

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE  
FIZIKAS NODAĻA

**SAULES BATERIJU EFEKTIVITĀTES PĒTĪJUMI ATKARĪBĀ NO  
TEMPERATŪRAS UN APGAISMOJUMA VIENMĒRĪBAS, UN TO  
KONSTRUKCIJAS OPTIMIZĀCIJAS IESPĒJAS**

MAĢISTRA DARBS

Autors: **Jānis Blūms**

Stud.apl. jb05008

Darba vadītājs: Dr. phys. Jānis Kleperis

RĪGA 2010

## ANOTĀCIJA

Darba ietvaros tiek pētīti šādi uzdevumi: 1) Saules bateriju izdalītās jaudas atkarības no apkārtējās vides parametriem (temperatūra, apgaismojuma vienmērīgums) noteikšana un priekšlikumi saules paneļu konstrukcijas optimizācijai; 2) Teorētisks aprēķins maksimāli iegūstamai no Saules elektrībai un siltumam LU Cietvielu fizikas institūta piemērā, ja ar Saules baterijām un kolektoriem noklāts viss DR fasādes jumts un pagrabā ierīkots ūdens rezervuārs siltuma uzglabāšanai.

## ABSTRACT

The following studies have been conducted during this work: 1) Efficiency dependence from environmental temperature of Solar panels – direct measurements and explanation in connection with optimization of construction of solar panels to minimize temperature dependence effects; 2) Theoretical calculations of maximal available electricity and heat from Solar panels and Solar collectors coated on all south-west side roof of Institute of Solid State Physics of University of Latvia, with the assumption that large water reservoir to store the heat is installed in the basement of institute.

## ATSLĒGVĀRDI

Saules baterijas

Saules kolektori

Saules enerģijas potenciāls

## SATURA RĀDĪTĀJS

Apzīmējumu saraksts.....	6
1. Ievads.....	8
2. Literatūras apskats temperatūras atkarībai .....	10
2.1. $J_{SC}$ atkarība no temperatūras .....	10
2.2. $V_{OC}$ un $ff$ atkarība no temperatūras .....	10
2.3. $I_{SC}$ , $V_{OC}$ , $ff$ un $\eta_s$ visi kopā .....	11
2.4. Kas notiek zemā temperatūrā .....	11
3. metodika .....	13
3.1. Iekārtas uzbūves shēma .....	13
3.2. Iekārtas darbības princips.....	13
4. rezultāti un diskusija.....	15
4.1. Dažas problēmas.....	15
4.2. Eksperimenta rezultāti .....	16
5. Secinājumi .....	20
6. Teorētisks aprēķins maksimāli iegūstamai no Saules elektrībai un siltumam LU Cietvielu fizikas institūta piemērā, ja ar Saules baterijām un kolektoriem noklāts viss DR fasādes jumts un pagrabā ierīkots ūdens rezervuārs siltuma uzglabāšanai.....	21
6.1. Ievads.....	21
6.2. Modeļa kopskats.....	21
6.3. Saules enerģija, ko saņem DR jumta virsma .....	21
6.3.1. Modelis Saules radiācijas potenciāla noteikšanai DR jumtam.....	25
6.3.2. Skaitliskais risinājums Saules radiācijas potenciāla noteikšanai DR jumtam.....	25
6.4. Elektriskā enerģija, ko ražo Saules baterija.....	34
6.5. Siltumenerģija, ko ražo Saules kolektors .....	35
6.5.1. Plakana Saules kolektora darbības princips.....	35
6.5.2. Aptuvens Saules kolektoru modeļa novērtējums .....	43
7. Kopējie secinājumi .....	45
7.1 Saules bateriju izejošās jaudas atkarība no temperatūras .....	45
7.2. Saules enerģija, ko saņem LU Cietvielu fizikas institūta DR jumts gada laikā .....	45
7.3. Elektriskā enerģija, ko ražos Saules baterijas, ja ar tām noklāt LU Cietvielu fizikas institūta jumtu.....	46
7.4. Siltumenerģija, ko ražos Saules kolektori, ja ar tiem noklāt LU Cietvielu fizikas institūta DR jumtu .....	46
Pateicības.....	48
Izmantotā literatūra un avoti.....	49

## APZĪMĒJUMU SARAKSTS

- A – virsmas laukums [ $m^2$ ];
- $B_{m/k}$  – attiecība (meteoroloģiskais Saules radiācijas potenciāls / bez atmosfēras (kosmiskais) Saules radiācijas potenciāls);
- $B_{s/d}$  – attiecība (saulainās stundas / dienas gaismas stundas);
- C – šķidrums īpatnējā siltumietilpība [ $J/(kg^{\circ}C)$ ];
- d - sienas biezums;
- E – jauda [ $W/m^2$ ], ko saņem virsma;
- $E_0$  – Saules konstante ( $1369 W/m^2$ );
- $E_h$  – enerģijas daudzums [ $kWh/m^2$ ], ko saņem virsma;
- $E_{hk}$  – enerģijas daudzums [ $kWh/m^2$ ], ko saņem virsma kosmosa tuvinājumā;
- $E_{h_{trans}}$  – enerģijas daudzums, ko Saules baterija transformē elektriskajā enerģijā;
- ff – volt-ampēru raksturlīknes aizpildījuma koeficients;
- $F_R$  – Saules kolektora siltumaizvades faktors;
- I – Saules radiācijas intensitāte [ $W/m^2$ ];
- $I_{SC}$  – īsslēguma strāva [A];
- $J_0$  – piesātinājuma pretstrāvas blīvums;
- $J_{SC}$  – slēgtas ķēdes strāvas blīvums;
- k – Bolcmaņa konstante ( $1.38 \cdot 10^{-23} J/K = 8.64 \cdot 10^{-5} eV/K$ );
- L – mazākuma lādiņnesēju difūzijas garums;
- M – šķidrums masas plūsma [ $kg/s$ ];
- $n_i$  – lādiņnesēju paškoncentrācija;
- $P_m$  – maksimālā jauda [W], kas atbilst optimālai slodzei volt-ampēru raksturlīknē;
- $P_S$  – Saules starojuma enerģija [W], kas krīt uz Saules bateriju;
- q – elektrona lādiņš ( $|q|=1.6 \cdot 10^{-19} C$ );
- $q_v$  – siltuma daudzums, kas izplūst vienas vienības laikā caur vienas vienības laukumu [ $W/m^2$ ];
- $Q_i$  – Saules kolektora uzņemtais siltuma daudzums;
- $Q_0$  – siltuma daudzums, ko Saules kolektors zaudē, atdodot to apkārtējai videi;
- $Q_u$  – lietderīgais siltuma daudzums, ko ražo Saules kolektors;
- T – temperatūra [K];
- $T_0$  – Saules kolektora izejas temperatūra [ $^{\circ}C$ ];
- $T_a$  – āra gaisa temperatūra [ $^{\circ}C$ ];
- $T_c$  – vidējā Saules kolektora temperatūra [ $^{\circ}C$ ];

$T_{c1}$  – temperatūra Saules kolektora plates vienā pusē;  
 $T_{c2}$  – temperatūra Saules kolektora plates otrā pusē;  
 $T_i$  – Saules kolektora ieejas temperatūra [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $T_s$  – šķidrums ārējās malas, kas skarās klāt Saules kolektora iekšējai virsmai temperatūra;  
 $U_L$  – kopējais Saules kolektora siltuma zudumu koeficients [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ];  
 $V_{OC}$  – atvērta ķēdes spriegums [ $\text{V}$ ];

$\alpha$  – refrakcijas leņķis [ $^{\circ}$ ];  
 $\alpha_b$  – Saules kolektora absorbera absorbcijas koeficients;  
 $\alpha_s$  – vides siltumatdeves koeficients;  
 $\gamma$  – siltumvadāmības koeficients;  
 $\eta$  – Saules kolektora lietderības koeficients;  
 $\eta_s$  – Saules enerģijas transformācijas lietderības koeficients;  
 $\eta_{kor.}$  – koeficients (korekcija), kas raksturo papildus zudumus sistēmā;  
 $\theta$  – krītošās Saules radiācijas leņķis pret kolektora stikloto virsmu;  
 $\lambda$  – punkta ģeogrāfiskais garums [ $^{\circ}$ ] uz sfēras;  
 $\lambda_s$  – jumta normāles ģeogrāfiskais garums [ $^{\circ}$ ] uz sfēras;  
 $\lambda_f$  – Saules ģeogrāfiskais garums [ $^{\circ}$ ] uz sfēras;  
 $\Delta\lambda$  – Saules un jumta normāles ģeogrāfiskā garuma starpība [ $^{\circ}$ ];  
 $\mu$  – lādiņnesēju kustīgums;  
 $\Delta\sigma$  – leņķis [ $^{\circ}$ ] starp jumta normāli un starojuma virzienu;  
 $\tau$  – mazākuma lādiņnesēju dzīves laiks;  
 $\varphi$  – punkta ģeogrāfiskais platums [ $^{\circ}$ ] uz sfēras;  
 $\varphi_s$  – jumta normāles ģeogrāfiskais platums [ $^{\circ}$ ] uz sfēras;  
 $\varphi_f$  – Saules ģeogrāfiskais platums [ $^{\circ}$ ] uz sfēras;  
 $\Delta\varphi$  – Saules un jumta normāles ģeogrāfiskā platuma starpība [ $^{\circ}$ ];  
 $\chi$  – caurlaišanas koeficients Saules kolektora virsmai;

## 1. IEVADS

Visa pasaule mums apkārt ir viena vienīga enerģija. Tikai tai ir ļoti dažādas formas. Parasti mēs enerģiju pazīstam, kā starojumu, kā daļiņu svārstības, kā daļiņu kustību. Pasaulē viss kustās – fotoni, atomi, ķermeņi un to sistēmas.

Arī cilvēks savā ikdienā saskaras ar atziņu, ka lai paveiktu kādu darbu, ir nepieciešama enerģija. Mūsdienās cilvēks attīsta dažādas tehnoloģijas. Tās kļūst arvien jaudīgākas un prasa arvien lielāku enerģijas daudzumu. Un līdzšinējie enerģijas avoti ar laiku kļūst nepietiekami. Aktuāls kļūst jautājums: kā iegūt trūkstozo enerģiju? Ir trīs risinājumi:

- 1) Taupīgāk izmantot esošo enerģiju;
- 2) Atrast jaunus enerģijas avotus;
- 3) Attīstīt esošās tehnoloģijas.

Principā enerģiju var iegūt no visurienes, jo tā ir visur. Vajag tikai atrast atbilstošam gadījumam piemērotu metodi. Bet ir viena svarīga lieta. Iegūstot enerģiju jebkādā veidā, pats enerģijas iegūšanas process atstāj ietekmi uz apkārtējo pasauli. Tas var atstāt gan sliktu ietekmi, gan arī labu ietekmi. Protams, slikts vai labs ir relatīvs jēdziens. Pasaulē gandrīz viss ir relatīvs.

Mūsdienās daudzi enerģijas iegūšanas veidi ir videi kaitīgi, piemēram, atomelektrostacijas, naftas produktu kurinātāji. Aktuāli kļūst jautājumi par daudzu resursu drīzu izbeigšanos. Jārod risinājums. Jāattīsta un jāizmanto tādi resursi, kas nenodara kaitējumu mūsu planētas dzīvai radībai un ir atjaunojami. Saule, vējš, ūdens ir tikai daži no tiem.

Pagaidām ir divi vispopulārākie Saules enerģijas iegūšanas veidi. Saules baterijas un Saules kolektori. Ar Saules baterijām ir iespējams iegūt elektrisko enerģiju, bet ar Saules kolektoriem ir iespējams iegūt siltumenerģiju. Bet aktuāls ir arī jautājums, kā šos divus enerģijas iegūšanas veidus padarīt efektīvākus. Jo ir zināms, ka patreizējās metodes ļauj savākt samērā nelielu Saules enerģijas daļu.

Mūsdienās Saules enerģija kļūst populāra pie mums, Baltijas valstīs, ne tikai ar termāliem kolektoriem siltuma iegūšanai, bet arī ar Saules baterijām elektriskās enerģijas iegūšanai. Latvijā jau pagājušā gada beigās pārdotas kvotas garantētam elektroenerģijas iepirkumam (kas 4 reizes pārsniedz cenas elektrībai, ko ražo lielākās VAS Latvenego elektrostacijas) priekš Saules enerģijas instalācijām ar kopēju jaudu 2MW. Tāpēc Latvijā aug interese par pieejamajām Saules baterijām un to īpašībām.

Viena no Saules bateriju efektivitātes problēmām ir saistīta ar paaugstinātu temperatūru. Ir zināms, ka daļa no Saules enerģijas Saules baterijās pārvēršas siltumā. Un šis siltums

samazina dažādu elektrisko procesu efektivitāti, kas norisinās Saules baterijās. Manā darbā tiks aplūkots, kas notiek ar enerģijas iegūšanas efektivitāti Saules baterijās, kad tās uzkarst.

Zināms, ka Saules kolektori daudz efektīvāk transformē Saules starojumu siltumenerģijā nekā Saules baterijas – elektroenerģijā. Un tie ir arī relatīvi lētāki, kas padara tos vieglāk pieejamus sabiedrībai. Saules kolektoru ražoto siltumenerģiju var izmantot, piemēram, kā siltu ūdeni mazgāšanai, apkurei u.c. sadzīves vajadzībām. Pie tam siltumenerģiju iespējams ražot arī mākoņainā laikā.

Tāpēc rodas visdažādākās idejas, kā mēs varam apmierināt savas vajadzības videi draudzīgā veidā – izmantojot zaļas tehnoloģijas. Un šajā darbā tiks apskatītas divas šādas idejas. Tiks izveidots modelis, kas ļaus aptuveni novērtēt, kāds būs ieguvums, ja LU Cietvielu fizikas institūta DR jumtu noklāt ar Saules baterijām un Saules kolektoriem.

## 2. LITERATŪRAS APSKATS TEMPERATŪRAS ATKARĪBAI

Es vēlētos pieminēt dažas pamata lietas no teorijas, lai vēlāk varētu aplūkot manu eksperimentu atbilstību vai neatbilstību tai.

Saules bateriju lietderības koeficienta atkarību no temperatūras var aplūkot, atsevišķi aplūkojot  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$  un  $ff$  atkarību no temperatūras, kur  $J_{SC}$  – slēgtas ķēdes strāvas blīvums,  $V_{OC}$  – atvērtas ķēdes spriegums,  $ff$  – volt-ampēru raksturliķnes aizpildījuma koeficients (1-3).

### 2.1. $J_{SC}$ atkarība no temperatūras

$J_{SC}$  atkarīgs no temperatūras galvenokārt caur tā saistību ar mazākuma lādiņnesēju difūzijas garumu:

$$L=(\mu kT\tau/q)^{1/2} \quad 2-1$$

kur  $\mu$  – lādiņnesēju kustīgums,  $k$  – Bolcmaņa konstante ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K =  $8.64 \cdot 10^{-5}$  eV/K),  $T$  – temperatūra,  $\tau$  – mazākuma lādiņnesēju dzīves laiks,  $q$  – elektrona lādiņš ( $|q|=1.6 \cdot 10^{-19}$  C).

Eksperimentāli tiek novērots, ka elektronu dzīves laiks  $\tau_n$  monotoni aug, palielinoties temperatūrai  $T$  (aptuveni proporcionāli  $T^{1.5}$ , kad  $T \approx 300$  K zema injekcijas līmeņa apstākļos). Lādiņnesēju kustīguma  $\mu$  temperatūras atkarību nosaka lādiņnesēju izkliedes pamatmehānisms. Zemas leģēšanas pakāpes silīcijam  $\mu \sim T^{-2}$ , un tāpēc  $L$  praktiski nav atkarīgs no temperatūras.

Mainoties temperatūrai, nedaudz nobīdās optiskā absorbcijas spektra mala, kas izsauc  $J_{SC}$  izmaiņas. Šīs izmaiņas ir relatīvi nelielas - silīcijam  $(\Delta J_{SC}/J_{SC})/\Delta T \approx 0.03\%/^{\circ}\text{C}$ . Zināms arī, ka neliels  $J_{SC}$  pieaugums, palielinoties temperatūrai, ir saistīts ar izmaiņām gaismas absorbcijas koeficientā temperatūras iespaidā.

No eksperimentāliem novērojumiem zināms, ka lielākai daļai kvalitatīvu Saules bateriju  $J_{SC}$  ir gandrīz konstanta un neievērojami pieaug, pieaugot temperatūrai.

### 2.2. $V_{OC}$ un $ff$ atkarība no temperatūras

$V_{OC}$  un  $ff$  samazinājums, pieaugot temperatūrai, pārsvarā rodas no izmaiņām lādiņnesēju paškoncentrācijā  $n_i$ . Pieaugot temperatūrai, piesātinājuma pretstrāvas blīvums  $J_0$  palielinās eksponenciāli, kas izraisa gandrīz lineāru  $V_{OC}$  kritumu, pieaugot temperatūrai:

$$V_{OC}=(kT/q)\ln(J_{SC}/J_0) \quad 2-2$$

$$ff = P_m / (V_{OC} I_{SC}) \quad 2-3$$

kur  $P_m$  – maksimālā jauda, kas atbilst optimālai slodzei volt-ampēru raksturlīknē,  $I_{SC}$  – īsslēguma strāva.

Parasti  $ff$  diezgan strauji samazinās, palielinoties temperatūrai.

Uz silīcija bāzes veidotu Saules bateriju ar homogēnu pāreju Saules enerģijas transformācijas lietderības koeficients:

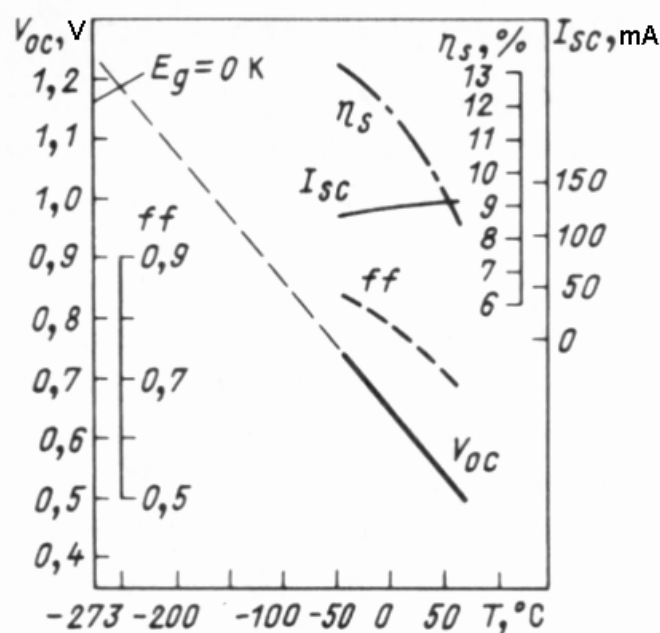
$$\eta_s = (V_{OC} J_{SC} ff) / P_s \quad 2-4$$

kur  $P_s$  – Saules starojuma enerģija, kas krīt uz Saules bateriju.

Zināms, ka šis koeficients sasniedz savu maksimālo vērtību temperatūru intervālā no -150 līdz -100°C. Temperatūrā, kas ir tuva 25°C,  $\eta_s$  mainās ar ātrumu  $\Delta\eta_s/\Delta T \approx -0.05\%/^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3. $I_{SC}$ , $V_{OC}$ , $ff$ un $\eta_s$ visi kopā

Iepriekš apskatīto parametru ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $ff$  un  $\eta_s$ ) eksperimentāli izmērītās atkarības no temperatūras var apskatīt (2.1. att.), kas ir no grāmatas (1).



2.1. att. Fotoelektrisko parametru temperatūras atkarības eksperimentālai silīcija Saules baterijai ar virsmas laukumu  $4 \text{ cm}^2$  pie  $P_s = 140 \text{ mW/cm}^2$ . Līkne  $V_{OC}(T)$  ir ekstrapolēta līdz  $T = 0 \text{ K}$

### 2.4. Kas notiek zemā temperatūrā

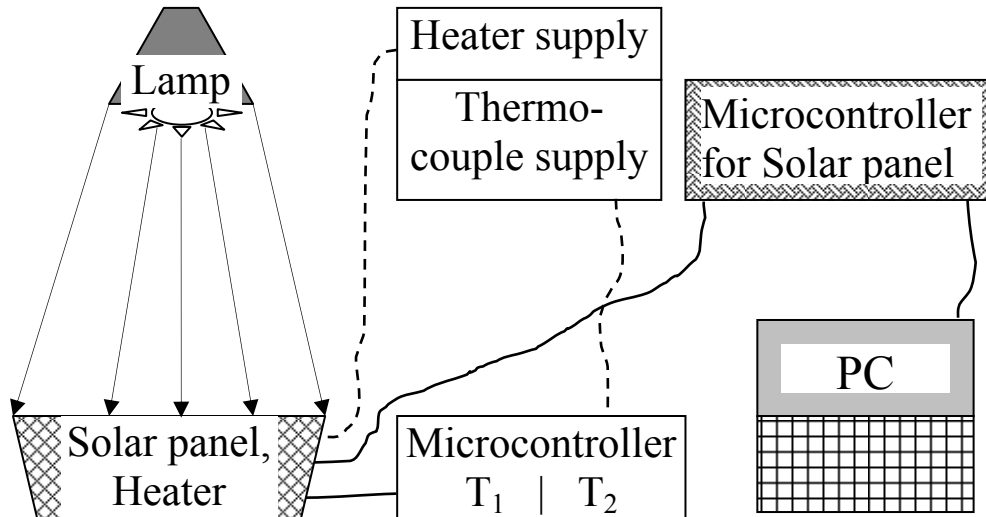
Zemās temperatūrās Saules bateriju darbībā rodas īpašas problēmas. Ja lādiņnesēju kustīgumu nosaka to izkliede uz piemaisījumiem, tad iespējama ievērojama  $L$  samazināšanās

un līdz ar to arī  $J_{SC}$  samazināšanās. Zemās temperatūrās kontakti var zaudēt savas omiskās īpašības, kas izraisīs  $ff$  ievērojamu samazinājumu. Lai gan silīcija bāzes Saules baterijām šī problēma ir zināmā mērā atrisināta pateicoties  $p^+$  slāņa radīšanai.

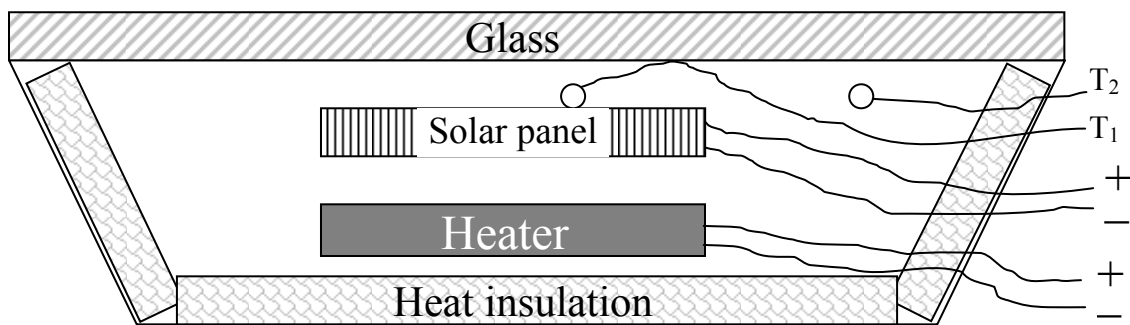
### 3. METODIKA

#### 3.1. Iekārtas uzbūves shēma

Lai izmērītu silīcija Saules baterijas fotoelektrisko parametru atkarības no temperatūras tika izveidota (3.1. att. un 3.2. att.) redzamā iekārta. (3.1. att.) redzams visas iekārtas kopskats, bet (3.2. att.) redzams Saules baterija un sildītājs tuvplānā.



3.1. att. Iekārtas kopskats



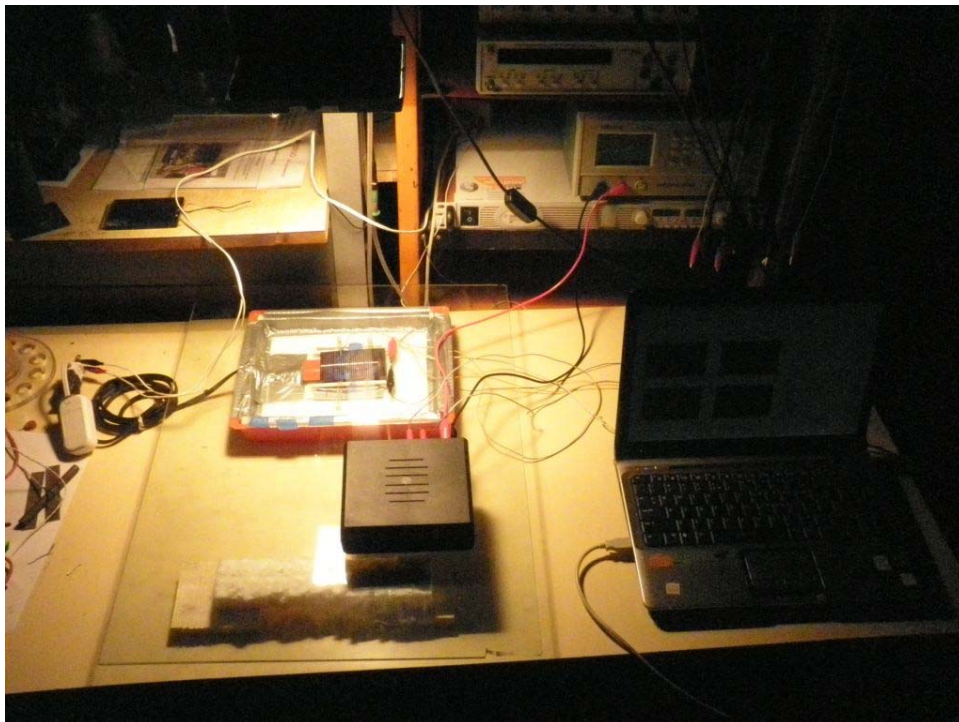
3.2. att. Saules baterija un sildītājs tuvplānā

#### 3.2. Iekārtas darbības princips.

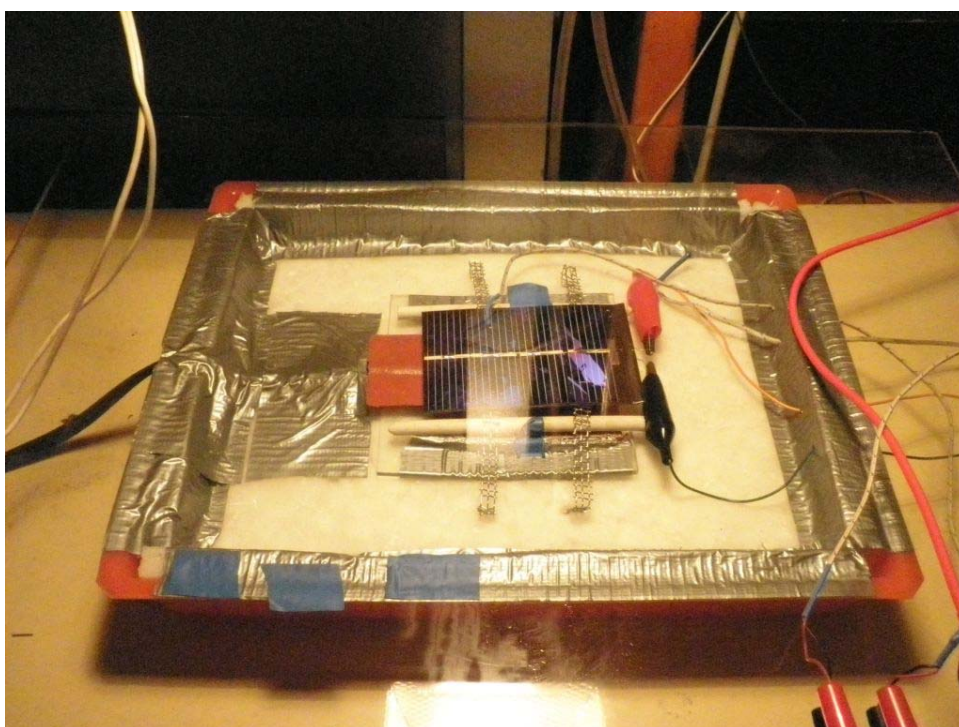
Ar sildītāju tiek sildīta Saules baterija. Kā gaismas avots tiek izmantota halogēnā lampa. Termopāru temperatūru uzrāda mikrokontrolieris. Volt-ampēru raksturlīknes tiek uzņemtas ar speciālu mikroskāmu, kas uzņemtos datus nosūta uz datoru.

Eksperimenta gaitā, kad Saules baterija ir uzsilusi līdz noteiktai temperatūrai, tiek uzņemta volt-ampēru raksturlīkne. Tad tiek palielināta sildītāja jauda un Saules baterija uzsilst līdz augstākai temperatūrai, pie kuras tiek uzņemta nākamā volt-ampēru raksturlīkne. Tādā veidā tiek iegūtas voltampēru raksturlīknes dažādām temperatūrām.

Iekārtas izskats eksperimenta laikā attēlots (3.3. att. un 3.4. att.).



3.3. att. Eksperimentālās iekārtas kopskats



3.4. att. Saules baterija ar sildītāju tuvplānā

## 4. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

### 4.1. Dažas problēmas

Temperatūras ietekme uz Saules bateriju fotoeletriskajiem parametriem, tika mērīta 3 dažādos eksperimentos. Pirmajā eksperimentā mērījumi tika veikti lielam ( $1.281 \text{ m}^2$ ) rūpnieciski ražotam Saules panelim. Tas tika ievietots lielā telpā ar jaudīgiem sildītājiem, apgaismošanai tika izmantotas divas halogēnās lampas (samērā nevienmērīgs apgaismojuma sadalījums uz paneļa virsmas) un volt-ampēru raksturliķnes tika uzņemtas ar pretestību magazīnas palīdzību. Otrajā eksperimentā, kas ir aprakstīts šajā darbā, tika izmantots neliels ( $43.12 \text{ cm}^2$ ) panelis. Tas tika ievietots kastē ar mazu sildītāju, apgaismošanai izmantota viena halogēna lampa (apgaismojuma sadalījums uz paneļa virsmas ir ievērojami vienmērīgāks) un volt-ampēru raksturliķnes tika uzņemtas ar īpašas mikroshēmas palīdzību, kas ir vadāma ar datora palīdzību (šādā veidā volt-ampēru raksturliķnes iespējams uzņemt daudz īsākā laika posmā). Trešais eksperiments ir otrā eksperimenta modifikācija, kur par sildītāju tiek izmantots Peltje elements, ar kuru iespējams ne tikai sildīt, bet arī dzesēt.

Šajā darbā tiks aprakstīti otrā eksperimenta rezultāti, jo pirmajā eksperimentā Saules paneļa apgaismojuma sadalījums bija samērā nevienmērīgs, bet trešajā eksperimentā dažām iegūtajām fotoelektrisko parametru līknēm ir diezgan nenoteikts raksturs (liela mērījumu punktu izkliede).

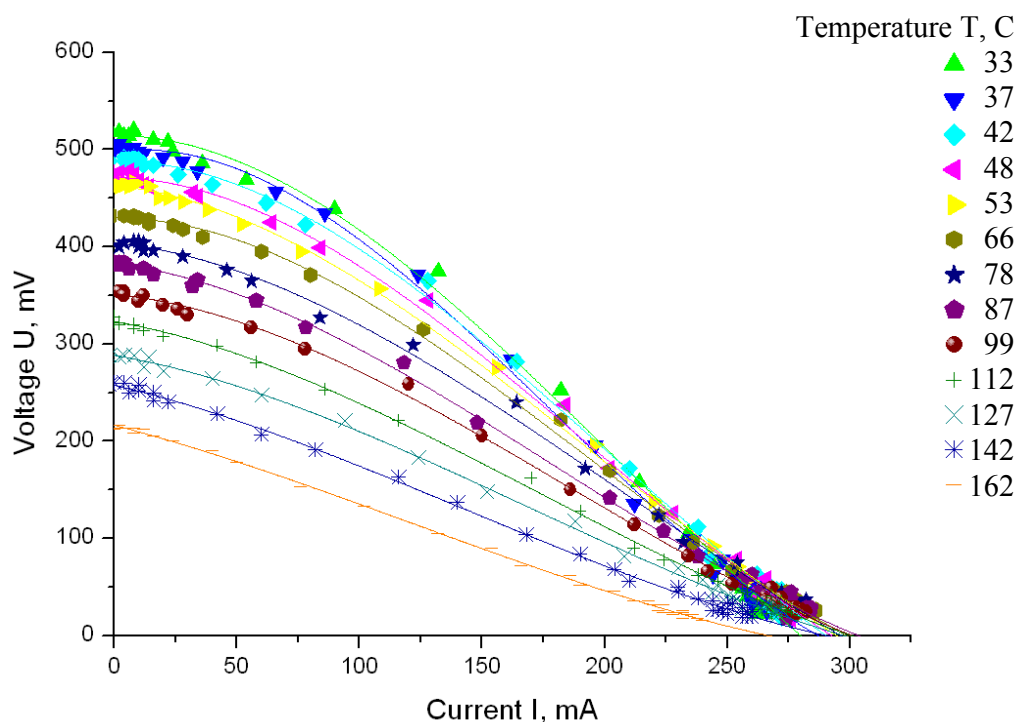
Eksperimenta laikā bija radušās dažas problēmas, kuras noteikti ir atstājušas ietekmi uz eksperimenta rezultātiem.

Jaudīgo halogēna lampu nedrīkst ilgi darbināt, citādi tā var sākt kust. Tāpēc tā tika ieslēgta kādas 10 sekundes pirms katras volt-ampēru raksturliķnes uzņemšanas. Zināms arī, ka pēc ieslēgšanas lampas starojuma temperatūra laika gaitā kāpj, līdz sasniedz zināmu līdzsvara stāvokli. Iespējams, ka 10 sekundes ir par maz, lai tiktu sasniegts līdzsvars. Lai visa eksperimenta gaitā saglabātu pēc iespējas nemainīgākus nosacījumus, laiks, kas tika dots lampas iesilšanai pirms katras volt-ampēru raksturliķnes uzņemšanas, tika uzturēts nemainīgs. Pēc katras volt-ampēru raksturliķnes uzņemšanas lampa tika izslēgta.

Volt-ampēru raksturliķnes tika uzņemtas automātiskā režīmā. Izveidotā iekārta ļauj iestatīt volt-ampēru raksturliķņu uzņemšanas precizitāti (mērījumu punktu skaitu). Diemžēl lielāks mērījumu punktu skaits prasa vairāk laika raksturliķnes uzņemšanai. Kā noskaidrojās, Saules baterijas temperatūra sāk diezgan strauji kāpt spožā halogēnās lampas gaismā. Tāpēc bija jāizšķiras par volt-ampēru raksturliķņu uzņemšanas precizitāti. Volt-ampēru raksturliķņu uzņemšanai tikai iestatīts laiks 20 s, kura laikā termopāru uzrādītā temperatūra kāpa par  $\approx 4^\circ\text{C}$ .

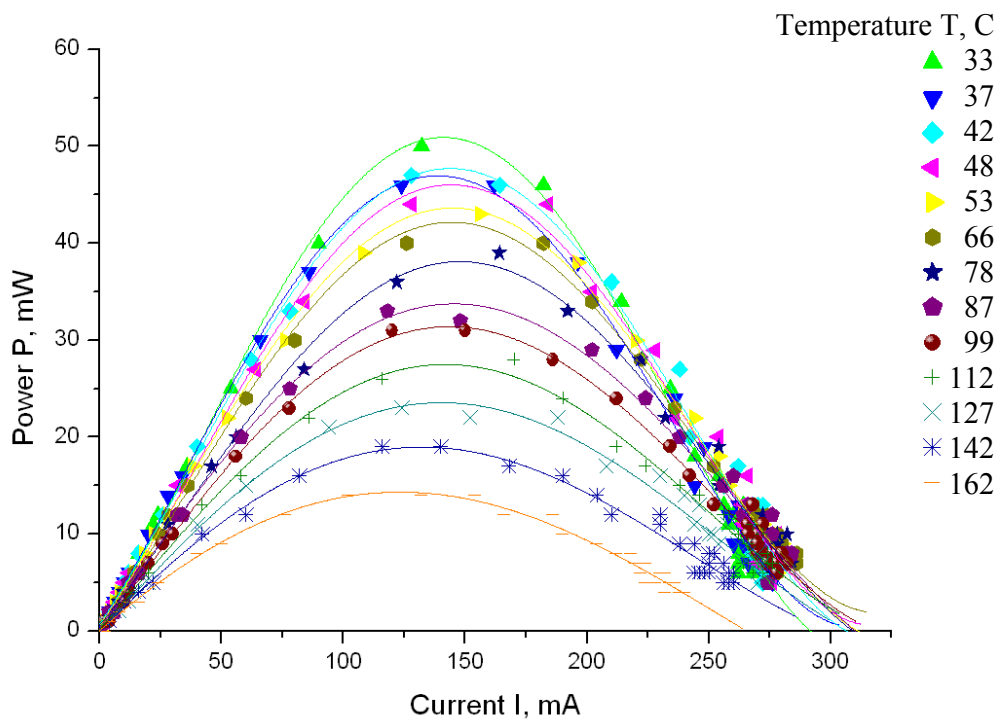
Tā kā pats termopāris arī bija atklāts lampas starojuma iedarbībai, tad nav īsti skaidrs, cik liela ir termopāru uzrādītās temperatūras atbilstība Saules baterijas temperatūrai. Cerams, ka nemainīgais režīms katras volt-ampēru raksturlīknes uzņemšanā vismaz saglabās parametru kvalitatīvo uzvedību. Kā vēlāk noskaidrojās, termopāra uzrādītās temperatūras uzvedības raksturs lampas gaismā nemainās, ja Saules baterija tiek izņemta no iekārtas.

## 4.2. Eksperimenta rezultāti



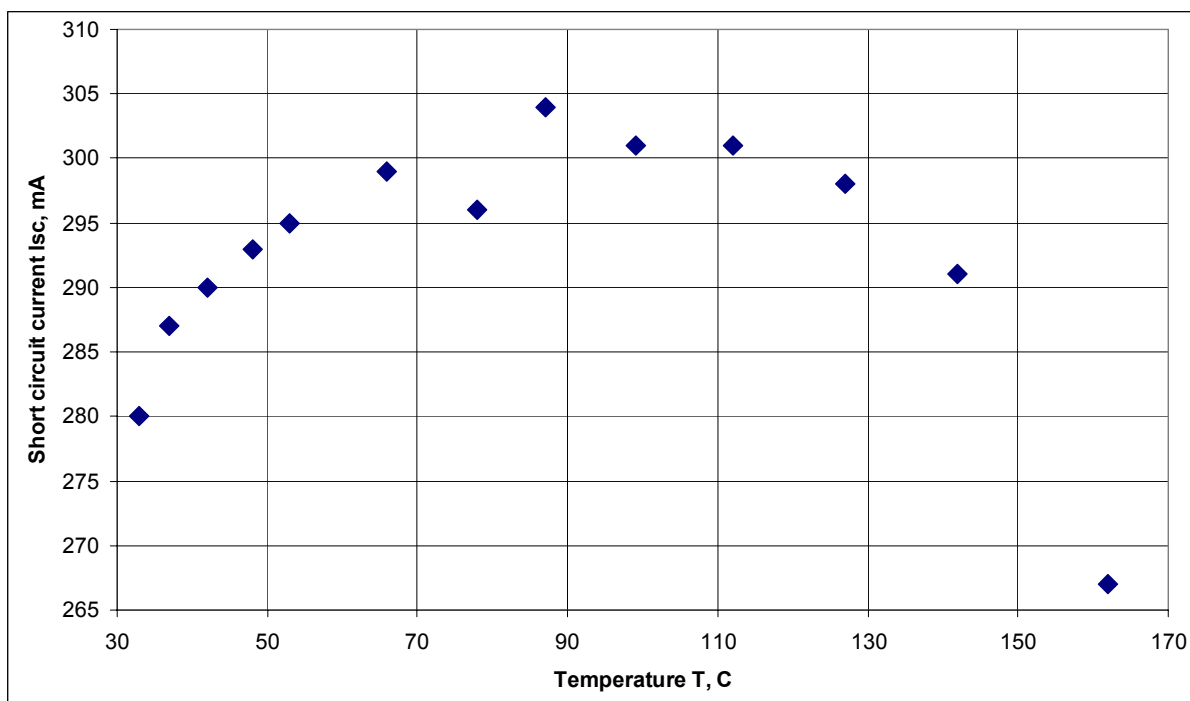
4.1. att. Volt-ampēru raksturlīknes silīcija Saules baterijai dažādās temperatūrās  $T$

(4.1. att.) redzams, ka pieaugot temperatūrai  $T$ , samazinās Saules baterijas izejošais spriegums  $U$  – gan bez slodzes, gan ar slodzi.



4.2. att. Saules baterijas izejošās jaudas P atkarība no strāvas I dažādās temperatūrās

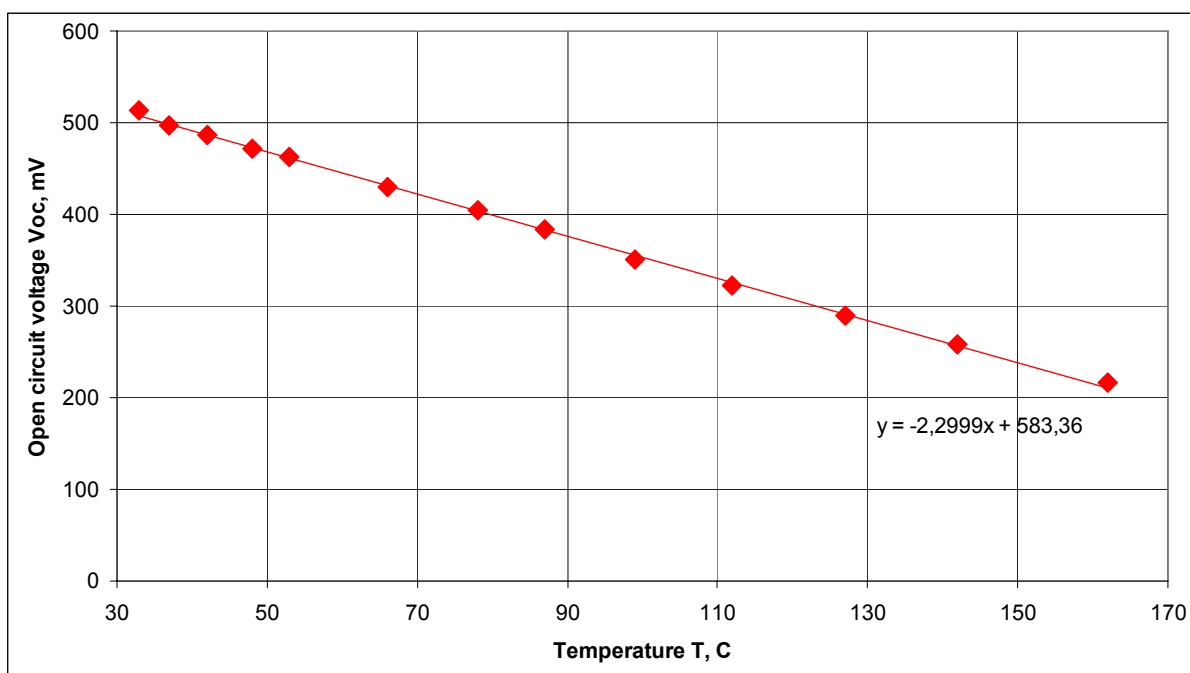
(4.2. att.) redzams, ka pieaugot temperatūrai T, samazinās Saules baterijas izejošā jauda P.



4.3. att. Saules baterijas īsslēguma strāvas  $I_{SC}$  atkarība no temperatūras T

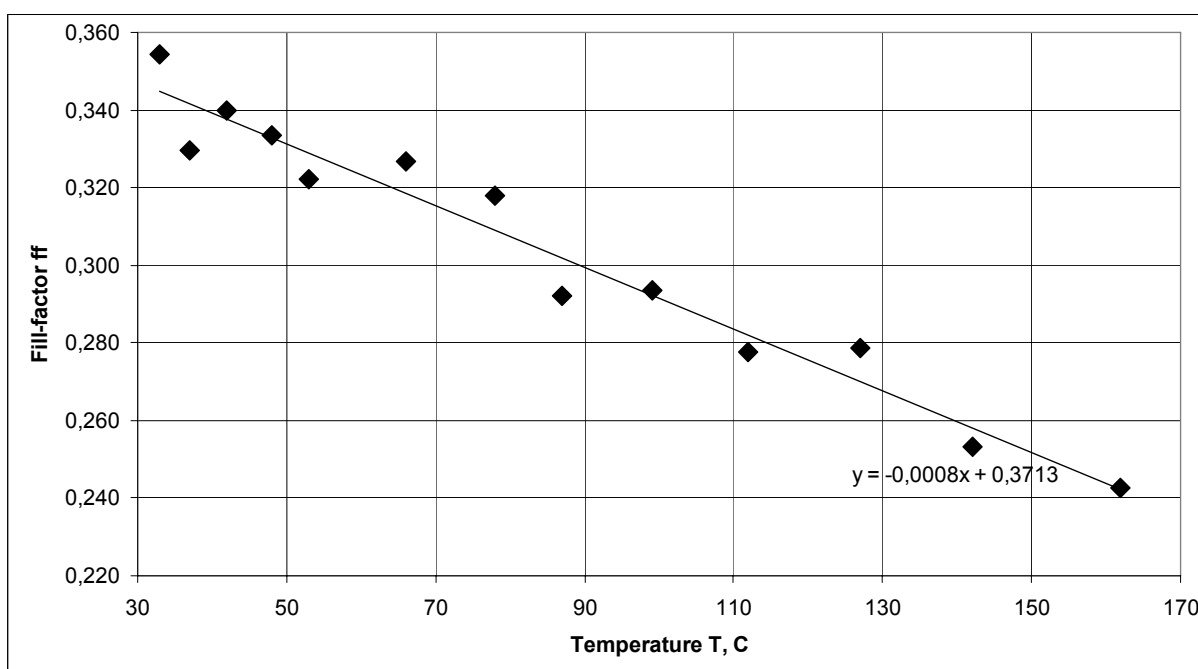
Līdz  $\approx 90^{\circ}\text{C}$  ir vērojams  $I_{SC}$  pieaugums, pie lielākas temperatūras veidojas kritums. (2.1. att.) redzams tikai  $I_{SC}$  pieaugums, lai gan (2.1. att.) redzamā līkne beidzas pie  $\approx 60^{\circ}\text{C}$ .

Iespējams, ka izmērītā  $I_{SC}$  izmaiņa saskan ar (1) izklāstīto teoriju, ja šī teorija būtu paredzējusi tik lielas temperatūras, kuras tika pielietotas eksperimentā.



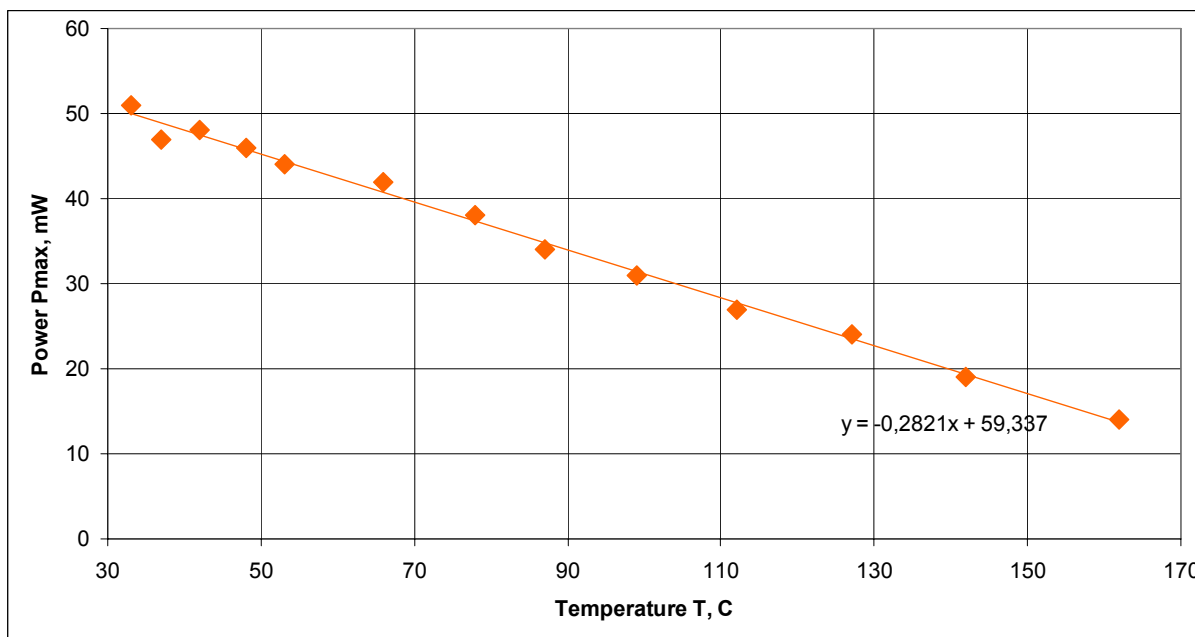
4.4. att. Saules baterijas atvērta ķēdes sprieguma  $V_{OC}$  atkarība no temperatūras T

$V_{OC}$  samazinās lineāri ar ātrumu  $2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . Šī linearitāte saskan ar informāciju zinātniskā avotā (1).



4.5. att. Volt-ampēru raksturlīknes aizpildījums ff Saules baterijai atkarībā no temperatūras T

Eksperimenta laikā  $P_{max}$  samazinās aptuveni lineāri ar ātrumu  $0.0008/^\circ\text{C}$ , un tas samazinās no  $\approx 350$  līdz  $\approx 240$ . Ja šo samazinājumu var pieņemt par strauju, kā tas minēts (1), tad tas apstiprina (1) izklāstīto teoriju.



4.6. att. Saules baterijas maksimālās izejošās jaudas  $P_{max}$  atkarība no temperatūras T

Eksperimenta laikā  $P_{max}$  samazinās lineāri ar ātrumu  $0.28 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ . Saules paneļa lietderības koeficientu  $\eta_s$  noteikt neizdevās, jo ir jāzina uz Saules paneli krītošās gaismas jauda  $P_s$ , kura eksperimentā netika noteikta. Bet no iegūtās līknes lineārā rakstura, izmantojot formulu (2-4), var droši apgalvot, ka  $\eta_s$  līknei arī būs lineārs raksturs. Lai iegūtu  $\eta_s$  līkni, ir jāpareizina  $P_{max}$  līkne ar koeficientu  $1/P_s$ . Tādējādi  $\eta_s$  līkne atšķirsies no  $P_{max}$  līknes ar citādu slīpuma koeficientu. Un ja (2.1. att.) redzamo  $\eta_s$  līkni var uzskatīt par aptuveni lineāru (tāda tā varētu izskatīties, ja no tās izgriež temperatūras intervālu, kas tiek aplūkots manā eksperimentā), tad arī mana eksperimenta līknei ir līdzīgs raksturs.

## 5. SECINĀJUMI

Temperatūra atstāj ievērojamu ietekmi uz ģenerēto jaudu silīcija Saules baterijām. Mūsdienās aktuāls ir jautājums par Saules bateriju izmantošanu vietās, kur ir daudz Saules. Bet tajās vietās parasti tieši arī ir viskarstāk. Tāpēc gribētos teikt, ka ir nepieciešams izstrādāt tehnoloģijas, kas atrisinās šo temperatūras problēmu. Iespējami divi varianti: esošo Saules bateriju dzesēšana vai jaunu no temperatūras mazāk atkarīgu Saules bateriju radīšana. Manuprāt, dzesēšana ir labs risinājums. Dzesējot bez elektriskās enerģijas ir iespējams iegūt arī siltumenerģiju. Un siltumenerģija tā pat kā elektroenerģija ir vērtīga. Mēs lietojam siltu ūdeni, mēs lietojam apkuri, mēs ar siltumenerģiju darbinām dažādus mehānismus. Dzesēt ir labi, ja ir ar ko. Šajā ziņā tuksnešos, kur ir daudz Saules, ziemā pagaidām nav radīta efektīva dzesēšanas risinājuma. Bet ir arī daži citi moderni veidi, kā var uzlabot Saules baterijas. Piemēram, ar gaismas koncentrēšanu, kas jau tiek plaši pielietots.

## 6. TEORĒTISKS APRĒĶINS MAKSIMĀLI IEGŪSTAMAI NO SAULES ELEKTRĪBAI UN SILTUMAM LU CIETVIELU FIZIKAS INSTITŪTA PIEMĒRĀ, JA AR SAULES BATERIJĀM UN KOLEKTORIEM NOKLĀTS VISS DR FASĀDES JUMTS UN PAGRABĀ IERĪKOTS ŪDENS REZERVUĀRS SILTUMA UZGLABĀŠANAI.

### 6.1. Ievads

Cilvēks savā dzīvē ļoti daudz laika pavada sapņojot par to, ko viņš varētu uztaisīt un realizēt. Ikvienu lietu un izgudrojumu kādreiz ir bijusi kā ideja, un tikai tad tā tika realizēta. Kad cilvēkam iešaujas prātā kāda iespējami ģeniāla doma vai ideja, viņš to grib realizēt. Tā viņš arī dara – materializē savus sapņus. Dažreiz veicas, dažreiz neveicas. Laika gaitā cilvēks iegūst pieredzi – jo labāk izdomāsi, jo labāk sanāks. Tāpēc cilvēks sāk rūpīgāk plānot savas idejas, pirms viņš reāli kaut ko no tām dara.

Viss sākas ar domu un ideju cilvēka prātā. Cilvēks sākumā attīsta savu ideju prātā līdz brīdim, kad parādās nepieciešamība pēc palīglīdzekļiem. Palīglīdzekļi var būt jebkas – papīrs, kalkulators, mēģinājumi, u.c. līdzekļi, kas atvieglo cilvēkam viņa idejas attīstīšanu. Kad viss ir rūpīgi izplānots, tad ir laiks ķerties pie plāna realizācijas.

Šajā gadījumā doma ir noklāt LU Cietvielu fizikas institūta DR jumtu ar Saules baterijām un Saules kolektoriem. Lai to izdarītu ir nepieciešami ļoti ievērojami resursi un līdzekļi. Pie tam nav zināms, vai tas viss atmaksāsies. Un tāpēc pirms ķerties pie šīs domas realizācijas ir visu rūpīgi jāizvērtē un jāizplāno. Jāizveido teorētisks modelis.

### 6.2. Modeļa kopskats

Jāuzskaita apstākļi, no kuriem šis modelis ir atkarīgs. Lai būtu vieglāk šo modeli izveidot, šos apstākļus var sadalīt 3 grupās:

- 1) Saules enerģija, ko saņem DR jumta virsma;
- 2) Elektriskā enerģija, ko ražo Saules baterija;
- 3) Siltuma enerģija, ko ražo Saules kolektors.

### 6.3. Saules enerģija, ko saņem DR jumta virsma

Pēdējās divas ir atkarīgas no pirmās, tāpēc lai novērtētu pēdējās divas, ir jānovērtē pirmā. Saules enerģija, ko saņem DR jumta virsma, ir maksimālais enerģijas daudzums, uz

kuru mēs varam tiekties. Un tas ir atkarīgs no virknes dažādu faktoru. Viens no faktoriem ir šīs virsmas laukums  $A$ , kuru es ērtības labad apskatīšu vēlāk. Tagad pieņemsim, ka šīs virsmas laukums ir  $1\text{m}^2$ .

Faktori, kuri ietekmē Saules enerģijas daudzumu, ko saņem šī virsma, ir ļoti dažādi: Saules radiācijas, kas nonāk līdz Zemes atmosfēras augšējiem slāņiem, spektrālais sastāvs un intensitāte; dažādi šķēršļi Zemes atmosfērā – gaismas absorbcija, izkliede, kas izsauc gan gaismas spektrālā sastāva, gan intensitātes izmaiņu.

Zināms, ka Saules radiācijas, kas nonāk līdz Zemes atmosfēras augšējiem slāņiem, spektrālais sastāvs un intensitāte ir atkarīgi no procesiem uz Saules un attāluma no Zemes līdz Saulei. Zemes orbīta ap Sauli nav ideāli apaļa. Tā ir mazliet izstiepta un līdzinās elipsei. Bet šis izstiepums ir samērā neliels – Zemes attālums līdz Saulei mainās no  $1,47 \cdot 10^{11}$  (m) līdz  $1,52 \cdot 10^{11}$  (m) (4). Šis attālums mainās neievērojami, tāpēc Saules radiācijas vidējais blīvums uz Zemes atmosfēras augšējās robežas ir **1369 W/m<sup>2</sup>** (4). Šī ir enerģija, kuru saņem virsma, kas ir novietota perpendikulāri Saules starojumam. Šī vērtība tiek saukta par Saules konstanti.

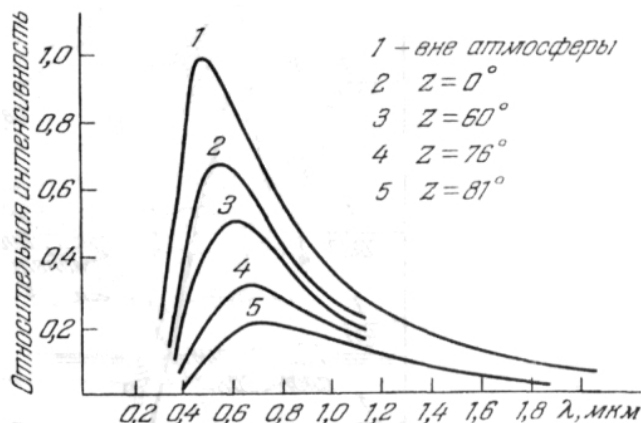
Saules gaisma, ejot cauri Zemes atmosfērai, tajā absorbējas un izkliedējas. Zemes atmosfēra nav homogēna un tā sastāv gan no gaisa, gan no mākoņiem, gan no cietām (putekļveida) daļiņām. Un šīs sastāvdaļas mainās gan telpā, gan laikā. Pie tam, katru no šīm sastāvdaļām arī var iedalīt vēl sīkākās sastāvdaļās, kas arī ir mainīgas gan laikā, gan telpā. Tātad ļoti daudz faktoru, kas šo, no Saules nākošu enerģiju, samazina. Rodas jautājums, kā novērtēt visus šos faktoros. Ja man kāds uzdotu šo jautājumu, tas es ieteiktu veikt šādu eksperimentu: uzstādīt nelielu Saules baterijas testa modeli attiecīgajā konfigurācijā ar tam nepieciešamo sistēmu, ļaut šim testa modelim darboties vienu gadu un tad nolasīt no elektroenerģijas skaitītāja, cik daudz elektroenerģijas savākts. Tas būtu visuzticamākais rezultāts. Un tas ļautu visprecīzāk novērtēt, cik liels ieguvums būtu, ja nelielas sistēmas vietā uzstādītu lielu sistēmu.

Pastāv uzskats, ka šāds novērtējums nav gudrs. Manuprāt, ir gan. Tas ir samērā vienkāršs un prasa vismazāko piepūli. Vajag tikai ziedot mazlietiņ līdzekļu, uzstādīt un ļaut iekārtai darboties brīvā dabā. Tieši tāpēc tas ir vispiemērotākais risinājums.

Bet ko darīt, ja trūkst laika? Nav laika gaidīt vienu gadu, nav arī laika gaidīt pusgadu (no ziemas Saulgriežiem līdz vasaras Saulgriežiem). Vai varbūt nav līdzekļu uzstādīt testa modeli? Tad ir jāmeklē kāds teorētisks piegājiens. Tas nozīmē, ka ir jāpielieto zināmās teorijas un formulas (kuras ne vienmēr spēj sniegt visai precīzu rezultātu), lai aprakstītu tos procesus, kas ietekmē Saules radiāciju, līdz tā pārvēršas elektriskajā enerģijā. Parametru ir ļoti daudz, bet paskatīsimies, ko mēs varam darīt, lai šajā modelī ieviestu kaut kādu kārtību.

Visus Zemes atmosfēras elementus (mākoņi, dažādas gāzes, putekļi, u.c.) varētu pieņemt par vienu vienotu nehomogēnu substanci. Šī substance mainās gan laikā, gan telpā. Bet ja apskata garāku laika posmu un lielāku telpu, tad šo substanci varētu novērtēt ar tai piemēroto parametru vidējām vērtībām. Piemēram, lai noskaidrotu kādas virsmas savāktu Saules enerģiju viena gada laikā, nav nepieciešams raksturot šo substanci konkrētai dienai. Pietiek novērtēt šo substanci ar piemērotu vidējo viena gada vērtību. Un šajā ziņā jau ir publiski pieejami dažādi meteoroloģiska rakstura novērojumi, kas ir veikti jau daudzus gadus dažādās Zemeslodes vietās. Un daudzām vietām (valstīm, pilsētām) no daudzu gadu novērojumiem ir radīts vidējais klimata profils, kas ietver sevī dažādu parametru vidējās vērtības šīm vietām. Piemēram, Saules radiācijas un fotovoltaisko elementu elektriskais potenciāls Eiropas Savienības valstīm (5, 6). Tur tiek ņemti vērā dažādi klimatiskie parametri, kas iegūti no meteoroloģiskiem novērojumiem, kas veikti no 1981–1990. gadam. Diemžēl (5) nesniedz precīzu aprakstu par parametriem, kas tur tiek ņemti vērā, ne arī par veidu, kā tiek rēķināts šis Saules radiācijas potenciāla algoritms. Un es piedāvāju izmantot šo Saules radiācijas potenciālu tikai kā korekciju savam teorētiskā aprēķina rezultātam. Pieņemsim, ka (5, 6) dod tiešām ticamu informāciju, kas ir iegūta, ņemot vērā ievērojumu meteoroloģiskajos novērojumos gūto rezultātu daudzumu.

Lai ieviestu zināmu skaidrību par faktoriem, kas varētu ietekmēt šo Saules radiācijas potenciālu, es pieminēšu dažus iespējamus faktoros. Daļa Saules gaismas, ejot cauri gaisa slānim, tajā absorbējas, daļa – izkliedējas. Tāpēc Saules konstantes vērtība uz Zemes virsmas (zem atmosfēras) samazinās par  $\approx 23\%$  (4), ja Saule ir zenītā. Gaismas absorbcijas un izklīdes kombināciju sauc par ekstinkciju, un tā ir atkarīga no gaisa slāņa biezuma, caur kuru iet gaisma. Tā kā samazinoties Saules leņķiskajam augstumam virs horizonta, palielinās šī gaisa slāņa biezums, tad ekstinkcija pieaug. Kas noved pie tā, ka novērojamā Saules gaismas intensitāte būs mazāka, ja Saule atradīsies zemāk virs horizonta. Arī enerģijas sadalījums Saules spektrā ekstinkcijas iedarbībā mainās (skatīt *6.1. att.*) (4).



6.1. att. Enerģijas sadalījums Saules spektrā atkarībā no Saules leņķiskā attāluma līdz zenītam. Uz X-ass atlikti gaismas viļņa garumi [μm], uz Y-ass atliktas relatīvās intensitātes

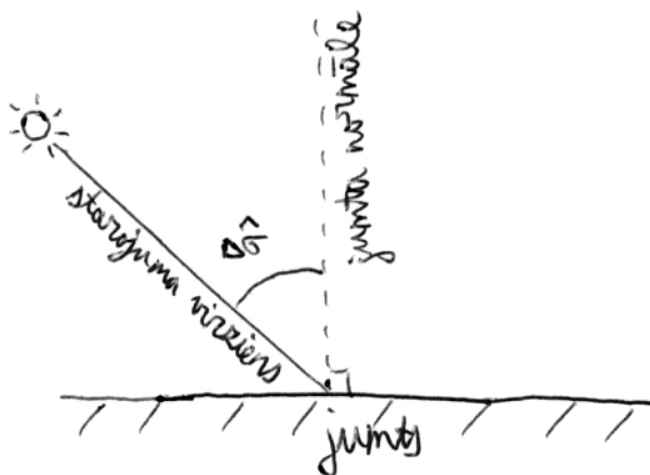
Mākoņi ir nākamā parādība, kas ietekmē līdz zemes virsmai nonākušo Saules radiāciju. Tie gan absorbē, gan izklīdē Saules gaismu. Pie tam mākoņi ir ļoti dažādi. Var būt viegla dūmaka, bet var būt biezs pērķona mākonis. Varētu, piemēram, ieviest parametru, kas nosaka Saulaino stundu attiecību pret visu dienasgaismas stundu attiecību. Saulaino stundu skaits Rīgā vidēji gadā ir **≈1812 stundas** (7). Dienas gaismas stundu skaitu Rīgā gada laikā var izrēķināt izmantojot datorprogrammu „Alyone Ephemeris 4” kombinācijā ar datorprogrammu „MS Excel”, un tas ir **≈4473 stundas** gadā. Jāņem vērā, ka tā kā Zemes kustība ap Sauli nav vienmērīga, tad planētas ziemeļu puslodē Saule uzturas 4 dienas ilgāk par pusgadu (8). Un līdz ar to vidējais dienas garums ziemeļu puslodē būs ievērojami lielāks par 12 stundām. Šī sastādītā attiecība (Saulainās stundas / Dienas gaismas stundas) var kalpot, kā ļoti pavisams tuvinājums mākoņu atstātai ietekmei uz Saules gaismu. Jo Saules baterijas dod zināmu iznākumu arī mākoņainā laikā, vai kad Saule ir daļēji aizklāta ar plāniem mākoņiem.

Ir pilnīgi iespējama arī mākoņu regulāra un virzīta uzvedība, kad visa gada laikā kāds no debesjuma apgabaliem (debespuses) ir vairāk apmācies nekā cits apgabals. Piemēram, ja DR puse būs vidēji skaidrāka nekā D puse, tad iespējams, ka uz DR vērstas Saules baterijas dos lielāku enerģijas iznākumu nekā uz D vērstas. Tātad mākoņiem var būt izteikta virzīta uzvedība gan laikā, gan telpā.

Var, piemēram, diezgan vienkārši izrēķināt, cik daudz enerģijas Saules baterijas saņem pa tiešo no Saules, zinot leņķi, kurā starojums krīt uz Saules baterijām. Bet jāņem vērā, ka arī atmosfērā izklīdētā gaisma krīt uz Saules baterijām, un lai novērtētu to, ir jāizmanto citas formulas un metodes.

### 6.3.1. Modelis Saules radiācijas potenciāla noteikšanai DR jumtam

Zināms, ka debesīs izkliedētā Saules starojuma vidējā vērtība Rīgā ir (izkliedētā gaisma / kopējā gaisma = 0,52) (6), bet lai vienkāršotu modeli, es neņemšu vērā izkliedēto Saules starojumu. Tādā veidā Saules baterijas darbosies tikai tiešajos Saules staros. Tas nosaka to, ka Saulei ir jābūt Saules baterijas redzamības lokā, lai tā dotu iznākumu. Saules enerģija, kuru saņem DR jumts, ir atkarīga no leņķa, ko veido DR jumta normāle ar Saules starojuma virzienu (skatīt 6.2. att.).



6.2. att. Leņķis, ko veido jumta normāle ar starojuma virzienu

Saules enerģiju, kuru šādā gadījumā saņem jumts, var izteikt ar formulu:

$$E = E_0 \cos \Delta\sigma \quad 6-1$$

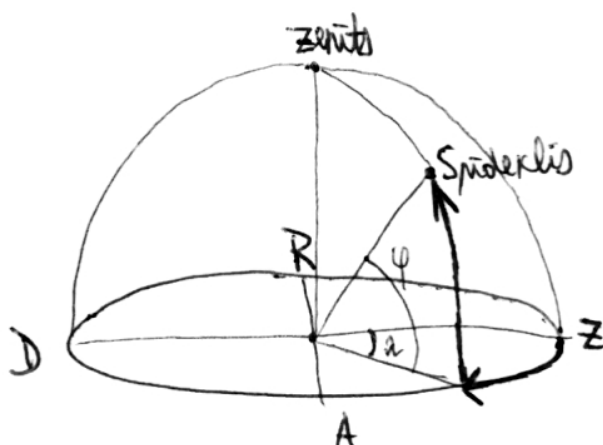
kur  $E_0$  – Saules konstante (enerģija, kuru saņem jumts, ja  $\Delta\sigma = 0^\circ$ ).

Tā kā Saule dienas laikā pārvietojas pa debesīm, tad arī šis leņķis visu laiku mainīsies. Lai varētu izrēķināt summāro enerģiju, ko saņem jumts dienas, mēneša vai gada laikā, ir jāizved vienādojums, kurš izsaka šī leņķa atkarību no laika un jānointegrē tas vajadzīgajā laika intervālā. Ņemot vērā, ka šāda vienādojuma izvešana var būt visai komplicēta, piedāvāju izdevīgāku risinājumu: atrisināt šo uzdevumu skaitliski.

### 6.3.2. Skaitliskais risinājums Saules radiācijas potenciāla noteikšanai DR jumtam

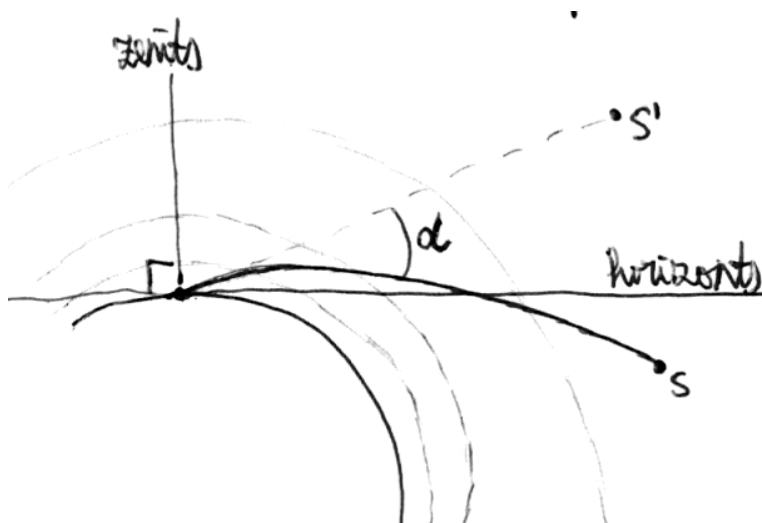
Astronomijas nozarē ir pieejamas vairākas datorprogrammas, kas spēj uzģenerēt Saules koordinātas pie debesīm jebkuram vēlamajam laika posmam. Kā vienu no vispiemērotākajām programmām šim nolūkam izmantošu "Alcyone Ephemeris 4" (9). Izvēlēsimies horizontālo koordinātu sistēmu, kur azimuts tiek skaitīts no ziemeļiem. Šajā koordinātu sistēmā spīdeklis ir divas koordinātas, kas raksturo tā atrašanās vietu pie debess sfēras ( $\varphi$  – spīdekļa leņķiskais

augstums virs horizonta, kas var būt intervālā no  $0-90^\circ$  un  $\lambda$  – spīdekļa azimuts no ziemeļiem, kas var būt intervālā no  $0-360^\circ$  (skatīt 6.3. att.).



6.3. att. Spīdekļa koordinātas pie debess sfēras

Lai noteiktu spīdekļa atrašanās vietu pie debesīm ir jāņem vērā viens efekts. Refrakcija ir gaismas laušana Zemes atmosfērā, kuras iespaidā mainās virziens, kurā tiek novērots spīdekļis. Refrakcijas iespaidā spīdekļa redzamais leņķiskais augstums palielinās, pie tam – jo zemāks ir spīdekļa leņķiskais augstums, jo spēcīgāk uz to darbojas refrakcija (4) (skatīt 6.4. att.).



6.4. att. Refrakcijas iespaidā spīdekļis  $s$  ir redzams virzienā  $s'$

Refrakcijas leņķis  $\alpha$  ir atkarīgs gan no temperatūras, gan no atmosfēras spiediena, gan no gaisa slāņa biezuma, tāpēc pie horizonta tas ir vislielākais  $\approx 30'$  (9), un tas ir gandrīz vienāds ar Saules redzamo leņķisko izmēru pie debesīm. Līdz ar to Saule agrāk lec un vēlāk riet, un diena kļūst par dažām minūtēm garāka.

Programmā „Alcyone Ephemeris 4” ir iespējams izmantot opciju, kura izmantojot ievadītās temperatūras un atmosfēras spiediena vērtību, izrēķina refrakcijas iespaidu uz

spīdekļa leņķisko augstumu. Par vidējo atmosfēras spiedienu izmantošu standarta spiedienu 1013 mbar, jo Latvijas teritorijā vidējais spiediens tāds arī aptuveni ir visa gada laikā (10). Vidējo temperatūru Rīgai ievadišu katram mēnesim atsevišķi (7) (skatīt 6.1. tabula).

6.1. tabula

#### Vidējā mēneša temperatūra Rīgā

Mēnesis	Vidējā mēneša temperatūra t, °C
Janvāris	-4
Februāris	-3
Marts	0
Aprīlis	5
Maijs	12
Jūnijs	15
Jūlijs	17
Augusts	17
Septembris	12
Oktobris	7
Novembris	2
Decembris	-2

Izmantojot programmā iebūvēto refrakcijas korekcijas opciju, var iegūt spīdekļa horizontālās koordinātas, kurās refrakcija jau ir ierēķināta.

Lai turpinātu, jāizvēlas novērošanas vieta. Šajā gadījumā izvēlos Rīgu ar tās ģeogrāfisko platumu (56°57'00" N) un garumu (24°06'00" E), augstumu virs jūras līmeņa (10 m) un atbilstošu laika zonu (GMT +2:00). Izvēlos nepieciešamo laika intervālu (konkrēto datumu) un laika soli (1 minūte), ar kādu vēlos redzēt Saules koordinātas pie debesīm. Tā kā programma piedāvā izdot ļoti daudz parametrus, tad izvēlos, kurus lielumus un kādās vienībās, es vēlos redzēt (Saules horizontālās koordinātes – azimuts  $\lambda$  [°] un leņķiskais augstums  $\phi$  [°]). Apstiprinu, un pēc dažām sekundēm programma izdod tabulu, kurā redzami pieprasītie lielumi.

Šajā tabulā ir redzamas Saules horizontālās koordinātas ar 1 minūtes intervālu izvēlētajai gada dienai. Tā kā man ir vajadzīgas tikai pozitīvās Saules leņķiskā augstuma vērtības (kad Saule ir virs horizonta), tad iezīmēju tabulā attiecīgo laika intervālu (kad Saule ir virs horizonta) un iekopēju to programmā „MS Excel”. Un tad atkārtēju šo procedūru nākamajai dienai. Šādā veidā dažu dienu laikā ir iespējams iegūt Saules horizontālās koordinātas visam gadam. Rezultātā man ir tabula, kurā attēlotas Saules horizontālās koordinātas katrai gada dienai ar 1 minūtes precizitāti. Ērtības labad un, lai varētu veikt precīzāku uzskaiti pa mēnešiem, šo tabulu sadalu pa mēnešiem. Tabulas piemērs (skatīt 6.2. tabula).

6.2. tabula

**Izgiezums no tabulas, kurā attēlotas Saules horizontālās koordinātas ar 1 minūtes precizitāti janvāra mēnesim**

		Refrakcijas korekcija: P=1013 mbar, T=-4°C	
<b>Janvāris</b>			
Datums un laiks		Azimuts (deg)	Augstums (deg)
2010-01-01 09:06		134,937884	0,071148
2010-01-01 09:07		135,146780	0,180545
2010-01-01 09:08		135,355836	0,290034
2010-01-01 09:09		135,565054	0,399610
2010-01-01 09:10		135,774433	0,509266
2010-01-01 09:11		135,983975	0,590004
...		...	...

Tālāk ir jāaprēķina, kā laikā mainās leņķis  $\Delta\sigma$  starp starojuma virzienu un DR jumta normāli. Lai to izdarītu, ir jāzina DR jumta normāles koordinātes. No LU Cietvielu fizikas institūta ēkas rasējumiem šīs koordinātas ir  $\phi_s=62^\circ$  un  $\lambda_s=231^\circ$ . Lai aprēķinātu  $\Delta\sigma$  ir jāizmanto sfēriskās trigonometrijas likumības.

Ir veselas trīs formulas, ar kuru palīdzību var aprēķināt leņķi  $\Delta\sigma$  starp diviem punktiem uz sfēras. Pirmā formula – sfēriskais kosinusu likums (spherical law of cosines) (11):

$$\Delta\sigma = \arccos(\sin\phi_s \sin\phi_f + \cos\phi_s \cos\phi_f \cos\Delta\lambda). \quad 6-2$$

kur  $\phi_f$  un  $\lambda_f$  – attiecīgi Saules ģeogrāfiskais platums un garums pie debess sfēras,  $\Delta\phi$  un  $\Delta\lambda$  – attiecīgi Saules un DR jumta normāles ģeogrāfiskā platuma un garuma starpības.

Gadījumā, kad šis attālums ir mazs, šai arkkosinusa formulai iespējamas lielas noapaļošanas rakstura kļūdas. Otrā formula – haversīnusa formula (haversine formula) (11):

$$\Delta\sigma = 2 \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_s \cos\phi_f \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right). \quad 6-3$$

Šī formula dod precīzu rezultātu arī maziem attālumiem. Lai gan šī formula ir precīza gandrīz visiem attālumiem, bet tai ir iespējamas noapaļošanas rakstura kļūdas īpašā gadījumā, kad punkti atrodas uz sfēras viens otram pretī (antipodal points). Trešā formula – Vincenta formula (Vincenty formula) (11):

$$\Delta\sigma = \arctan\left(\frac{\sqrt{(\cos\phi_f \sin\Delta\lambda)^2 + (\cos\phi_s \sin\phi_f - \sin\phi_s \cos\phi_f \cos\Delta\lambda)^2}}{\sin\phi_s \sin\phi_f + \cos\phi_s \cos\phi_f \cos\Delta\lambda}\right). \quad 6-4$$

Vincenta formula ir precīza jebkuram punktu izvietojumiem uz sfēras (šī formula būtībā ir domāta attālumu aprēķināšanai uz elipsoīda, kuram ir vienādas lielās un mazās pus asis). Programmā „MS Excel” ATAN() funkcijas vietā ieteicams izmantot ATAN2() funkciju, lai apietu problēmas, kas varētu rasties gadījumā, ja saucējs ir nulle. Zināms, ka ATAN(b/a)=ATAN2(a;b).

Kontroles pēc, lai saprastu, kurai no šīm formulām drīkst uzticēties manā gadījumā, aprēķinu veikšu pēc visām trim formulām. Tad varēs salīdzināt iegūtos rezultātus un redzēt, cik daudz šīs formulas viena no otras atšķiras. Rezultāti sanāca pārsteidzoši labi (skatīt 6.3. tabulu).

6.3. tabula

Izgriezums no tabulas, kurā izrēķināts attālums starp punktiem ar trim atšķirīgām formulām

Spherical law of cosines	Haversine formula	Vincenty formula
52,17899116	52,17899116	52,17899116
52,05303982	52,05303982	52,05303982
51,92752512	51,92752512	51,92752512
51,80245437	51,80245437	51,80245437
51,67783929	51,67783929	51,67783929
51,58261366	51,58261366	51,58261366
...	...	...

Iespējams, ka manā gadījumā punkti uz sfēras neatrodas tajās kritiskajās pozīcijās, kad kāda no formulām sāk dot novirzi. Bet mērījumu punktu ir vairāki simti tūkstoši, un es nevēlos riskēt, tāpēc tālākiem aprēķiniem ņemšu to garāko – Vincenta formulu.

Tātad ar Vincenta formulu es varu noteikt kā mainās attālums  $\Delta\sigma$  starp Saules starojuma virzienu un DR jumta normāli atkarībā no laika ar laika soli 1 minūte.

Ja es zinu šo atkarību, tad ar 6-1 formulu es varu izrēķināt, kā mainās DR jumta virsmas saņemtā enerģija  $E$  atkarībā no laika ar 1 minūtes laika soli. Modificēsim mazliet 6-1 formulu, lai uzreiz noteiktu savākto kWh daudzumu  $E_h$  katrai minūtei:

$$E_h = (1/60)E = (1/60)E_0 \cos \Delta\sigma \quad 6-5$$

kur  $(1/60)$  – vienas minūtes ilgums stundās, Saules konstante  $E_0 = 1369 \text{ [W/m}^2\text{]}$  (ārpus Zemes atmosfēras).

Lai iegūtu šo kWh summu visam mēnesim, sasummēsim visas iegūtās  $E_h$  vērtības:

$$\sum(E_h) \quad 6-6$$

Esam ieguvuši Saules enerģijas daudzumu  $[\text{kWh/m}^2]$ , ko saņem DR jumts janvāra mēnesī pie nosacījuma, ka Zemei nav atmosfēras. Tā mēs varam iegūt savāktās enerģijas daudzumu katram mēnesim un attēlot to (6.4. tabula):

6.4. tabula

Saules enerģijas potenciāls DR jumtam, ja nebūtu atmosfēras

Mēnesis	Savāktā enerģija DR jumtam bez atmosfēras (kWh/m <sup>2</sup> )
Janvāris	120,167777144371
Februāris	155,787502172801
Marts	241,303780713232
Aprīlis	297,285392702368
Maijs	352,122375644445
Jūnijs	358,356710040141
Jūlijs	361,782173698345

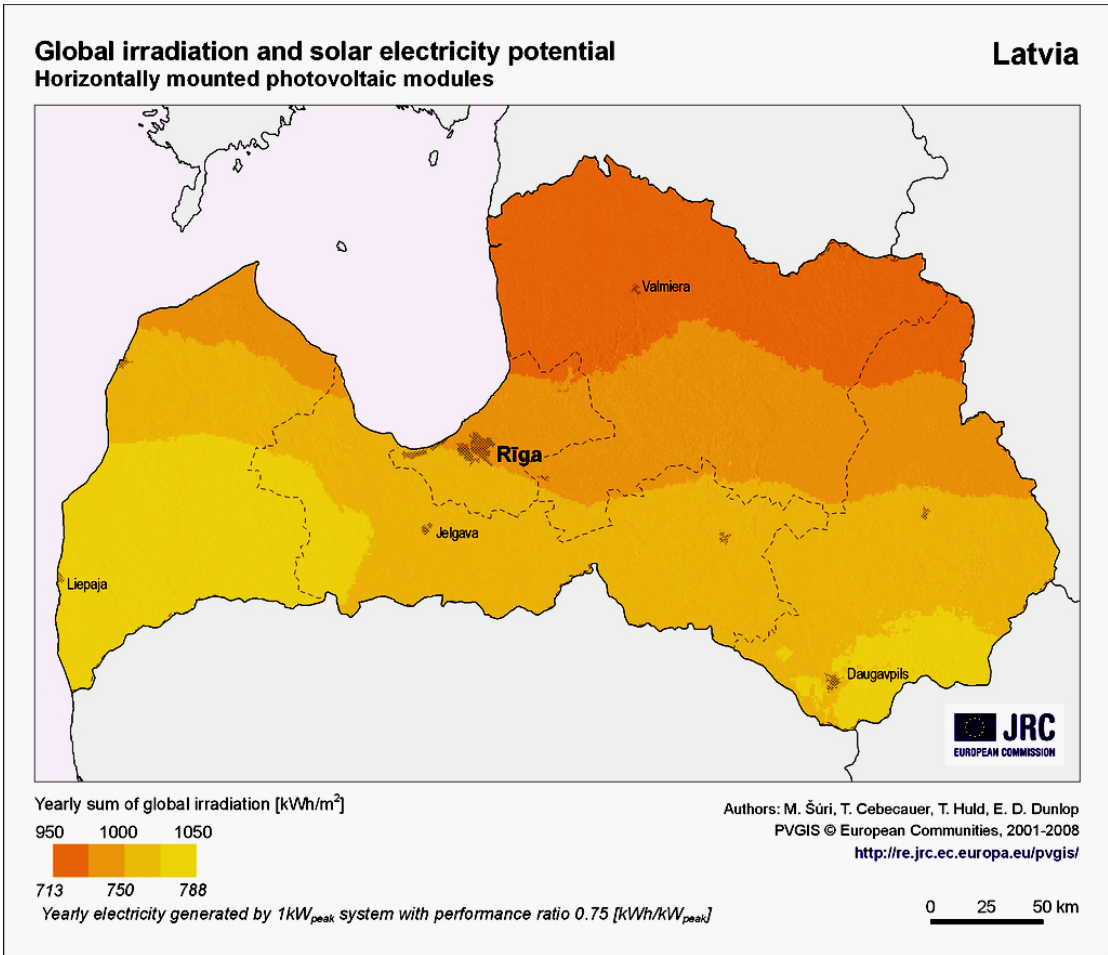
Augusts	325,922340428807
Septembris	258,491679933354
Oktobris	196,683128009797
Novembris	130,276383141874
Decembris	104,150472314149
<b>Summa <math>Eh_k</math></b>	<b>2902,32971594368</b>

Tagad nepieciešams novērtēt meteoroloģisko apstākļu ietekmi uz Saules gaismu, kas nonāk līdz jumtam. Kā jau iepriekš tika minēts, var ieviest koeficientu  $B_{s/d}$ , kas raksturo saulaino stundu attiecību pret dienas gaismas stundām, un tas ir:

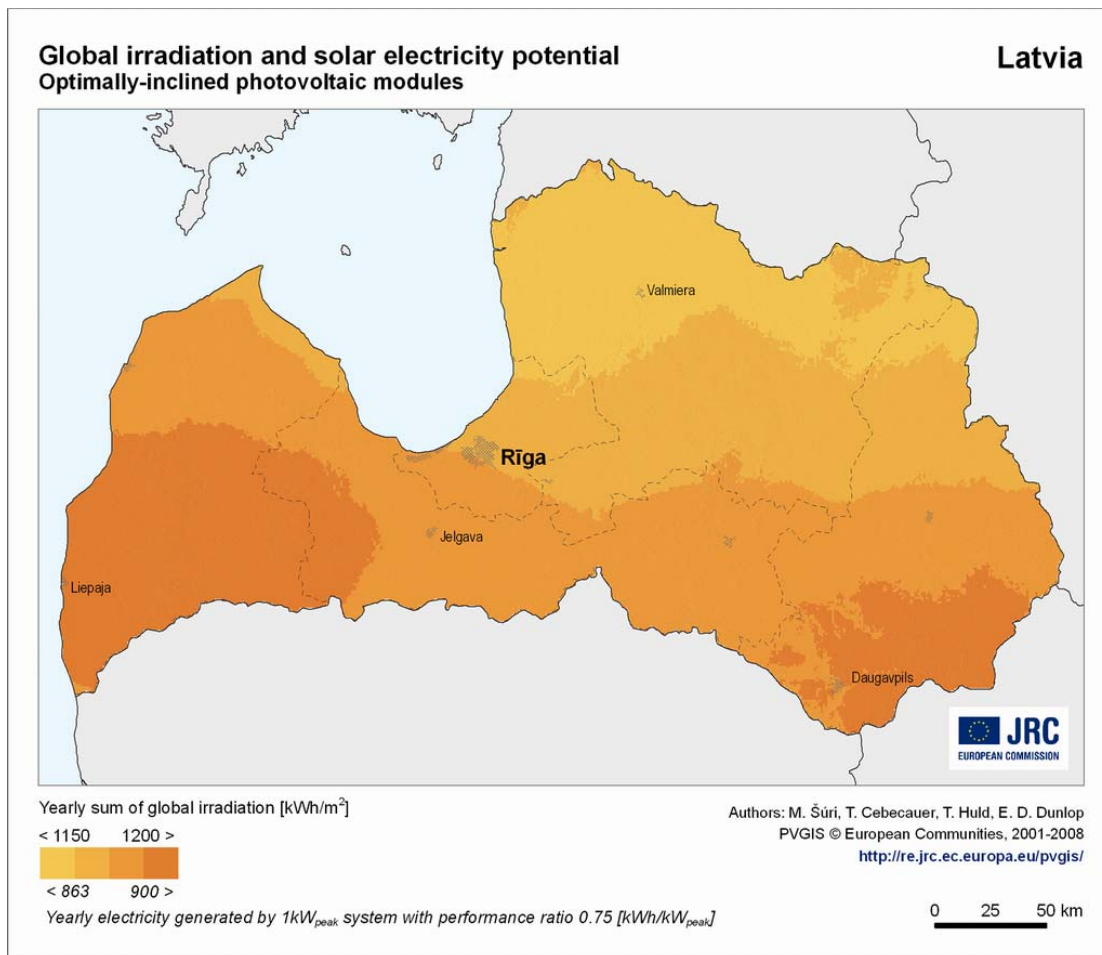
$$B_{s/d} = 1812/4473 \approx 0,405 \quad 6-7$$

Bet tas var dot visai neprecīzu meteoroloģisko apstākļu raksturojumu, jo Saules spīdēšanas ilgumu jau no seniem laikiem mēra ar Kempbela-Stoksa rakstītāju (Campbell-Stoks recorder) (12). Šis instruments pēc būtības ir stikla lode, kas safokusē Saules gaismu uz papīra strēmeles un izdedzina tajā caurumu. Saulei pārvietojoties dienas laikā pa debesīm, uz strēmeles tiek izdedzināta švīka. Zinot švīkas garumu, var noteikt Saules spīdēšanas ilgumu. Ja Saules gaisma nav pietiekami spoža kā, piemēram, Saullēkta vai Saulrieta brīdī, tad švīka neparādās. Tas nozīmē to, ka šāds aparāts uzrāda tikai spožās Saules spīdēšanas ilgumu, bet ne redzamās Saules spīdēšanas ilgumu. Mūsdienās ir arī moderni elektroniski datorizēti Saules spīdēšanas ilguma mērītāji.

Avotā (6) var iegūt kartes, kurās ir attēlots Saules radiācijas potenciāla sadalījums Latvijā dažādām virsmu pozīcijām, ievērojot meteoroloģisko apstākļu ietekmi uz Saules radiāciju. Kā piemēru minēšu Saules radiācijas potenciāla sadalījumu uz horizontālā (skatīt 6.5. att.) un uz optimālā leņķī un virzienā slīpi vērstas (skatīt 6.6. att.) virsmas.



6.5. att. Saules radiācijas un elektriskais potenciāls horizontāli novietotām Saules baterijām Latvijā. Attēla apakšējā kreisā stūrī ir skala, kuras augšējā daļa attēlo Saules radiācijas potenciāla sadalījuma mērogu [kWh/m<sup>2</sup>], bet apakšējā daļa – saražoto elektriskās enerģijas daudzumu uzstādītai sistēmai, kuras maksimālā jauda ir 1 kW ar sistēmas lietderības koeficientu 0,75 (nejaukt ar Saules baterijas lietderības koeficientu) [kWh/kW<sub>peak</sub>].



**6.6. att. Saules radiācijas un elektriskais potenciāls optimālā slīpuma leņķī (optimālā slīpuma vidējā vērtība Latvijai 38°) D virzienā vērstām Saules baterijām Latvijā. Attēla apakšējā kreisā stūrī ir skala, kuras augšējā daļa attēlo Saules radiācijas potenciāla sadalījuma mērogu [kWh/m<sup>2</sup>], bet apakšējā daļa – saražoto elektriskās enerģijas daudzumu uzstādītai sistēmai, kuras maksimālā jauda ir 1 kW ar sistēmas lietderības koeficientu 0,75 (nejaukt ar Saules baterijas lietderības koeficientu) [kWh/kW<sub>peak</sub>].**

Avotā (6) ir pieejama online programma, kas ļauj izrēķināt dažādus globālās Saules radiācijas parametrus. Zināms, ka šī programma ņem vērā dažādus klimatiskos parametrus konkrētai vietai Eiropā. Diemžēl neizdevās noskaidrot, kādi tieši parametri tiek ņemti vērā, bet pēc dažu stundu spēlēšanās ar šo programmu, radās nojauta, ka tā varētu ņemt vērā tādus parametrus, kā ekstinkcija, refrakcija, izkliede, atmosfēras caurspīdīgums, mākoņainība, reljefs. Nelielu priekšstatu par principiem, uz kuriem darbojas šī programma, var iegūt (5) avotā. Ar šo programmu principā iespējams iegūt arī LU Cietvielu fizikas institūta DR jumta Saules enerģijas potenciālu. Tur jāizvēlas sava atrašanās vieta Eiropā, jāievada virziens, kurā vērsta virsma (ir pieejamas vēl vairākas opcijas), un palaižot aprēķinu, programma izdod rezultātu.

Principā koeficientu B, ar kuru būtu jāreizina manis izrēķinātā vērtība (bez atmosfēras), var atrast padalot (6) programmas iegūto rezultātu ar "MS Excel" sagataves sniegto rezultātu. Bet tam nav lielas jēgas, jo tad man vajadzētu iegūt to pašu vērtību, ko sniedz avots (6). Izdarīšu savādāk. Ar (6) palīdzību iegūšu Saules enerģijas potenciālus dažiem standarta virzieniem.

Saules enerģijas daudzums, ko saņem horizontāla ( $\varphi=90^\circ$ ) virsma (Zemes virsma) gada laikā Rīgai:

$$E_{\text{hor.}}=999 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$$

Saules enerģijas daudzums, ko saņem optimālā leņķī ( $\varphi=52^\circ$  Rīgai) uz D vērsta virsma gada laikā Rīgai:

$$E_{\text{opt.}}=1170 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$$

Saules enerģijas daudzums, ko saņem vertikāla ( $\varphi=0^\circ$ ) uz D vērsta virsma gada laikā Rīgai:

$$E_{\text{vert.}}=842 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$$

Izrēķināšu Saules enerģijas potenciālu šajos pašos standarta virzienos ar savējo „MS Excel” sagatavi:

$$E_{\text{hor.Exc.}}=2253 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$$

$$E_{\text{opt.Exc.}}=3390 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$$

$$E_{\text{vert.Exc.}}=2781 \text{ (kWh/m}^2\text{)}$$

Izrēķināšu koeficientus  $B_{m/k}$ , kas izsaka attiecību starp meteoroloģisko Saules radiācijas potenciālu un bez atmosfēras (kosmisko) Saules radiācijas potenciālu:

$$B_{m/k} = E_h/E_{h_{\text{Exc.}}} \quad 6-8$$

Tātad:

$$B_{m/k \text{ hor.}} = E_{\text{hor.}}/E_{\text{hor.Exc.}}=999/2253 \approx 0,443$$

$$B_{m/k \text{ opt.}} = E_{\text{opt.}}/E_{\text{opt.Exc.}}=1170/3390 \approx 0,345$$

$$B_{m/k \text{ vert.}} = E_{\text{vert.}}/E_{\text{vert.Exc.}}=842/2781 \approx 0,303$$

Redzams, ka šie koeficienti atšķiras un tiem ir tendence samazināties, virsmas normālei tuvojoties horizontam. Tas nozīmē, ka tuvojoties horizontam, atmosfēras absorbcija palielinās un avotā (6) tas tiek ņemts vērā. Tāpēc nevar kādu no šiem koeficientiem izmantot citā virzienā, kā tikai tajā virzienā, kurā tas tika aprēķināts.

Ja ņem vērā tikai leņķisko augstumu, tad DR jumta normāles augstumam vistuvāk ir  $B_{m/k \text{ opt.}}$  koeficients. Līdz ar to, reizinot manas „MS Excel” sagataves izdoto vērtību DR jumtam  $E_{h_k}$  (6.4. tabula) ar šo koeficientu, iegūst:

$$E_{h_{\text{gala}}} = E_{h_k} * B_{m/k \text{ opt.}} \approx 2902 * 0,345 \approx 1001 \text{ (kWh/m}^2\text{)} \quad 6-9$$

Šis ir enerģijas daudzums, ko saņem LU Cietvielu fizikas institūta DR jumta virsmas 1 (m<sup>2</sup>) gada laikā. Bet kā jau teikts izmantotais koeficients B<sub>m/k</sub> ir atkarīgs no manas „MS Excel” sagataves sniegtās vērtības, un tāpēc rēķināt Eh<sub>gala</sub> šādā veidā nav pareizi.

Vienīgais, ko es godīgi varu izdarīt, tas ir pareizināt „MS Excel” sagataves sniegto rezultātu Eh<sub>k</sub> ar 6-7 formulā iegūto B<sub>s/d</sub> koeficientu:

$$Eh_{gala} = Eh_k * B_{s/d} \approx 2902 * 0,405 \approx \mathbf{1175 \text{ (kWh/m}^2\text{)}} \quad 6-10$$

Šī ir vērtība, kas nav atkarīga no (5,6) avotiem. Ja šo pašu vērtību liek izrēķināt (6) programmai, tad iegūst:

$$Eh_{PVGIS} = \mathbf{1100 \text{ (kWh/m}^2\text{)}}$$

Kas, manuprāt, ir daudz ticamāka vērtība. Lai izrēķinātu enerģijas daudzumu visam DR jumtam, tad tikko iegūtās vērtības jāreizina ar šī jumta laukumu (A=909 m<sup>2</sup>):

$$Eh_{visam \text{ jumtam Exc.}} = Eh_{gala} * A = 1175 * 909 = \mathbf{1068075 \text{ (kWh)}} \quad 6-11$$

$$Eh_{visam \text{ jumtam PVGIS}} = Eh_{PVGIS} * A = 1100 * 909 = \mathbf{999900 \text{ (kWh)}}$$

#### 6.4. Elektriskā enerģija, ko ražo Saules baterija

Saules radiācijas daudzumu, ko Saules baterija transformē elektriskajā enerģijā var izteikt ar formulu:

$$Eh_{trans.} = Eh_{visam \text{ jumtam}} * \eta_s * \eta_{kor.} \quad 6-12$$

kur  $\eta_s$  – Saules enerģijas transformācijas lietderības koeficients,  $\eta_{kor.}$  – koeficients (korekcija), kas raksturo papildus zudumus sistēmā.

Saules enerģijas transformācijas lietderības koeficients  $\eta_s$  ir norādīts Saules bateriju tehniskajos parametros. Uz LU Cietvielu fizikas institūta DA jumta esošiem Saules paneļiem  $\eta_s = 0,1405$  (un tas atbilst standarta testa apstākļiem: gaisa masa 1,5 – apgaismojums: 1000W/m<sup>2</sup> – Saules bateriju temperatūra: 25°C). Īstenībā zudumi ir lielāki, jo Saulē baterijas sakarst un to lietderības koeficients samazinās; Saules gaisma atstarojas no plāksnes, kura sedz baterijas, un pie lieliem leņķiem  $\Delta\sigma$  šī atstarošanās kļūst ievērojama; citi zudumi (kabeļi, invertors u.c.). Programma (6), ievadot nepieciešamos parametrus, spēj šos zudumus novērtēt. Nepieciešamie parametri ir tādi paši kā līdz šim – jāievada vieta, kur Saules baterija atrodas, un virziens, kurā tā ir vērsta. Un DR jumtam tiek izdoti šādi papildus zudumi:

Zudumi temperatūras iespaidā: 8,4 % (izmantojot vietējo apkārtnes temperatūru);

Zudumi leņķiskās atstarošanās efektu rezultātā: 3,4 %;

Citi zudumi (kabeļi, invertors u.c.): 14,0 %;

Visi Saules bateriju sistēmas zudumi kopā: 25,8 %.

(6) apgalvo, ka 14 % ir visraksturīgākā vērtība citiem zudumiem. Bet ja ir vēlme, tad to ir iespējams izvēlēties pašam atsevišķi.

$$\eta_{kor.}=1-0,258=0,742$$

$$E_{h_{trans,Exc.}}=1068075*0,1405*0,742\approx\mathbf{111348\ (kWh)}$$

$$E_{h_{trans,PVGIS}}=999900*0,1405*0,742\approx\mathbf{104241\ (kWh)}$$

Šis ir reālais elektroenerģijas daudzums gada laikā, ko iespējams iegūt, ja noklāj LU Cietvielu fizikas institūta DR jumtu ar Saules baterijām.

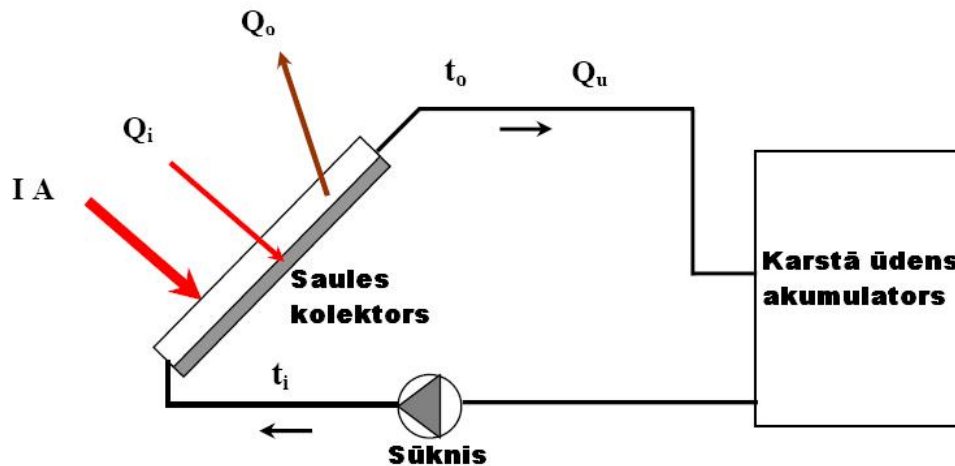
Ja ņemt to lielāko vērtību  $E_{h_{trans,Exc.}}$ , kuru iegūst no mana modeļa, un pārveidot elektroenerģijas cenā (tarifs 1 kWh=0,0743 Ls), tad sanāk ≈8273 Ls. Uz LU Cietvielu fizikas institūta DA jumta pašlaik uzstādītiem paneļiem ir garantija, ka 25 gadu laikā izejošā jauda nekļūs mazāka par 80 % no sākotnējās jaudas. Pieņemsim, ka uz DR jumta uzstādītās Saules baterijas nokalpos 25 gadus. Vai šis laiks būs pietiekams, lai tās atmaksātos? Zināms, ka labas, kvalitatīvas Saules baterijas izmaksā ≈450 Ls / m<sup>2</sup>. Tad visa DR jumta noklāšanai ar šādām Saules baterijām būs nepieciešami ≈409050 Ls. 25 gadu laikā Saules baterijas varēs saražot elektrību, kuras izmaksas ir ≈206825 Ls, un tas ir pie noteikuma, ka to atdeve būs visu laiku 100 % (nevis samazināsies līdz 80 %). Tātad acīmredzami, ka šāds projekts neatmaksāsies 25 gadu laikā. Vajadzēs vismaz 2 reizes pa 25 gadiem, vai pat 3 reizes pa 25 gadiem, ja ņem vērā, ka Saules bateriju atdeve ar laiku samazinās. Pie tik lieliem laika posmiem maz ticams, ka šāda sistēma varētu nokalpot tik ilgi.

Zināms, ka LU Cietvielu fizikas institūts 2009.gada laikā patērēja 471250 kWh elektroenerģijas. Tātad, ja noklāt institūta DR jumtu ar Saules baterijām, tad tiks iegūti **24%** no visas institūta patērētās elektroenerģijas.

## **6.5. Siltumenerģija, ko ražo Saules kolektors**

### **6.5.1. Plakana Saules kolektora darbības princips**

Aplūkosim visvienkāršākā Saules kolektora veida uzbūvi: plakana Saules kolektors (13). (6.7. att.) attēlota tipiska Saules kolektoru sistēma. Tā sastāv no plakanas virsmas Saules kolektora, karstā ūdens akumulatora, sūkņa un savienojošās armatūras. Saules radiācija krīt uz Saules kolektora virsmu, uzsilda šķidrumu Saules kolektorā, ko sūknis nogādā karstā ūdens akumulatorā.



6.7. att. Tipiska Saules kolektora sistēma

Ja  $I$  ir Saules radiācijas intensitāte [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], un tā absorbējās uz Saules kolektora virsmu ar laukumu  $A$  [ $\text{m}^2$ ], tad kopējais siltuma daudzums, ko kolektors dod ir:

$$Q_i = IA \quad 6-13$$

Daļa no Saules radiācijas atstarojas no kolektora stikla plāksnes, un tikai daļa no atlikušās enerģijas absorbējas Saules kolektora absorberī. Tādēļ Saules kolektora devums jāraksta sekojoši:

$$Q_i = I(\alpha_b \chi) A \quad 6-14$$

kur  $Q_i$  – kolektora uzņemtā siltuma daudzums;  $\chi$  – caurlaišanas koeficients kolektora virsmai;  $\alpha_b$  – kolektora absorbera absorbcijas koeficients.

Uzņemot siltuma daudzumu, kolektors uzsilst un parādās siltuma zudumi, jo kolektors atdod siltumu apkārtējai videi. Siltuma daudzums, kas tiek zaudēts šādā ceļā tiek aprakstīts sekojoši:

$$Q_0 = U_L A (T_c - T_a) \quad 6-15$$

kur  $U_L$  – kopējais kolektora siltuma zudumu koeficients, [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ];  $T_c$  – vidējā kolektora temperatūra [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $T_a$  – āra gaisa temperatūra [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Lietderīgais siltuma daudzums, ko kolektors ražo ir izsakāms ar starpību starp no Saules uzņemtā siltuma daudzuma un kolektorā zaudētā siltuma daudzuma:

$$Q_u = Q_i - Q_0 = I(\alpha_b \chi) A - U_L A (T_c - T_a) \quad 6-16$$

To pašu siltuma daudzumu  $Q_u$  var arī aprēķināt izmantojot ietilpstošā un izplūstošā šķidruma temperatūras starpību, zinot šķidruma izplūstošo masu un šķidruma īpatnējo siltumietilpību:

$$Q_u = MC(T_0 - T_i) \quad 6-17$$

kur  $M$  – šķidruma masas plūsma [kg/s];  $C$  – šķidruma īpatnējā siltumietilpība [J/(kg°C)];  $T_0$  – izejas temperatūra [°C];  $T_i$  – ieejas temperatūra [°C].

6-16 izteiksme ir visai neērta aprēķinu lietošanai, jo ir pagrūti definēt kolektora vidējo temperatūru. Ērti būtu, ja kolektora vidējo temperatūru aizstātu ar ieplūstošā šķidruma temperatūru. Ja 6-16 vienādojumā aizstāj kolektora vidējo temperatūru ar šķidruma ieejas temperatūru un padala reālo ieguvumu ar šādi pamainītu kolektora virsmas ieguvumu, iegūst tā saukto kolektora siltumaizvades faktoru  $F_R$ :

$$F_R = MC(T_0 - T_i) / (A[I(\alpha_b \chi) - U_L(T_i - T_a)]) \quad 6-18$$

Maksimālais kolektora devums būs tad, ja visa kolektora temperatūra būs tāda, kā ieejošajam šķidrumam, jo tad tā temperatūra ir viszemākā un tāpēc pēc siltumvadāmības, tas strādās visefektīvāk. Reālais enerģijas devums tādā veidā tiks atrasts, reizinot maksimālo siltuma devumu ar kolektora siltumaizvades faktoru:

$$Q_u = F_R A [I(\alpha_b \chi) - U_L(T_i - T_a)] \quad 6-19$$

Šis vienādojums parasti tiek izmantots kolektora enerģijas devumu mērījumiem, un tas tiek saukts par Hotteļa-Vīlera-Blisa (Hottel-Whillier-Bliss) vienādojumu (14). No augstāk minētā ir jāizpildās vienādībai:

$$F_R A [I(\alpha_b \chi) - U_L(T_i - T_a)] = MC(T_0 - T_i) \quad 6-20$$

Kolektora lietderības koeficients būs attiecība starp reāli iegūto siltuma daudzumu laika periodā un kopējo krītošo Saules radiācijas blīvumu tajā pašā laika periodā:

$$\eta = (\int Q_u dt) / (A \int I dt) \quad 6-21$$

Momentānais Saules kolektora lietderības koeficients būs:

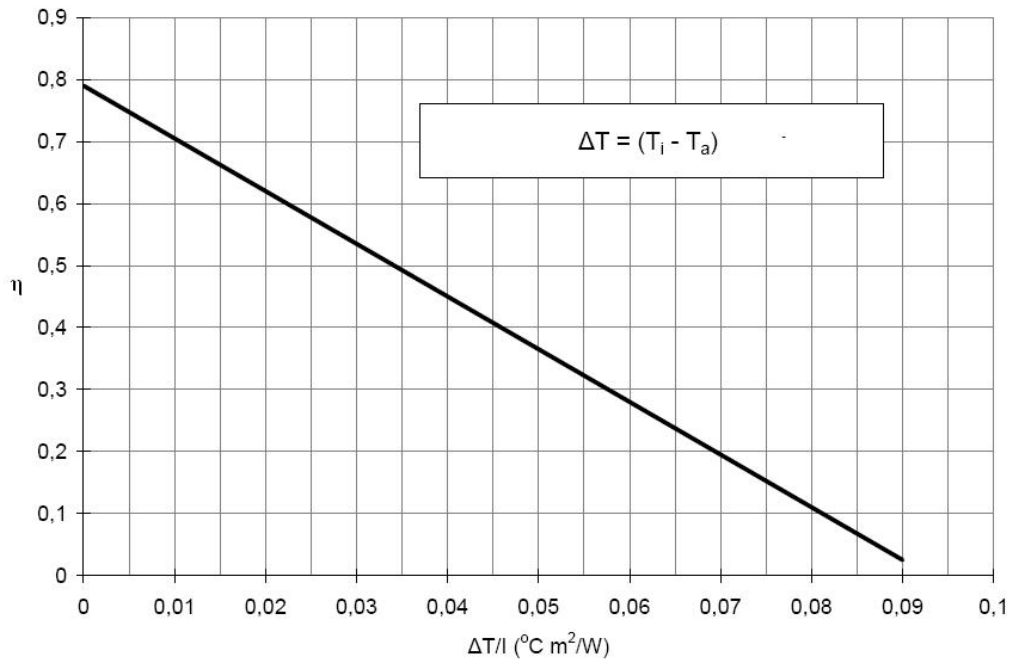
$$\eta = Q_u / (IA) \quad 6-22$$

Izteiksmi izvēršot:

$$\eta = F_R A [I(\alpha_b \chi) - U_L(T_i - T_a)] / (IA) \quad 6-23$$

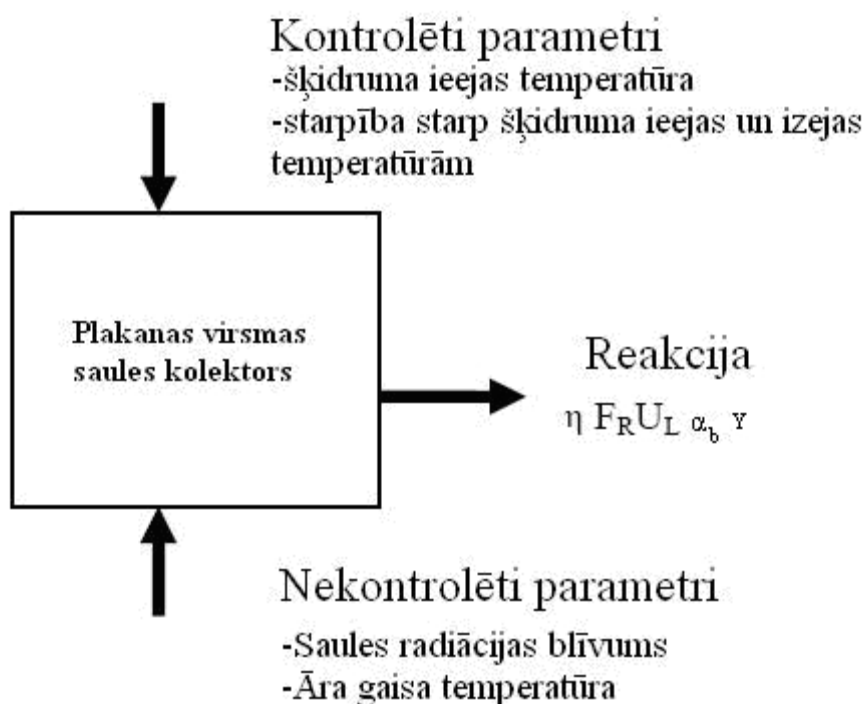
$$\eta = F_R (\alpha_b \chi) - F_R U_L (T_i - T_a) / I \quad 6-24$$

Kolektora lietderības koeficientu parasti atliek pret iekavās esošo daļījumu 6-24 izteiksmē. Ja  $F_R$ ,  $U_L$  un  $(\alpha_b \chi)$  ir konstanti, tad tā grafiks būs taisne kā (6.8. att.), bet reāli šie lielumi nav konstanti, un grafiks kļūst nelineārs.



**6.8. att. Lietderības koeficienta atkarība no temperatūras starpības dalījuma ar Saules radiācijas blīvumu**

Redzams, ka Saules kolektora lietderības koeficients ir nepastāvīgs darba laikā. Hoteļ-Vīlera-Blisa vienādojumā parādās trīs grupu parametri. Ir nekontrolējami parametri, tādi kā Saules radiācijas blīvums, ārējā gaisa temperatūra. Tad ir kontrolējami parametri kā šķidruma ieejas temperatūra, starpība starp šķidruma ieejas un izejas temperatūrām, un šie abu tipu parametri izsauc reakciju uz tādiem parametriem kā lietderības koeficients, kolektora siltumaizvades faktors, kopējais kolektora siltuma zudumu koeficients, absorbcijas koeficients un virsmas caurlaišanas koeficients. Kopējā parametru bloks hēma attēlota (6.9. att.).



#### 6.9. att. Kolektoru parametru klasifikācija

Saules kolektoru darbības analīzei svarīgi ir pētīt šo kontrolēto un nekontrolēto parametru ietekmi uz reakcijas parametriem. Kā redzams (6.8. att.), tad lietderības koeficientu stipri ietekmē kontrolēto un nekontrolēto parametru izteiksme.

Caurļaišanas koeficients  $\chi$  mainās atkarībā no krītošās Saules radiācijas leņķa pret kolektora stikloto virsmu  $\theta$ . Šī atkarība ir parādīta (6.5. tabula).

6.5. tabula

#### Stikla caurlaišanas koeficienta atkarība no krītošās Saules radiācijas leņķa pret kolektora stikloto virsmu

$\theta$	0°	60°	70°	80°	90°
$\chi$	0.9	0.8	0.65	0.35	0

Melnas plates absorbcijas koeficients atkarībā no Saules radiācijas krītošā starojuma leņķa pret plates plakni attēlots (6.6. tabula).

6.6. tabula

#### Melnas plates absorbcijas koeficienta atkarība no krītošās Saules radiācijas leņķa pret kolektora virsmu

$\theta$	0°	60°	70°	80°	90°
$\alpha_b$	0.92	0.85	0.75	0.60	0

Abu koeficientu reizinājuma, kas minēts 6-19 vienādojumā, atkarība no krītošās Saules radiācijas leņķa pret kolektora virsmu attēlota (6.7. tabula).

6.7. tabula

**Kolektora absorbcijas koeficienta un caurlaišanas koeficienta reizinājuma atkarība no krītošās Saules radiācijas leņķa pret kolektora virsmu**

$\theta$	$0^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$	$90^\circ$
$\alpha_b\chi$	0.83	0.68	0.49	0.21	0

Siltumvadīšana ir siltumenerģijas pārvade starp ķermeņa daļām vai ķermeņiem temperatūras starpības dēļ. Siltumvadīšanas cēlonis ir mikrodaļiņu kustība ķermenī. Siltumvadīšana, kā arī citi siltumapmaiņas procesi rodas tikai dēļ temperatūras starpības starp ķermeņa daļām vai ķermeņu sistēmas. Analītiska siltumvadīšanas pētīšana saistīta ar temperatūras lauka atrašanu, t.i., atrast vienādojumu:

$$T=f(x,y,z,t) \quad 6-25$$

Atrodot temperatūras lauku pētāmajam objektam, ir zināma temperatūra šim objektam jebkurā telpas punktā un laika momentā. Izšķir stacionāru un nestacionāru temperatūras lauku. Stacionārs nebūs atkarīgs no laika, nestacionārs būs. Šajā darbā tiek tuvināti uzskatīts, ka temperatūras lauks ir stacionārs. No eksperimentāliem datiem ir zināms, ka plakanas virsmas Saules kolektora absorbera temperatūras nestacionārais lauks no stacionāra lauka atšķiras trešajā ciparā aiz komata, tāpēc šo lauku var uzskatīt par stacionāru.

Zinot temperatūras lauku, var atrast izotermas. Izotermas parāda telpas punktus uz kuriem temperatūra ir vienāda. Tā kā viens un tas pats ķermeņa punkts nevar būt ar divām dažādām temperatūrām vienlaicīgi, tad izotermas nekrustojas. Svarīgs vektors, kas parāda visstraujāko temperatūras izmaiņas virzienu ķermenī, ir gradients. Temperatūras gradients ir vērsts pa izotermas normāli, un to iegūst atvasinot temperatūras lauku pret katru koordinātu vai pret izotermas normālvektoru:

$$\text{grad}T=n_0dT/dn \quad 6-26$$

Saskaņā ar Furjē hipotēzi, siltuma daudzums  $dQ_t$ , kas iziet cauri izotermiskas virsmas elementu  $dF$  laika sprīdī  $dt$ , ir proporcionāls temperatūras gradientam:

$$dQ_t= -n_0\gamma(dT/dn)dFdt \quad 6-27$$

Koeficientu  $\gamma$  izteiksmē 6-27 sauc par siltumvadāmības koeficientu. Siltuma daudzums, kas izplūst vienas vienības laikā caur vienas vienības laukumu uzrakstāms sekojoši:

$$q_v= -n_0\gamma(dT/dn) \quad 6-28$$

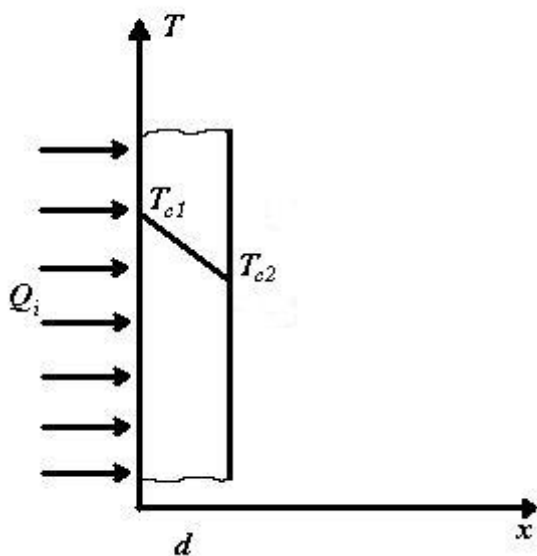
un seko, ka siltumvadāmības koeficients:

$$\gamma = |q_v| / |\text{grad}T| \quad 6-29$$

Siltumvadāmības koeficients tāpat ir siltuma daudzums, kas izplūst vienā laika vienībā caur vienu izotermiskas virsmas laukuma vienību, ja temperatūras gradients ir viena vienība. Šis koeficients ir atkarīgs no materiāla. Lielākais koeficients piemīt tīriem metāliem, tad seko sakausējumi. Iekārtās, arī Saules kolektoros, kurās ir labi jānovada siltums, izmanto materiālus ar augstu siltumvadāmības koeficientu, tādēļ arī Saules kolektora absorbers tiek veidots no vara.

Lai atrastu temperatūras lauku noteiktas ģeometrijas objektam, ir jāatrisina Laplasa vienādojums. Stacionārā siltumplūsmas režīmā, viendimensionālā gadījumā, Laplasa vienādojums uzrakstāms sekojoši:

$$\partial^2 T / \partial x^2 = 0 \quad 6-30$$



6.10. att. Siltuma plūsma caur sienīņu

Šāds gadījums atbilst situācijai (6.10. att.), kad caur sienīņu, kuras biezums  $d$ , plūdis siltums ar nosacījumu, ka pārējo divu dimensiju virzienos temperatūra paliks konstanta:

$$\partial T / \partial y = \partial T / \partial z = 0 \quad 6-31$$

Šādai sistēmai var uzdot pirmā veida robežnosacījumus:

$$\begin{aligned} x=0 &\rightarrow T=T_{c1} \\ x=d &\rightarrow T=T_{c2} \end{aligned} \quad 6-32$$

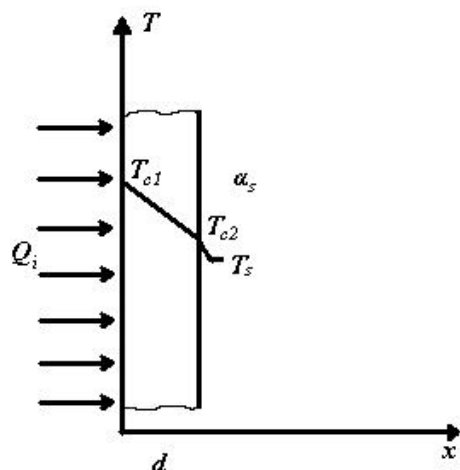
Atrisinot diferenciālvienādojumu 6-30, iegūst temperatūras lauku:

$$T = T_{c1} - x(T_{c1} - T_{c2}) / d \quad 6-33$$

Pēc 6-28 vienādojuma var atrast siltuma daudzumu, kas izplūst caur sienīņu vienu vienību lielumos:

$$q_v = -\gamma(\partial T/\partial x) = (\gamma/d)(T_{c1} - T_{c2}) \quad 6-34$$

6-34 izteiksmes mērvienība ir  $[W/m^2]$ . Jo lielāka temperatūras starpība starp abām sienas pusēm, jo lielāka siltuma plūsma. Jo mazāks sienas biezums, jo atkal lielāka siltuma plūsma. Atsaucoties uz Saules kolektoriem, nepieciešams, lai siltumnesēja temperatūra ieejā būtu zemāka, tādēļ arī lietderības koeficients ir augstāks. Tas arī tika attēlots, runājot par Saules kolektoru lietderības koeficientu.



6.11. att. Siltuma plūsma caur sieniņu ar dzesējošu vidi vienā pusē

Ja ņem vērā, ka plates otru pusi dzesē vide (6.11. att.), tad nepieciešams diferenciālvienādojuma atrisināšanai izmantot otrā un trešā veida robežnosacījumus. Uzdevums saistīts ar temperatūras atrašanu uz virsmām. Ja uz vienas plates puses krīt siltuma plūsma  $Q_i$ , un šī siltuma plūsma laikā ir konstanta, tad var uzrakstīt šādu vienādojumu sistēmu:

$$\begin{aligned} Q_i &= (T_{c1} - T_{c2})\gamma/d \\ Q_i &= \alpha_s(T_{c2} - T_s) \end{aligned} \quad 6-35$$

Šos divus vienādojumus iespējams vienādot:

$$(T_{c1} - T_{c2})\gamma/d = \alpha_s(T_{c2} - T_s) \quad 6-36$$

Seko izteiksme vides siltumatdeves koeficientam:

$$\alpha_s = (\gamma/d)(T_{c1} - T_{c2}) / (T_{c2} - T_s) \quad 6-37$$

kur  $\alpha_s$  – vides siltumatdeves koeficientu. Šis koeficients nav tikai atkarīgs no vides īpašībām, bet ir atkarīgs arī no sistēmas ģeometrijas. Šis koeficients katrai sistēmai tiek noteikts eksperimentāli.

Noslēgtai sistēmai, izmērot laikā šķidruma uzsilšanu un zinot no siltuma avota krītošo radiācijas blīvumu, var noteikt ne visai korekti Saules kolektora lietderības koeficientu.

### 6.5.2. Aptuvens Saules kolektoru modeļa novērtējums

Doma ir izveidot zem LU Cietvielu fizikas institūta milzīgu termiski izolētu tvertni, kur varētu uzglabāt Saules kolektorā uzsildīto ūdeni, lai ziemā šo ūdeni varētu izmantot apkurei. Tā kā šis ūdens tur stāvēs ilgu laiku un būs silts, tad šādā vidē var savairoties dažādi mikroorganismi, kas var sabojāt izbūvēto sistēmu. Nav izslēgts, ka šādā situācijā var sākties rūgšanas un pūšanas process, un veidoties dažādas gāzes. Protams, ka sistēmā var iebērt kādu ķīmiju, kas nepieļaus šādu organismu attīstīšanos, bet jāņem vērā fakts, ka agri vai vēlu pienāks laiks šo šķīdumu mainīt, un var rasties lielas problēmas ar tā utilizāciju (iespējams tas nebūs izdevīgi).

No Saules kolektora darbības principiem var secināt, ka efektivitāte ir atkarīga no ātruma, kādā tiek sūknēts cauri ūdens. Jo aukstāks tiek laists iekšā ūdens, jo efektīvāk tas uzņem siltumu. Jo ātrāk tiek sūknēts cauri ūdens, jo mazāk tas uzsilst kolektorā, un līdz ar to no Saules kolektora iznestais siltuma daudzums kļūst lielāks. Ja vēl visu ūdeni cauri kolektoram laist tikai vienu reizi, tad šādā veidā ūdens sevī uzņems visvairāk siltumenerģijas. Šāds ūdens būs uzsilis minimāli, bet toties masas ziņā tā būs ļoti daudz. Un līdz ar to šī lielā ūdens masa saturēs daudz enerģijas  $Q_u$ .

Skaidrs, ka šāds variants nav izdevīgs. Lai gan mums ir milzum daudz ūdens, bet tā kā tā temperatūra ir relatīvi zema, tad šāds ūdens nederēs ne efektīvai apkurei, ne karstā ūdens vajadzībām.

Tātad mūsu vajadzībām ir nepieciešams karstais ūdens, kuram ir noteikta temperatūra. Latvijā karstais ūdens standarts skaitās  $T_0=+55\text{ }^\circ\text{C}$ . Pieņemsim, ka no Saules kolektora mums vajadzīgs tieši šāds ūdens, jo tad tas apmierinās mūsu vajadzības. Manam kolēģim Rīgā citā vietā uz mājas jumta ir uzstādīti Saules kolektori. Tie ir pavērsti D virzienā  $33^\circ$  slīpumā ( $\varphi_S=57^\circ$  un  $\lambda_S=180^\circ$ ). Viņš ir noteicis, ka gada laikā viņa kolektori siltumenerģijā pārvērš  $Q_u=800\text{ kWh/m}^2$ . Ja ar manis izveidotu „MS Excel” sagatavi izrēķina Saules starojuma enerģiju, ko gada laikā saņem  $1\text{ m}^2$  viņa kolektora virsmas, tad pēc 6-10 formulas sanāk:

$$E_{h_{\text{gala}}}=E_{h_k} * B_{s/d} \approx 3309 * 0,405 \approx \mathbf{1340\text{ (kWh/m}^2\text{)}}$$

Saules kolektora lietderības koeficients, rupji sakot:

$$\eta=Q_u/E_{h_{\text{gala}}}=800/1340 \approx \mathbf{0,597} \quad 6-38$$

Tas nozīmē, ka  $\approx 59,7\%$  Saules enerģijas kolektors ir pārvērtis lietderīgajā siltumenerģijā. Pieņemsim, ka uz LU Cietvielu fizikas institūta DR jumta tiks uzstādīta tāda pati sistēma un pieņemsim, ka nekādi apstākļi nemainīsies (reālītātē šie apstākļi mainīsies gan). Tas nozīmē to, ka mana kolēģa lietderības koeficients būs derīgs arī mūsu jumtam. Jau

ir zināms, ka mūsu DR jumts gada laikā saņem  $E_{h_{\text{visam jumtam Exc.}}}=1068075$  (kWh) Saules enerģijas. Pārveidojot vienādojumu 6-38, iegūstam:

$$Q_u = E_{h_{\text{visam jumtam Exc.}}} * \eta = 1068075 * 0,597 \approx \mathbf{637641 \text{ (kWh)}} \quad 6-39$$

Šis ir siltumenerģijas daudzums, ko iespējams iegūt no LU Cietvielu fizikas institūta DR jumta gada laikā. Zināms, ka vidējā aukstā ūdens temperatūra ūdens krānā ir  $T_i = +12^\circ\text{C}$ , ūdens siltumietilpība  $C = 4181,3 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$  (15). Tagad pārveidojot formulu 6-17, iegūstam:

$$M = Q_u / [C(T_0 - T_i)] = \quad 6-40$$
$$= 637641(\text{kWh}) / [4181,3(\text{J}/[\text{kg}^\circ\text{C}]) * (55^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C})] \approx 12767297 \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}}) \approx \mathbf{12767 \text{ (t}_{\text{H}_2\text{O}})}$$

Šis ir karstā ( $+55^\circ\text{C}$ ) ūdens daudzums, kas var tikt iegūts no LU Cietvielu fizikas institūta DR jumta gada laikā, ja aukstā ūdens temperatūra ( $+12^\circ\text{C}$ ), un visi pārējie apstākļi paliek nemainīgi. Reāli gan šis daudzums būs, pirmkārt, mazāks, jo ja siltais ūdens tiks uzkrāts un uzglabāts pazemes tvertnē, tad lai cik laba būtu siltumizolācija, ūdens lēnām zaudēs enerģiju un atdzīsīs. Ja runa iet par ūdens uzsildīšanu vasarā un glabāšanu līdz ziemei priekš apkures, tad šī atdzišana var būt ļoti ievērojama. Otrkārt, Saules kolektora sistēmas kopējā efektivitāte ir ļoti atkarīga ne tikai no izmantojamā kolektora veida un tā konfigurācijas, bet arī no siltumapmaiņas sistēmas veida un konfigurācijas. Ir dažādu veidu Saules kolektori, un katram veidam ir savs lietderības koeficients un savas īpatnības. Tāpat ir dažādi veidi, kā mēs varam iekārtot siltumapmaiņas sistēmu, un līdz ar to padarot kopējo procesu vai nu efektīvāku, vai nu neefektīvāku. Abām pusēm, Saules kolektors un siltumapmaiņas sistēma, jābūt sabalansētām savā starpā. Ja mēs uzstādīsim labu Saules kolektoru un sliktu siltumapmaiņas sistēmu, vai arī darbināsim labu siltumapmaiņas sistēmu nepareizā režīmā, tad no Saules kolektora liela labuma nebūs. Un otrādi, mēs varam uzlikt ne īpaši efektīvu Saules kolektoru, bet labu siltumapmaiņas sistēmu, kas kopējo iznākumu padarīs par pietiekami labu. Treškārt, tā kā Saules kolektori ir relatīvi efektīvāki par Saules baterijām, tad nelielas Saules radiācijas izmaiņas atstās lielāku iespaidu uz kolektoru ražoto siltumenerģiju, nekā tas ir Saules baterijām. Tāpēc atšķirība starp virzieniem, koros būs vērsta mana kolēģa kolektori un LU Cietvielu fizikas institūta kolektori, var dot ievērojamu atšķirību kopējā iznākumā.

LU Cietvielu fizikas institūta siltumenerģijas patēriņš 2009. gadā bija 842,07 MWh. Tātad, ja noklāt institūta DR jumtu ar Saules kolektoriem, tad tiks iegūti  $\approx 76\%$  no visas institūtam nepieciešamās siltumenerģijas. Reāli gan būs mazāk manis iepriekš norādīto faktoru dēļ.

## 7. KOPĒJIE SECINĀJUMI

### 7.1 Saules bateriju izejošās jaudas atkarība no temperatūras

Izmantojot (3.1. att. un 3.2. att.) redzamo iekārtu tika izmērīta 43,12 cm<sup>2</sup> lielas Saules baterijas izejošās jaudas atkarība no temperatūras. Šī atkarība ir attēlota (4.6. att.). Var redzēt, ka Saules baterijas izejošā jauda lineāri samazinās ar ātrumu 0,28 mW/°C temperatūru intervālā no +30 līdz +160 °C. Bet izmantojot 2-4 formulu, var apgalvot, ka arī Saules baterijas lietderības koeficientam būs lineāra atkarība no temperatūras. No eksperimenta rezultātiem redzams, ka arī pārējie parametri diezgan labi atbilst teorijai (1), kas nozīmē to, ka šī teorija tiešām lielākā vai mazākā mērā izpildās.

Ir skaidrs, ka spožā Saulē ir visvairāk enerģijas, bet tieši tad parasti ir viskarstāk, un Saules bateriju efektivitāte samazinās. Tāpēc jārod risinājums. Kā visvērtīgākais temperatūras atkarības risinājums atzīts Saules baterijas apvienojums ar Saules kolektoru. Tā, lai tiktu izveidota sistēma, kas vienlaikus ražo gan elektrību, gan strāvu. Nevis pūlēties radīt Saules bateriju, kas nebūtu jutīga pret temperatūras izmaiņām, bet radīt sistēmu, kas šo siltumenerģiju utilizē.

### 7.2. Saules enerģija, ko saņem LU Cietvielu fizikas institūta DR jumts gada laikā

Izveidojot visai paviršu teorētisko modeli, tika novērtēts institūta DR jumta Saules enerģijas potenciāls. Lai to izdarītu, tika izveidots skaitlisks modelis:

1. Ar astronomisku programmu „Acyone Ephemeris 4” tika uzģenerētas Saules horizontālās koordinātas ( $\varphi_f$  un  $\lambda_f$ ) visam gadam ar laika soli 1 minūte.
2. Zinot DR jumta normāles horizontālās koordinātas ( $\varphi_s$  un  $\lambda_s$ ), 1.punktā iegūtā atkarība, izmantojot Vincenta formulu 6-4, tika pārrēķināta Saules gaismas krišanas leņķa  $\Delta\sigma$  pret jumta plakni atkarību no laika.
3. Nointegrējot leņķa  $\Delta\sigma$  atkarību no laika un pareizinot ar Saules konstanti (1369 W/m<sup>2</sup>), iegūst Saules enerģijas potenciālu DR jumtam, ja Zemei nebūtu atmosfēras.
4. Pareizinot šo potenciālu ar koeficientu (saulainu stundu skaits / dienas gaismas stundu skaits = 0,405 [Rīgai]), iegūst reālo Saules enerģijas potenciālu DR jumtam.

Šādā veidā institūta DR jumtam izrēķinātais Saules enerģijas potenciāls ir 1,068075 (GWh) gadā.

Avotā (6) tiešaistes režīmā ir pieejama programma, kas spēj izrēķināt Saules enerģijas potenciālu jebkurai plakanai virsmai, ja ir zināms virziens, kurā šī virsma vērsta un šīs

virsmas atrašanās vieta Eiropā. Pie tam šī programma diezgan nopietni ņem vērā dažādus meteoroloģiskos apstākļus, kas ietekmē šo potenciālu. Vēl šajā pašā avotā iespējams iegūt dažādas kartes, kurās ir attēlota Saules enerģijas potenciāla un dažu citu parametru sadalījums Eiropas valstīs. Tā ir visai noderīga informācija, lai varētu novērtēt Saules enerģijas iespējas konkrētā Eiropas vietā.

### **7.3. Elektriskā enerģija, ko ražos Saules baterijas, ja ar tām noklāt LU Cietvielu fizikas institūta jumtu**

Zinot Saules enerģijas transformācijas lietderības koeficientu un koeficientu, kas raksturo papildus zudumus sistēmā, izmantojot 6-12 formulu var atrast elektriskās enerģijas daudzumu, kas tiks iegūts, ja institūta DR jumtu noklāt ar Saules baterijām. Un šis enerģijas daudzums ir **111,348 (MWh)**. Zinot elektrības un Saules bateriju cenu, var izrēķināt, ka 25 gadu laikā uzstādītās Saules baterijas atmaksāsies, labākajā gadījumā, tikai uz pusi. Izmantojot 2009.gadā institūtā patērētās elektroenerģijas daudzumu, var prognozēt, ka DR jumta noklāšana ar Saules baterijām nodrošinās **24%** no visas institūtam nepieciešamās elektroenerģijas.

### **7.4. Siltumenerģija, ko ražos Saules kolektori, ja ar tiem noklāt LU Cietvielu fizikas institūta DR jumtu**

Siltumenerģijas daudzums, ko var iegūt ar Saules kolektoriem, ir ļoti atkarīgs gan no kolektoru konstrukcijas, gan no siltumapmaiņas sistēmas konstrukcijas. Lai pavisai novērtētu konkrētas kolektora un siltumapmaiņas sistēmas kopējo potenciālu, var izmantot aptuveno kolektora lietderības koeficientu. Šajā nolūkā enerģijas daudzumu, ko uztver ūdens, var izmērīt. Enerģijas daudzumu, ko uztver kolektora virsma no Saules, arī var izmērīt. Izdalot saražoto enerģijas daudzumu ar ienākušās enerģijas daudzumu, var aptuveni novērtēt kolektora lietderības koeficientu. Manam kolēģim Rīgā, citā vietā, ir uzstādīti labi Saules kolektori. Ir arī izmērīts siltumenerģijas daudzums, ko tie ražo gada laikā. Siltuma daudzumu, ko tie saņem no Saules, var izrēķināt ar manu „MS Excel” sagatavi. Šādā veidā tika iegūts kolektoru sistēmas lietderības koeficients, kas ir **60%**. Zinot šo koeficientu un Saules enerģijas daudzumu, ko saņem institūta DR jumts gada laikā, var noteikt siltuma daudzumu, ko saražos šāda sistēma, ja to uzstādīt pie mums, un šis siltuma daudzums ir **637,641 (MWh)**. Izmantojot 2009.gadā institūtā patērētās siltumenerģijas daudzumu, var prognozēt, ka DR

jumta noklāšana ar Saules kolektoriem nodrošinās **76%** no visas institūtam nepieciešamās siltumenerģijas.

Gandrīz visi iegūtie rezultāti, izņemot ar „MS Excel” sagatavi iegūtos rezultātus, sniedz visai paviršu novērtējumu par enerģijas daudzumu, ko iespējams iegūt ar Saules baterijām un Saules kolektoriem. Tā iemesla pēc, ka ir daudzi vairāk vai mazāk prognozējami apstākļi, kas atstāj nopietnu ietekmi uz šiem rezultātiem. Neskatoties uz to, ka „MS Excel” sagataves izveidošanai aizgāja daudzas dienas, jāatzīst, ka tās lietošana ir diezgan vienkārša un samērā viegli ir novērtēt Saules enerģijas potenciālu gadījumam, kad nav atmosfēras.

## PATEICĪBAS

Es vēlos pateikties ESF (European Social Fund) struktūrfondiem par finansējumu manām studijām un pētījumiem. Tāpat vēlos pateikties mana maģistra darba vadītājam Jānim Kleperim un konsultantam Mārtiņam Vanagam par palīdzību eksperimentālās iekārtas izveidošanā.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

1. **Фаренбрех, А., Бьюб, Р.** *Солнечные элементы: Теория и эксперимент/* Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.: ил.
2. **Radziemska E.** The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28 (2003) 1-12.
3. *Солнечная батарея* [atsauce 1.06.2010]. Pieejams: <http://ru.wikipedia.org> meklējamie vārdi “Солнечная батарея” un “Фотоэлемент”.
4. **Куликовский, П. Г.** *Справочник любителя астрономии /* Под ред. В. Г. Сурдина. Изд. 5-е, перераб. и полн. обновл. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 688 с.
5. **Šuri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., Ossenbrink H.A.** Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 2007, 81, p. 1295–1305.
6. *PVGIS home* [atsauce 30.05.2010]. Pieejams: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm> vai <http://sunbird.jrc.it/pvgis/index.htm> .
7. *Rīgas klimats* [atsauce 30.05.2010]. Pieejams: <http://lv.wikipedia.org> meklējamais vārds „Rīgas klimats”.
8. *Day length* [atsauce 30.05.2010]. Pieejams: <http://en.wikipedia.org> meklējamais vārds „Day length”.
9. Datorprogramma „Alcyone Ephemeris 4”.
10. *Atmospheric pressure* [atsauce 30.05.2010]. Pieejams: <http://en.wikipedia.org> meklējamais vārds „Atmospheric pressure”.
11. *Great-circle distance* [atsauce 30.05.2010]. Pieejams: <http://en.wikipedia.org> meklējamais vārds „Great-circle distance”.
12. *Campbell-Stokes recorder* [atsauce 31.05.2010]. Pieejams: <http://en.wikipedia.org> meklējamie vārdi „Campbell-Stokes recorder” un „Sunshine recorder”.
13. **Kūms, E.** Saules siltuma kolektora efektivitāte atkarībā no tā konstrukcijas un pieslēguma : bakalaura darbs. LU Fizikas un matemātikas fakultāte. Rīga : Latvijas Universitāte, 2008. 57 lp.
14. **Facão, J., Oliveira, A.C.** Analysis of a Plate Heat Pipe Solar Collector. *In: SET 2004 – International Conference on Sustainable Energy Technologies.* Nottingham, UK, 28-30 June 2004.
15. *Table of specific heat capacities* [atsauce 1.06.2010]. Pieejams: <http://en.wikipedia.org> meklējamais vārds „Heat capacity”.

Bakalaura/maģistra darbs „Saules bateriju efektivitātes pētījumi atkarībā no temperatūras un apgaismojuma vienmērības, un to konstrukcijas optimizācijas iespējas” izstrādāts Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūtā.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autore/s : \_\_\_\_\_  
(paraksts)

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai  
Darba vadītājs/a: \_\_\_\_\_  
(paraksts)

Recenzents/e: \_\_\_\_\_  
(paraksts)

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ . 2010.

Studiju metodiķe: Ārija Deme \_\_\_\_\_  
(paraksts)

Darbs aizstāvēts bakalaura/maģistra gala pārbaudījumu komisijas sēdē  
\_\_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ . 2010. protokols \_\_\_\_\_ , vērtējums \_\_\_\_\_

Komisijas sekretārs: \_\_\_\_\_  
(paraksts)