

TITLUL LUCRĂRII:

Sisteme fotovoltaice

SCOPUL LUCRĂRII:

- aprofundarea de către studenți a modului de utilizare a panourilor fotovoltaice în cadrul sistemelor de conversie a energiei solare în energie electrică;
- prezentarea structurii și funcționării unui sistem fotovoltaic în regim autonom.

V.1. *Panouri fotovoltaice (PV)*

Celulele fotovoltaice de construcție modernă produc energie electrică de putere care nu depășește 1,5 W – 2 W la tensiuni de 0,5 V – 0,6 V. Pentru a obține tensiuni și puteri necesare consumatorului, celulele PV se conectează în serie și/sau în paralel.

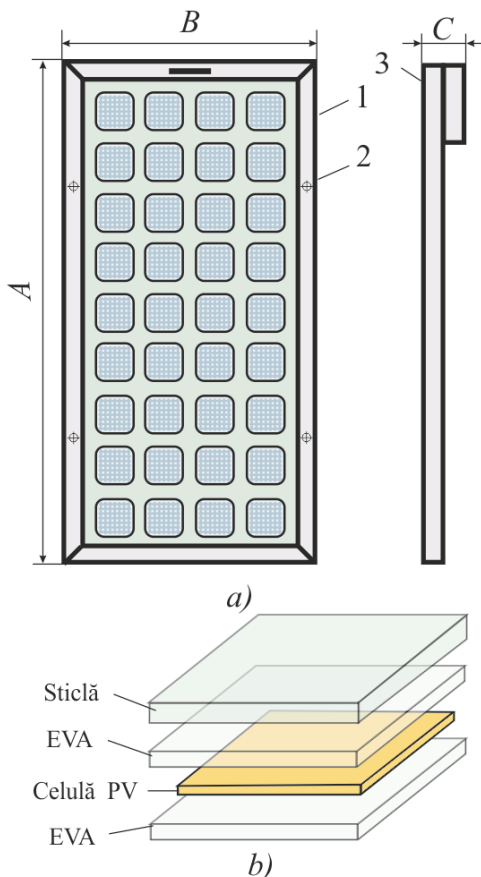


Fig. 1. Construcția modului PV a) și încapsularea celulei PV b): 1 - suport;
2 - găuri pentru asamblare în panouri, 3 - cutie de borne.

Cea mai mică instalație fotoelectrică formată din celule PV interconectate în serie și/sau în paralel, încapsulate pentru a obține o rezistență mecanică mai mare și a proteja celulele de acțiunea mediului se numește **modul fotovoltaic**. Un număr de module PV asamblate mecanic ca o unitate mai mare și conectate electric poartă denumirea de **panou** sau **câmp de module**.

În acord cu standardele Comisiei Internaționale de Electrotehnică (IEC) se utilizează termenul „**array**”, ceea ce înseamnă sistem, rețea. Expresiile „*modul fotovoltaic*”, „*panou fotovoltaic*” sau „*câmp de module*” deseori au una și aceeași semnificație.

La proiectarea modulelor PV se ia în considerație folosirea frecventă a modulelor PV pentru încărcarea acumulatorilor electrice, a căror tensiune este de 12 V – 12,5 V. Astfel, în condiții de radiație standard, tensiunea U_M (tensiunea în punctul critic de funcționare) trebuie să fie 16 – 18 V, iar tensiunea de mers în gol de 20 V – 22,5 V. O singură celulă generează în gol circa 0,6 V și trebuie să conectăm în serie 33 – 36 de celule pentru a obține tensiunea necesară. Puterea modulului va oscila între 50 W și 100 W.

Construcția modulului PV (figura 1,a) este de obicei dreptunghiulară. Suportul se confecționează din aluminiu anodizat și separat de structura laminată a celulelor cu căptușeală, care nu permite pătrunderea umezelii. Celulele PV sunt protejate de acțiunea condițiilor nefavorabile, care pot interveni pe parcursul exploatării: ploaie, grindină, zăpadă, praf etc, de un sistem care constă dintr-un strat de sticlă și cel puțin două straturi (din față și din spate) din etilen vinil acetat EVA sau polivinil butirol PVB (figura 1,b).

Pentru a obține tensiunea și puterea necesare consumatorului de energie electrică, modulele PV pot fi conectate în serie, paralel sau în serie-paralel (conform figurii 2 a,b,c). La conectarea în serie a două module PV identice curentul debitat consumatorului rămâne același, iar tensiunea crește de două ori.

În figura 2,a) modulele PV1 și PV2 conectate în serie încarcă bateria de acumulatori GB. Punctul de funcționare a sistemului module PV – GB este punctul de intersecție M al caracteristicilor respective: a două module conectate în serie și a bateriei de acumulatori. Diodele VD1 și VD2, numite *diode de ocolire* sau *by-pass* se conectează în paralel cu fiecare modul sau cu un grup de module conectate în paralel (conform figurii 2,a). Dioda *by-pass* limitează tensiunea inversă, dacă un modul din circuitul consecutiv este mai puțin performant sau este umbrit și se evită suprasolicitarea termică. În regim de funcționare normală, diodele VD1 și VD2 nu consumă energie.

Dioda VD, numită *antiretur*, se conectează în serie cu sarcina. Această diodă evită situația când modulul PV poate deveni consumator de energie, dacă tensiunea generată va fi mai mică decât a acumulatorului. Este evident că ea introduce o cădere de tensiune de circa 0,5V și, corespunzător, pierderi de energie.

În figura 2,b) se prezintă conectarea în paralel a două module identice. Tensiunea generată rămâne aceeași, iar curentul crește de două ori. Punctul de funcționare al sistemului module PV – rezistență R este punctul de intersecție M al caracteristicilor amper – volt ale modulelor și consumatorului $I = (1/R) \cdot U$. Diodele antiretur VD11 și VD12 nu permit ca un modul sau un grup de module unite în paralel să treacă în regim de consumator, atunci când nu sunt identice sau când sunt umbrite.

În schema din figura 2,c), modulele PV1 – PV2, PV3 – PV4 și PV5 – PV6 sunt unite în serie, dar între ele – în paralel. Se obține astfel majorarea de două ori a tensiunii și de trei ori a curentului. Evident, puterea instalației crește de șase ori.

Diodele VD1 - VD6 sunt diode de ocolire, iar VD12, VD34, VD56 sunt diode antiretur.

Parametrii unui modul PV sunt determinați de parametrii celulelor din care este confecționat.

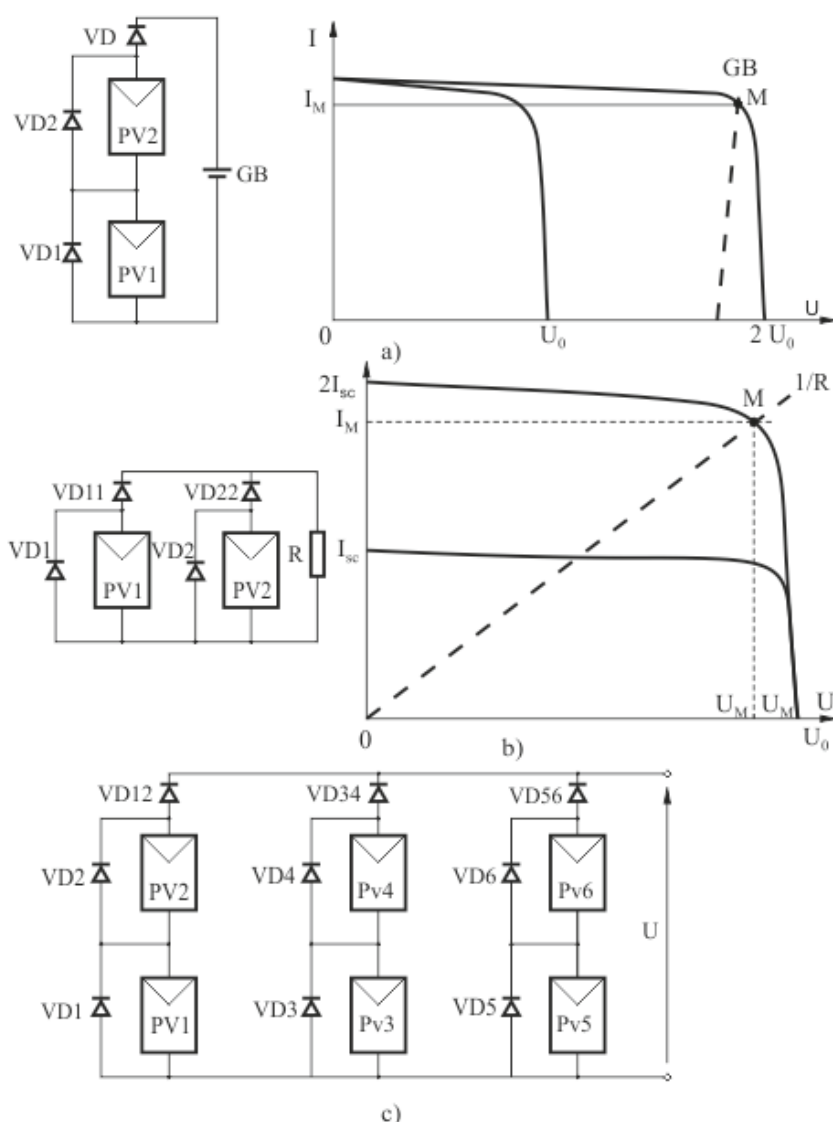


Fig. 2. Interconexiunea modulelor PV: a) - în serie; b) - în paralel; c) - în serie - paralel.

V.2. Parametrii celulelor și modulelor PV.

În cartea tehnică a produsului, producătorii de celule și module PV indică parametrii ridicați în condiții standard:

- radiația solară globală pe suprafața celulei, $G=1000 \text{ W/m}^2$;
- temperatura celulei, $T = 25^\circ\text{C}$;
- masa convențională de aer, $AM=1,5$.

În mod obligatoriu, în cartea tehnică se prezintă: curentul de scurtcircuit, I_{sc} , tensiunea de mers în gol, U_0 , puterea maximă sau critică, P_c ; tensiunea și curentul în punctul critic, U_M și I_M . Pe lângă acești parametri, pot fi indicați suplimentar: factorul de umplere FF (Fill Factor), randamentul celulei sau modulului PV, Temperatura Normală de Funcționare a Celulei $NOCT$, coeficienții de variație a tensiunii de mers în gol și a curentului de scurtcircuit cu temperatura.

Curentul de scurtcircuit. Se obține la scurtcircuitarea bornelor sarcinii R din figura 3. Pe caracteristica $I - U$, acesta este punctul cu coordonatele $U = 0, I = I_{sc}$.

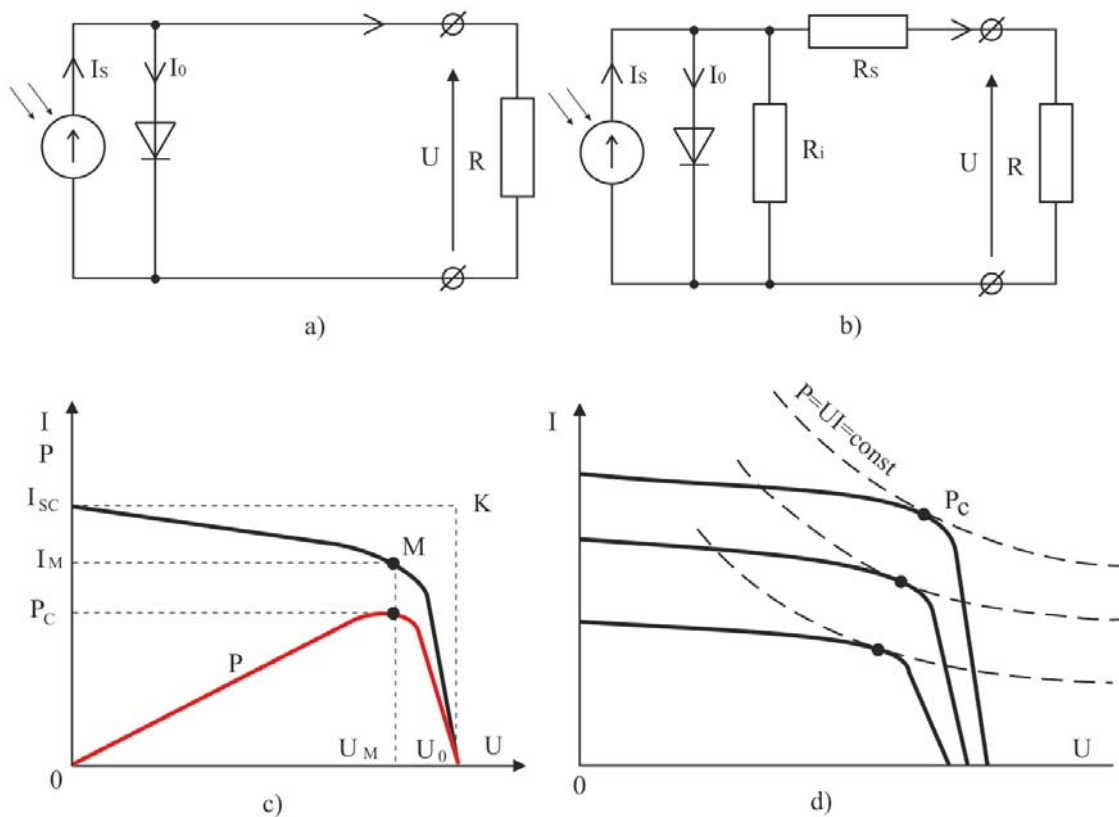


Fig. 3. Scheme echivalente ale celulei PV: a) - simplificată;
b) - completă; c), d) - caracteristicile celulei.

Tensiunea de mers în gol. Corespunde punctului de pe caracteristica $I - U$ cu coordonatele $I = 0, U = U_0$. Puterea debitată în acest punct este egală cu zero.

Pentru o celulă din siliciu raportul I_s/I_0 este de circa 10^{10} , iar $U_0 = 0,6 \text{ V}$.

Puterea critică sau maximă. Este produsul dintre curentul și tensiunea din punctul M a caracteristicii $I - U$. În limba engleză acest parametru se numește *peak power* și se notează P_c .

$$P_c = U_M \cdot I_M \quad (1)$$

Din punct de vedere geometric, puterea critică P_c corespunde punctelor de tangență ale hiperbolelor $P = UI = \text{const.}$ către caracteristicile amper - volt $I - U$ (conform fig. 3,d).

Factorul de umplere (Fill Factor). Se determină ca raport între suprafețele dreptunghiurilor $0U_M M I_M$ și $0U_0 K I_{sc}$ (figura 3,c) sau:

$$FF = \frac{U_M I_M}{U_0 I_{sc}} \quad (2)$$

de unde:

$$P_c = FF \cdot U_0 \cdot I_{sc} \quad (3)$$

Factorul de umplere este măsura calității celulei PV. Cu cât este mai mică rezistența internă R_s a celulei PV, cu atât FF este mai mare. De obicei $FF > 0,7$.

Randamentul celulei sau al modului PV. Se determină ca raportul dintre puterea generată de celula sau modulul PV în punctul optim de funcționare M la o temperatură specificată și puterea radiației solare:

$$\eta = \frac{P_C}{A \cdot G}, \quad (4)$$

unde P_C este puterea livrată în W, A este suprafața celulei sau modului în m^2 ; G - radiația globală incidentă pe suprafața celulei sau modului în W/m^2 .

Un modul PV cu randamentul de 12% și aria suprafeței de $1 m^2$, expus la radiație solară egală cu $1000 W/m^2$ va produce aproximativ 120 W.

În condiții de laborator au fost obținute celule din siliciu cristalin cu un randament de 13% - 25% în funcție de suprafața celulei, iar în condiții de fabrică, de 12% - 14%. Randamentul celulei din siliciu policristalin este de până la 20% în condiții de laborator. Limita teoretică a randamentului celulei din siliciu cristalin este de 37%, iar a celei din siliciu amorf de 28%.

Temperatura normală de funcționare a celulei. Corespunde temperaturii celulei PV la funcționare în gol la temperatura mediului de $20^\circ C$, radiația globală de $800 W/m^2$ și viteza vântului mai mică de 1 m/s. Pentru celule uzuale, parametrul NOCT se situează între $42^\circ C$ și $46^\circ C$.

Influența radiației solare și a temperaturii asupra caracteristicilor celulelor și modulelor PV. Caracteristicile celulei PV pentru diferite valori ale radiației solare sunt prezentate în figura 4,a).

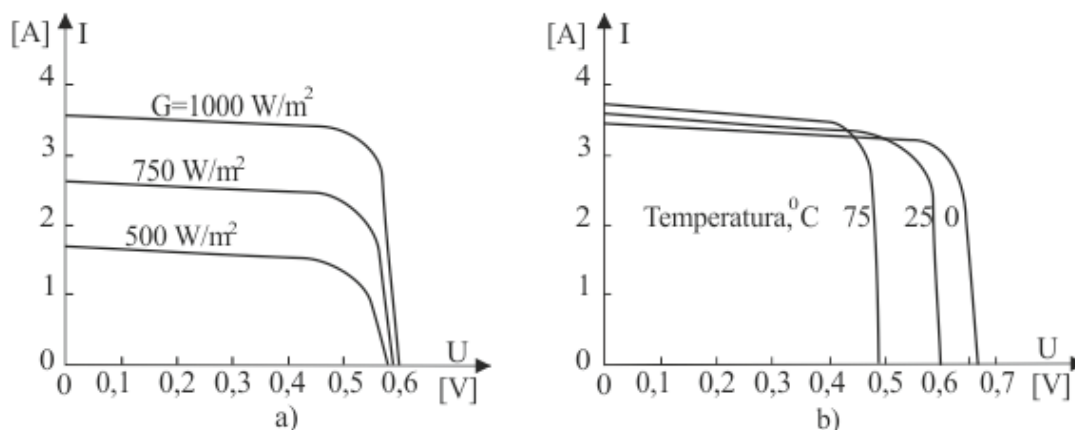


Fig. 4. Caracteristicile celulei PV la variația radiației solare a) și a temperaturii b).

După cum se observă, curentul de scurtcircuit este direct proporțional cu radiația solară, iar tensiunea de mers în gol variază puțin. Tensiunea U_0 depinde logarithmic de radiația solară (I_s este proporțional cu radiația) și adesea în calcule practice această variație se neglijează. Curentul de scurtcircuit, pentru diferite valori ale radiației solare G , poate fi determinat cu o aproximație satisfăcătoare, prin formula:

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{st}} \cdot I_{scst}, \quad (5)$$

unde I_{scst} este curentul de scurtcircuit al celulei corespunzător radiației standard $G_s=1000 W/m^2$. Temperatura celulei PV influențează semnificativ asupra tensiunii de mers în gol și cu mult mai puțin asupra curentului de scurtcircuit (conform figurii 4,b). Odată cu creșterea temperaturii, tensiunea de mers în gol scade. Pentru celule din siliciu, coeficientul de variație a tensiunii cu temperatura K_T este egal cu $2,3 mV/^\circ C$. Astfel, parametrul U_0 pentru temperaturi diferite de cea standard se va calcula cu relația:

$$U_0 = U_{025} - 0,0023(t - 25), \quad (6)$$

unde U_{025} este tensiunea de mers în gol a celulei PV la temperatura standard, iar t este temperatura curentă a celulei, în $^{\circ}\text{C}$. În calculele de proiectare, variația curentului de scurtcircuit și a factorului de umplere FF în funcție de temperatură sunt neglijate.

V.3. Sisteme fotovoltaice

Structura unui sistem fotovoltaic. Celulele sau modulele PV nu sunt unicele componente ale unui sistem PV. Pentru asigurare continuă a consumatorului cu energie electrică, multe sisteme PV conțin acumulatori de energie electrică. Modulul PV constituie un generator de curent continuu (c.c.), dar adesea consumatorul de energie este de curent alternativ. Energia electrică PV are un caracter variabil, alternanța zi/noapte, cer senin/cer acoperit provoacă variația într-o gamă largă a fluxului de energie și a tensiunii generate de modulul PV. Astfel, apare necesitatea condiționării fluxului de energie, folosind convertoare electronice: c.c./c.c., care îndeplinesc și funcția de monitorizare a procesului încărcare/descărcare a acumulatorului, c.c./c.a., pentru transformarea curentului continuu în curent alternativ. Pentru a evita supradimensionarea sistemului fotovoltaic adesea se folosește o sursă auxiliară de energie, fie un grup electrogen, fie un generator eolian sau chiar rețeaua electrică publică.

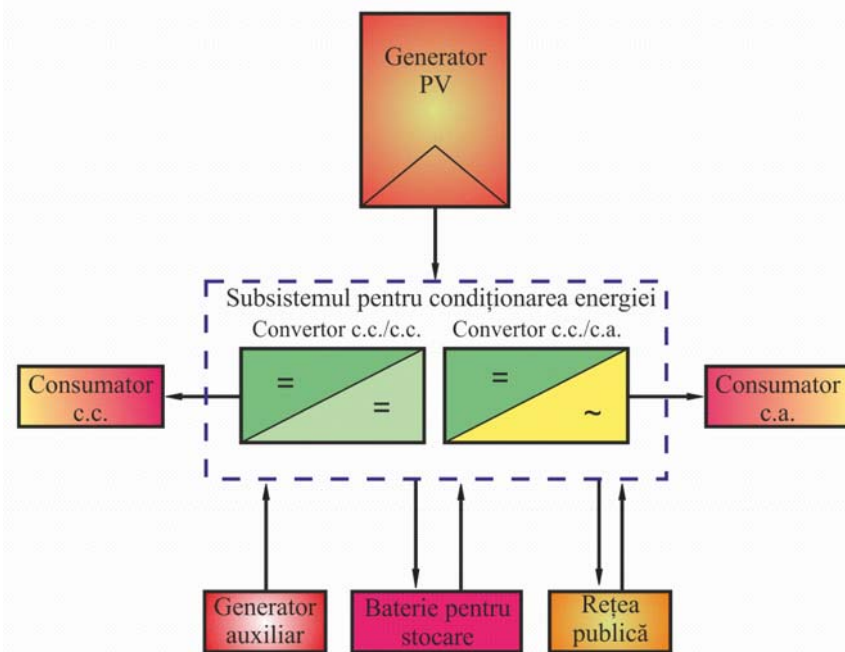


Fig. 5. Structura unui sistem fotovoltaic.

Toate aceste componente trebuie să fie interconectate, dimensionate și specificate pentru a funcționa într-un sistem unic, numit sistem fotovoltaic. În figura 5 este prezentată structura unui sistem PV. Componentele principale sunt:

- modulul, panoul, câmpul de module sau, altfel spus, generatorul fotovoltaic. În cele prezentate mai sus, au fost analizate caracteristicile și parametrii generatorului PV;
- bateria de acumulatori;
- subsistemul pentru condiționarea energiei electrice, care includ și elemente de măsurare, monitorizare, protecție etc;

- sursa auxiliară de energie, de exemplu, un grup electrogen (*back-up generator*), care funcționează cu benzină sau motorină. În acest caz, sistemul PV se mai numește **sistem PV hibrid**.

Sistemele PV se împart în două categorii principale: **conectate la rețea** (*grid - connected*) care funcționează în paralel cu rețeaua electrică publică și **sisteme PV autonome** (*stand - alone PV systems*).

Sistemele PV conectate la rețea pot fi divizate în: sisteme PV, în care rețeaua electrică publică are rol de sursă auxiliară de energie (*grid back - up*), sisteme PV, în care excesul de energie PV este furnizat în rețea (*grid - interactive PV systems*) și centrale electrice PV (*multi MW PV systems*), care furnizează toată energia produsă în rețea.

În figura 6 este reprezentată utilizarea unui sistem fotovoltaic pentru asigurarea necesităților energetice casnice, în situația în care locuința este izolată față de rețeaua publică de alimentare cu energie electrică (sistem PV autonom).

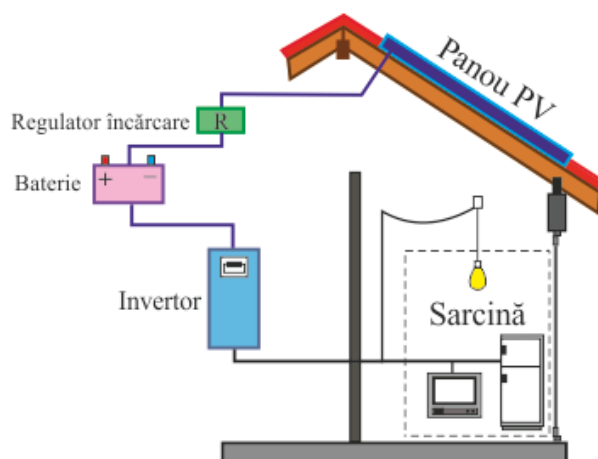


Fig. 6. Schema sistemului fotovoltaic pentru o locuință izolată.

Dacă există posibilitatea conectării locuinței la rețeaua publică de alimentare cu energie electrică, schema instalației este prezentată în figura 7, care ilustrează o variantă de conectare a sistemelor fotovoltaice în rețeaua electrică a unei case de locuit.

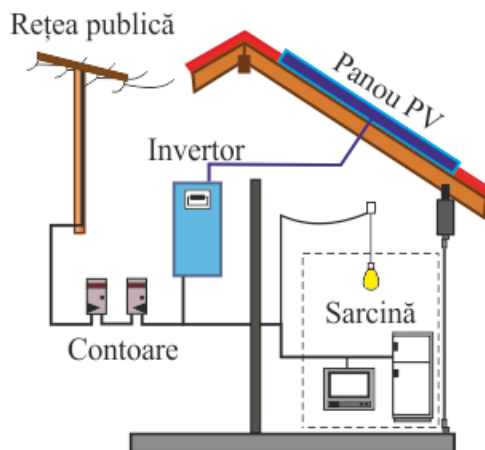


Fig. 7. Variantă de conectare a sistemelor fotovoltaice în rețeaua electrică, a unei case de locuit.

V.4. Procedeu experimental

V.4.1. Caracteristicile $I - U$ ale panoului PV la variația energiei radiației luminoase

Pentru determinarea experimentală a caracteristicilor $I - U$ ale unui panou PV, se realizează montajul din figura 8.

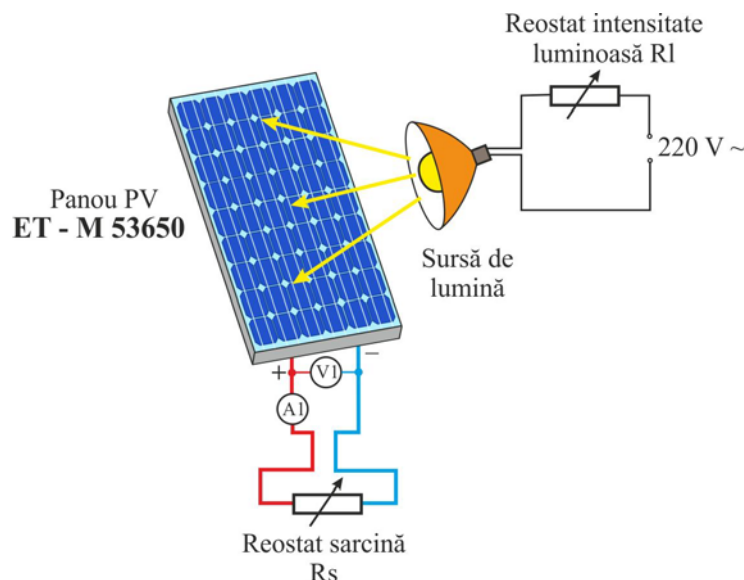


Fig. 8. Montajul experimental pentru determinarea caracteristicilor $I - U$ ale panoului PV

- se plasează sursa de lumină perpendicular pe panoul fotovoltaic la o anumită distanță, în așa fel încât panoul să fie luminat uniform;
- se plasează cursorul potențiometrului RI pe poziția de rezistență minimă (scurtcircuitat), prin aceasta asigurând valoare maximă a energiei luminoase transmise panoului;
- cu întrerupătorul K deschis, ($I = 0$), se citește indicația voltmetrului V1, obținând tensiunea de mers în gol U_0 (figura 3,c);
- se închide întrerupătorul K și pentru diferite poziții ale reostatului de sarcină R_s , se citesc indicațiile voltmetrului V1 și ale ampermetrului A1;
- se trec valorile U (V1) și I (A1) într-un tabel de date;
- se scurtcircuitază reostatul de sarcină R_s și se citește indicația ampermetrului A1, deci valoarea curentului de scurtcircuit I_{sc} (figura 3,c);
- se reprezintă dependența $I = I(U)$, care va avea forma din figura 3,c);
- se modifică poziția reostatului de intensitate luminoasă RI, micșorând energia luminoasă transmisă panoului PV;
- se repetă operațiile de mai sus și se obține o nouă caracteristică $I = I(U)$;
- pentru fiecare poziție a reostatului RI, se va obține o nouă caracteristică;
- se reprezintă familia de caracteristici astfel obținute, care vor avea aceeași alătură cu familia de caracteristici din figura 4,a).

V.4.2. Caracteristicile $I - U$ ale panoului PV la variația unghiului de incidență a radiației luminoase asupra panoului

- în montajul din figura 8, se păstrează poziția sursei luminoase pe verticală față de panoul PV;
- se menține reostatul RI scurtcircuitat;

- se modifică poziția pe orizontală a sursei luminoase cu un anumit unghi față de poziția anterioară;
- conform procedurii de mai sus, se ridică datele necesare trasării caracteristicii $I = I(U)$, corespunzătoare noului unghi de incidență;
- modifică din nou unghiul de incidență și pentru fiecare nouă poziție se ridică datele necesare trasării unei noi caracteristici;
- se reprezintă în același sistem de coordonate U, I familia de caracteristici obținute prin variația unghiului de incidență a radiației luminoase.

V.4.3. Studiul sistemului fotovoltaic funcționând în regim autonom

Pentru a ilustra funcționarea unui sistem fotovoltaic funcționând în regim autonom, se realizează montajul din figura 9.

În acest montaj, pentru poziția sursei de lumină în poziția inițială din paragraful 4.1 și reostatul Rl scurtcircuitat, se identifică elementele componente ale sistemului fotovoltaic și se explică rolul fiecăreia dintre ele.

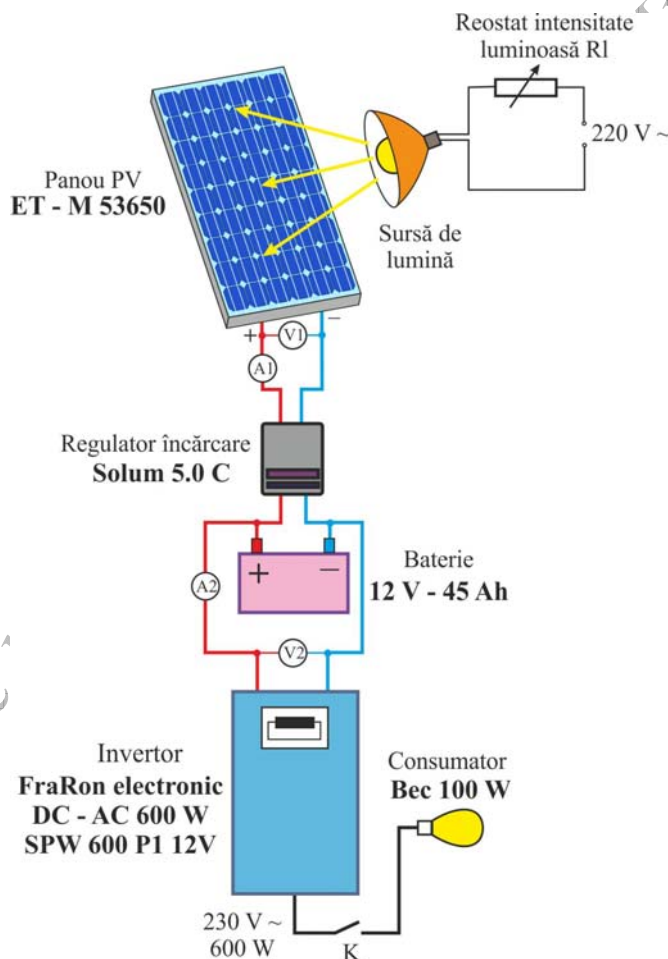


Fig. 9. Sistem fotovoltaic funcționând în regim autonom.

Dacă întrerupătorul K este deschis (curentul de sarcină al invertorului este zero), sistemul funcționează la gol. Curentul indicat de ampermetrul A2 este zero, iar tensiunea indicată de V2 este egală cu tensiunea de încărcare a bateriei, dată de regulatorul de încărcare. Tensiunea V1 este tensiunea corespunzătoare gradului de încărcare a panoului, grad de încărcare indicat de valoarea

curentului indicată de A1. Valoarea curentului absorbit de la panoul PV este stabilită de regulatorul de încărcare, în funcție de gradul de încărcare al bateriei. Cu cât bateria este mai încărcată, cu atât curentul de sarcină al panoului, stabilit de regulatorul de încărcare este mai mic. Dacă bateria este puternic descărcată, regulatorul de încărcare limitează curentul cerut de baterie de la panou, împiedicând funcționarea acestuia în regim de scurtcircuit, regim care nu asigură o valoare corespunzătoare a tensiunii de încărcare a bateriei și protejează panoul PV.

Prin închiderea întrerupătorului K, invertorul va intra în regim de funcționare în sarcină. Pentru valoarea sarcinii prezentate în figura 9, invertorul DC/AC va prelua majoritatea puterii electrice din baterie, panoul neputând susține de unul singur această sarcină. Acest fapt se poate remarca dacă se compară curenții indicați de ampermetrele A1 și A2. Curentul absorbit de către inverter (A2) este mult mai mare decât curentul absorbit de la panou (A1). Tensiunea la bornele panoului indicată de V1 este mai mare decât tensiunea la bornele bateriei indicată de V2.

Dacă se folosește o sarcină mai mică decât 50 W, panoul fotovoltaic poate susține singur această sarcină, rolul bateriei reducându-se la stocarea energiei produse de panou, pentru cazurile în care iluminarea lipsește (noaptea) sau este insuficientă (cer noros) pentru a produce întreaga putere de care este capabil (50 W).