

ГЛАВА 2: СЛЪНЦЕТО КАТО ИЗТОЧНИК НА ЕНЕРГИЯ

2.1. Цели

След усвояване на лекционния модел, обучаемите трябва да са в състояние да:

- обяснят модела на "абсолютното черно тяло";
- дефинират термина слънчевата радиация;
- обяснят парниковия ефект ;
- посочат факторите, които влияят на работоспособността на фотоволтаичните клетки;
- класифицират фотоволтаичните клетки;
- аргументират видовете слоеве, които се използват за направата на фотоволтаични клетки;
- обяснят принципа на работа на ФВ клетки;
- посочат техническите характеристики на ФВ клетки;
- начертаят и обяснят заместващата електрическа схема на ФВ клетки;
- обяснят настройките и работните режими на ФВ клетка;
- определят параметрите на ФВ клетки и модули;
- изложат структурата на ФВ система;
- посочат и обяснят характеристиката на ФВ модули;
- определят ролята на инвертора при съвместна работа с ФВ система ;
- оразмерят ФВ система.

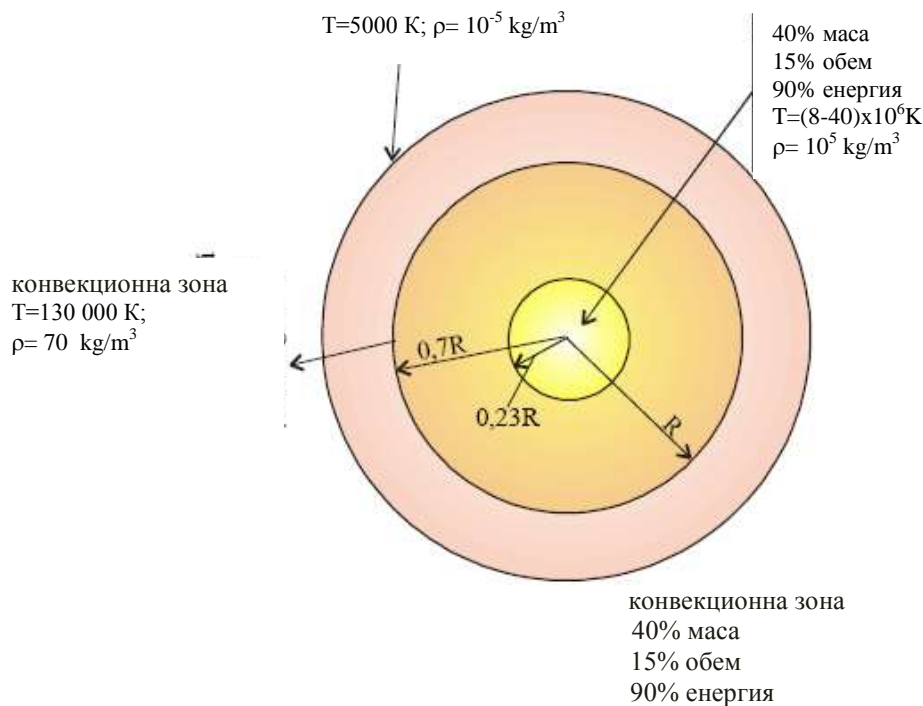
2.2. Строеж на Слънцето. Характеристики и параметри на слънчевата радиация.

Работата на една система за преобразуване на слънчева енергия в топлина или електрическа се основава на точната оценка на слънчевата радиация за даденото място и на познаване свойствата на слънчевата радиация.

Слънцето е най-близката звезда до Земята. То е разположено на разстояние от около $1,5 \times 10^{11}$ m. На фиг. 2.1 е показана опростена структура на Слънцето и геометричните зависимости на системата Слънце - Земя.

Енергията на Слънцето е в резултат от няколко ядрени съединителни реакции, основният процес от които е водород (4 протона), който се преобразува и образува хелий. Масата на ядрото на хелия е по-малко от масата на 4 протона. Разликата в масите се преобразува в енергия според формулата на Айнщайн $E = mc^2$.

Диаметърът на Слънцето е около 110 пъти по-голям от диаметъра на Земята: съответно $1,39 \times 10^9$ m и $1,27 \times 10^7$ m. Слънчевото ядро е с радиус около $0,23 R$ (R – радиуса на слънчевият диск) и обем, който отговаря на повече от 15% от този, който представя натуралния термоядрен реактор. Температурата на ядрото е около $(8-40) \times 10^6$ K и 90% от енергията е освободена. Плътността на ядрото е 100 пъти по-голяма от тази на водата и неговата маса е 40% от общата маса. На разстояние от $0,7 R$ от центъра, температурата спада до 130 000 K и плътността се повишава до 70 kg/m^3 . Областта между $0,7$ и $1,0 R$ се нарича конвекционна зона (следователно процеса на топлинна конвекция е основен). Температурата намалява до 5000 K и плътността е много ниска – около 10^{-5} kg/m^3 .



Фиг. 2.1. Опростената структура на Слънцето

Абсолютното черно тяло е физически модел, използван да опише характеристиките на радиационният спектър на тяло с постоянна температура T . Абсолютното черно тяло е едно идеално тяло, което има абсорбционен фактор равен на 1 и рефлексен фактор 0. Този модел е показан на фиг. 2.2. Сърцевината има постоянна температура T . Тя е изолирана от всички страни, с изключение на тесните отвори. Вътрешните страни на ядрото имат рефлексивен фактор 1. Вероятността един фотон да влезе в ядрото през тесен отвор и да може го напусне е почти нищожна. По този начин моделът е точно черен (невидим). Въпреки това, ядрото с температура T излъчва електромагнитни вълни през отвора. Спектрална плътност на мощността зависи от температурата T и от дължината на вълната на електромагнитната радиация λ . Аналитичната връзка между плътността на мощността, температурата и дължината на вълната се дава с формулата на Планк:

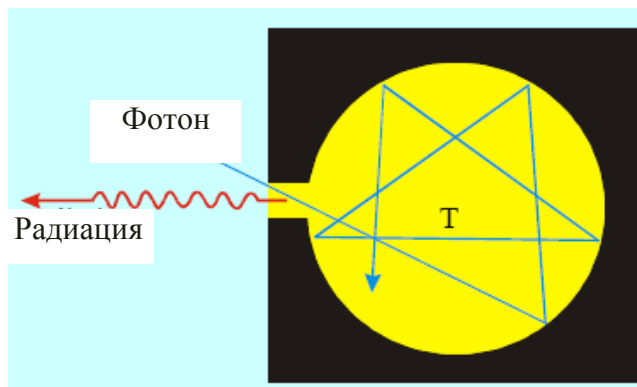
$$W_{\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad W/(\text{m}^2 \cdot \text{deg}) \quad (2.1)$$

където $h = 6,63 \times 10^{-34}$ е константата на Планк, J.s;

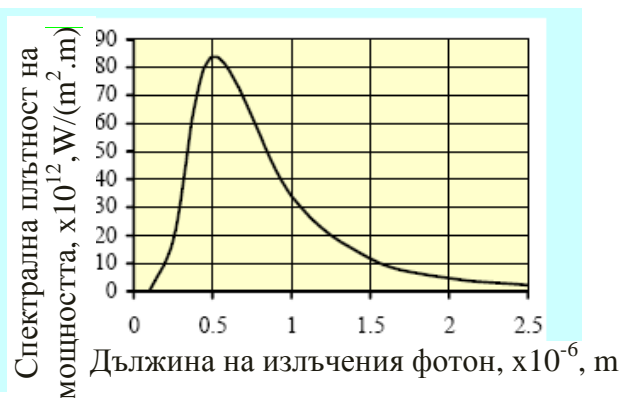
$k = 1,38 \times 10^{-23}$ - константата на Болцман, J/deg ;

$c = 299\,722\,458$ – скоростта на светлината във вакуум, m/s.

Изразът (2.1) дава възможност за моделиране на слънчевата радиация с висока точност. На фиг. 2.3 е показана спектрална плътност на мощността на повърхността на Слънцето, изчислена в съответствие с (2.1), за ефективна температура на абсолютно черно тяло, равна на 5800 K. Ефективната температура се разглежда като температурата на абсолютно черно тяло, излъчващо същата енергия като Слънцето.

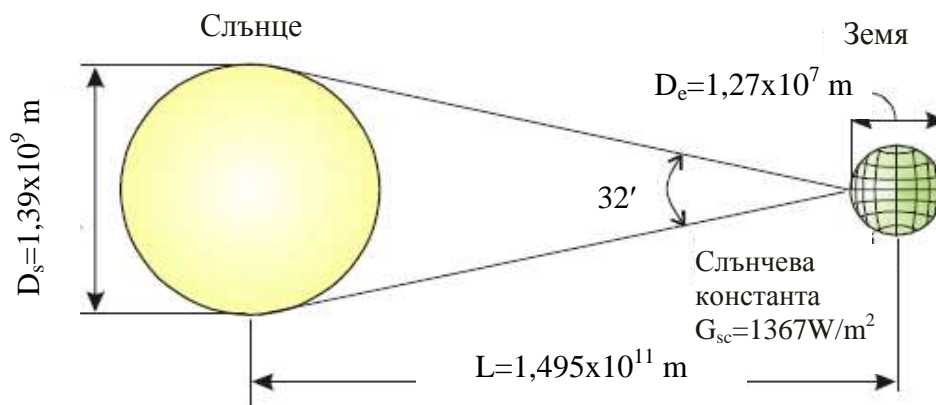


Фиг. 2.2. Модел на абсолютно черно тяло



Фиг. 2.3. Спектрална характеристика на абсолютно черно тяло

Планетата Земя се движи по елиптична орбита около Слънцето (отклонението за обиколка не надвишава 1,7%) (фиг. 2.4).



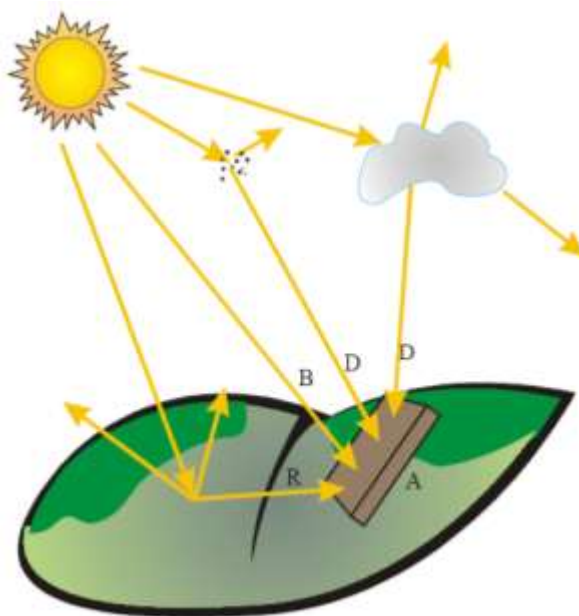
Фиг. 2.4. Геометрията на Слънчево - Земната система

Слънцето, видно от Земята, има формата на диск с приблизителен ъглов диаметър $32'$. Слънчевата радиация може да бъде определена с помощта на абсолютното черно тяло с ефективна температура от около 5777 K. Резултатите от пресмятанията за абсолютно черно тяло и от измерванията показват, че $6,4\%$ от енергията на електромагнитното излъчване се пада на ултравиолетови лъчи с $\lambda = (0-0,38) \mu\text{m}$, $48,0\%$ - на видимата област с $\lambda = (0,38-0,78) \mu\text{m}$ и $45,6\%$ - инфрачервените лъчи с $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$.

Слънчевата радиация е комплекс от електромагнитни вълни с дължина от $(0,2-2,5) \text{ m}$. Енергията с дължина на вълната над $2,5 \text{ m}$ може да се пренебрегне.

Облъчването (лъчението) се измерва във W/m^2 и представлява моментната плътност на слънчевата радиация. Например, ниво на облъчване от 1000 W/m^2 означава, че за всяка секунда, върху един квадратен метър от повърхността, попада енергиен поток, равен до 1000 J .

Радиацията (експозицията), се измерва или в kWh/m^2 или в MJ/m^2 и представлява плътността на енергията на слънчевата радиация. Очевидно е, че това е интегрираната стойност на облъчването за определен период от време - един час, ден или месец.



**Фиг. 2.5. Компоненти на слънчевата радиация върху абсорбираща повърхност A:
B – директна; D – разсеяна; R - отразена**

За изчисляване на фотоволтаични системи плътността на енергията на слънчевата радиация се измерва в kWh/m^2 и често се отнася за пиковите часове на Слънцето. Това означава, че продължителността на времето с ниво на слънчевата радиация 1 kW/m^2 е получено след интегрирането на енергийна плътност през целия ден.

Директната радиация е радиация, получена директно от Слънцето, без да има разсейвания в атмосферата. Сянката на даден обект се появява само когато има директно излъчване. Директната слънчева радиация е означена с B.

Разсеяната (дифузната) радиация, означена с D, е слънчев лъч, който преминава през атмосферата и е разпръснат във всички посоки (фиг. 2.5). Дифузната радиация винаги има, дори и в ясен слънчев ден тя е около 10%. В този случай, слънчевите лъчи са разпръснати от молекули кислород, въглероден диоксид, прахови частици и др. и небето става синьо. Ако небето е облачно, директното излъчване е равно на нула, и има само дифузна радиация. Общата слънчева радиация G е сумата от три компонента: директна B, дифузна D и отразена радиация R.

Отразената радиация се отбелязва с R. Обикновено се работи с радиация, която се отразява от повърхността на Земята и която попада върху слънчевия колектор или върху фотоволтаичен панел. В повечето случаи, този компонент не се използва при изчисленията, освен за колекторни или сдвоени фотоволтаични панели (с две повърхности - едната ориентирана към Слънцето, а другата към повърхността на земята). Моментната стойност на радиацията върху повърхността на един обект би била равна на сумата на пряката и дифузната радиация (фиг. 2.5):

$$G = B + D. \quad (2.2)$$

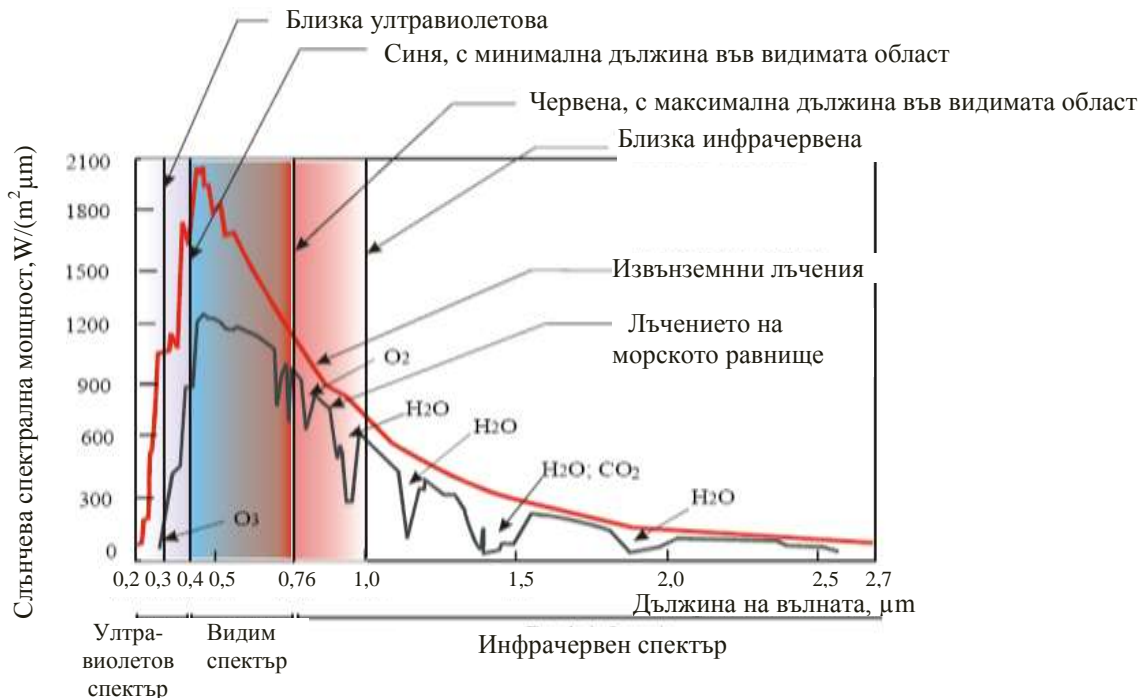
Слънчева радиация върху повърхността на Земята – плътността на мощността на слънчевото излъчване S в космоса е константа и е равна на 1367 W/m^2 . Повърхността, изложена на радиацията е равна на πR^2 , където R е радиусът на Земята с обща площ на земното кълбо $4\pi R^2$. Средната плътност на мощността на излъчването S_{med} , попадащо на Земята ще бъде:

$$S_{\text{med}} = \frac{S}{4} = \frac{1367}{4} = 342 \text{ W/m}^2. \quad (2.3)$$

Слънчевата светлина, която преминава през атмосферата, подлежи на промяна. Една част от нея се абсорбира от молекулите на въздуха, друга се разсейва (дифузен компонент), а

трета прониква в атмосферата без промяна (директен компонент) и се поглъща или отразява (отразен компонент) от обекти на повърхността на Земята.

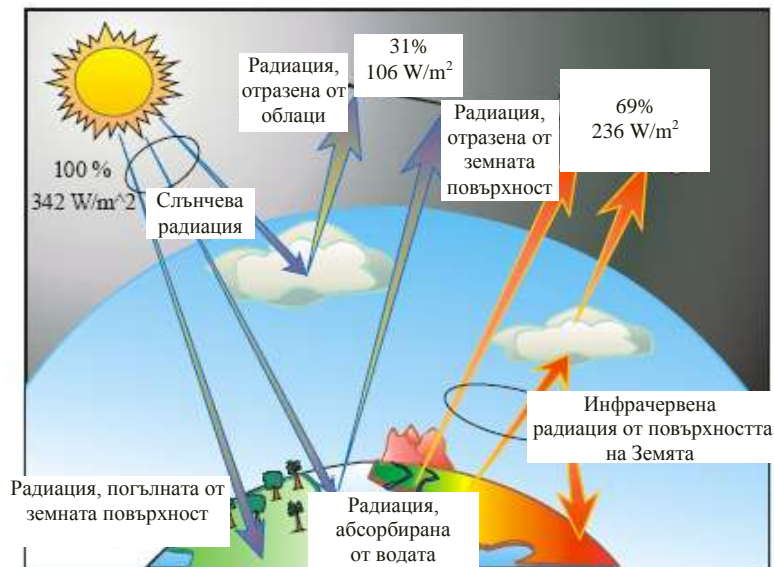
Земната атмосфера не е абсолютно прозрачна среда за слънчевата радиация. Тя се променя количествено и качествено в зависимост от съдържанието на газове, водна пара и др., участващи в състава на атмосферния въздух (фиг. 2.6). Количеството ултравиолетова радиация в общия поток лъчиста енергия, доставена от Слънцето е незначително.



Фиг. 2.6. Спектрално разпределение на слънчевата радиация

Слънцето е основен източник на енергия, която определя климата на Земята. Всеки квадратен метър от външната обвивка на атмосферата получава по 342 W, от които 31% (106W), се отразяват незабавно в космоса от облаците, атмосферата и повърхността на Земята (фиг. 2.7). Останалите 236 W/m² се абсорбират от повърхността на почвата, водата на океана и от части от атмосферата. Повърхността на Земята отразява в пространството същото количество енергия 236 W/m². Поради обмяната на енергия между повърхността на Земята, атмосферата и космоса се запазва една постоянна средна глобална температура от около 15 °C на морското равнище, която намалява до -58°C в горните слоеве на тропосферата.

Атмосферата на Земята съдържа редица газове: въглероден диоксид CO₂, метан CH₄, N₂O, азотен оксид и водни пари H₂O. Обща черта на ПГ е, че те поглъщат спектъра на инфрачервената радиация, излъчвана от повърхността на Земята, атмосферата и облаците. По този начин феноменът **поглъщане – излъчване – поглъщане** води до запазване на енергия в долния слой на атмосферата.



Фиг. 2.7. Относително равновесие на потока от енергия в системата Земя-атмосфера

Парниковият ефект играе решаваща роля в поддържането на живота на Земята. Ако го няма парниковият ефект температурата на Земята ще се определя от баланса между количеството енергия, освободено от Земята в Космоса и тази, получена с помощта на слънчевата радиация. В съответствие със закона на Стефан-Болцман, енергията, излъчвана от тяло с ефективна температура T_e се определя от израз:

$$W_e = \sigma \cdot A \cdot T_e^4, \quad (2.4)$$

където $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ е константата на Стефан-Болцман, $\text{W/m}^2 \text{ K}^4$;
 A – повърхността на тялото, m^2 ;
 T_e – температурата на тялото, K .

Формулата е получена чрез интегриране на отношенията на мощността на спектралната плътност. В случая на Земята $W_e = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$. От друга страна, Земята получава от Слънцето енергия, равна на $0,69 S/4$ (фиг. 2.7). При топлинен баланс, ефективната температура на земната повърхност T_e е:

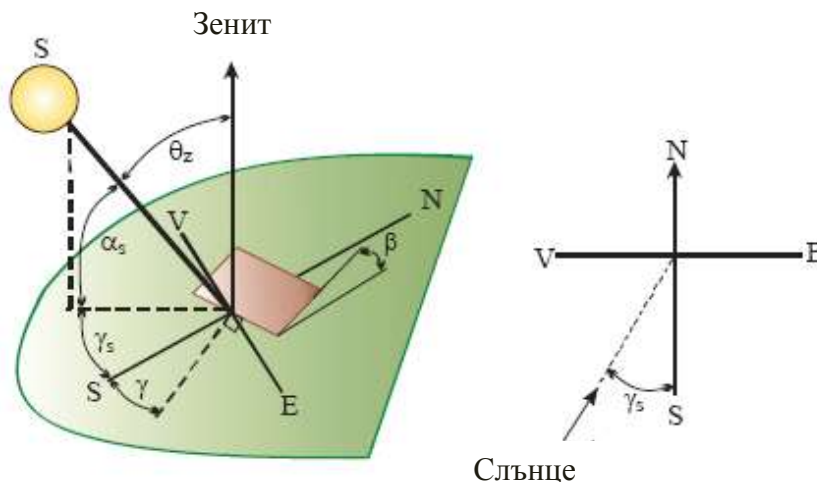
$$T_e = \sqrt[4]{\frac{0,69S}{4\sigma}}. \quad (2.5)$$

Изчисляването на разполагаемата слънчева радиация.

За да се проектира механизъм за конвертиране на слънчевата енергия в топлина или електрическа, е необходимо да се знае слънчевата радиация на повърхността на слънчевия колектор или PV модул (панел). Слънчевата радиация е променлива величина, която зависи от редица фактори: географска широчина на точка от земната повърхност и височина на страната, годишния сезон, ден, час, степен на облачност, съдържание на прах, водни пари и аерозоли в атмосферата и др. Очевидно е, че може да има един или повече математически изрази, които позволяват изчисляване на слънчевата радиация, като се вземат предвид всички тези фактори в частност, случайния характер на облачността – съдържанието на прах, аерозоли и др.

Проектирането на слънчева система и нейната производителност се основават на системни измервания на слънчевата радиация. В повечето случаи се използват резултатите на измененията, получени за хоризонтална повърхност на пряката (директната) и дифузната радиация за интервал от време един час.

Ъгълът на инклинация β е ъгълът между повърхността, за която се изчислява слънчевата радиация и хоризонталната повърхност $-180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ (фиг. 2.8). Тази стойност не надвишава 90° .



Фиг. 2.8. Към обяснение на ъглите:

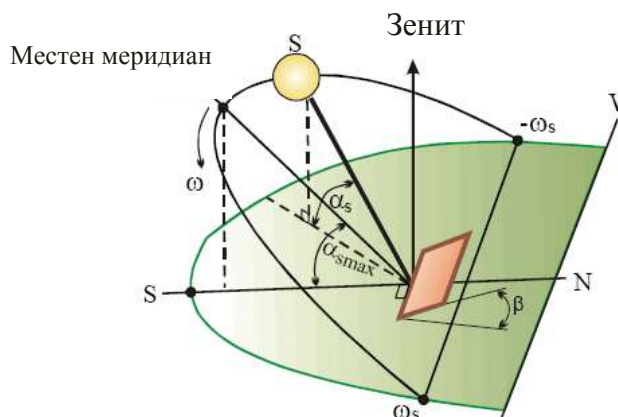
наклон β , азимут γ , слънчев азимут γ_s , ъгъл на издигане на Слънцето α_s

Ъгъл на издигане на Слънцето α_s е ъгълът между хоризонта и линията, която свързва Слънцето с точката на наблюдение, т.е падащият слънчев лъч с точката на наблюдение (фиг. 2.8).

Ъгъл на зенит θ_z - ъгълът между вертикалата и линията, която свързва Слънцето с точката на наблюдение или допълващия до 90° ъгъл α_s (фиг. 2.8).

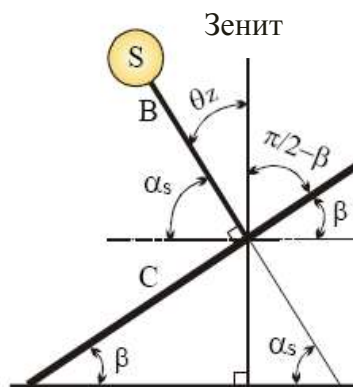
Часов ъгъл на Слънцето ω - определя позицията на Слънцето върху небесната сфера в определено време. Той е равен на нула, когато Слънцето преминава през местния меридиан, т.е по пладне. Ъгълът приема положителни стойности на изток и отрицателни на запад (фиг. 2.9). С други думи, ω_s съответства на ъгъл при изгряване на Слънцето, а $-\omega_s$ при залязване. Очевидно е, че на всеки час Слънцето си променя ъгъла с 15° . Следователно позицията му може да се определи за всеки час T чрез:

$$\bar{\omega} = 15(12 - T). \quad (2.6)$$



Фиг. 2.9. Към часовия ъгъл ω

На фиг. 2.10 е представен слънчев колектор С, насочен право към юг (ъгълът $\gamma = 0$). Повърхността на колектора С е наклонена спрямо хоризонта под ъгъл β .



Фиг. 2.10. Директна слънчева радиация върху наклонена повърхност по обяд: $\omega = 0$, $\gamma = 0$

Слънчевата радиация върху повърхността на колектора е максимална по обяд, когато ъгълът на издигане на Слънцето α_s е най-голям (фиг. 2.9). Тя трябва да бъде най-голяма и заради начина, по който преминават слънчевите лъчи и ъгълът $\omega = 0$. По този начин е изпълнено задължителното условие слънчевата радиация да попада перпендикулярно върху повърхността на колектора С. От фиг. 2.10 следва, че:

$$\theta_z = \beta, \quad \beta = \Phi - \delta.$$

Тест за самоподготовка

- Слънчевата радиация върху повърхността на колектора е максимална, когато:
 - Ъгълът на издигане на Слънцето е максимален;
 - Измененията на лъча на Слънцето са минимални;
 - Ъгъла на часа е равен на нула.

Отговор: а, б, в
- Ъгълът на издигане на Слънцето е:
 - Ъгълът между вертикалата и линията, свързваща Слънцето с точката на наблюдение;
 - Ъгълът между хоризонта и линията, която свързва Слънцето с точката на наблюдение;
 - Ъгълът на Слънцето в небето, определен по едно и също време.

Отговор: б
- Слънчевата радиация е променлива величина, която зависи от следните фактори:
 - Географска ширина и височина на обекта;
 - Сезон, ден и час;
 - Метеорологичните условия.

Отговор: а, б, в
- Моментната стойност на сумарната слънчева радиация е:
 - Сумата от директна, дифузна и отразена радиация;
 - Сумата от пряката и дифузната радиация;
 - Сумата от дифузната и отразената радиация.

Отговор: а

5. Формулата на Планк дава връзка между:

- Плътноста на мощността и температурата;
- Плътноста на мощността и дължината на вълната;
- Плътноста на мощността, температурата и дължината на вълната.

Отговор: в

Тест за оценяване

- Обяснете какво представлява „абсолютно черно тяло”!
- Кои са компонентите на слънчевата радиация?
- Обяснете термина парников ефект!

2.3. Фотоелектрическа енергия. Увод. Фотоволтаична клетка и нейните характеристики

Антоан Бекерел открива възможност за генериране на електрическа енергия във веригата под действието на светлина (1839г.). Френкел (1935г.) и Ландау (1936г.), обясняват условията за изпълнението на този феномен. Превръщането на слънчева радиация в електрическа енергия с помощта на фотоелектричния ефект се постига директно във вътрешността на слънчевите клетки, чрез пренебрегване на преобразуването в топлина.

Фотоволтаичната клетка е елемент, изграден от полупроводникови материали.

Фотоволтаичните клетки могат да бъдат изградени от:

- Монокристални полупроводникови материали;
- Тънки слоеве;
- Поликристални или аморфни;
- Si и GaAs, осигуряващи висока ефективност от порядъка на (18-25)%;
- Поликристален CdS, аморфен хидрогенериран Si. Притежават по-ниски нива на ефективност (5-12)%.

Приложения, в които фотоволтаичните клетки работят като електрически генератори:

- Генератори с малка мощност (джобни калкулатори, преносими радиостанции и др.);
- Средно-мощни местни генератори (домакински уреди, електрически превозни средства и др.);
- Високо мощни генератори за променливотокови вериги.

Фактори, които оказват влияние върху ефективността на ФВ клетка

ФВ клетки преобразуват само част от лъчистата енергия в електрическа. Останалата част не се използва, поради последователност от процеси, по време на преобразуването:

- процеси, които протичат, когато енергията е под форма на излъчване (неизползвана радиация);
- процеси, които протичат в полупроводниците след като слънчевата радиация е била преобразувана;
- всеки процес може да бъде дефиниран с „частична ефективност”.

Резултантната ефективност на ФВ клетка е вследствие на всички „частични ефективности”:

- проникване на светлината през повърхността;
- непълна абсорбция;
- генерация на заредени частици;
- загуба на мощност от рекомбинация;
- загуба на мощност.

Половината от енергията, погълната от Слънцето се преобразува в топлина. Тази загуба на максимална ефективност на фотоволтаични клетки е около 25%. Една PV клетка се състои от два или повече слоя полупроводникови материали, най-често силициеви. Тези слоеве са с дебелина между 0,001 и 0,2 mm и са инжектирани с определени химични елементи (примеси), за да се образуват „P” и „N” полупроводници. Тази структура е подобна на диодите. Когато силициевият слой е изложен на светлина той ще предизвика „възбуждане” на електрони в материала, чрез които ще се генерира електрическа енергия.

Клетките, наречени *фотоволтаици*, обикновено имат много малка повърхност и токът, генериран от една клетка е малък, но при реализирането на последователно или паралелно свързване на тези клетки могат да се осигурят достатъчно големи токове, които да бъдат използвани в практиката. За тази цел, клетките са херметически затворени в панели, които осигуряват механична здравина и устойчивост срещу атмосферни влияния.

Слънчевите клетки могат да бъдат класифицирани по няколко критерия. Най-често използваният е дебелината на материала. Тук се разграничават клетки с дебел и тънък слой. Според основната структура ФВ клетки биват *кристални* (моно- и поликристални) и съответно *аморфни*.

Дебелослойни

- Монокристални клетки (C-Si) – отличават се с висок процент на ефективност. При масово производство той може да достигне над 20%.

- Поликристални клетки (mc-Si)- за серийно производство, като вече е достигнато ниво на енергийна ефективност над 16%.

Тънкослойни

- Клетки с *аморфен силиций* (a-Si) - най-голям пазарен сегмент за тънкослойни клетки. Енергийната ефективност на модулите е от 5 до 7%.

- *Кристални силициеви клетки*, бившите микрокристални (μc-Si), аморфен силиций в комбинация с висока ефективност, със същата технология както на аморфен силиций.

В зависимост от използваните материали силициевите клетки се класифицират на:

1. Полупроводникови елементи от група III-V (Ga-As клетки)

Отличават се с висока производителност, устойчивост на температурните промени, по-малки топлинни загуби от тези на ФВ клетки от кристален силиций, устойчивост на ултравиолетова радиация, скъпа технология. Обикновено се използват в космическата промишленост (GaInP / GaAs, GaAs / Ge).

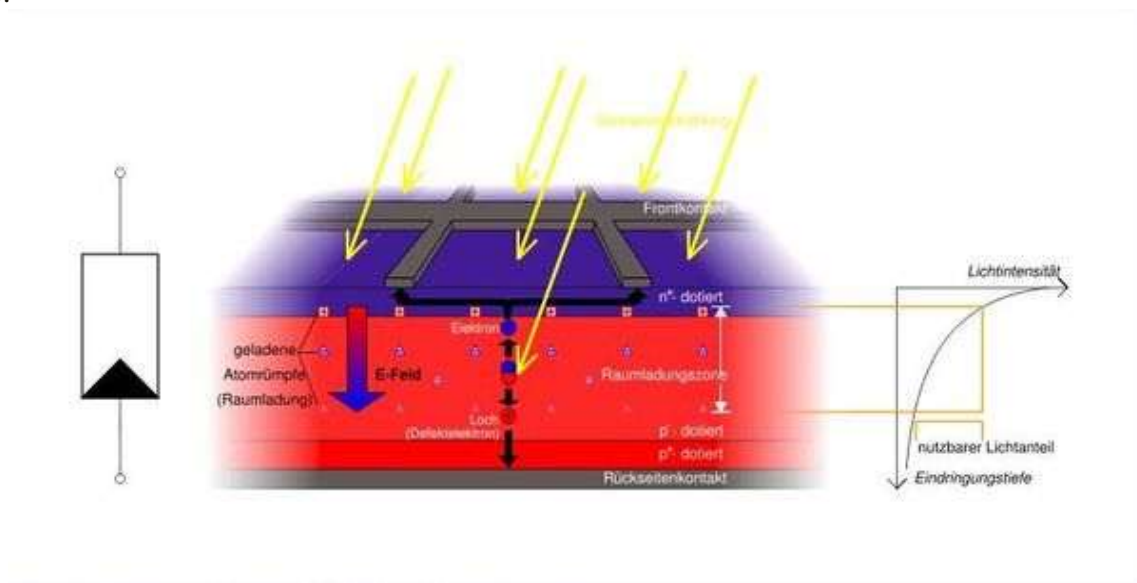
2. Полупроводникови елементи от група II-VI (Cd-Te клетки)

Получават се от най-съвременни технологии CBD (подаване на тънки слоеве на големи площи в среда на средна киселинност, температура и концентрация реактивен контрол). В лабораторни условия е постигната ефективност от 16%, но модулите произведени досега са постигнали ефективност под 10%, поради което те притежават малка надеждност. От съображения за опазване на околната среда е малко вероятно, те да имат широко използване.

1. **CIS, CIGS-CIS клетъчен стандарт** за медно-индиев-диселенид, произведени от експерименталната компания Würth Solar от Марбах; съответно медно-индиев-дисулфид, който компанията Sulfurcell произвежда в Берлин и CIGS индий-галий-меден-диселенат, произведен в опитен завод в Упсала/Швеция.
2. **Слънчеви клетки**, базирани на органични съединения, органична химична обработка, базирана на съединения, които могат да доведат до по-евтино производство на слънчеви клетки. Те обаче имат, по-ниска ефективност и срок на служба до 5000 часа.
3. **Пигментни клетки**, наречени Гретцел (Grätzel) клетки, използват естествени пигменти за преобразуването на светлината в електричество, процедура, която се основава на ефекта на фотосинтеза.
4. **Полупроводникови-електролитни клетки**, например: CuO/NaCl. Фабричните клетки са много удобни за използване, но мощността и сигурността са ограничени.

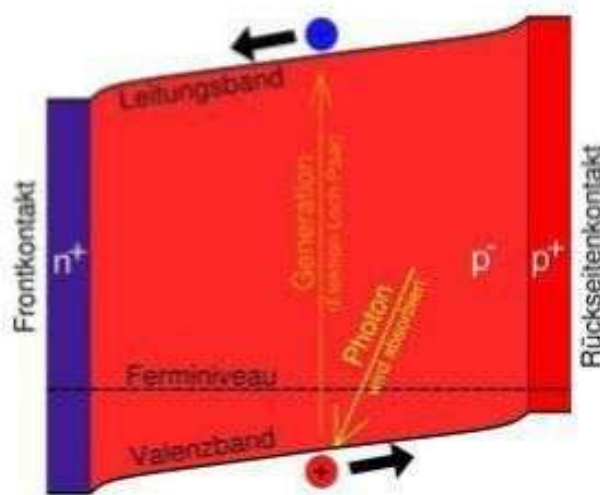
5. Клетки с полимерна основа - в момента те са на етап изследователска фаза.

Селенът и телурът се намират в малки количества в анодната утайка, получена в резултат от процеса на електролиза на мед и медни производства. Използва се само част от утайките. В момента част от полупроводниковите слънчеви клетки се произвеждат на основата на силиций. Полупроводниковите ФВ клетки, използвани за производството на енергия, са свързани в модули. На един модул има няколко реда от соларни клетки. Те са свързани последователно на предната и задната част на модула, за увеличаване на мощността. По този начин се използват проводници с по-малко сечение, отколкото за паралелно свързване. За защита на соларни клетки от ефекта на лавината в мястото на свързване, поради по-висок потенциал (например частично засенчване на модула), се използват защитни диоди. Те трябва да се свържат със соларните клетки (байпас) (фиг. 2.11, 2.12).



Фиг. 2.11. Принцип на работа на полупроводникова ФВ клетка:

Фотоните с по-голяма енергия разкъсват ковалентните връзки и се получават свободни електрони и дупки. Под действие на електрическото поле на прехода електроните се натрупват в N-полупроводника, който се оказва отрицателният полюс на клетката, а дупките - в P-полупроводника (положителен полюс).



Фиг. 2.12. Опростена структура на ФВ клетка с извод – наличие на два слоя. В единия преобладават електроните (n – отрицателен слой), а в другият – дупките (p – положителен слой).

Полупроводниковите ФВ клетки са изградени на принципа на фотодиода – с широка повърхност и не се използват като детектори за радиация, а като енергийни източници. Това,

което е интересно за този вид полупроводници е, че поглъщането на енергия (топлинна или светлинна) доставя носители на заряд (електрони и дупки). Това изисква вътрешно електростатично поле за тези усилватели, за да се създаде електрически ток, който ги насочва в различни посоки. Това вътрешно електрическо поле се появява в непосредствена близост до р-п прехода. Поради експоненциалното намаляване на интензивността на светлинния поток в дълбочина, този преход трябва да бъде най-близо до материала, за да проникне колкото е възможно по-дълбоко.

Този преход се създава чрез контролирано въвеждане на примеси. Под действието на фотонните свободни носители на заряд се появяват в границите на прехода, от който електроните се ускоряват към вътрешността, а дупките - към повърхността. Някои от тези свободни носители на заряд рекомбинират в прехода и получената енергия се разсейва в топлина. Резултатният ток може да бъде използван от потребителите чрез зареждане на батерия или инвертор. Максималното напрежение на една слънчева клетка (например за най-често използваните кристални силициевы клетки) е 0,5 V.

Структурата на слънчевата клетка е направена по такъв начин, че да абсорбира повече светлина и да има повече р-п преходи. За тази цел повърхността на електрода трябва да бъде прозрачна. Контактите в този слой трябва да бъдат колкото се може по-тънки, на повърхността трябва да се прилага антирефлексно покритие, за да се сведе до минимум отражението на падащата светлина. Антирефлексният слой на слънчевите клетки се прави в черно-син цвят, които без него ще бъдат сребристо-сиви. За съвременните слънчеви клетки, силициевият нитрат се получава с помощта на PE-CVD процес (плазмено-химическо свързване на пари). Антирефлексният слой е с дебелина около 70 nm (1/4 от дължината на вълната е с коефициент на пречупване 2,0). По същия начин, слоевете от SiO₂ и TiO₂ се използват като рефлексни слоеве и се нанасят с помощта на AP-CVD процес - химическо свързване на пари при атмосферно налягане. Дебелината на слоя оказва влияние върху цвета на клетката. Дебелината на покритието трябва да бъде еднаква, защото няколко нанометра отклонение увеличава степента на отражение. ФВ клетките имат син цвят, но те трябва да имат такава дебелина, която съответства на дължината на вълната на червената светлина, защото тя се абсорбира по-добре от силиция. Следователно ФВ клетките могат да бъдат изработвани в различни цветове - червен, жълт и зелен. Тези клетки ще отговарят на специфични архитектурни изисквания, но те ще имат по-малка ефективност.

В случай на слой от силициев нитрат и от силициев диоксид, антирефлексният слой има за задача да намали скоростта на рекомбинациите на повърхността. Ако първоначално за производството на слънчеви клетки се използваха отпадъчни материали от производството на полупроводници, то днес се използват материали, произведени за тази цел. Полупроводниковата индустрия разполага с почти идеален материал - силиций. Той е евтин, може да се изтегля в кристали, с висока степен на чистота и може да се инжектират примеси за получаване на полупроводник тип „N” или „P”. С помощта на окисляването може да се създадат тънки изолиращи слоеве. Широчината на силициевите зони не е много подходяща за директно използване на фотоелектричния ефект. Слънчевите клетки, базирани на кристален силиций, трябва да имат дебелина на слоя 100 μm или повече, за да може ефективно да се абсорбира слънчевата светлина. За тънкослойни клетки, изработени от GaAs кристалната структура на силиция с дебелина 10 μm е нарушена.

В зависимост от състоянието на кристалният силиций, се разграничават следните видове:

- Кристалните клетки, които са в резултат на така наречените Wafer (силициевы слоеве в един кристал). Тези кристали са основния материал за производството на полупроводникови елементи и са доста скъпи;
- Поликристалните клетки, съдържат области с кристални равнини с различна ориентация. Те могат да бъдат произведени чрез метода на зонно топене, който е по-евтин и затова най-често се използва за получаване на фотоволтаични устройства. Често те се наричат поликристални слънчеви клетки;

- аморфно-слънчеви клетки се състоят от тънък слой аморфен силициев двуокис (без кристализации) и затова се наричат тънки филмови клетки. Могат да се произвеждат чрез кондензация на пари. Процесът на получаване на силиция е много евтин, но имат нисък спектрален добив на слънчевата светлина. Притежават обаче предимства при слаба слънчева светлина;
- Микрокристални – тези клетки са с тънък слой от микрокристална структура. Имат по-добри характеристики от аморфните клетки и имат дебел слой като поликристалните;
- Последователно свързани слънчеви клетки - последователно подредени и съединени слоеве на слънчеви клетки. Обикновено това е смес от поликристални и аморфни слоеве. Слоевете са от различни материали. По този начин се използват различни спектри на дължината на вълната на светлината. С помощта на покриването на по-широк спектър от слънчевата светлина, тези клетки имат по-висока ефективност от стандартните слънчеви клетки. Тези слънчеви клетки се използват за производството на слънчеви панели, но са сравнително скъпи. Ориентировъчна оценка за тяхната работа може се получи, с помощта на комбинация на системи от лещи, така наречените концентриращи системи.

Обикновените слънчеви клетки се изработват с помощта на няколко метода за производство. Първичната суровина за производство на силиций са различни халогенно водородни съединения на силиция. Процесът протича на няколко етапа при висока температура в атмосфера на цинкови пари и водород. За производство на слънчеви клетки е много важна чистотата на силициевата пластина, за да се осигури възможно най-дълъг живот на токоносителите, а в микроелектрониката – много високата чистота изисква да се ограничава дебелината на слоя до (20-30) μm . В момента се използва силиций с много висока чистота за производството на соларни клетки. В момента се извършват проучвания и се разработват нови методи и технологии на производство за по-евтини и оптимизирани клетки.

Въпреки, че производството на чист силиций е енергоемко, в зависимост от използваната технология изразходваната енергия може да бъде „възстановена” в рамките на 1,5 до 7 години. Като се има предвид, че срокът на експлоатация на ФВ панели е над 20 години, това води до положителен енергиен баланс.

Тънкослойните слънчеви клетки се в различни разновидности като субстрат и кондензиран материал, с различни физически свойства и изпълнение. Тънкослойните слънчеви клетки се различават от традиционните клетки (слънчеви, базирани на кристални силициеви пластини) преди всичко по отношение на производствените технологии и дебелината на материала. Физичните свойства на аморфния силиций са различни от тези на кристалния, което определя и различни стойности на параметрите.

Светлината в кристалните слънчеви клетки се абсорбира от повърхностния слой (на дълбочина около $10\mu\text{m}$). В сравнение с кристалните силициеви клетки, тънките филмови клетки са 100 пъти по-тънки. Тънките клетки се получават най-вече чрез кондензация в газовата фаза върху материал, който може да бъде стъкло, метално фолио, пластмаса или друг материал.

Едно от основните свойства на тънките филмови клетки е, че те не изискват твърда подложка, като например стъкло и алуминий. Гъвкавите слънчеви клетки могат да бъдат прикрепени към конструкцията или да бъдат прикачени към основата. По-малката ефективност е приемлива, когато тегловният фактор е по-важен от оптималното преобразуване на клетките. В този тип клетки се намалява повърхността на полупроводниковия материал и светлината се концентрира върху по-малка площ, с помощта на лещи, които са много по-евтини, отколкото полупроводниковия материал. Обикновено този тип клетки, използващи полупроводниковите елементи от III-V група, се прилагат при последователно свързване на три слоя. Поради използването на лещи, панелните клетки трябва винаги да се ориентирани перпендикулярно на посоката на слънчевата светлина.

Електрохимичните слънчеви клетки, базирани на пигментните клетки са известни също и като Grätzel клетки. За разлика от клетките, представени досега клетката Grätzel се получава с помощта на поглъщане на светлинният пигмент и титанов оксид като полупроводник. Като пигменти се използват сложни метални съединения на рутений, но за демонстрационни цели може да се използват и органични пигменти, като хлорофил.

Слънчевите клетки, използващи органични компаунди също се характеризират с полупроводникови свойства. В тези полупроводникови материали светлината откъсва електрони от валентните връзки, но те имат спектър с много малка дължина на вълната. Ето защо често се използват два полупроводника с различни нива на енергия, за предотвратяване на загубата на тези токоносители. Ефективността на клетка с площ 1cm^2 е над 5%.

Тест за самоподготовка

1. Слънчевите клетки се класифицират според дебелината на материала на:

- а. Дебелослойни клетки;
- б. Аморфни клетки;
- в. Тънкослойни клетки.

Отговор: а, в

2. Структурата на слънчевите клетки е направена така, че:

- а. Да абсорбира повече светлина;
- б. Да създава повече преходи;
- в. Да има повече свободни токоносители.

Отговор: а, б, в

3. При преобразуването на лъчистата енергия в електрическа, ФВ клетки губят енергия поради:

- а. Излъчването;
- б. Непълното поглъщане;
- в. Преобразуването в полупроводниковите материали.

Отговор: а, б, в

Тест за оценяване

1. Избройте и опишете основните видове ФВ клетки!

2. Обяснете технологията на производство и принципа на действие на полупроводникови клетки!

3. Какви видове силиций се използва за производство на ФВ клетка според кристалната структура на материала?

2.4. Фотоволтанична слънчева енергия. Параметри на ФВ модули и клетки.

Въздействие на слънчевата енергия и температурата върху характеристиките на ФВ модули и клетки. Фотоелектрически модули.

Спецификации.

Техническите параметри на ФВ клетки, се дават за стандартни условия (STC)*:

- Интензивност на слънчевото лъчение - 1000 W/m^2 ;
- Постоянна температура на слънчева клетка - 25°C ;

* Standard Test Conditions – Стандартни условия за изпитване.

- Маса (оптична) атмосфери - AM 1,5 (по DIN EN 61215, IEC 1215, DIN EN 60904, IEC 904).

Глобалният AM 1,5 показва отслабването на слънчевата радиация на земната повърхност, в зависимост от географската ширина. В зимни условия се наблюдават стойности от AM 4 до AM 6. Поради атмосферното поглъщане, спектърът на слънчевата радиация, падащ върху панела също е изместен.

Най-общо радиацията се състои както от разсеяна, така и от директна компонента. Трябва да се отбележи, че в действителност особено през лятото по обяд, температурата на слънчевите клетки (в зависимост от местоположението, условията, вятъра и др.) може да достигне от 30 до 60° C, което води до намаляване на производителността. Поради тази причина се въвежда параметър, който отчита температурата P_{NOCT} при нормална работа (при нормална работна температура на клетката).

При изложението на материала са използвани следните съкращения:

- SC: късо съединение;
- OC: Отворена верига;
- MPP: Максимална точка на мощността;
- PR: Коефициент на преобразуването.

Характеристики на ФВ клетки са:

- U_{OC} – напрежение на празен ход;
- I_{SC} – ток на късо съединение;
- U_{MPP} - номинално напрежение;
- I_{MPP} - номинален ток;
- P_{MPP} - номинална мощност;
- FF- коефициент на запълване;

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}, \quad (2.7)$$

- Мощността се променя вследствие изменението на температурата на клетките;
- η - ефективност на ФВ клетка

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A \cdot P_{opt}}, \quad (2.8)$$

където A е облъчената площ, m^2

P_{opt} – светлинният поток.

ФВ клетки могат да достигнат мощност от 160 W/m². В рамките на модулите мощността върху повърхността ще бъде по-малка, защото между клетките и краищата има определено разстояние.

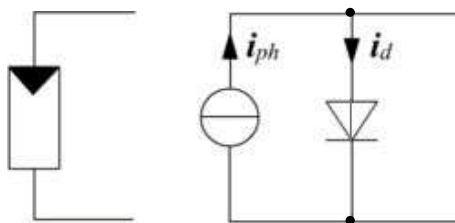
Ефективността е представена чрез съотношението между енергията, произведена от панелите и мощността, която се съдържа в общата падаща светлина. Полупроводниците със забранена зона, използват само част от слънчевата светлина. Максималната теоретична ефективност, която може да бъде достигната в този случай е 33%, а максималната теоретична ефективност на системите с голям брой забранени зони, които реагират на всички дължини на вълните на слънчевата светлина е 85%.

Таблица 2.1

| Материал | Ефективност AM1,5 | Срок на експлоатация | Цена, EUR/W |
|--------------------------------|-------------------|----------------------|-------------|
| Аморфен силициев диоксид | (5-10) % | < 20 години | |
| Поликристален силициев диоксид | (10-15) % | 25-30 години | 5 |
| Монокристален силициев диоксид | (15-20) % | 25-30 години | 10 |
| Галиев арсенид (еднослойни) | (15-20) % | | |
| Галиев арсенид (двуслойни) | 20 % | | |
| Галиев арсенид (трислойни) | 25 % | >20 години | (20-100) |

Ефективността на стандартните FW клетки на пазара е около 20%, и модулите, създадени на основата на тези клетки, постигат ефективност около 17%. Рекордът за произведените клетки в лабораторни условия е 24,7% (от Университета на Нов Южен Уелс, Австралия), чиито панели са с производителност от 22%. Цената на тези модули е около 200 евро на клетка. Повърхността на клетката е с размери 21,6 cm², което съответства на цена от (5-10) EUR /W. Системите GaAs имат от 5 до 10 пъти по-високи разходи.

Стареенето на фотоволтаиците води до намаляване на тяхната ефективност с около 10% за 25 години. Повечето производители дават гаранция за запазване на работоспособността до 80% за срок на експлоатация 20 г. В космоса слънчевата константа е по-висока от слънчевата радиация, попадаща върху Земята. Затова слънчевите клетки стареят по-бързо. Например, фотоволтаиците, използвани за изкуствените спътници постигат ефективност от 25% и срок на експлоатация 15 години.

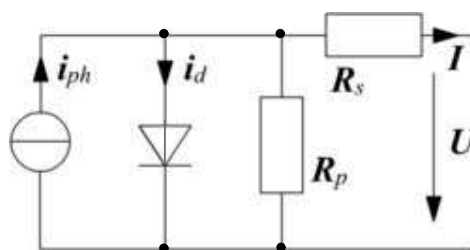


Фиг. 2.13. Схема на свързване и заместваща схема на слънчева клетка

Графичното означение на една слънчева клетка е като диод и фотодиод с една стрелка по посока на часовниковата стрелка до връзката. Функцията на една слънчева клетка се различава обаче от тази на идеалният диод. За моделиране на тези различия, се използват еквивалентни заместващи схеми (фиг. 2.13)

Опростената еквивалентна схема се състои от източник на енергия, свързан в паралел с идеален диод. Този източник произвежда енергия, в зависимост от интензитета на радиацията и формира фототок I_{ph} . Токът през диода I_D оказва влияние на общата стойност.

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}} - 1 \right], \quad (2.9)$$



Фиг. 2.14. Схема на слънчева клетка с един диод

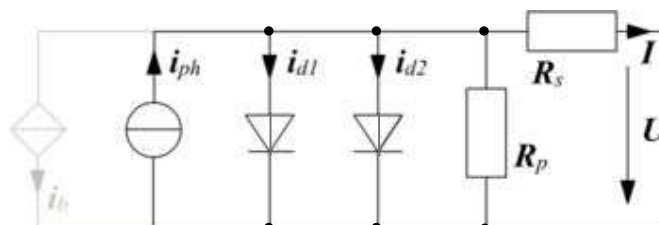
Разширената еквивалентна схема отчита реалните параметри на компонентите (фиг. 2.14). Този модел се описва възможно най-точно ФВ клетка.

В сравнение с опростената еквивалентна схема с един диод, схемата е допълнена със съпротивления, свързани паралелно и последователно:

- Паралелното съпротивление R_p отчита кристалните дефекти, нехомогенните примеси и дефектите в материала, от които има загуби на мощност в p-n преходите. В добре проектираните клетки, това съпротивление е относително голямо.
- Последователното съпротивление R_s взема под внимание ефектите, които биха довели до увеличаване на общото съпротивление на елементите. То отчита предимно съпротивлението на полупроводниковия материал, контактните съпротивления и тези на връзките. Това съпротивление на слънчевите клетки, трябва да бъде възможно най-малко.

Формулата за общия ток в този модел има вида:

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{U_p}{R_p} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{U + R_s \cdot I}{n \cdot U_T}} - 1 \right] - \frac{U + R_s \cdot I}{R_p}. \quad (2.10)$$



Фиг. 2.15. Схема с два диода с ограничаване на напрежението за ефекта на лавината, когато се прилага обратно напрежение.

В сравнение с предишната фигура в тази е добавен диод с други параметри, за да се отчита обратния режим на работа. Формулите за схемата включват електрическата проводимост g_b , пробивното напрежение U_b и лавинният експоненциален коефициент n_b :

$$I = I_{ph} - I_b - I_{s1} \left[e^{\frac{U + R_s \cdot I}{n_1 \cdot U_T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{U + R_s \cdot I}{n_2 \cdot U_T}} - 1 \right] - \frac{U + R_s \cdot I}{R_p}, \quad (2.11)$$

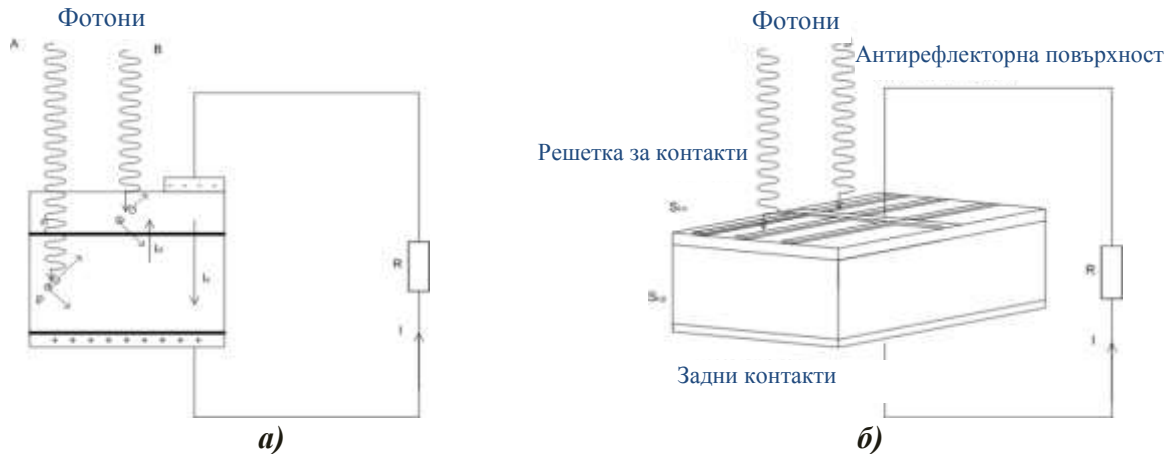
$$I_b = g_b \cdot (U + R_s \cdot I) \left(1 - \frac{U + R_s \cdot I}{U_b} \right)^{-n_b}.$$

Слънчевият панел (без рамка) с тънкослойни клетки се амортизира в рамките на (2-3) години. Поликристалните клетки се нуждаят от срок на изплащане около (3-5) години, докато кристалните – от (4-6) години. Заради това, че в една фотоволтаична система са включени и монтажни елементи, инвертори и др. времето за откупване на системата се увеличава с около 1 година.

Архитектура и принцип на действие. ФВ клетка е устройство, чиято работа се дължи на светлинната генерация на свободни токоносители и тяхното разделяне от вътрешно електрично поле в областта на р-п прехода, MOS или Шотки. За получаване на материал за производството на кристален или поликристален силиций се използват различни технологични методи, осигуряващи слоеве с различна проводимост, за да се получи р-п преход. Основният материал, използван за производството на ФВ клетки, е силицийт.

Технологията на поликристалния и кристален силиций е най-напреднала, и осигурява производството на фотоволтаични модули в промишлен мащаб, с ефективност от 14-17% и срок на експлоатация от 30 г. Тази технология има основен недостатък: ограничен потенциал за намаляване на разходите за производство на фотоволтаични клетки (високоенергийно производство). Технологиите за производство на аморфен силиций и на тънкослоен силиций са с перспективи за развитие. Цената за производството на елемент с номинална мощност 1W, използващ тези технологии, ще намали разходите с 1€. При тези условия електроенергията, произведена от ФВ системи ще бъде по-евтина от електроенергията, произведена от изкопаемите енергийни източници.

На фиг. 2.16 е показан опростена схема на ФВ клетки на основата на Р-тип полупроводникови материали. Извършен е анализ на явленията, които се наблюдават, когато ФВ клетка е изложена на въздействието на слънчевата радиация. Това лъчение може да се приравни с поток от фотони, които имат енергия $E=h\nu$, където h е константата на Планк, ν е честотата на електромагнитното лъчение. Ако фотонната енергия е по-голяма от енергията на забранена зона, тогава падащият фотон взаимодейства с атома, електронът от валентната зона ще премине в зоната на проводимостта и фотон V има по-висока честота и съответно по-висока енергия (нискофотонните електромагнитни вълни проникват на голяма дълбочина и обратно). Свободните токоносители са отделени от електричното поле на **р-п** прехода, който се характеризира с потенциалното напрежение U_0 и в зависимост от типа на използваните полупроводници е около (0,2 - 0,7) V.



Фиг. 2.16. Архитектура на фотоволтаичните клетки.

Електрическото поле действа като разделител на свободните токоносители – електрони и дупки. Електроните се насочват към п - областта, дупките в р - областта. Ето защо под влияние на облъчването, р-областта е положително заредена, а п- е с отрицателен потенциал, което води до електрически ток през външната верига, причинени от фотоволтаичното преобразуване на слънчевата радиация. Този ток, (фиг. 2.16-а) води до пад на напрежение U върху външното съпротивление R , свързано към изводите (фиг. 2.16-б). Напрежението U действа на р-п прехода директно и на свой ред, определя големината на диодния ток I_d :

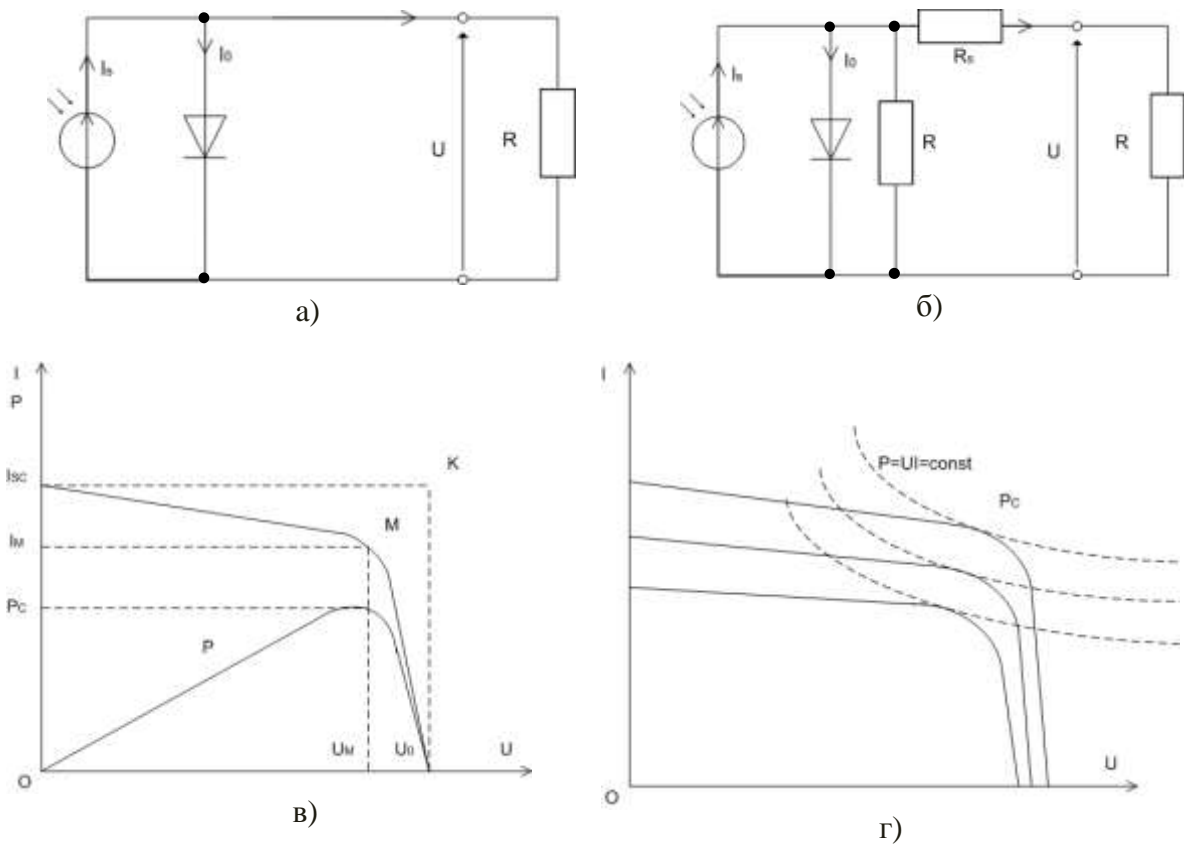
$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right], \quad (2.12)$$

където: I_0 е токът на насищането;
 k – константата на Болцман;
 T – абсолютната температура;
 e – зарядът на електрона.

Характеристики на фотоволтаичната клетка. Основните характеристики на ФВ клетките са: $I(U)$ или $U(I)$ и $P(U)$. Токът във вътрешната верига I се определя като разликата между фотоволтаичния ток I_s и тока на диода I_d :

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left[\exp \left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right]. \quad (2.13)$$

Еквивалентната опростената схема на ФВ клетка, показана на фиг. (2.17-а) съответства на ур.(2.13). Ако се вземе предвид съпротивлението R_i , утечката през p-n прехода на ФВ клетка и последователното съпротивление R_s , може да се състави еквивалентна схема на една ФВ клетка (фиг. 2.17-б). С модерните технологии е възможно да се получат клетки с $R_i \rightarrow \infty$ и $R_s = 0$, така че опростената диаграма е достоверна.



Фиг. 2.17. Еквивалентни схеми на фотоволтаичните клетки:
 а - опростена; б - пълна; в, г - основни характеристики.

Електрическата мощност, разсейвана върху товара R на ФВ клетка е:

$$P = UI = U \left\{ I_s - I_0 \left[\exp \left(\frac{eU}{kT} \right) \right] - 1 \right\}. \quad (2.14)$$

Максималната стойност на тази мощност е получена в точка M , чиито координати се определят от условието $dP/dU=0$:

$$\begin{aligned} U_M &= U_0 - U_T \ln \left(1 + \frac{U_M}{U_T} \right), \\ I_M &= I_s \left(1 + \frac{I_0}{I_s} \right) \frac{U_M}{U_M + U_T}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

където $U_T = kT/e$.

Оптималната стойност на съпротивлението на товара за пасивно натоварване, са:

$$R_M = \frac{U_M}{I_M} . \quad (2.16)$$

Параметри на фотоволтаичните клетки и модули. В проспектните материали на фирмите производители на подобен род устройства, се дават параметрите им при стандартни условия:

- нива на слънчевата, радиация, попадаща върху клетката - $G=1000 \text{ W/m}^2$;
- температурата на клетките - $T_C = 25^\circ\text{C}$;
- стандартната маса на въздуха - $AM=1,5$.

Задължително се посочва в каталожните данни: токът на късо съединение I_{sc} ; напрежението на празен ход U_0 ; максимална или критична мощност P_C ; напрежението на тока при максимална мощност U_M и I_M . Заедно с тези параметри, може се дадат: коефициент на запълване (Fill Factor), FF, ефективността (к.п.д.), нормалната температура на работа на клетката NOCT, коефициентът на вариацията на напрежението на празен ход и на токът на късо съединение от температурата.

Ток на късо съединение. Той се получава, когато се свържат накъсо контактите на R (фиг. 2.17). Съгласно I-U характеристика това е точката с координати $U = 0$, $I = I_{sc}$. На пример (5.7), за $U = 0$, получаваме $I_{sc} = I$. Произведената енергия е равна на нула.

Напрежение на празен ход. То съответства на точката от I-U характеристика с координати $I = 0$, $U = U_0$. Мощността е равна на нула. Напрежението на празен ход може да се определи от (2.17), като се положи $I = 0$:

$$U_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_s + I_0}{I_0} \approx \frac{kT}{e} \ln \frac{I_s}{I_0} . \quad (2.17)$$

За силициева клетка съотношението I_s/I_0 е приблизително 10^{10} , факторът kT/e , се нарича термоелектродвижещо напрежение и е равно на 26 mV. Следователно $U_0 = 0,6 \text{ V}$.

Максимална или критична мощност. Това е точка, съответстваща на т.М от I-V характеристика. На английски този параметър се нарича peak power (максимална мощност) и се отбелязва като P_C .

$$P_C = U_M \cdot I_M . \quad (2.18)$$

От геометрична гледна точка, максималната P_C мощност съответства на допирателната точка на хиперболата $P = UI = \text{const.}$ към I-V кривите на I-U характеристика (виж фиг.2.19,в). Коефициентът на запълване се определя съотношението между площите на правоъгълниците $OU_M I_M$ и $OU_0 I_{sc}$ -(фиг. 2.19,с) или:

$$FF = \frac{U_M I_M}{U_0 I_{sc}} , \quad (2.19)$$

където:

$$P_C = FF \cdot U_0 \cdot I_{sc} . \quad (2.20)$$

Коефициентът на запълване е мярка за качеството на PV клетките. Колкото вътрешното съпротивление R_s е по-малко, толкова FF на ФВ клетката е по-голямо. Обикновено $FF > 0,7$.

Коефициент на полезно действие. Той се определя по същия начин, като съотношението между енергията, произведена от PV клетка или модул в оптимална работна точка М за определена температура и слънчева радиация.

$$\eta = \frac{P_C}{A \cdot G} \quad (2.21)$$

където P_C е мощността, W;

A - повърхността на клетката или модул, m^2 ;

G - нивото на слънчевата радиация, попадащо върху площта на клетката, W/m^2 .

Един PV модул с 12% ефективност и площ от 1 m^2 , изложен на слънчева радиация, равна на 1000 W/m^2 осигурява електрическа мощност около 120 W.

В лабораторни условия са получени кристални силициеви клетки с к.п.д. от (13-25)%. На практика, в зависимост от повърхността к.п.д. е от 12 до 14%. В лабораторни условия е

получена за ФВ клетки от поликристален силиций ефективност 20%. Теоретичната граница за ефективността на клетки от кристален силиций е 37%, а за клетки от аморфен силиций – 28%.

Нормална работна температура на клетката.

Тя съответства ФВ клетка, работеща при температура на околната среда 20 °С, ниво на слънчевата радиация 800 W/m² и скорост на вятъра по-ниска от 1 m/s. За нормалните клетки, NOCT параметърът е между 42 and 46°C Ако NOCT параметърът, е известен, тогава можем да се определи T_C - температурата на клетките в други работни условия, характеризиращи се от околната среда на T_A температура и глобална радиация – G по зависимостта:

$$T_C = T_A + \left(\frac{NOCT - 20}{0,8} \right) \cdot G. \quad (2.22)$$

Влияние на слънчевата радиация и температурата върху характеристиките на фотоволтаичните клетки и модули

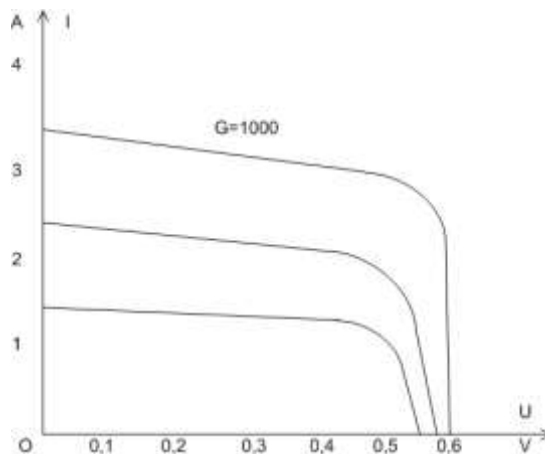
Характеристиките на ФВ клетки за различни стойности на слънчевата радиация са показани на фиг.2.18. Необходимо е да се отбележи, че токът на късо съединение е пряко пропорционален на слънчевата радиация, а напрежението на празен ход почти не се променя, защото според ур. (2.17) напрежението U_0 зависи логаритмично от слънчевата радиация (I_s е пропорционална на радиацията) и често в практически изчисления този вариант се пренебрегва.

Токът на късо съединение за различните стойности на слънчевата радиация G може да се определи по формулата:

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{st}} \cdot I_{scst}, \quad (2.23)$$

където I_{scst} е токът на късо съединение на клетката, съответстващ на стандартна радиация $G_{st} = 1000 \text{ W/m}^2$.

Температурата на ФВ клетки оказва значително влияние на напрежението на празен ход и слабо влияние върху тока на късо съединение (фиг. 2.18). Напрежението на празен ход намалява с повишаване на температурата.



Фиг. 2.18. Характеристики на ФВ клетки при промяна на слънчевата радиация

За силициевы клетки, коефициентът на чувствителност на напрежението е 2,3 mV/°C. Следователно, за да се определи U_0 , за различни температури, различни от стандартните, се използва съотношението:

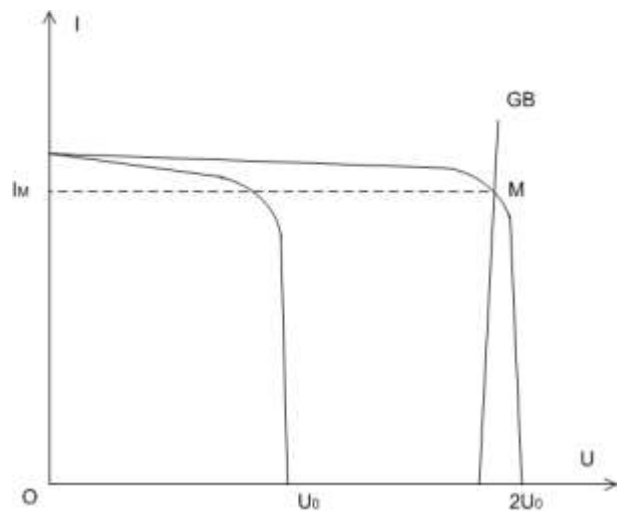
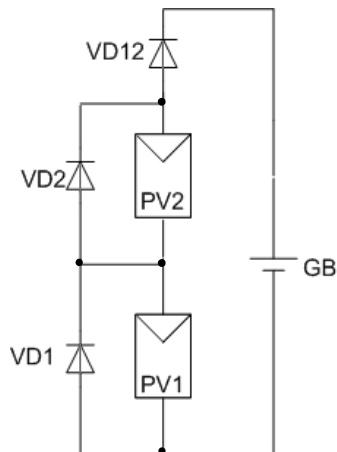
$$U_0 = U_{025} - 0,0023(t - 25), \quad (2.24)$$

където U_{025} е напрежението на празен ход при стандартна температура, V;

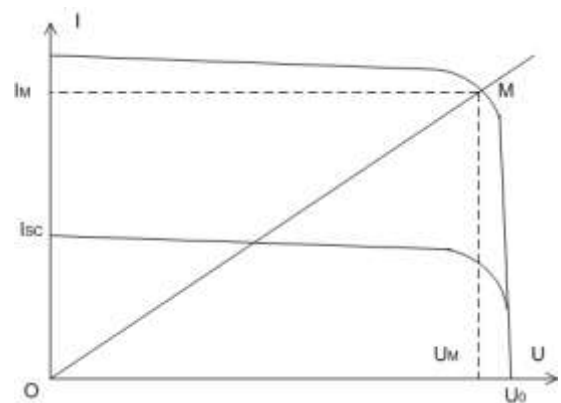
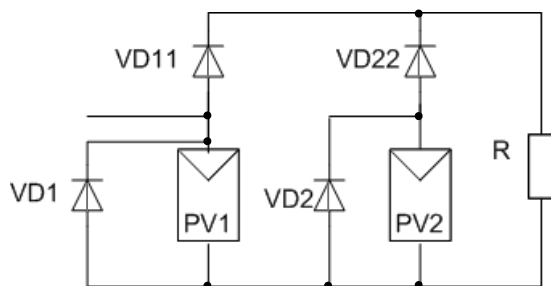
t - текущата температура на клетката, °C.

В проектни изчисления, изменението на тока на късо съединение и коефициентът на запълване FF, в зависимост от температурата, се пренебрегва.

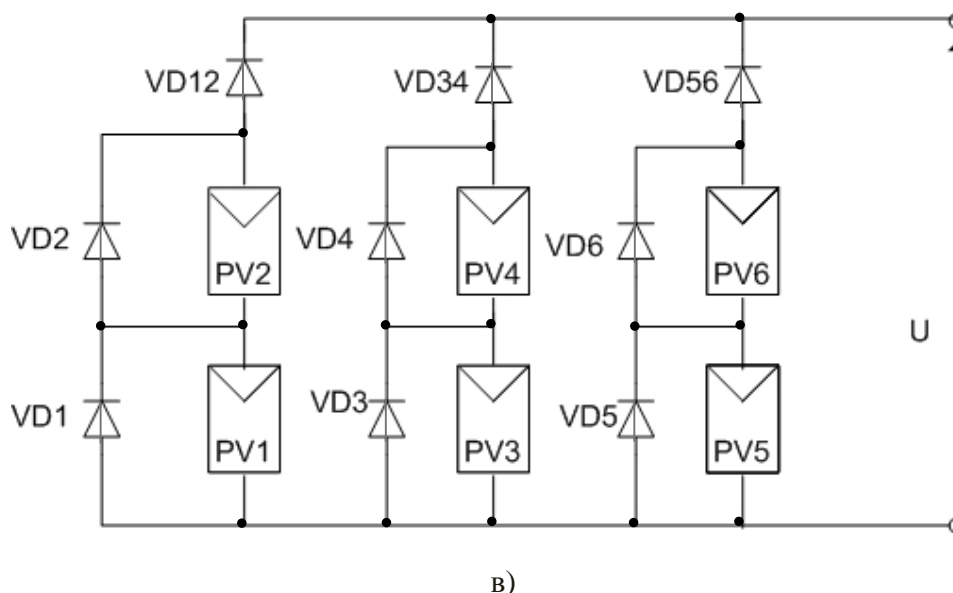
Фотоволтаични модули. Фотоволтаичните клетки произвеждат електрическа енергия, при мощност (1,5-2) W и напрежение (0,5-0,6) V. За да се получат напрежения и мощности, които са необходими на потребителя, фотоволтаичните клетки се свързват последователно и/или паралелно. Най-малката фотоелектрическа инсталация на фотоволтаични клетки представлява система от взаимно свързани помежду си клетки последователно и/или паралелно, затворени в един корпус, за да се постигне по-висока механична устойчивост и да се предпазят клетките от влиянието на околната среда. Този елемент се нарича **фотоволтаичен модул**. Взаимно свързаните фотоволтаичните модули върху обща основа образуват фотоволтаичен **панел**.



a)



б)



Фиг. 2.19. Свързване на фотоволтаичните модули: а-последователно, б-паралелно, в-смесено

При проектирането на ФВ модули трябва да се вземе под внимание използването им за зареждане на батерии, чието напрежение е (12-12,5) V. Следователно, при стандартни условия на радиацията, напрежението U_M трябва да бъде около (16-18) V, а на празен ход: (20 - 22,5) V.

Една клетка генерира приблизително около 0,6 V. Затова се свързват последователно (33-36) клетки, за да се получи необходимото напрежение. Мощността на ФВ модул е между 50 и 100 W. Обикновено ФВ модул има правоъгълна форма. Рамката е изработена от алуминий и е отделена от лимитираната структура на покритите клетки, което ги прави водо- и влагозащитени.

Клетките са защитени от действието на неблагоприятни условия, които могат да възникнат по време на работа, чрез слой от стъкло или два слоя (отпред и отзад) на етилен, винтил ацетат или поливинил EVA, бутирол PVB и др. За да се получи необходимото напрежение и енергия, необходима на потребителите към електрическата енергия, фотоволтаичните модули могат да бъдат свързани последователно, паралелно или смесено (виж фиг. 2.19, а, б, в). При последователното свързване на два еднакви ФВ модула, мощността на потребителите остава същата, а напрежението се покачва два пъти. На фиг. 2.19а модулите PV1 и PV2 са свързани последователно за захранване на акумулаторна батерия GB.

Работната точка на системата PV – GB е точката на пресичане M на съответните характеристики на двата модула, свързани последователно за зареждане на батериите. Диодите VD1 и VD2 се наричат контурни или “паралелни” (байпас). Те са свързани в паралел с останалите модули или група от модули, свързани паралелно (фиг. 2.19, б). Паралелните диоди ограничават обратното напрежение, ако даден модул има по-малка ефективност или е засенчен. В нормален режим на работа, диодите VD2, VDL не консумират енергия. Диодът VD, наречен антиреверс е свързан последователно с товара. Този диод предотвратява обратната работа на PV модулите - да се превърнат в консуматор на електрическа енергия. Точката на системата PV-R е пресечната точка на характеристиките на модулите и консуматорите – $I=(I/R)$. Диодите VD11 и VD12 не позволяват модул или група свързани помежду си модули в паралел, да преминат в режим на консумация, когато те са засенчени. В схемата на фиг. 2.19-в, модулите PV1-PV2, PV3-PV4 и PV5, PV6 са свързани последователно, но помежду си са свързани паралелно. Така се постига два пъти

нарастването на напрежението и три пъти увеличаване на тока. Очевидно е, че мощността на ФВ генератор се увеличава шест пъти.

Диодите VD1-VD6 са обходни диоди, а VD12, VD34, VD56- обратни диоди. Параметрите на ФВ модулите се определят от параметрите на клетките.

Таблица 2.2

Данни на фотоволтаичните модули

| Техническа спецификация | Вид на модула | | | | | | | |
|---|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | КС 35 | КС 40 | КС 45 | КС 50 | КС 60 | КС 70 | КС 80 | КС 120 |
| Максимална мощност, W_c | 35 | 40 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 | 120 |
| Напрежението в т. М, V | 15 | 16,9 | 15 | 16,7 | 16,9 | 16,9 | 16,9 | 16,9 |
| Ток в т. М, А | 2,33 | 2,34 | 3 | 3 | 3,55 | 4,14 | 4,73 | 7,10 |
| Напрежението за работа на празен ход, V | 18,8 | 21,5 | 19,2 | 21,5 | 21,5 | 21,5 | 21,5 | 21,5 |
| Номинален ток, А | 2,50 | 2,48 | 3,10 | 3,10 | 3,73 | 4,35 | 4,97 | 7,45 |
| Дължина, mm | 471 | 526 | 573 | 639 | 751 | 865 | 976 | 1425 |
| Ширина, mm | 652 | 652 | 652 | 652 | 652 | 652 | 652 | 652 |
| Дебелина, mm | 52 | 52 | 54 | 54 | 52 | 56 | 52 | 52 |
| Маса, kg | 4 | 4,5 | 4,5 | 5 | 6 | 7 | 8 | 11,9 |

Тест за самоподготовка

1. ФВ клетка се изобразява графично чрез:

- а. Диод и фотодиод със стрелка, по посока на часовниковата стрелка;
- б. Триак със стрелка, по посока на часовниковата стрелка;
- в. Транзистор със стрелка, по посока на часовниковата стрелка.

Отговор: а

2. Токът на късо съединение на ФВ клетка е:

- а. Токът при късо съединение при липса на натоварване;
- б. Пряко пропорционален на слънчевата радиация;
- в. Обратно пропорционален на напрежението на празен ход.

Отговор: б

3. Ефективността на ФВ клетка, е:

- а. Съотношението между мощността, генерирана от клетката в оптимална работна точка при определена температура и слънчева радиация;
- б. Пряко пропорционална на получената мощност и обратно пропорционална на произведението от повърхността на клетката и нивото на слънчевата радиация;
- в. Пропорционална на мощността, произведена от клетката, площта и слънчевата радиация.

Отговор: а, б

Тест за оценяване

1. Посочете техническите характеристики на ФВ клетка!
2. Обяснете устройството и принципа на работата на ФВ клетка!
3. Какво е влиянието на слънчевата радиация и температура върху характеристиките на ФВ клетки и модули?

2.5. Оразмеряване на фотоволтаична система. Приложения.

Структурата на ФВ система.

ФВ клетки и/или модули не са единствените компоненти на една ФВ система. За да се осигури непрекъснато захранване за потребителя, много ФВ системи включват зарядни устройства. ФВ модулите генерират постоянно напрежение, но често потребителят се нуждае от променливотокова мощност. Мощността на ФВ панел зависи от редица фактори - редуване на ден и нощ, ясно или облачно време и др. които водят до промяна в широк диапазон на генерираните напрежение и ток.

Затова важно условие за използване на получената енергия е употребата на инвертори, които изпълняват различни функции - мониторинг на процеса на работа, разтоварване или преобразуване на постоянния ток в променлив и др. За да се избегне преоразмеряването на една фотоволтаична система, често се използват помощни източници на захранване, дизелов генератор или ветрови генератор или обществена електрозахранваща мрежа.

Всички тези компоненти трябва да бъдат взаимосвързани, оразмерени и проектирани да работят в единна информационна система, наречена фотоволтаична система.



Фиг. 2.20. Структурата на фотоволтаична система

На фиг. 2.20 е представена структурата на ФВ системата. Основните ѝ компоненти са:

- модул, панел, съвкупност от модули, образуващи ФВ генератор;
- зарядно устройство;
- подсистемата за работа на електрическата енергия, включително компоненти за измерване, наблюдение и контрол;
- спомагателен енергиен източник, например, генератор, който работи на бензин или дизел. В този случай, ФВ системата се нарича **хибридна ФВ система**.

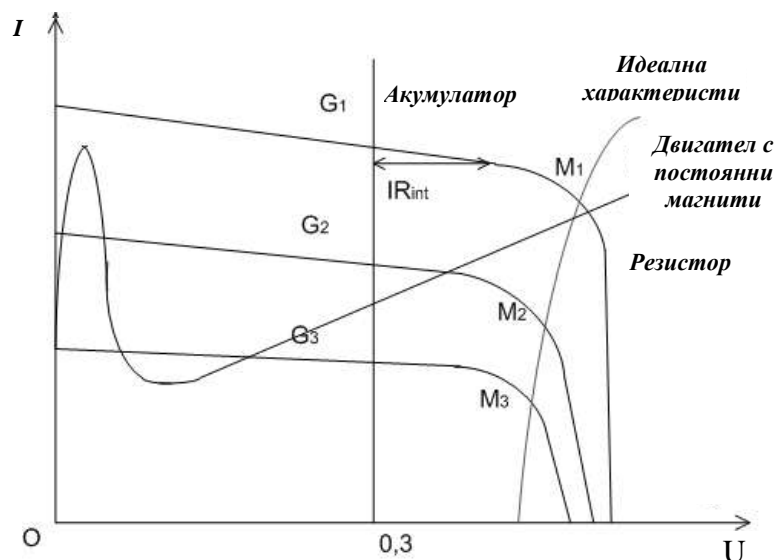
ФВ системи се делят на две основни категории: **свързани към мрежата** или работещи в паралел с обществената мрежа за електроснабдяване и **автономни фотоволтаични системи**.

Работа на ФВ модул под товар.

ФВ клетка, съответно и ФВ модула могат да работят в режим на максимална генерирана мощност при даден товар. Въпреки това, слънчевата радиация и температурните промени водят до промени във волт-амперната характеристика на ФВ генератора.

Следователно, точката на системата ФВ модул - товар (точка на пресичане на характеристиките на волт-амперната на товара и модула) няма да съвпадне с точката, където

е максимална мощността при съответния товар. На фиг. 2.21 са показани волт-амперните характеристики на три от най-разпространените потребители: резистор, променливотоков електродвигател с постоянни магнити и акумулатор. Необходимо е да се отбележи, че характеристиката на идеалния потребител е тази, за която работната точка винаги съвпада с оптималната точка М. Волт-амперните характеристики се описват със следните аналитични изрази:



Фиг. 2.21. Волт-амперни характеристики на ФВ модул и на различни потребители

- Резистор

$$I = \frac{I}{R} U, \quad (2.25)$$

- Електродвигател

$$I = \frac{U-E}{R_i} = \frac{U-k\Omega\Phi}{R_i}, \quad (2.26)$$

- Акумулатор

$$I = \frac{U-E_0}{R_{int}}, \quad (2.27)$$

където U е напрежението на ФВ модул;

Φ - постоянният магнитен поток;

Ω - честота на въртене;

R_i - съпротивлението на котвата (ротора);

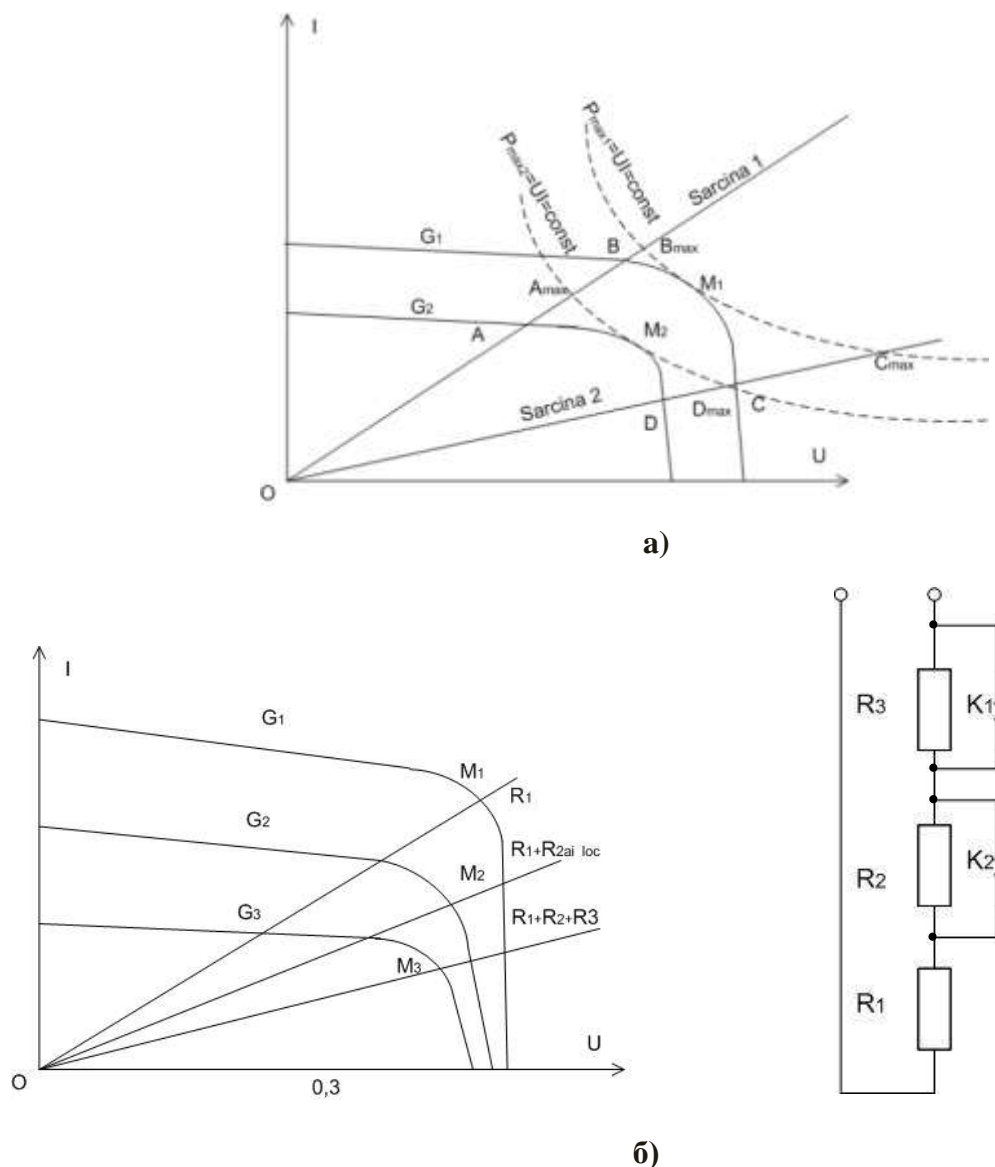
E_0 - зарядното напрежение;

R_{int} - вътрешното съпротивление на акумулатора.

Когато двигателят работи, той консумира ток от модула, максимално близък до тока на късо съединение. Въпреки, че напрегнатостта на полето е малка, за пускане възниква е.д.н., което може да се определи от произведението $k\Phi I_{sc}$. Ако $U=E_0$, зарядното устройство напълно захранва консуматора. Ако не е изпълнено условието, зарядният ток се увеличава с нарастването на слънчевата радиация, пропорционално с напрежението. Заедно с повишаването на зарядния ток ще има увеличение на пада на напрежението IR_{int} .

От фиг. 2.23 се вижда, че товарът на електродвигателя или резистора не трябва да оказва влияние на оптималната работна точка, която се определя от радиацията. Затова трябва да се променят волт-амперните характеристики на ФВ модул или на товара. За да се

среди оптимално точката на работа се използват електронни преобразуватели от типа AC/DC*, наречена MPPT† тракери.



Фиг. 2.23. Към мониторинга на максималната точка на захранване:
а- MPPT технология, б - промяна на натоварването.

MPPT е свързан между ФВ модул и товара, за да променя изходното напрежение, така че да се гарантира оптимално положение на работната точка. На фиг. 2.23 са представени два случая на проследяване чрез MPPT технология (фиг. 2.23.а) и чрез промяна на натоварването (фиг. 2.23.б). В първия случай се разглеждат два потребителя с различни характеристики. За удобство се приема, че те са линейни. И за двата потребителя има съществено отклонение на работните точки А, В и D, С, от оптималните точки M_1 и M_2 . На същата графика са начертани хиперболите $I=P_{\max,1}/U$ и $I=P_{\max,2}/U$. За всяка точка от хиперболите, мощностите $P_{\max,1}$ и $P_{\max,2}$ са постоянни съответно, равна на максималната потребена мощност M_1 и M_2 .

Смята се, че подсистемата на ФВ модула работи при точка В при ниво на обща радиация, равна на G_1 . За да се получи максимална мощност от модула, трябва да се промени

* AC – променлив ток

† MPPT – Maximum Power Point Tracker

волт-амперната характеристика на товара, така, че двете характеристики да се пресичат в точката M_1 . Същият резултат може да се постигне, ако напрежението се намалява и мощността се увеличава в точка M_1 , която се движи по хиперболата B_{max} . Този начин съответства на намаление на радиацията от G_1 до G_2 . Във втория случай, за осигуряване на максимума трябва да се направи обратното, т.е. да се повиши напрежението и да се намали мощността (да се сравни с S_{max} с C и D_{max} с D).

Електронният инвертор МРРТ трябва да може да си променя напрежението и мощността, така, че на изхода мощността да бъде постоянна и равна на максималната мощност, генерирана от ФВ модули, облъчени с обща радиация G ; в някои специфични случаи, проследяването на максималната точка на мощността може да бъде постигнато само чрез промяна на волт-амперната характеристика, характеризираща на товара, както е показано на фиг. 2.23.б. При максимална слънчева радиация G_1 и товар R_1 , ФВ система ще работи в точката M_1 , в случай, когато контактите K_1 и K_2 са затворени.

При средната стойност на слънчевата радиация G_2 , контактите K_2 са отворени, волт-амперната характеристика на товара и системата се стремят към M_2 . Ако слънчевата радиация продължава да намалява, контактът K_1 се отваря и системата ще работи в т. M_3 . Системата „ФВ модул-акумулатор“ не изисква използването на МРРТ технология, защото, ако волт-амперната характеристика се движи надясно (фиг. 2.21) тя ще бъде близо до идеалната. Вместо това, батерията се нуждае от автоматично следене на степента на заряд и разряд, за да се предотврати повреда.

Инвертор. Инверторът е част от подсистемата за следене на захранването на фотоволтаичната система (фиг. 2.20) и основният компонент на преобразувателя АС/DC. Инверторът преобразува постояннотоковата мощност, генерирана от фотоволтаичните модули или която е съхранена в акумулатори. Предлагат се инвертори, които осигуряват качествените параметри на електрическата енергия за осигуряване на електрозахранването на обществени мрежи със стабилна честота и напрежение и синусоидална форма на напрежението. В зависимост от вида на товара по отношение на формата на напрежението, претоварващият фактор, както и на ефективността, има различни видове налични инвертори, чиито параметри са представени в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Характеристики на различни видове инвертори

| Параметри | Триъгълно напрежение | Квази-синусоидално напрежение | Модулиране на импулси по продължителност |
|----------------------------|----------------------|-------------------------------|--|
| Номинална мощност, kW | U_p до 1000 | U_p до 2,5 | U_p до 20 |
| Коефициент на натоварване | U_p до 20 | U_p до 4 | U_p до 2,5 |
| Ефективност, % | 70-98 | >90 | >90 |
| Хармонични изкривявания, % | U_p до 40 | >5 | <5 |

Ефективността на инвертора се отнася за натоварване (75-100)% от номиналната мощност. При избора на един инвертор е важно да се познават допълнителните изисквания към захранващата система и към бъдещото разширение и начина на използване. Електрическите двигатели имат пусков ток, многократно (от 3 до 7 пъти) по-голям от номиналния. Следователно инверторът трябва да може да издържи това нормално технологично претоварване.

Инвертор с правоъгълна форма на вълната е най-простото решение. То има добра ефективност, ниска цена, но причинява най-голямото хармонично изкривяване, което води до прегряването на двигателя. Този тип инвертори се препоръчва да се използват при маломощни фотоволтаични системи за осветление, отопление или за постояннотокови консуматори, така също и като част от DC/DC преобразувателите. Инверторите със синусоидална форма на вълната (синусоидални инвертори) са по-сложни като конструктивно устройство, но са по-ефективни спрямо с правоъгълната форма на вълната. В тях се използват най-новите технологии за модулация формата на вълната. Цената на

синусоидалните инвертори е по-висока, но осигурява по-висока ефективност и минимално хармонично изкривяване.

Оразмеряване на една фотоволтаична система.

Общият принцип, който лежи в основата на оразмеряването на една ФВ централа е, че трябва да има постоянен баланс между енергията, произведена от ФВ генератор и енергията, консумирана от потребителя. Този баланс се постига за определен период, обикновено един ден или месец. Наличието на акумулатор позволява да се компенсира недостига на произведената енергия и консумацията. Това може да бъде вследствие на облачно време или специално претоварване от страна на потребителя.

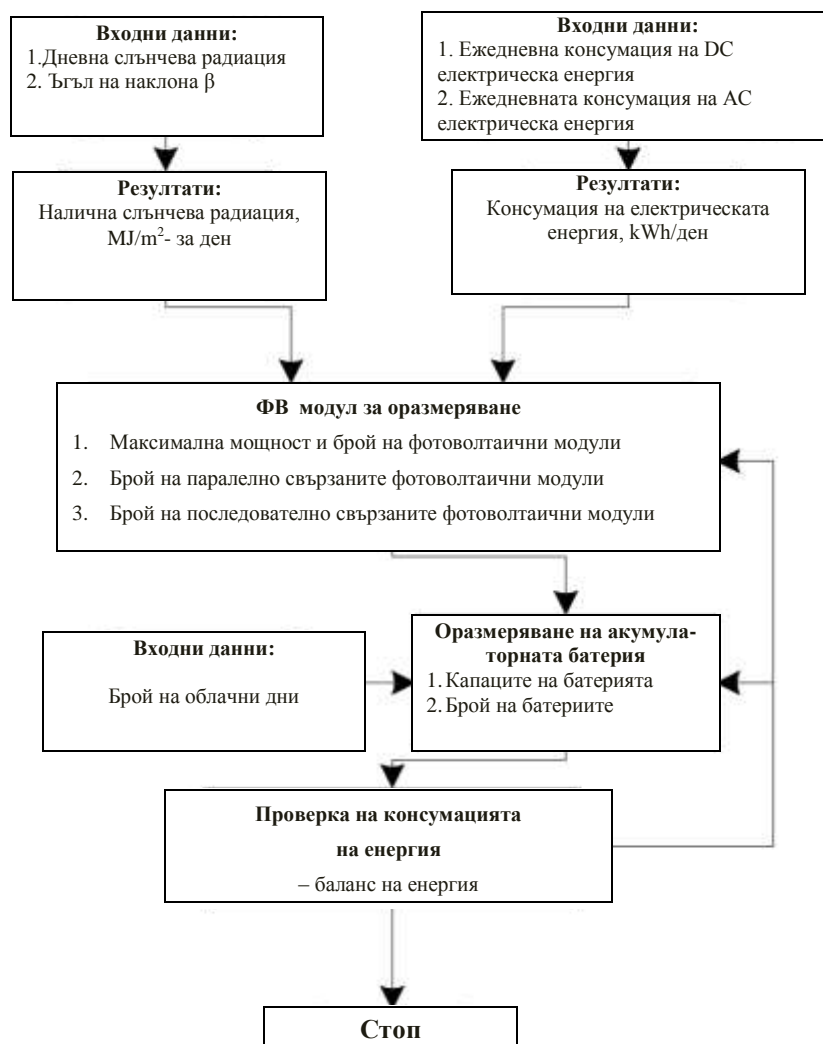
Оразмеряване на ФВ системата включва следните основни стъпки:

1. Изчисляване на слънчевата радиация на повърхността на ФВ модул;
2. Изчисляване на дневното потребление на електроенергията - E_c ;
3. Изчисляване на енергията, която трябва да се произвежда от ФВ модул - E_p ;
4. Изчисляване максималната мощност на ФВ модул и избор;
5. Изчисляване и избор на капацитета на акумулаторната батерия;
6. Проверка на баланса между потреблението и производството на електроенергия.

На фиг.2.24 е показана процедурата за оразмеряване на ФВ система с акумулаторна батерия.

Изчисляване на слънчевата радиация на повърхността на ФВ модул.

Наклонът на на ФВ модул спрямо хоризонта β се определя от изискването да бъде изгълнен баланса между потреблението и производството на електроенергията „в месеците с най-малка слънчева радиация”.



Фиг. 2.24. Процедура за оразмеряване на фотоволтаична система.

Изчисляване дневното потребление на електроенергия. За всеки потребител на AC/DC, се определя номинална мощност и броят на работните часове. Консумацията на електроенергията E_C , се определя като произведение на номиналната мощност по броя на часовете:

$$E_C = \sum_{i=1}^k \frac{P_{ni}^{cc} \cdot t_i}{\eta_R \cdot \eta_{AC}} + \sum_{j=1}^m \frac{P_{nj}^{ca} \cdot t_j}{\eta_{CF}}, \quad (2.28)$$

където k е броят на потребителите DC;

m - броят на потребителите на AC;

P_{ni}, P_{nj} - номиналната мощност на AC/DC;

t_i, t_j - продължителността на работа на съответните потребители, h;

$\eta_R, \eta_{AC}, \eta_{CF}$ - к.п.д. съответно на товара, регулатора и честотния инвертор.

При изчисленията се приема $\eta_R = 0,95-0,98$, $\eta_{AC} = 0,85-0,90$, $\eta_{CF} = 0,85 - 0,95$. Номиналните мощности на електротехнически съоръжения са посочени в техническите им паспорти.

Изчисляване на енергията, която е необходимо да се произведе от ФВ модул.

Енергията, която трябва да бъде произведена от ФВ модул е:

$$E_P = \frac{E_C}{K}, \quad (2.29)$$

където факторът K отчита несигурността на прогнозата на времето, загубите в кабелите, възможните грешки и др. Факторът K за ФВ системи с батерии, заема стойност между 0,75 и 0,85.

Таблица 2.4

Стойности на времето за работа на потребителите на електроенергия

| Товар | Номинална мощност, W | h/ден | | |
|-----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|---------------|
| | | Месеци от годината | | |
| | | ХІІ, І, ІІ | ІІІ, ІV, V, ІХ, X, XІ | VI, VII, VIII |
| Осветление на кухня | 2x13 LFC | 4 | 3,5 | 2 |
| Осветление на коридор | 3x9 LFC | 1 | 1 | 1 |
| Осветление на хол | 2x20 LFC | 1 | 1 | 1 |
| Осветление на баня | 1x18 LFC | 1 | 1 | 1 |
| Прахосмукачка | 1200 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Хладилник | 100 | 7 | 7 | 7 |
| Цветен TV, 54 cm | 60 | 4 | 4 | 4 |
| Стерео | 60 | 2 | 2 | 2 |
| Микровълнова фурна | 600 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Водна помпа | 200 | 1 | 1 | 1 |

Изчисляване максималната мощност на ФВ модул.

Тя се определя от съотношението:

$$P_C = \frac{E_P}{G_\beta} = \frac{E_C}{K \cdot G_\beta}, \quad (2.30)$$

където G_β е средната стойност на общата слънчева радиация по време на работа.

В зависимост от мощността P_C , се избира мощността на PV модул и броя на последователно свързаните модули:

$$N_S = \frac{U_{cc}}{U_m}, \quad (2.31)$$

където U_{cc} е номиналното напрежение постояннотоковите консуматори;

U_m – номиналното напрежение на ФВ модула (обикновено се приема за 12 V).

Броят на фотоволтаичните модули, свързани паралелно се определя, както се изчислява среднотоковото натоварване за целия ден

$$I_{med} = \frac{E_P}{24U_{cc}}. \quad (2.32)$$

В същото време, от уравнението, което описва енергийния баланс за един ден, се извежда:

$$24 \cdot I_{med} \cdot U_{cc} = HRS \cdot I_{PV} \cdot U_{cc} \text{ или } I_{PV} = \frac{24I_{med}}{HRS}, \quad (2.33)$$

където I_{PV} е токът на ФВ панел.

Броят на фотоволтаичните модули, свързани в паралел се определя от израза:

$$N_P = \frac{I_{PV}}{I_{sc}}, \quad (2.34)$$

където I_{sc} е токът на късо съединение на PV панел.

Изчисляване капацитета на акумулаторната батерия.

Той се определя от израза:

$$C = \frac{n \cdot E_C}{K_D \cdot U_{cc}}, \quad (2.35)$$

където n е броят на дните без Слънце;

K_D – коефициентът, зависещ от вида на акумулатора (0,5 – 0,6 за Pb –киселинен и 1,0 за Ni- Cd).

Броят на последователно свързани акумулаторни батерии се изчислява от уравнението:

$$N_{AS} = \frac{U_{cc}}{U_A}, \quad (2.36)$$

където U_A е номиналното напрежение на акумулаторната батерия (обикновено $U=12V$).

Проверка баланса за консумация на енергия.

Проверката се извършва чрез сравняване на количеството електроенергия, E_i , която произвежда от панела и консумираната от потребителя.

Тест за самоподготовка

1. За да избегне преоразмеряване на фотоволтаичната система се използва:

- Допълнителен източник на хранване;
- Разрядно съпротивление;
- Кондензатор.

Отговор: а

2. Инверторът е:

- Основен компонент на преобразувателя AC/DC;
- Устройство, което трансформира DC енергия, произведена от фотоволтаични модули или батерии в енергия, за съхранение в акумулаторни устройства;
- Устройство, което преобразува механичната енергия в електрическа.

Отговор: а, б

3. Максималната мощност на ФВ модул е равна на:

- а. Отношението между средната стойност на глобалната слънчева радиация за определен период от време и енергията, произведена от ФВ модул;
- б. Броя на последователно свързаните модули;
- в. Отношението между слънчевата радиация и продължителността на консумация на електроенергия.

Отговор: а

Тест за оценяване

- 1. Опишете структурата на фотоволтаичната система!
- 2. Как се постига натоварване на ФВ модул?
- 3. Каква е процедурата за оразмеряване на ФВ система с възможност за зареждане на акумулаторни батерии?