта по хоризонтала в съответната посока. Следва следене за ориентиране на панела към слънцето – блокове 3 и 6, след което се изключват съответните задвижвания – блокове 4 и 7. Насочването на панела по вертикала е изпълнено аналогично чрез блокове от 8 до 14.



Фиг. 6. Алгоритъм на подпрограма за насочване на панела.

След прецизното насочване на панела се изчаква определена пауза (блокове 5, 6 и 7), след което цикълът се повтаря. Наличието на временен интервал между две последователни ориентирания на панела се обуславя от бавното движение на слънцето по зенита. Важен момент от работата на алгоритъма е проверката за наличие на осветеност от слънцето, чрез съответния критерий (критериите за оценка на местостоеното на слънцето относно панела и критериите за наличие на осветеност и грубо насочване подробно са разгледани в блок 1). Ако няма осветеност, насочването не се изпълнява. По този начин се премахват ненужни завъртания, които е възможно да се появят при недостатъчна осветеност от слънцето.

Структурата на електронната система е изградена на базата на електронен микроконтролер (фиг. 7) с включени към аналоговите му входове четири фототранзисторни преобразователя за оценка на местоположението на слънцето относно панела и два потенциометрични преобразователя, измерващи съответно наклона на панела относно хоризонта и завъртането му по хоризонтала.

Насочването на панела се извършва с четири релейни изхода – два за вертикално насочване и два за хоризонтално. За анализирани на получените резултати е предвиден мониторинг, включващ персонален компютър, свързан чрез сериен интерфейс към контролера. Измерва се също текущата мощност на панела.



Фиг. 7. Структурна схема на електронна система за автоматично насочване на фотоволтаичен панел

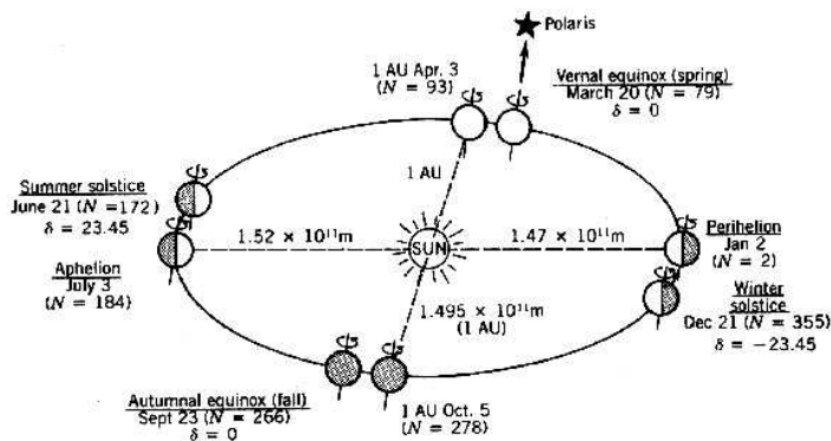
Към аналоговите входове са включени сигналите от първичния преобразовател за оценка местостоеното на слънцето относно панела (D1), от преобразователите за ъгъл на завъртане на панела по хоризонтала (D2) и по вертикала (D3), и от преобразователя, измерващ генерираната от панела енергия (D4). Изходите на микроконтролера са включени към изпълнителните механизми за завъртане на панела по хоризонтала (реле 1, реле 2) и по вертикала (реле 3, реле 4). Предвижда се свързване на едочиповия микроконтролер със система за мониторинг на базата на персонален компютър. Получената от преобразователите информация за ъгъл на завъртане на панела по хоризонтала (D2) и по вертикала (D3), и от преобразователя, измерващ генерираната от панела енергия (D4), се предава по серийният канал за обмен към системата за мониторинг на базата на персонален компютър.

При системите с концентрирани слънчеви мощности проследяването на слънцето е от особено важно значение. Системите могат да бъдат от тип концентрирани фотоволтаични, така както и системи от соларно-термален тип. От гледна точка на геометрията, те могат да проследяват на базата на една или две оси.

Тези методи могат да са пасивни, използвайки отворен подход или активни, използвайки затворен кръг.

Пасивните методи изчисляват слънчевото положение като функция от топоцентричната позиция и времето. Този тип на позициониране е изложен на по-голям риск от грешки, в случай, че не се получава обратна информация от съответната позиция на проследяващото устройство (тракера) във всеки един момент. Той също е лимитиран откъм прецизност само на база прецизността на алгоритмите (имайки предвид, че електро-магнитната прецизност е идеална). За този тип позициониране, вертикалното подравняване на оста на азимута е от особена важност за цялостната точност и прецизност.

Методът за активно проследяване използва светлочувствителна електроника за да може да „вижда“ слънцето и се позиционира по много динамичен начин към оптималната позиция. Ограниченията, прилагани към този вид проследяване се свързват с чувствителността на сензорите и нивото на интелигентност на системата. Този модел работи по метода на „най-ярките точки на небето“, т.е. нежеланото движение при „търсене на слънцето“ при облачно време е нещо, което може да се очаква и това да доведе до увеличаване на консумацията на мощност, механично износване и намаляване на цялостния положителен ефект и пригодност. Прецизността в този метод варира между от 0.2 до няколко градуса, в зависимост от системата.[4]



Фиг. 8. Земна орбита около Слънцето

Ротацията на земята около слънцето отнема приблизително 365.24 дни. Орбитата е елипсоидна, поради което дистанцията между земята и слънцето постоянно варира. Смяната на деня с нощта се дължи на въртенето на земята около своята ос и сезонните вариации, дължащи се на отклонението от оста на земята по отношение на елипсоидната равнина, която слънцето описва около земята (фиг. 8).

Положението на слънцето може да бъде описано по отношение на видимия азимутен и зенитен ъгъл. И двата ъгъла могат да бъдат определени като функция от променливите: ъгъл в местно време (w), ъгъл на падане (δ) и географска ширина (φ).

Местният ъгъл за време е линейна зависимост от местното слънчево време T_s , който се определя от 12.00 в момента, в който слънцето е на най-високата си точка. Поради елипсовидната орбита на земята, ъгълът на падане и вариациите на ротационната честота около оста си, истинското слънчево време може да се различава със 17 минути от средното слънчево време през годината, където средното слънчево време е дефинирано като продължителността на средния ден. Ъгълът на местното часово време w се измерва в градуси и е равен на:

$$w=15.(T_s-12) \quad (1)$$

Уравнението на местното слънчево време е предложено от Лам през 1981 г.:

$$T_s = T_k + \frac{EOT}{60} - LC - D \quad (2)$$

където

$$LC = \frac{LL - LS}{15}$$

при LL е местната географска дължина, LS е географската дължина на стандартния меридиан, D е равно на 1 по време на лятото и 0 в останалото време,

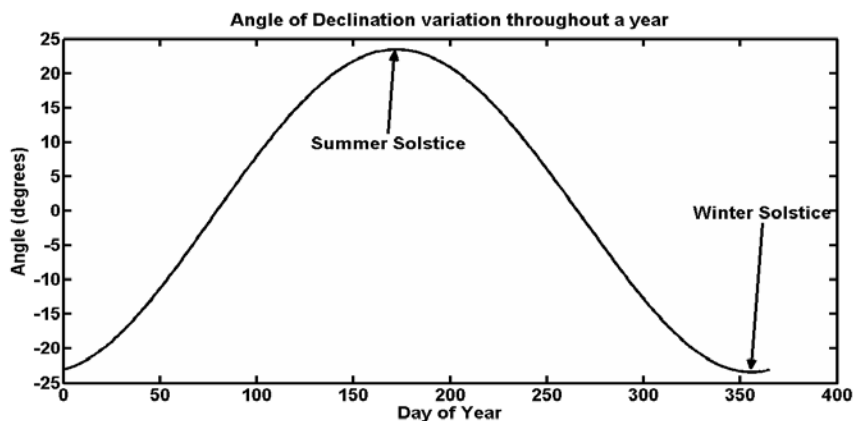
$$EOT = 60 \sum_{k=1}^6 \left[A_k \cdot \cos\left(\frac{360kN}{365.25}\right) + B_k \cdot \sin\left(\frac{360kN}{365.25}\right) \right] \quad (3)$$

за N – брой на дните във високосна година и приблизителните стойности на константите A_k и B_k са показани на таблица 1.

Таблица. 1

k	A	B
1	2.0870E-04	0.0000E+00
2	9.2869E-03	-1.2229E-01
3	-5.2258E-02	-1.5698E-01
4	-1.3077E-03	-5.1602E-03
5	-2.1867E-03	-2.9823E-03
6	-1.5100E-04	-2.3463E-04

Ъгълът на отклонение, който земната ос сключва с елипсовидната равнина се променя през годината (фиг. 9).



Фиг. 9. Ъгъл на отклонение – вариации през годината (лято-зима)

Един от начините за изчисление на този ъгъл на отклонение е предложен от Бурже през 1985 г.:

$$\delta = 0.372 + \sum_{k=1}^5 A_k \cdot \sin(kD) + A_6 \cdot \cos(kD) \quad (4)$$

Където

$$D = \frac{360}{362.25}(N - 79.346)$$

Алгебричният израз за слънчево издигане и азимутен ъгъл може да бъде получен по следния начин – ъгълът на слънчевия зенит е ъгълът, който векторът S сключва със зенитната ос на наблюдателя (фиг. 10), като

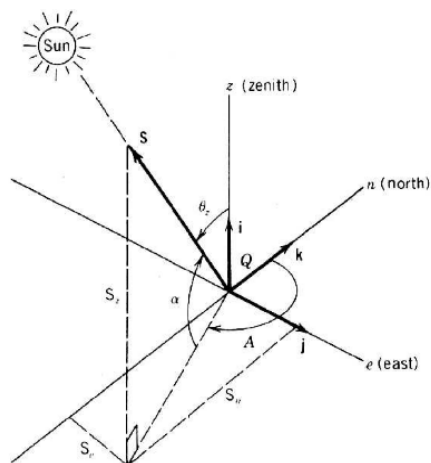
$$\varphi_z = 90^\circ - \alpha \quad (5)$$

Векторът S се изразява чрез равенството

$$S = S_z i + S_e j + S_n k \quad (6)$$

По отношение на слънчевата височина и азимут, координатите на вектора на слънцето се пресмятат по следния начин:

$$\begin{aligned} S_z &= \sin(\alpha) \\ S_e &= \cos(\alpha) \cdot \sin(A) \\ S_n &= \cos(\alpha) \cdot \cos(A) \end{aligned} \quad (7)$$



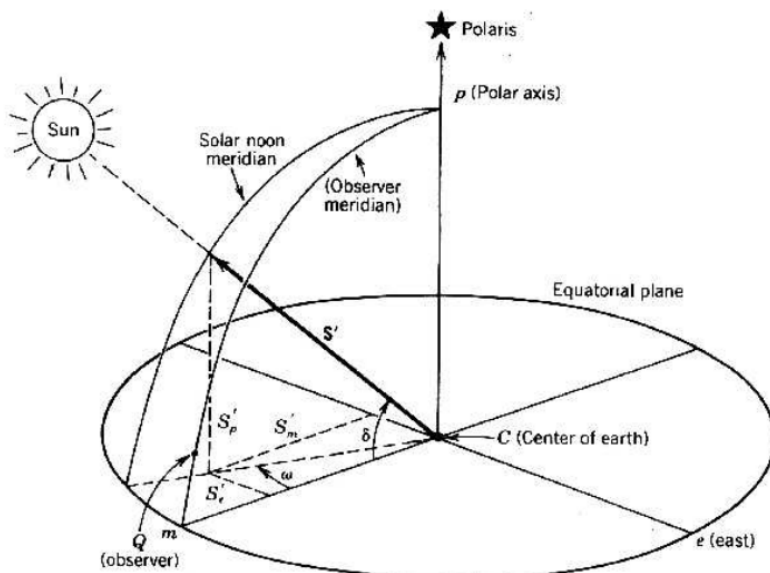
Фиг. 10. Слънчеви ъгли в равнината на наблюдателя

В геоцентричната координатна система оста *m* пресича центъра на Земята и точката на пресичане е между местния меридиан и екваториалната равнина (фиг. 11). Оста *E* е перпендикулярна на *m* и също лежи в екваториалната равнина. Оста *p* е перпендикулярна на екваториалната равнина през северния полюс. Новият слънчев вектор *S'* се получава от слънчевото отклонение и часовите ъгли по формулите:

$$S' = S'_m \cdot i + S'_e \cdot j + S'_p \cdot k \tag{8}$$

където

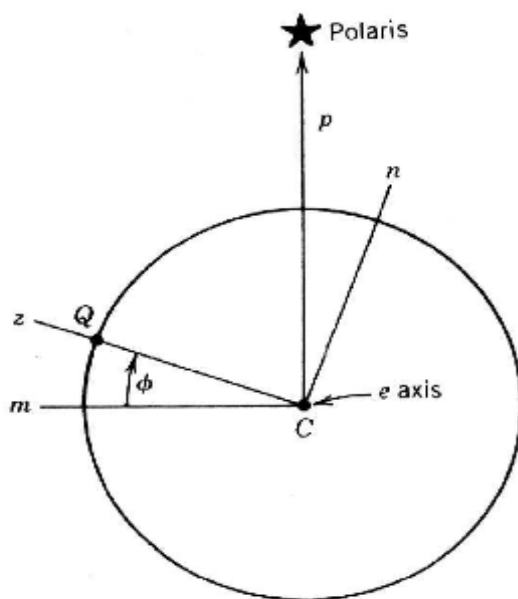
$$S'_m = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega), S'_e = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega), S'_p = \sin(\delta)$$



Фиг. 11. Геоцентрични слънчеви ъгли

Топоцентричните и геоцентрични координати са взаимно свързани посредством ротация около оста E през ъгъла на географската ширина φ . (фиг.12)

$$\begin{bmatrix} S_z \\ S_e \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S'_m \\ S'_e \\ S'_p \end{bmatrix} \quad (9)$$



Фиг. 12. Геоцентрична и топоцентрична координатни системи

От горните равенства за азимута и зенита се получават следните изрази:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arcsin(\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi)) \\ A &= \arctg(\sin(\omega) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi)) \end{aligned} \quad (10)$$

За реализация на показаните по-горе формули е създадено приложение в програмната среда MATLAB. Приложението е базирано на алгоритъм за пресмятане на точните стойности на азимутния и зенитния ъгли. Точността на алгоритъма е от порядъка на ± 0.0003 градуса, с изключение на екстремални температури на въздуха и атмосферно налягане.

Входните променливи са дата, време, географска дължина, ширина и височина. На фигура 13 са показани конкретните входни данни за фотоволтаична система, намираща се в землището на с. Пънчево.

```
clc
clear
location.longitude=27.155495100000053;
location.latitude=42.2765356;
location.altitude=192;
time.year=2012;
time.month=08;
time.day=30;
time.hour=12;
time.sec=0;
time.UTC=2;
time.min=0;
sun=sun_position(time, location)
```

Фиг. 13. Входни данни на софтуерно приложение за пресмятане на азимут и зенит

Като резултат от изпълнение на програмата се получават зенита и азимута в градуси. Освен това са предвидени следните допълнителни възможности за пресмятане по:

- пресмятане на земната хелиоцентрична ширина, височина и радиус вектор;
- пресмятане на геоцентричните височини и ширини;
- пресмятане на наклона на еклиптиката (в градуси);
- пресмятане на абревиационните корекции (в градуси);
- пресмятане на очевидната слънчева височина (в градуси);
- пресмятане на времето по Гринуич;
- пресмятане на геоцентричното положение на слънцето в зависимост дали слънцето е на север или на юг от екватора;
- пресмятане на центричните слънчеви позиции;
- пресмятане на центричния часови ъгъл;
- пресмятане на центричните зенитни и азимутни ъгли.

На фигура 14 са показани получените резултати за зенита и азимута на слънцето на 30.08.2012 за фотоволтаичната система в землището на с. Пънчево в различни часове от деня – 5:00, 10:00, 12:00, 14:00 и 18:00.

Пънчево, near Sredets Bulgaria						
Дата на изследване	30.08.2012г.					
	<ul style="list-style-type: none"> • The latitude for this location is: 42.2765356 (ширина) • The longitude for this location is: 27.1554951 (дължина) • The altitude for this location is: 192 meters(надморска височина) 					
	Hour	5:00 AM	10:00 AM	12:00 PM	14:00 PM	18:00 PM
	zenith	97.0069	44.2281	33.5893	41.0733	81.8846
	azimuth	71.2163	129.5591	174.6868	223.1226	274.4905

Фиг. 14. Резултати от софтуерно приложение за пресмятане на азимут и зенит

Заклучение:

Проследяването на слънцегреенето се прилага за да се увеличи производителността на соларния парк чрез насочване на фотоволтаичните или концентрираните фотоволтаични панели, следвайки слънцето от зори до вечер, като се улавя максимум слънчева радиация за възможно най-дълго време.

Соларните проследяващи устройства имат положително влияние върху общите ползи за системата, при което инверторът работи максимално дълго на по-добро функционално ниво.

Литература:

1. Божинов, Я. „Възобновяеми енергийни източници” – Технически университет - Варна, 2004.
2. Калчевски, Ст. „Възобновяеми енергийни източници, вторични енергийни ресурси и съвременни аспекти при тяхното оползотворяване”, С., 2012.
3. <http://www.shtrakov.net/>
4. http://wikipedia.org/wiki/Solar_tracker/
5. <http://www.ekoel-bg.com>
6. <http://ecoproject-bg.com/>
7. <http://www.tu-sofia.bg/>
8. Младенчева, Р., „Фотоволтаични електросистеми”, Ековат Технологии, 2009.