



NAPELEMES VÍZMELEGÍTŐ RENDSZER HATÁSFOKNÖVELŐ ÁRAMKÖRÉNEK TERVEZÉSE

ZÁRÓDOLGOZAT

Energetikai mérnöki szak, gépészeti szakirány



Készítette:

LÉVAI PÉTER
Neptun kód: L8DFO9

Miskolc – Egyetemváros

2017

Eredetiségi nyilatkozat

Alulírott (neptun kód:)
a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős.....
..... szakos hallgatója ezennel
büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy
a
című komplex feladatom/ szakdolgozatom/ diplomamunkám¹ saját, önálló munkám; az abban
hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályi szerint történt.

Tudomásul veszem, hogy plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy
plágium esetén a szakdolgozat visszavonásra kerül.

Miskolc, 20..... év hó nap

.....
Hallgató

¹ Megfelelő rész aláhúzendó

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	3
1. ÖSSZEFOGLALÁS.....	5
1. SUMMARY.....	6
2. BEVEZETÉS.....	7
3. A NAPENERGIA HASZNOSÍTÁSA.....	8
3.1 A napelemek alapvető jellemzői.....	10
3.1.1 Villamos jellemzők.....	12
3.1.2 A villamos jellemzőket befolyásoló tényezők.....	13
3.1.3 Veszteségek.....	14
3.2 A napelemek gyártási folyamata.....	15
3.2.1 Az alapanyag előkészítése és feldolgozása.....	15
3.2.2 A napelemcellák kialakítása.....	17
3.2.3 Az áramvezető hálózat megvalósítása.....	19
3.2.4 A laminálási folyamat.....	21
3.2.5 A szolárüveg.....	26
3.2.6 A hátdoldali burkolat szerepe.....	29
4. AZ ÁRAMKÖR MEGVALÓSÍTÁSA.....	30
4.1 Bevezetés.....	30
4.2 A megvalósítás előkészítése.....	32
4.2.1 Az LTSpice alkalmazása.....	36
4.3 Az áramkör megépítése.....	40
4.4 Az alkalmazott tápegységek és mérőeszközök.....	43
4.4.1 TR-9175/A egyenfeszültségű stabilizált tápegység.....	43
4.4.2 A VOLTcraft DPPS-32-30 tápegység.....	43
4.4.3 A MA-TECH MY-64 multiméter.....	44
4.4.4 A PCE-DC1 érintkezésmentes árammérő.....	44
4.5 A mérés folyamata.....	45
4.6 Eredmények.....	48
4.6.1 A jelleggörbe módosítása az ellenállások változtatásával.....	49
4.6.2 A különböző rendszerek összehasonlítása.....	54
5. ÖSSZEGZÉS.....	58
6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	59
Irodalomjegyzék.....	60
F1. FÜGGELÉK.....	63

F2. FÜGGELÉK 64

1. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen dolgozat célkitűzése egy olyan vezérlő áramkör bemutatása, mely egy napelemtől táplált vízmelegítő készülék hatásfokát képes érdemben javítani. A megvalósítás során további fontos szempont volt, hogy a kapcsolás alapvető analóg áramköri elemeket tartalmazzon, ezzel biztosítva az egyszerűséget és a kedvező bekerülési költségeket.

A napelem egy olyan félvezető alapú energiatermelő eszköz, mely képes a Napból érkező elektromágneses sugárzást közvetlenül egyenárammá alakítani. Elektromos eszközeink jelentős része egyenárammal működik, azonban a váltakozó áramú villamos energia előállítása és szállítása kedvezőbb tulajdonságokkal bír, emiatt az elektromos hálózatból 230 V effektív középértékű váltóáram érhető el. Ezután sok esetben szükséges valamilyen átalakítás – legtöbbször egyenirányítás –, hogy megfelelő paraméterű villamos áram álljon rendelkezésre.

A villamos berendezések működése közben többféle veszteség jelentkezik, melyek közül az egyik legjellegzetesebb az ohmikus veszteség, melyet hő formájában tapasztalunk. Nevéből adódóan ez az elektromos energiának egy nem hasznosuló része, mely kezelése azonban nagyon fontos. Egyrészt, törekedni kell ezen veszteség minimalizálására, így elkerülhető a káros hőfejlődés és adott esetben az eszköz tönkremenetele. Másrészt, ha nem tudjuk megvalósítani, hogy a termelődő hőmennyiség meghaladja azt a határértéket, melyet az eszköz még el tud disszipálni, akkor gondoskodni kell a rendszer hűtéséről.

Az itt bemutatásra kerülő rendszer a napelem által előállított egyenáramot közvetlenül, egy fűtőszál által hőt termelve, képes hasznosítani, emellett az áramkör elemeinek hűtését maga a fűtendő közeg végzi, ezzel szükségtelenné téve külön hűtőrendszer kialakítását.

1. SUMMARY

This study aims to introduce a special circuit, which can grow energy efficiency of a photovoltaic water heating system. Due to simplicity of the circuit, it consists of simple analog electronic elements, such as resistors and transistors, it is cost efficient system. Solar modules, some kind of semiconductor based device, can directly transform electromagnetic beam of Sun to direct current (DC). Most of electronic device utilize direct current, but we can reach 230 V alternate current (AC) from sockets because of crucial advantages of alternate current, for instance it has less losses under delivering. The AC current often need to transform to another featured current – in most cases it means rectifier.

Under operating electronic devices have some different kind of losses, for example ohmic loss which we can experience in form of heat. Losses are harmful phenomenas and we have to handle these. On the one hand, we can design the way with low dissipating heat so that it can operate at normal conditions. On the other hand, if we cannot secure that quantity of dissipating heat would be under a given limit, we have to use a suitable cooling system.

The assembled circuit utilize DC current from photovoltaic system for water heating by a resistive heating element. It does not need a dedicated cooling system because of heated water which can absorb dissipating heat.

2. BEVEZETÉS

Az utóbbi évek talán legnagyobb társadalmi-gazdasági kérdése az, vajon a jelenleg ismert és gazdaságosan kitermelhető energiahordozó készletek képesek-e fedezni növekvő energiaigényeinket jelentős szemléletváltás nélkül. A választ csak utólag fogjuk megkapni, azonban érdemes elgondolkozni a kérdésen. Ha készleteink elegendőek és paradigmaváltás nélkül kielégítik igényeinket, akkor minden a legjobb úton halad. Ha azonban nem, akkor változásra van szükség, még hozzá gyorsan, és meg kell vizsgálni azokat az eddig még nem vagy csak alig hasznosított energiaforrásokat, melyek a jövő megoldásait jelenthetik.

A jelenlegi gazdaság (még) a fosszilis energiahordozókra épül. Ezek az anyagok a Nap energiáját tárolták el hosszú évmilliókon keresztül, mígnem elkezdtek kitermelni őket. Az idetartozó energiahordozók a különböző szenek, a kőolaj és földgáz, melyek véges mennyiségüknél fogva nem jelenthetnek végleges megoldást egy folyamatosan növekvő igényű civilizáció számára.

A megújuló energiaforrások, mint a nap-, a szél-, a víz- és a geotermális energia, mind alkalmasak lehetnek arra, hogy egyes régiókban – ahol bőségesen rendelkezésre állnak – megoldják az energiaellátás fennálló problémáit. Azért nevezik ezeket megújuló forrásoknak, mert emberi mértékkel nézve viszonylag gyorsan újratermelődő, szinte állandó készlettel bírnak. Ettől függetlenül a felelős gazdálkodás ugyanúgy meghatározó, mint egy véges készletű energiahordozó esetén, hiszen minél hatékonyabban használjuk ki a bennük rejlő potenciált, annál tovább fennmaradhat a természeti egyensúly.

A Nap által sugárzott energia kiemelkedik fontosságával a többi energiafajta közül, egyrészt azért, mert szinte az összes többi energiafajta visszavezethető csillagunk működésére, másrészt azért, mert egyik másik sem rejt akkora hasznosítható lehetőségeket, mint a napenergia. Az az energiamennyiség, mely fény és hő formájában Földünket éri többszöröse annak, mint amire szükségünk van. Éppen ezért célszerű olyan eszközök fejlesztését támogatni, melyek képesek a napenergiát hatékonyan összegyűjteni és hasznosítani. Az elmúlt néhány évtizedben intenzíven foglalkoztak ilyen berendezések kutatásával, melynek eredményeként mára széleskörűen elterjedtek és számtalan alkalmazásuk került kialakításra. Ilyen eszköz például a napelem, a napkollektor, a napkemence, a napkémény és a naphőerőmű.

3. A NAPENERGIA HASZNOSÍTÁSA

Naprendszerünk központi eleme, a Nap, a Tejútrendszernek nevezett galaxis egyik karjának sárga törpe csillaga. Bár a Földről nézve hatalmas és megkerülhetetlen, a galaxis szemszögéből apró kis pont csupán. A Nap 75 % hidrogénből (H₂), 24 % héliumból (He) és 1 % egyéb elemekből álló forró gáztömeg. Belsejében magfúziós folyamatok játszódnak le, mely eredményeként jelentős mennyiségű elektromágneses sugárzást bocsát ki. Ez biztosítja a megfelelő feltételeket a földi élethez [1].

Az elektromágneses sugárzás terjedési sebessége a levegőben jó közelítéssel megegyezik a vákuumbeli $3 \cdot 10^8$ m/s-mal. Az elektromágneses sugárzást a frekvenciával (f) vagy a hullámhosszal (λ) jellemezzük. E két mennyiség szorzata adja a terjedési sebességet.

$$c = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

A testek nem egy diszkrét hullámhosszon bocsátanak ki sugárzást, hanem széles hullámhossztartományban. Ez alól a Nap sem kivétel, a gammasugárzástól ($\lambda = 10^{-13}$ m) egészen a mikrohullámú sugarakig ($\lambda = 10^{-1}$ m) minden tartományban bocsát ki valamilyen elektromágneses hullámokat. Minél magasabb hőmérsékletű egy test, annál rövidebb hullámhosszakon bocsát ki sugárzást [1]. A sugárzás energiája a test abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával arányos (Stefan-Boltzmann törvény):

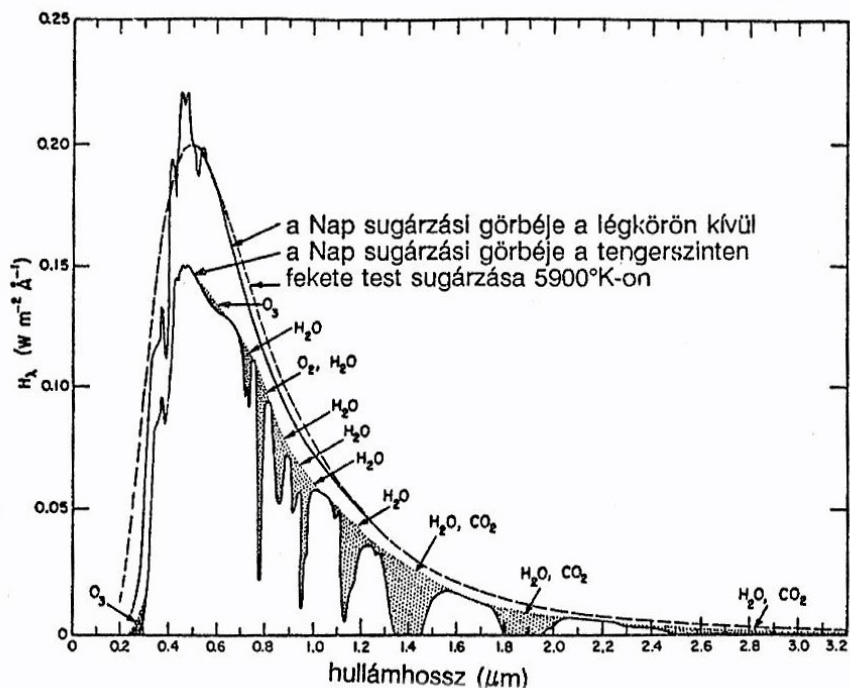
$$E = \sigma T^4, \quad (3.2)$$

ahol E a sugárzó energia, a σ arányossági tényező pedig az egyetemes sugárzási állandó, mely értéke $\sigma = 5,77 \text{ Wcm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Az elektromágneses sugárzás intenzitása bármilyen közegen történő áthaladás során a visszaverődés (reflexió) és az elnyelődés (abszorpció) miatt csökken. A visszaverődés mértékét az albedóval jellemezzük. Az albedó azt fejezi ki, hogy az adott közeget elérő sugárzás hányad része verődik vissza. A visszaverődés és az elnyelődés mértéke függ a hullámhossztól és az anyagi minőségtől [1].

A Nap felszíni hőmérséklete megközelítőleg 6000 K, ennek következtében a 0,2 – 4 μm -es hullámhossztartományban bocsát ki elektromágneses hullámokat, ahogy az az 1. ábrán látható. A sugárzás a látható tartományban a legintenzívebb. A légkört elérő sugárzás csak részben jut el a felszínig. A 0,3 μm -nél rövidebb hullámhosszú ultraibolya sugárzás nagy részét elnyeli a sztratoszférában található ózon (O₃). A 0,3 – 0,8 μm közötti, látható sugárzás felhőmentes esetben akadálytalanul elérheti a felszínt. A felhők azonban vastagságuktól függően kisebb-nagyobb mértékben

visszaverik a látható tartományba eső sugárzást. Míg a 10 km-es vastagságot is elérő zivatarfelhők albedója elérheti a 90 %-ot, addig a vékony, jégkristályokból álló cirrus felhők a beérkező sugárzás energiájának csak kb. 5 %-át verik vissza [1].

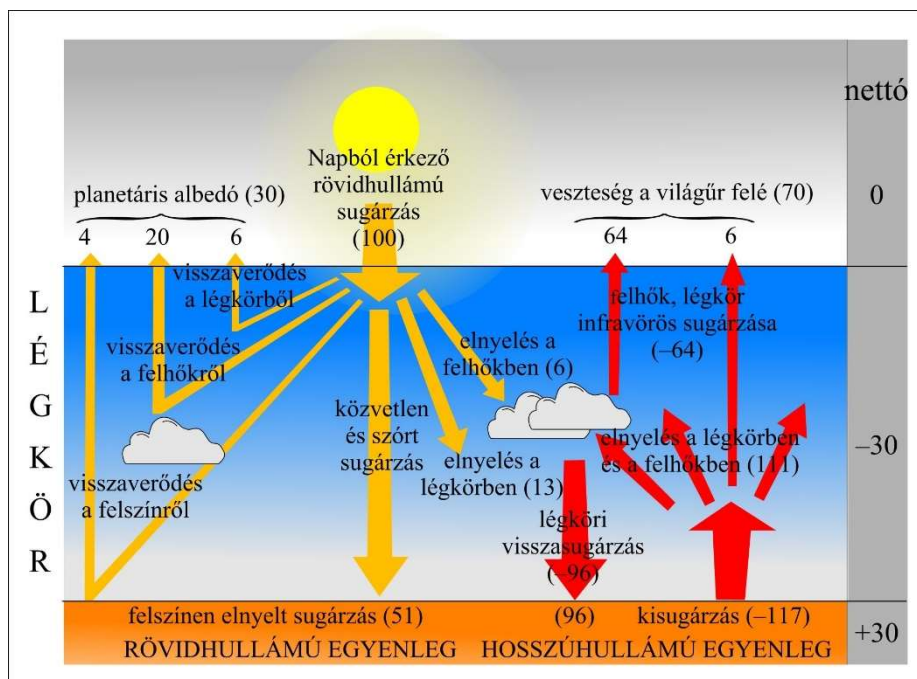


1. ábra: A nap által kibocsátott sugárzás spektruma [2]

A Föld felszínének átlagosan 50 %-át árnyékoló felhők és a légkörben található szilárd aeroszol részecskék a Napból érkező sugárzásnak megközelítőleg 20 %-át verik vissza. A 0,8 és 4 μm közötti infravörös sugárzás egy részét a légkörben található vízgőz (H_2O) és szén-dioxid (CO_2) elnyeli. Ennek eredményeként a Napból érkező sugárzás közel egyharmada a troposzférában nyelődik el [1].

A visszaverődés és elnyelődés mértéke jelentősen függ a felszín anyagától. Míg a hóval fedett tájakon a visszaverődés meghaladhatja a 90 %-ot, addig a szántott, nedves talaj esetében az albedó csak 5 % körüli. A Föld felszínének átlagos albedója 10 %, amely megegyezik a felszín kétharmadát borító vízfelszín hasonló értékével.

Összegezve, a Napból érkező sugárzásnak hozzávetőlegesen 30 %-a visszaverődik a világűrbe, a fennmaradó nagyjából 70 % pedig elnyelődik a légkörben, továbbá a talajban és a felszín borító vízrétegben [1]. A légkörben lejátszódó elnyelődési és visszaverődési folyamatok megtekinthetők a 2. ábrán, mely a felszín-légkör rendszer sugárzásháztartását ábrázolja.



2. ábra: A Föld sugározsházartása [3]

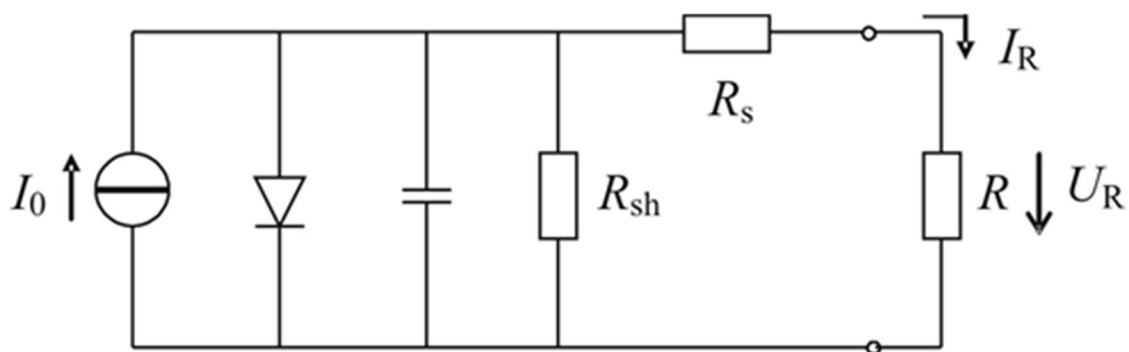
3.1 A napelemek alapvető jellemzői

A napelemek, másnéven fotovillamos elemek félvezető anyagból, szilíciumból vagy germániumból, esetleg vegyületből, például gallium-arsenidből (GaAs) készülnek. A leggyakrabban alkalmazott alapanyag a szilícium, mivel nagy mennyiségben megtalálható a Földön, nagyon stabil, tulajdonságait sokáig megőrzi. Az előállítás technológiájától függően készítenek egykristályos, polikristályos és amorf napelemcellákat. A legfőbb különbséget közöttük az előállítás költsége és az elérhető hatásfok jelenti [4].

Előjáróban annyit érdemes megjegyezni a szilárd anyagok sávszerkezetéről, hogy a vegyérték és a vezetési sáv elhelyezkedésétől függően három típust különítünk el: a szigetelőket, a félvezetőket és a vezetőket. A vegyérték sávbán található a kémiai kötésekben részt vevő elektronok, a vezetési sávbán a kötésekben kiszabadult mozgásképes elektronok lehetséges energiaszintjei foglalnak helyet. A két tartomány között lévő tiltott sáv olyan energianívókat tartalmaz, melyeket a hibátlan egykristály elektronjai nem vehetnek fel. A vezetőknél a vezetési és a vegyérték sáv átlapol, a tiltott sáv közel nulla ($E_g < 0,2 \text{ eV}$). A szigetelők tiltott sávja túl széles ahhoz, hogy azon az elektronok át tudjanak lépni a másik tartományba. A félvezetőknél a tiltott sáv viszonylag széles ($E_g = 0,7 - 1,2 \text{ eV}$), emiatt szobahőmérsékleten, vegytiszta

állapotban csaknem szigetelők. Növekvő hőmérséklettel és szennyezéssel (doping) vezetőképességük növelhető [5].

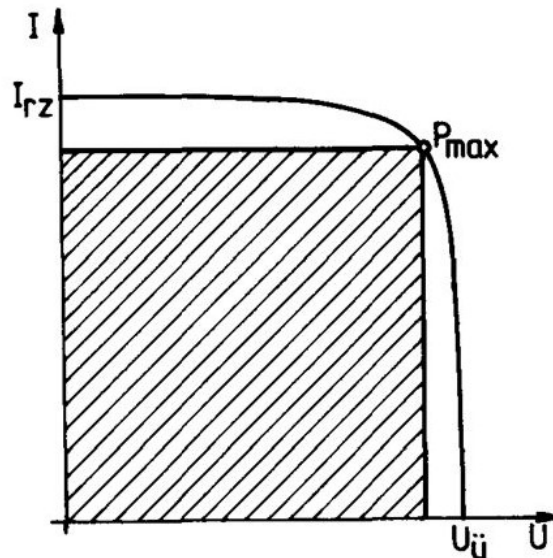
A napelemek működésének alapja az ún. p-n átmenet. A tiszta félvezető anyagban különböző diffúziós félvezető technológiai műveletekkel p típusú (pozitív töltésű többségi töltéshordozókat, lyukakat tartalmazó) és n típusú (negatív töltésű többségi töltéshordozókat, elektronokat tartalmazó) réteget alakítanak ki. Az n típusú réteg kialakítása ún. donoranyaggal lehetséges, ezek öt vegyértékű anyagok, ilyen a foszfor (P) és az arzén (As). A p típusú szennyezés akceptoranyaggal – három vegyértékűek - valósítható meg, mely lehet például bór (B) vagy alumínium (Al) [5]. A két réteg határán létrejövő p-n átmenet diódként működne, amelyben az energialepcsőt a töltéshordozók a rákapcsolt megfelelő polaritású feszültség hatására képesek átlépni. Napelem úgy lesz belőle, ha a félvezetőt fény éri és a fény energiája készíti a töltéshordozókat az energiáját leküzdésére. A fény kettős természete – egyszerre kvantum és foton – közül a foton elméletét használjuk a szemléletes tárgyalásra. A megfelelő energiájú fotonok elnyelése elektron-lyuk párokat hoz létre a félvezető mindkét rétegében. A kisebbségi töltéshordozók átvándorolnak a p-n átmeneten keresztül a másik rétegben, ami áramot hoz létre, s a napelem áramforrásként használható [4].



3. ábra: A napelem helyettesítő áramköre [6]

A napelem működésének leegyszerűsítésére alkották meg annak helyettesítő képét, mely a 3. ábrán látható. Az I_0 áram a besugárzás által létrehozott szabad töltéshordozókból keletkező fotoáramot jelöli. Az áramgenerátorral párhuzamosan kapcsolt dióda az eszköz félvezető jellegét szemlélteti. Az áramkör kondenzátora a p-n átmenet kapacitív tulajdonságait hivatott modellezni, azonban ennek jelentősége csak nagyfrekvenciás alkalmazásoknál van. Az R_{sh} sönt és R_s soros ellenállások pedig a napelem belső ellenállásait reprezentálják. Villamos terhelésnél az R ellenálláson mérhető U_R kapocsfeszültség és az I_R áramerősség a meghatározó – e mennyiségek

vizsgálatát később részletesen ismertetem. Azt azonban fontos leszögezni, hogy e két paraméter meghatározása nem egyszerű, mivel a diódára felírható feszültség-áram függvény nem lineáris. A számítások általában numerikus közelítésekkel, iteratív eljárásokkal végezhetők [6].



4. ábra: A napelem U-I jelleggörbéje [4]

3.1.1 Villamos jellemzők

A 4. ábrán feltüntetett karakterisztika jelöléseinek megfelelően a napelem alapvető jellemzői a következők:

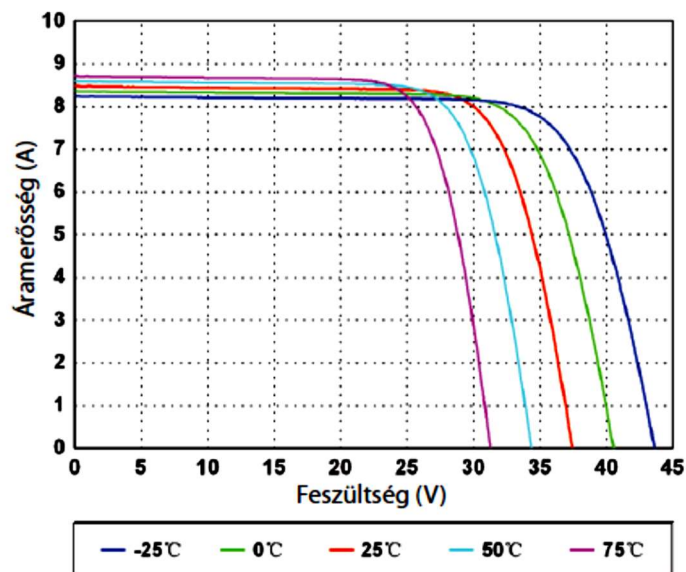
- üresjárási feszültség ($U_{\ddot{u}}$): amikor $I = 0$, ilyenkor a fény által generált áram teljes egészében a diódán folyik keresztül,
- rövidzárási áram (I_{rz}): amikor $U = 0$, a napelem rövidzárási árama egyenesen arányos a sugárzás intenzitásával,
- maximális leadott teljesítmény (P_{max}): $P = UI$, azaz a maximális teljesítménynek megfelelő pontot grafikusán a jelleggörbén a maximális területű, U_{max} , I_{max} oldalú téglalap megkeresésével határozhatjuk meg.
- kitöltési tényező (K vagy φ): $P_{max} = \varphi U_{\ddot{u}} I_{rz}$ képlettel értelmezhető, vagyis az elméletileg elérhető villamos teljesítmény és a tényleges maximális teljesítmény aránya.

A napelemek névleges teljesítményét Wp-ben (watt csúcs /watt peak/) adják meg. Ez az a maximális teljesítmény, amit szabványos (lásd később STC és NOCT) körülmények között szolgáltat [4].

3.1.2 A villamos jellemzőket befolyásoló tényezők

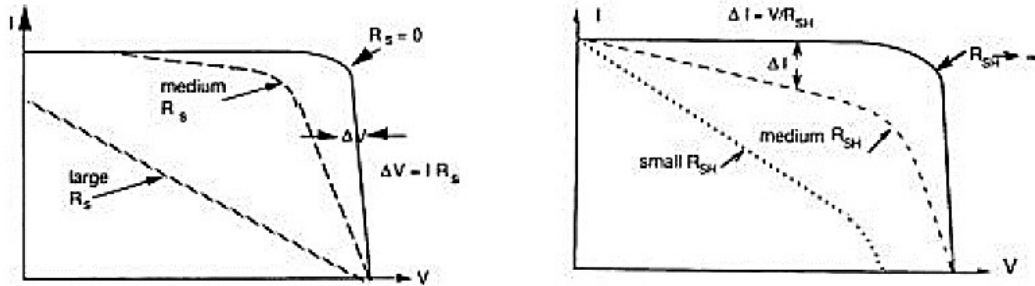
A napelemeket a valós körülmények között, mikor is azok változó időjárási feltételek mellett üzemelnek, több olyan hatás is éri, melyek kihatnak azok jelleggörbéjére.

1. Hőmérséklet: A hőmérsékletváltozás leginkább a napelem feszültségét befolyásolja – növekvő hőmérséklettel csökken. A szilícium napelem hőmérsékleti együtthatója negatív, tipikusan $-2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. A hőmérséklet hatására megváltozott karakterisztika az 5. ábrán figyelhető meg [4].



5. ábra: A napelem U-I jelleggörbéjének hőfokfüggése [7]

2. Fényintenzitás: A napelem működéséből következik, hogy minél nagyobb a sugárzás intenzitása, annál nagyobb a töltéshordozók száma, és így nagyobb a napelem árama. A feszültség változása a gyakorlatban elhanyagolható. A karakterisztika függése a sugárzás intenzitásától a 4.1 fejezet 15. ábráján látható.
3. Soros és a sönt ellenállás: A napelem áramának elvezetése Joule hőveszteséget okoz, mely hatására a kitöltési tényező csökkenése figyelhető meg.



6. ábra: A soros és a sönt ellenállás hatása az U-I jelleggörbére [8]

Ezen kívül a soros ellenállás csökkenti még a rövidzárási áramot, a sönt ellenállás pedig az üresjárási feszültséget [4][8].

3.1.3 Veszteségek

A napelem tényleges hatásfoka sok tényezős függvény (gyártástechnológia, típus, környezeti hatások stb.). A veszteségeket eredetük szerint három nagyobb csoportba oszthatjuk, úgy mint: rekombinációs eredetű, ohmikus ellenállásból adódó – más irodalmak alapveszteségként említik [4] – és optikai veszteségek.

A rekombináció a töltéshordozó szétválasztás ellentétes folyamata. Ha a szétvált töltéshordozók újra egyesülnek (elsősorban a félvezető hibás részeinél illetve a felületén), akkor már nem tudnak részt venni az áramtermelés folyamatában. Emiatt a rekombináció az üresjárási feszültséget és a rövidzárási áramot is csökkenti, csökkentve ezzel a hatásfokot. A rekombináció ellen jobb kristályminőséggel és konstrukciós megoldásokkal (a felület passzíválása vagy ún. hátoldali tér /Back Surface Field, BSF/ kialakítása) lehet védekezni [4][9].

A napelemek legnagyobb hatásfokromlása az ohmikus veszteségből ered. Keletkezésének oka, hogy a fotonok által végzett töltéshordozó generálás hő disszipációval is jár [4]. Ezek az ellenállások jelentősen csökkentik a rövidzárási áramot, melyek a cella alábbi részeinek hatását reprezentálják:

- a hátoldali fém-félvezető átmenet ellenállása,
- a bázis ellenállása,
- az emittorréteg ellenállása a homlokoldali fémezések között,
- a homlokoldali fém-félvezető átmenet ellenállása,
- a mellékfémezés (fingerek) ellenállása, és
- a fő gyűjtősín ellenállása.

Az ezeken fellépő hőveszteségek csökkentésére a cella megfelelő kialakítása a megoldás. Miközben elméletben külön-külön kezelhetők a problémák, addig valós

körülmények közt, mikor egyszerre lépnek fel, már kompromisszumokat kell kötni. Például az áramgyűjtő fémezés méretének és tömörségének növelésével ugyan csökkenthető a rajta fellépő veszteség, de egyidejűleg növekszik a napfény elől leárnyékolt félvezető felület nagysága is [9].

A fényvesztésekről és azok hatásairól részletesen beszámolok a napelemek gyártási folyamata során, a 3.2.5 fejezetben.

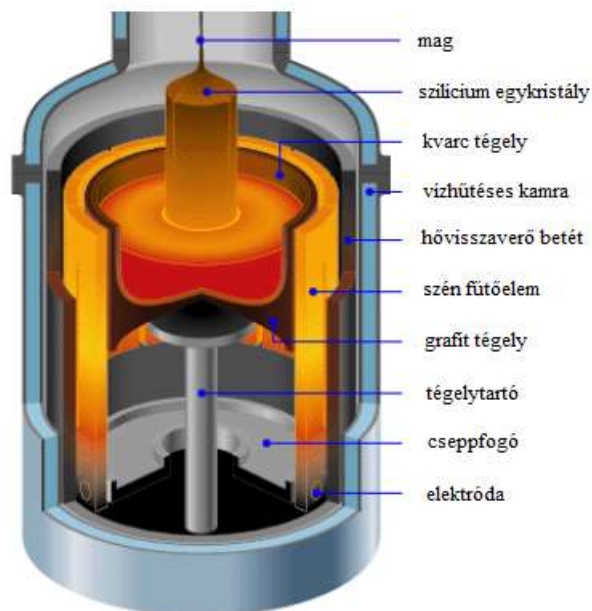
3.2 A napelemek gyártási folyamata

3.2.1 Az alapanyag előkészítése és feldolgozása

A fényelektromos eszközök alapanyaga nagy tisztaságú homok, vagyis szilícium-dioxid (SiO_2), mely egy soklépcsős feldolgozási procedúrán végighaladva nyeri el azt a végső formáját, mely már alkalmas napelemcellaként történő felhasználásra. Az elsődleges feladat a szilícium-dioxidból eltávolítani az oxigént, mivel a napelemcellagyártáshoz minimum 6 N, azaz 99,999999 % tisztaságú szilícium szükséges. A 6-9 N közötti tisztaságú szilíciumot napelemgyártáshoz, míg az ennél tisztább, 9 és 11 N közötti tisztaságú szilíciumot a mikrochipgyártáshoz használják fel [10]. A kellően tiszta szilícium olvasztókemencékben szén hozzáadásával állítható elő nagyon magas hőmérsékleten, 1780 °C-on [9]. A szén a redukációs folyamat során megköti az oxigént, és szén-dioxid jön létre. Az így kapott szilícium 99%-os tisztaságú, amit azonban további lépésekben kell tisztítani, hogy eltávolítsák a maradék szennyezőket, úgymint a kalciumot, az alumíniumot, a bórt és a vasat. Az így kapott olvadékot ezt követően ledarálják, újra megolvasztják, és a napelemcellákhoz szükséges nagy tisztaságú, megfelelő kristályszerkezetű tömböket alakítanak ki belőlük. A tömbösítéshez (ingot casting) használt legrégebbi módszer a Czochralski-eljárás [10]. Az elrendezés, mely a 7. ábrán látható, viszonylag egyszerű: egy emelőszerkezetből és egy kemencéből áll, mely tartalmazza a tégelyt a kiinduló anyaggal. Az eljárás lényege az, hogy a Si olvadék felületéhez vagy egy nagyobb olvadáspontú kristályt, vagy az olvadék anyagából készült kristályt érintenek, és azt meghatározott, állandó értékű sebességgel emelik. A folyamat két kritikus paramétere a sebesség és a hőmérséklet-eloszlás. Ugyanis, ha túl lassan emeljük a kristályt, akkor a szilárd-folyadék fázishatáron új mag képződhet és az anyag polikristályos lesz, ha pedig túl nagy a sebesség, az ömledék elszakad a kristálytól. A másik kihívás az, hogy a hőmérsékletet több irányban is nagyon szűk intervallumban kell tartani, különben a művelet sikertelen

lesz. A hőfoknak mindenképpen az olvadáspontnál nagyobbak kell lennie, de nagyon rövid távolságon belül le is kell csökkennie az alá. Ezentúl a tengelyszimmetrikus hőmérsékleti gradiens beállítása miatt a kristályt, a tégelyt, esetleg mindkettőt állandóan forgatják a húzási sebességgel párhuzamos tengely körül [11].

Ha a keletkezett szilícium hengerünket merőlegesen felfűrészeljük, akkor egy-egy szelet egységes kristályszerkezetű lesz, nem lesznek benne töréspontok, és ezt monokristályos szilíciumnak nevezzük. A szilíciumhengereket gyémántszemcsés huzalvágó berendezésekkel szögletesítik, majd felszeletelik 160 és 210 μm vastagságú lapkákká, melyet a szakirodalom waferként (magyarul ostyaként lehet fordítani) is nevez. A monokristályos napelemcellát közelebbről megnézve láthatók a nyolcszög alakú lapka rövidebb oldalain a kezdeti 156 mm átmérőjű henger ívelt vonalai [10].



7. ábra: A Czochralski-eljárás [11]

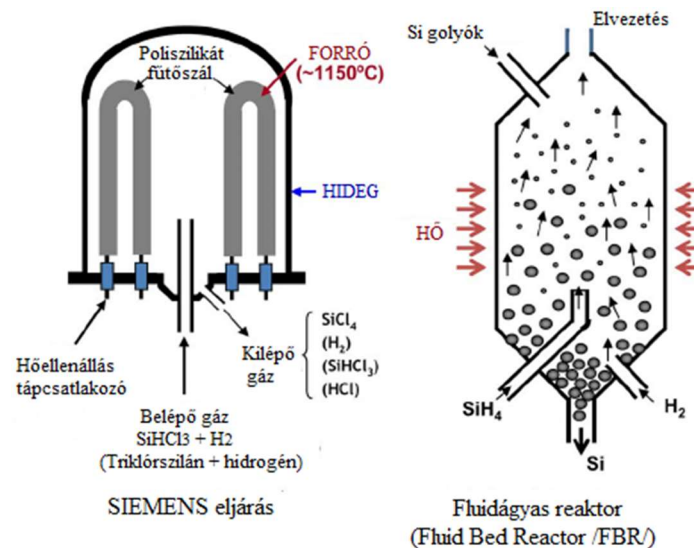
A tömbösítéshez használt másik eljárás a Siemens-eljárás. A kristályhúzást kikerülve az elektronikai tisztaságú szilícium alapanyagot megömlesztve – 1100 °C-on – egy négyszögletes grafit tégelybe öntik, és szabályozott hűtés mellett kikristályosítják. A kristályosodás több gócpontból indul és az így keletkezett anyag polikristályos lesz. A folyékony anyag szabályozott hűtése arra irányul, hogy a kristallit méret lehetőleg nagy és homogén, a megszilárdult anyag hasábos szerkezetű legyen. Az anyag kristallit mérete a néhány millimétertől centiméteres nagyságrendig terjed [9]. A nagy tömböket ezután kisebb hasábokra szeletelik fel (156x156 mm, 6" átmérőjű), ahol a

vágási vonalak nem esnek egybe a kristályok széleivel, emiatt a feldolgozatlan polikristályos lapkákon jól kivehetők még az egyes kristályok közötti határvonalak.

Ez a technológia forradalmasította a kristályos Si-alapú napelemgyártást, mivel alacsonyabb energiaszükséglete folytán olcsóbb, mint a Czochralski-eljárás.

A harmadik alkalmazott eljárás az ún. fluidágyas reaktor eljárás, mely sematikus ábrája a Siemens-eljárással együtt a 8. ábrán tekinthető meg.

Az eljárás során felhevített szilán- és hidrogéngáz segítségével hozzák fluidizált állapotba az ágyanyagként felülről beadagolt szilíciumot. A hő hatására a szilán (SiH_4) alkotóira bomlik, s a kiváló szilícium lerakódik az ágyanyagban, melyben ekképp a kristályok növekedésnek indulnak. Ha egy kristály elérte a kívánt méretet, a reaktor alján távozik és a berendezés tetején bevezetett szilícium golyókkal egyensúlyban tartják az anyagmértéket. A rendszer szinte teljes mértékben hasznosítja a szilán gázt, emiatt energiahatékony folyamatnak tekinthető. A fluidágyas reaktor egy folyamatos üzemű berendezés, ellentétben a Czochralski- illetve Siemens-eljárásokkal, melyek szakaszos üzemben működnek, ezáltal kevésbé termelékenyek [12].



8. ábra: A Siemens és a fluidágyas reaktor eljárás [12]

3.2.2 A napelemcellák kialakítása

Miután megismertük a nagy tisztaságú szilícium előállítási technológiáit, következzenek a napelemcellák kialakításának lépései.

A kihűlt szilíciumtömböket lapkákra (wafernek is nevezik) fűrészelik, melyet leggyakrabban gyémántporos huzalvágókkal valósítanak meg – tucatnyi huzal segítségével egyszerre több lapkát alakítanak ki egy tömbből. Ezt egy mechanikai-kémiai polírozás követi, mely után előáll az eszközkészítésre alkalmas lapka. A

gyártók folyamatosan dolgoznak azon, hogy minél vékonyabb szeleteket produkáljanak, illetve hogy csökkenteni tudják a vágási veszteségeket (a huzal vastagságának mérséklésével), s így olcsóbbá váljanak a napelemcellák. 2010-ben még 220 μm volt egy átlagos szilíciumlapka vastagsága, ami napjainkra 160-180 μm -re csökkent le. A vékonyabb lapkák esetében kisebb annak az energiának a mennyisége, ami hő formájában elvész, miközben az elektronok a lapka egyik oldaláról a másikra vándorolnak. Az egyre vékonyabb lapkáknak viszont az a hátrányuk, hogy könnyebben törnek, emiatt a gyártó robotok nehezebben tudnak velük dolgozni [10].

A kész szeletek első lépésben átesnek egy kémiai felületkezelésen (kénsavas fürdő), hogy a vágási egyenetlenségeket és a felületi domborulatokat kiegyenlítsék. Még ebben a fázisban gyakran texturálják a félvezető felületét csökkentve ezáltal a felületi reflexiót. Ez a megoldás elsősorban a Si-alapú eszközöknél szokásos. Az eljárás során kálium-hidroxid (KOH) vagy nátrium-hidroxid (NaOH), ún. szelektív katalitikus oldószereket használnak, mely anyagok piramisszerű képződményeket alakítanak ki az anyag felületén. Az oxidréteg kialakítása történhet termikus oxidációval (ez lehet száraz vagy nedves), anódos oxidációval, gázfázisból történő kémiai leválasztással (chemical vapour deposition /CVD/) vagy katódporlasztással. A leggyakrabban a száraz és nedves oxidnövesztést alkalmazzák, amely ún. oxidáló kemencében megy végbe 900-1200 $^{\circ}\text{C}$ -on. A technológiától függően a struktúra egyszerűbb esetben véletlenszerű elhelyezésű és méretű pozitív piramis (random pyramids), igényesebb esetben negatív irányú piramisok rendezett formációja (inverted pyramids) [9].

Az antireflexiós rétegek általában több eltérő feladatot látnak el. Amellett, hogy csökkentik a tükröződési veszteséget, még passziváló réteggként is funkcionálnak, melynek célja a felületi rekombinációs sebesség mérséklése, mely által megnő a hasznosítható töltéshordozók száma. Erre a célra kiválóan alkalmasak az átlátszó vezető-oxidok (transparent conducting oxide /TCO/), úgymint az indium-oxid (In_2O_3) vagy az ón-dioxid (SnO_2) [9].

A szilícium szobahőmérsékleten villamosan szigetelő, magas hőmérsékleten azonban vezeti az áramot, emiatt a félvezetők közé soroljuk. Annak érdekében, hogy energiatermelésre használható anyag váljon belőle, ahhoz tartósan elektromos vezető állapotban kell maradnia, lehetőleg szobahőmérsékleten. Ezt egy különleges kémiai eljárással, ún. dópolással vagy másnéven adalékolással (angolul doping) érik el. A szilícium kristályban létrehozandó pn-átmenetet, illetve minden egyéb adalékolási

inhomogenitás elsősorban diffúzióval történik. A diffúzió az atomok vándorlása az őket befogadó anyagi közegben termikus energia segítségével. Ha az anyagban koncentrációkülönbség áll fenn, akkor a hőmérséklet hatására az atomok véletlenszerű mozgása eredményeként anyagáramlás jön létre. Az adalékanyagoknak (B, P, As, Ga, stb.) a diffúzió során is elektromosan aktívnak kell lenniük, ami csak akkor lehetséges, ha ezek a rácspontokba épülnek bele, azaz a diffúzió helyettesítéssel történik. Az adalékolás különböző peremfeltételekkel történhet:

- állandó felületi koncentrációval – a diffundáló kristály közelében állandó adalékanyag parciális nyomása
- véges anyagmennyiségből – a szeletre felvitt vékony rétegből
- kétlépcsés módszerrel – az előző kettő kombinálásával [9].

Az adalékolást nem lehet irányítottan, kizárólag a szilíciumlapka adott pontján elvégezni, ezért egy fotolitográfiai eljárással először kimaszkolják a lapkák egyes részeit – ahova majd az áramvezető érintkezők kerülnek –, majd bór- vagy foszfor-oxid-klorid-fürdőbe (POCl_3) helyezik a szilíciumot. Azokról a részekről, ahol nem volt szükség adalékolásra, lemosják a kialakult szilíciumüveg réteget, majd egy lézer segítségével a cella felső éle mentén egy árkot hoznak létre (angolul edge isolation), amellyel elkülönítik az adalékolt és a kezeletlen réteget [10].

Ekkor már nagyrészt eldőlt, hogy a napelemcella milyen végső teljesítményre lesz képes, attól függően, hogy a savas fürdők során milyen magas piramisrendszer alakult ki a cella felületén, az adalékolás milyen rétegvastagságban ment végbe a szilícium felületén, illetve a kémiai leválasztás során mennyire egyenletes antireflexiós réteget kapunk.

3.2.3 Az áramvezető hálózat megvalósítása

A félkész cellák már készen állnak az energiatermelésre, azonban az előállított energiát össze kell gyűjteni és el kell vezetni. Ennek megvalósítására hozták létre a cellák felszínén elhelyezett vezeték hálózatot, mely hasonlóan összetett és nagy szakértelmet igénylő folyamat, mint magának a napelemcellának az előállítása.

Az elektromosságban két leggyakrabban használt vezetőanyag a réz és az alumínium. Gyakori előfordulásuk és alacsony előállítási költségük miatt érthető kiterjedt felhasználásuk. Az alumínium és a szilícium között könnyebb kötést kialakítani, mint a réz és a szilícium között, viszont az alumínium rosszabb villamos vezető, emiatt nagy felületen és keresztmetszetben kellene azt a napelemcella felszínére felvinni, hogy a

termelt energiát veszteség nélkül elvezessük. Éppen ezért a cella felső oldalán, amelyik a napfényel közvetlenül érintkezik, nem lehet az alumíniumot alkalmazni, mert gyakorlatilag beárnyékolnánk vele. A megoldást egy ezüst-ötvözet jelenti, amely jól kapcsolódik a szilícium felszínéhez, viszont drága [13].

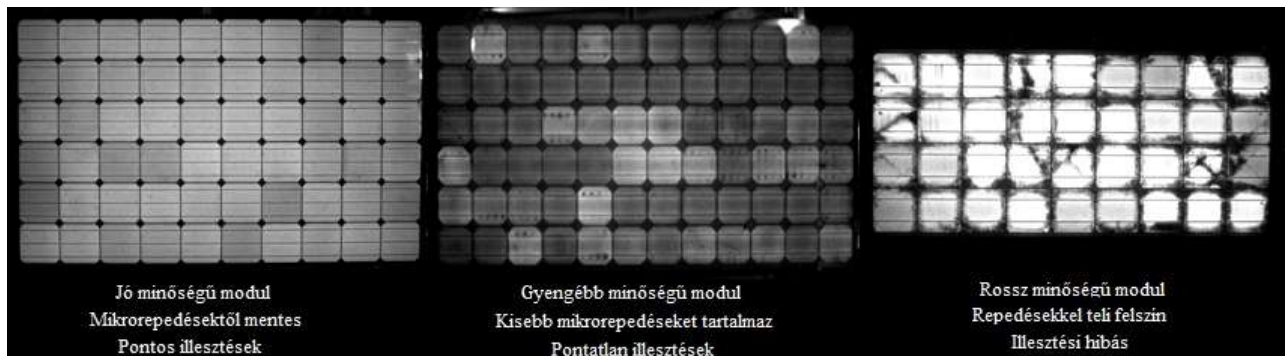
A termelődő energia minél nagyobb arányú és hatékonyabb elvezetése érdekében egy – vagy több – vezető sít, ún. busbar-t alkalmaznak, melyhez a cella egész felületéről vékonyabb vezetékek, ún. fingerek futnak. Ez az elrendezés azért alakult ki, mert a töltéshordozók csak igen rövid távolságra képesek elmozogni anélkül, hogy rekombinálnának [13].

Kezdetben egy vezetősínt alakítottak ki - ekkor még többnyire 5"-os, 125 mm átmérőjű szilíciumlapkákkal dolgoztak – és ehhez csatlakoztak a fingerek. Annak érdekében, hogy a kellő mennyiségű energiát elvezessük, kellően vastag fingereket és vezető sítet kellett kialakítani a napelemcella felszínén az ohmikus ellenállás csökkentése miatt. A keletkezett struktúra azonban a cella egy jelentős részét takarta, mely így nem vett részt az energiatermelésben [13].

Az anyagtechnológia, a forrasztási és nyomdai technikák fejlődése lehetővé tette, hogy több vezető sín kerüljön elhelyezésre egy adott cellán. A több busbar-os megoldás előnye, hogy a busbar-ok közötti távolság kisebb, így a rövidebb fingerek ellenállásából adódó veszteség is kisebb, illetve azonos veszteség mellett vékonyabb fingereket lehet kialakítani, amivel csökkenthető a cella felszínének beárnyékolása. Az optimális megoldásnak sokáig a két busbar-os kialakítást tűnt, majd a forrasztó robotok fejlődésével 2011-2012-től megnyílt az út a 3 busbar-os cellakialakítások előtt. Egy ilyen cellán 1,5 mm széles vezető síneket és 90-100 µm-es fingereket helyeznek el, melynek köszönhetően azok a cella felületének mindössze 2,9 %-át árnyékolják. A nagyobb hasznos felület természetesen nagyobb egységnyi teljesítmény elérését teszi lehetővé [13].

Miután rányomtatták a napelemcellákra az első és a hátsó érintkezőket, a paszta a cella felszínén még nedves és képlékeny, azért ismét egy kb. 200 °C hőmérsékletű szárítóba, majd egy 350-450 °C közötti beégető kemencébe kerülnek a cellák, hogy az ezüst busbar-ok és finger-ek, illetve a szilícium közötti kötés alakuljon ki: a szilícium rácsszerkezetébe be kell, hogy épüljön/olvadjon az ezüst, illetve az alumínium hátsó réteg. A beégetés végeztével el is készült a napelemcella, amely még egy utolsó ellenőrzésen megy át [13]. Ekkor lefolytatnak egy elektrolumineszcens (Electro Luminescence /EL/) vizsgálatot, nem keletkeztek-e a gyártás során apró repedések

a cellákban. A vizsgálat képes a tizedmilliméteres nagyságrendű sérülések kimutatására is. Ezután szín szerint válogatják őket és attól függően, hogy mennyire egyenletesen sikerült a CVD eljárással a fényvisszatükröződés-csökkentő réteget a szilíciumlapka felszínére felvinni, más-más csoportba sorolják őket [14].



9. ábra: Különböző minőségű modulok elektrolumineszcenses vizsgálata [15]

Ezt követően egy napfény szimulátorba helyezik a kész napelemcellákat, ahol a napfényel azonos spektrumú fényel megvilágítják őket, és megméri az elektromos paramétereiket, majd a kapott teljesítményadatokat szerint tovább osztályozzák a cellákat. Mivel a kémiai folyamatok nem kontrollálhatók tökéletesen és a nyomtatott áramkörök beégetése során is eltérő vastagságú, minőségű bevonatokat érünk el, így 0,6-0,8%-os szórás figyelhető meg a kész napelemcellák teljesítményénél, amit 0,2 W_p -es toleranciájú teljesítményosztályokba sorolnak [13].

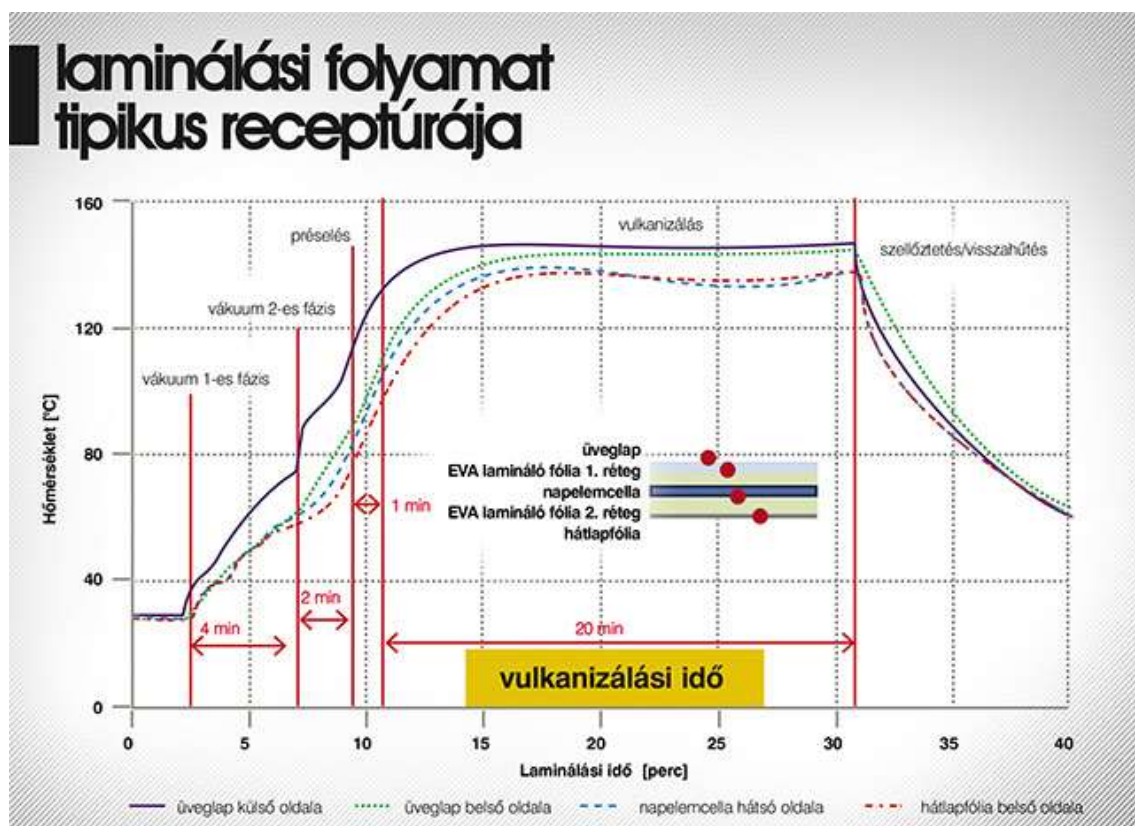
3.2.4 A laminálási folyamat

A laminálási eljárásban, más néven a vulkanizálás során, egy üvegből, az első réteg lamináló fóliából, a napelemcellákból, a második réteg lamináló fóliából és a hátlapfóliából álló szendvicset olvasztunk össze egy sütőprésben. A berendezés méretétől függően egyszerre akár négy „napelemszendvics” is elhelyezhető a hőkezeléshez. A leggyakrabban alkalmazott EVA (etilén-vinil-acetát kopolimer) műanyag, mely egy nem teljesen átlátszó, hőre lágyuló anyag. Olvadáspontja 60-70 °C és kémiai összetételétől, elsősorban a vinil-acetát tartalomtól függően, 110 °C-on kezd el vulkanizálódni. Ekkor megkeményedik és kötést hoz létre az egyes rétegek között. A nem megfelelő mértékű vulkanizálás eredményeképpen az egyes rétegek szétválhatnak (a jelenség neve angolul delamination), vagy akár az évek során a napelem besárgulhat, ami a teljesítmény romlásához vezethet. Az ún. gyorskötésű (fast-cure) kémiai összetételű anyagban a kötések 12-15 perc alatt mennek végbe,

míg a hagyományos EVA fóliák esetében 15-20 perc szükséges. Mindez állandó hőmérsékletű és nyomású munkateret igényel [16].

A „napelemszendvicset” szobahőmérsékletű állapotban teszik be a sütőbe, melyet fel kell melegíteni arra a hőmérsékletre, melyen megkezdhető maga a vulkanizálás. Ez általában 6-12 percet vesz igénybe, elsősorban az üveglap rossz hővezető tulajdonsága miatt. Miután véget ért a hőkezelés, az anyagok nem távolíthatók el azonnal a berendezésből, mert a hirtelen kialakuló nagy hőfokváltozás anyaghibákat okozhat. A vulkanizálás hőmérséklet lefutása a 10. ábrán figyelhető meg [16].

Laminálás során a hő hatására az ecetsav távozik az EVA fóliából, amely hidrogén atomokat von el a polimer láncok végéről. A szabad fonalmolekula-láncok között gyenge kölcsönhatás alakul ki, vagyis kötések jönnek létre az eltávozott hidrogénatomok helyén. Annak érdekében, hogy a késztermék kellően rugalmas maradjon, a cél 70-90% közötti kötésszám elérése (angolul gel-content). Ha a molekulák kevesebb, mint 70%-a találja meg a párját, akkor a rétegek szétválhatnak az idő múlásával. Ha azonban túl sok molekula között jön létre kötés, akkor a szendvics szerkezete túl merev lesz, és ez az egyes alkatrészek eltérő hőtágulási mutatóiból eredően, akár töréshez vagy a forrasztások töréséhez vezethet [16].



10. ábra: A vulkanizálás hőmérséklet lefutása [16]

A szabadon maradt molekulaláncok végét a levegőből oxigénatomokkal próbálja zárni a kapott rugalmas polimerünk, viszont az oxigénatomoknak van egy olyan rossz tulajdonságuk, hogy az ultraibolya (UV) fény hatására ózonmolekulák (O_3) képződnek. Ennek a folyamatnak az eredménye a napelemek besárgulása, mely a 11. ábrán látható. A besárgult lamináló fólia kevésbé átlátszó, kevesebb fényt tud átterjeszteni a cellák felszínére, így akár jelentősen csökkenhet az évek során a napelemünk teljesítménye [16].



11. ábra: Besárgult EVA fólia [16]

A besárgulás elkerülése érdekében a lamináló berendezések sütőkamrájában vákuumot hoznak létre, hogy a levegőt, így az oxigént is kizárják a rendszerből. Egy ilyen berendezés ábrája látható a 13. ábrán. Tökéletes vákuumot nagyon nehéz nagyipari körülmények között létrehozni, így az EVA anyagot gyárilag UV-stabilizáló anyagokkal „szennyezik el”. Az UV-stabilizáló anyagok, bár csökkentik a sárgulás effektust, egyben csökkentik az EVA fólia fényáteresztő képességét is. Kiszűrjük a 380 nm alatti ultraibolya fénysugarakat, amelyek viszont hasznos fénysugarak lehetnének, mivel a napelemcellák hasznosítani tudnák a fényspektrum e tartományát is energiatermelésre.

Mivel a laminálás egy rendkívül összetett, nagy idő- és energiaigényű folyamat, ezért a gyártók igyekeznek azt optimalizálni. A legkézenfekvőbb módszer a laminálási ciklusidő csökkentése, mellyel a lamináló gép áteresztő képessége megnövelhető, s ezzel az előállítás költsége kedvezőbb lesz. Mindezt az alábbiak alkalmazásával lehet megvalósítani:

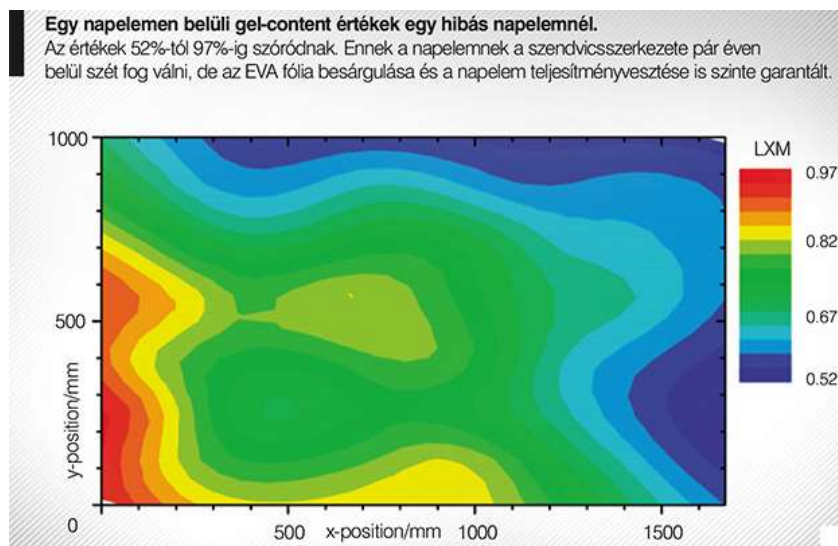
- vulkanizálási hőmérséklet növelése,
- rövidebb vulkanizálási idejű anyag használata,
- nem EVA alapanyagú fólia felhasználása [16].

Azonban mindhárom lehetőség hátrányokkal is jár, melyeket mindenképpen mérlegelni kell ahhoz, hogy képet kapjunk – vajon a nagyobb gyártási volumen biztosította előnyök nagyobbak, mint a megjelenő hátrányok. Ilyen mérlegelendő jellemző a hőmérséklet, mely nem növelhető minden határon túl, ugyanis ha túl gyorsan hevítjük fel az EVA fóliát, akkor túlsüthetjük (over-cooking), és ekkor gázbuborékok válnak ki, amelyek csökkentik az anyagon belüli kötések számát. Ha a gázbuborékok a napelemcellák felszínén alakulnak ki, akkor fénytörést okozhatnak, de hozzájárulhatnak a PID (Power Induced Degradation) effektus kialakulásához is. A gyors kötésű EVA fóliákkal a ciklusidőket akár 15-20%-kal lehet csökkenteni, de ennek az anyagnak is megvannak a korlátai. A nem EVA alapú lamináló fóliák (PVB, szilikon) pedig drágábbak, mint az EVA, emiatt alkalmazásuk nem minden esetben gazdaságos [16].

A termék minőségének folyamatos nyomon követése az optimalizálási folyamat szerves része, ugyanis a minél hatékonyabb előállítás gyorsabb munkafolyamatokat, anyagtakarékosságot vagy éppen költségcsökkentést jelent, vagyis csökkentjük a biztonsági tartalékot. Ez nem a tényleges biztonsággal való spórolást jelenti, egyszerűen csak annyit, hogy az üzemelési paraméterek figyelembe vételével úgy módosítjuk az adott termék tulajdonságait, hogy az egyes előírásokat már nem teljesít, azonban használati értékéből nem veszít semmit. Ilyen szempont lehet egy napelem esetén az időjárás, vagyis egy európai piacra szánt panelt szükségtelen az ázsiai tájfunok okozta szélterhelésre tervezni, mivel az a célországokban nem fordul elő.

A minőségellenőrzés jelen esetben a gel-content, vagyis az EVA fóliában a vulkanizálás során kialakult kötések számának az ellenőrzését jelenti. Egy kielemezett minta értékei a 12. ábrán figyelhetők meg. A gel-content vizsgálatára több mérési módszer létezik, azokon belül is két fő metódus van: a roncsolásos és a roncsolás nélküli vizsgálatok. A roncsolásos módszerek lényege, hogy a gyártósorról levett kész napelemek 5 pontjáról kivágnak 1x1 cm-es EVA darabokat (használatatlanná téve azt a napelemet), és azokat vegyi, illetve spektroszkópiai elemzésnek vetik alá [16].

A legpontosabb és a mai napig leggyakrabban használt módszer a Soxhlet-eljárás. Az eljárás a szilárd minták szerves anyag tartalmának klasszikus extrakciós módszere, mely nem, vagy csak félig illékony összetevők meghatározására alkalmas. Lényege, hogy a mintát porózus cellulóz csőbe helyezik, majd jól oldó oldószert áramoltatnak a mintán keresztül. A cirkuláció melegítés hatására történik. Az eljárás hátránya, hogy lassú (8-24 óra alatt megy végbe) és nagy az oldószerigénye (200-500 ml) [17].



12. ábra: A kötesek százalékos aránya a modul felületén [16]

A másik elterjedt roncsolásos módszer a differenciál pásztázó kalorimetriás (Differential Scanning Calorimetry /DSC/) vizsgálat, mely a legmegfelelőbb módszer szilárd anyagok átalakulási hőjének mérésére (például allotróp módosulatok közötti fázisátalakulás, szilárd anyagok bomlása, stb.). Pásztázó kalorimetriáról akkor beszélünk, ha a kaloriméter hőmérsékletét előre megadott program szerint vezéreljük, és ezzel párhuzamosan mérjük a mintában zajló folyamatok hőjét. A pásztázó kaloriméterek differenciális elven és hőmérséklet kompenzációval működnek, és igen széles hőmérséklet tartományban használatosak (a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletétől egészen 1200 °C-ig [18]. Ez a módszer jelentősen gyorsabb mérést tesz lehetővé, viszont a pontossága függ a berendezés kalibrálásától. A kalibráláshoz ismételt Soxhlet eljárással ellenőrzött és hitelesített minták szükségesek, ám ennek ellenére is 5-10%-os hibahatárral működik ez a módszer [16].

A roncsolás nélküli vizsgálatok egyik képviselője az egyszerű letapogatásos módszer, amely a hátlapon keresztül nyomásnak teszi ki a vulkanizált EVA fóliát a napelem több pontján, és a ruganyosságból következtet a kialakult polimerkötések mértékére. Ez az eljárás is előzetes kalibrációt igényel, azonban a DSC eljárással ellentétben nem függ a hőmérséklettől [16].

Eddig nem esett szó a laminálást megvalósító gépekről, melyek nem megfelelő karbantartás esetén jelentős mértékben befolyásolhatják a végtermék minőségét. A lamináló berendezések, akár csak a villamos olajradiátorok, a felhevített olaj folyamatos áramoltatásával melegítik fel a sütőlapokat. Ezt úgy kell elképzelni, hogy egy acéllemezhez rögzített vékony csőkiyóban folyamatosan 130-180 °C közötti

hőmérsékletre hevített speciális olaj cirkulál. A kemencében rendszeres olajcsere szükséges, mert a folyamatos magas hőmérséklet hatására az olaj kémiai átalakuláson megy keresztül és lerakódások képződhetnek a vékony csövekben. Ha sokáig fennáll ez az állapot, akkor ez a csövek részleges vagy teljes elzáródásához vezethet, ezáltal hőmérséklet különbség alakulhat ki a sütőlapon. A lamináló berendezésgyártók egy ilyen sütőlapon általában öt darab Pt100-as szenzort helyeznek el a sütőlap négy sarkához közel, illetve a sütőlap középpontjánál. Ez alkalmas nagyobb hibák felfedezésére, de valójában csak a sütőlap töredékének felszíni hőmérsékletét mérik. A szenzorok továbbá rendszeres kalibrációt igényelnek és időnként a cseréjük is szükséges a nagy termikus igénybevétel miatt [16].



13. ábra: Szakaszos üzemű laminológép [19]

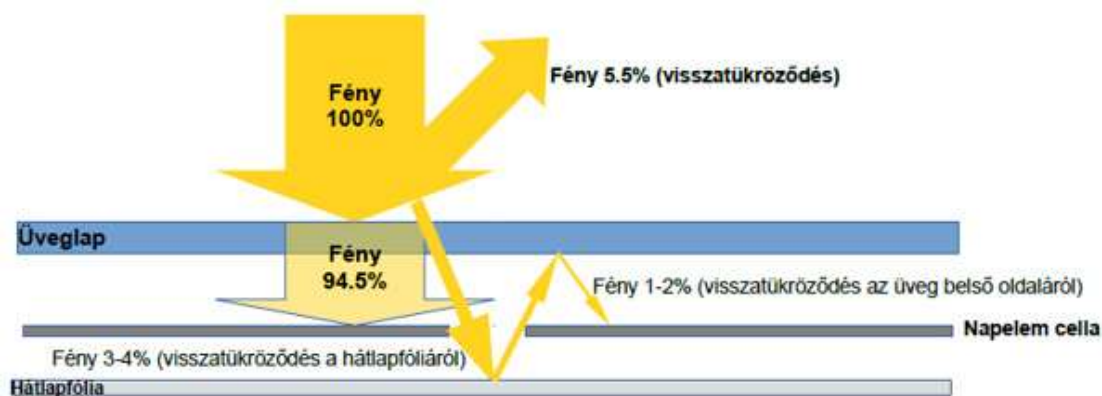
3.2.5 A szolárüveg

Az üveg szinte minden fényelektromos modulnak része. Vagy a félvezető anyag hordozójaként – a vékonyréteg-napelemeknél –, vagy mint az átlátszó vezető oxid hordozója, vagy mint a tokozás része. A gyakorlati életben használatos üvegek alapanyaga a kvarc (SiO_2), amelyhez a megfelelő fizikai tulajdonság elérése érdekében különböző adalékanyagokat adnak: a megmunkálhatóság javítása érdekében Na_2O , CaCO_3 , az átlátszóság, a törésmutató változtatásához alumínium, magnézium, bór és ólom segédanyagokat használnak [9].

A szolárüveg, bár úgy néz ki, mint egy szokványos beltéri ajtóknál használatos egyszerű üveglap, fizikai és kémiai összetételét tekintve jelentősen eltér azoktól, mivel a napelemeknél használatos üveg feladata, hogy minél több fényt engedjen át a cellák

felületére. Az ablaküvegek esetében az üveg anyagát a gyártás során elszennyezik szénnel, hogy az visszatükrözze az üveg belső szerkezetéből a melegítő hatású infravörös fénysugarakat [20]. A szolár üveg esetében viszont a gyártók arra törekednek, hogy minél tisztább és nagyobb fényáteresztő képességű üveget állítsanak elő, ezért lecsökkentik az üveg vas- és széntartalmát [21].

Az anyagán túl a másik lényeges különbség az üveg vastagsága, mely az elmúlt tíz év során 5-6 mm-es értékről jellemzően 3,2 mm-re csökkent, de megjelentek a 2 mm vastagságú elemek is, ezek általában a 2+2 mm-es előlapi üvegű/üveg hátfalú napelemek. A vékonyítás egyik, nyilvánvalóbb oka a költségek csökkentése, mivel a három- és négycentiméteres üveglap között nagyságrendileg 10 %-os árkülönbség mutatkozik. A másik oka az, hogy egy 4 mm-es üveg kevesebb fényt tud magán átengedni, mint egy 3,2 mm vastag üveglap. Ha 100 egységnek vesszük az üveglap felületére eső fényt, akkor egy 4 mm vastag üveg esetében az üveglap belső oldalára már csak 91 egységnyi fény jut át, míg egy 3,2 mm vastag üveg esetében ez 94,5 egységet jelent (5. ábra). Az a fény, ami itt elvesz – és amely az esetünkben energiát jelent –, az visszatükröződik az üveg felszínéről, illetve elnyelődik az üveglap belsejében, ezáltal az üveglap felmelegedik [20].



14. ábra: Az üveglapon keletkező veszteség [20]

Mindezek ismeretében most már jobban érthetővé válik a 3,2 mm vastag üveg alkalmazása, ugyanis ez még kellően vékony, hogy jó fényáteresztő képességgel rendelkezzen, de elég szilárd is, hogy megfelelő mechanikai védelmet biztosítson. Ha már a vastagságon nem tudunk tovább csökkenteni, akkor a következő logikus lépésnek az üveg felületéről visszatükröződő fény mennyiségének csökkentése mutatkozik, ezáltal csökkentve az energiaveszteséget. A három jól elkülöníthető megvalósítás:

- a texturált üveg: apró, rücskös felület kialakítása, melyek prizmaként viselkednek és a cella belseje felé térítik el a fényt,
- a matt/prizmatikus üveg: külső oldala csak enyhén texturált, míg a napelemcellák felé eső oldaluk apró piramisokból (prizmákból) épül fel, és
- a durván texturált (prizmatikus) üveg: mindkét felület erősen barázdált, azonban a külső oldalon nem célszerű, mivel könnyen megtapad rajta a kosz [20].

Ezen túlmenően tükröződéscsökkentő felületkezelő anyagokat (nitrides vagy titán-oxidos bevonatot) vihetnek fel az üvegre, melynek két fő eljárása létezik: az első esetben egy hengerrel viszik fel az üveglap felületére az antireflexiós réteget, míg a másik esetben vékony rétegben az üveglapra permetezik a kívánt anyagot. Ezen rétegek 2-3%-kal tudják javítani az üveg fényáteresztési képességét, ezáltal 1-1,5%-ra csökkentik a beágyazási veszteséget egy 3,2 mm-es üveglappal szerelt napelem esetében. Azonban ennek a módszernek is megvannak a korlátai, ugyanis a bevonat nem épül be az üveg szerkezetébe, csak beborítja azt, így kérdéses az anyag tartóssága. Ugyanis egy mai korszerű napelemet 25-30 évre terveznek, vagyis ennyi ideig kell ellenállnia az időjárás viszontagságainak. Az antireflexiós rétegeknek a napelemmel összemérhető tartósságát azonban a jelenlegi tesztprocedúrák alkalmazásával nehéz bizonyítani, emiatt fennáll a lehetőség, hogy sérülés esetén a rendszer az elvárt teljesítményszint alatt fog működni [20].

A napelemek az évek során nagyon kevés karbantartást igényelnek, mivel az energiatermelést egy hermetikusan lezárt, mozgó alkatrészeketől mentes térben végzik. Ebből kiindulva a szolárüveget sem szükséges gyakran karbantartani, azonban egyfajta időszakos tisztítás elengedhetetlen a nem várt teljesítmény csökkenés elkerülése végett. De pontosan miért is?

Az üveg alapvetően nem egy bomlandó anyag, nem tudja kikezdeni az UV sugárzás és a víz sem – normál körülmények között. Azonban ha tartósan oxigénmentes környezetben vízzel érintkezik (például egy a felületére esett falevél, mely szorosan rátapad az üvegre), akkor lassan elindul egy ozmózisfolyamat. A víz részecskéi lassan elkezdnek az üveg felszínén lévő mikroszkopikus pórusokon át az üveg belseje felé diffundálni, majd beépülni annak szerkezetébe. Ezt kiszárítani már nem lehet, ez egy visszafordíthatatlan (irreverzibilis) folyamat, mely eredményeképpen a tejüveghez hasonló, fehér, opálos üveget kapunk, ami már sokkal rosszabb fényáteresztő képességű, mint az eredeti üveg. Amennyiben csak felszíni a károsodás, akkor azt

speciális dörzsanyaggal meg lehet próbálni eltávolítani, de a napelemünk már sosem lesz a régi [20].

3.2.6 A hátoldali burkolat szerepe

A hátlapfólia, már csak elhelyezkedéséből adódóan is, kevésbé van szem előtt, pedig ugyanolyan fontos szerepe van a napelem hosszútávú, kielégítő működésében, mint például a laminálás technológiájának. A hátoldali fólia feladata:

1. Biztosítja az elektromos szigetelést a napelemcellák és a külvilág között.
2. Megakadályozza a nedvesség bejutását, amely károsítaná a berendezést [20].

Az egyik legelső hátlapfóliákat az amerikai DuPont cég fejlesztette ki, elsődlegesen a repülőgépipar és a távközlési ipar számára, ezért a szakmából sokan a mai napig a hátlapfóliát Tedlarnak nevezik, ami a termék márkaneve. Ez egy erős, időtálló és jól szigetelő, PVF-alapú anyag (polivinil-fluorid), azonban elég drága, emiatt ma már inkább az azóta kifejlesztett olcsóbb helyettesítő anyagait alkalmazzák széleskörűen. A ma használatos hátlapfóliák többsége több vékony rétegből álló, ragasztott, szendvicsszerkezetű anyag, amelynek a fő komponense a PET (polietilén-tereftalát). A PET egy jó elektromos szigetelő tulajdonságokkal rendelkező műanyag, de érzékeny az UV sugárzásra, és nem teljesen levegő- illetve párazáró [22]. A hátlapfóliák külső oldalát általában módosított poliamid vagy néha egy vékonyabb réteg Tedlar alkotja, amely további párazáró réteget képez, így tartva szárazon a napelemet [20].

Az egyrétegű fóliák, amelyek egy lépcsőben kínálnak megoldást a párazárásra és az elektromos szigetelésre is, általában drágábbak, míg a legolcsóbb hátlapfóliák a 3 rétegű AAA vagy APA szerkezetű fóliák (AAA: poliamid/poliamid/poliamid, APA: poliamid/PET/poliamid). Ezek a fóliák is ellátják a szigetelés és párazárás feladatát, de könnyebben sérülnek, és hajlamosabbak az öregedésre, viszont olcsóbbak egyrétegű társaiknál.

Összegezve a hátlapfóliák tulajdonságait látható, hogy olyan műanyagokat használnak erre a célra, melyek hatékonyan képesek távol tartani a nedvességet a celláktól, ezáltal megfelelő szigetelést is biztosítva a rendszer számára. Mivel egy napelemes rendszerben 1000 V nagyságú egyenfeszültség is felléphet, érintésvédelmi szempontból különösen fontos a borítás sértetlensége az eszköz teljes élettartama alatt [20].

4. AZ ÁRAMKÖR MEGVALÓSÍTÁSA

4.1 Bevezetés

A napenergia hővé való átalakítását leggyakrabban napkollektorokkal valósítják meg. A napkollektorban sűrűn egymás mellett párhuzamosan csövek futnak, melyekben a víznél alacsony fagyáspontú folyadék kering. Erre azért van szükség, hogy a rendszer télen is működképes legyen. A folyadék maga a munkaközeg, melyet a napsugárzás felmelegít, majd egy hőcserélőn keresztül átadja energiáját egy másik közegnek, ami már legtöbbször víz. A vizet a keringtető szivattyú a felhasználás helyére szállítja, legyen az egy radiátor vagy éppen egy puffertárolóként is szolgáló villanybojler.

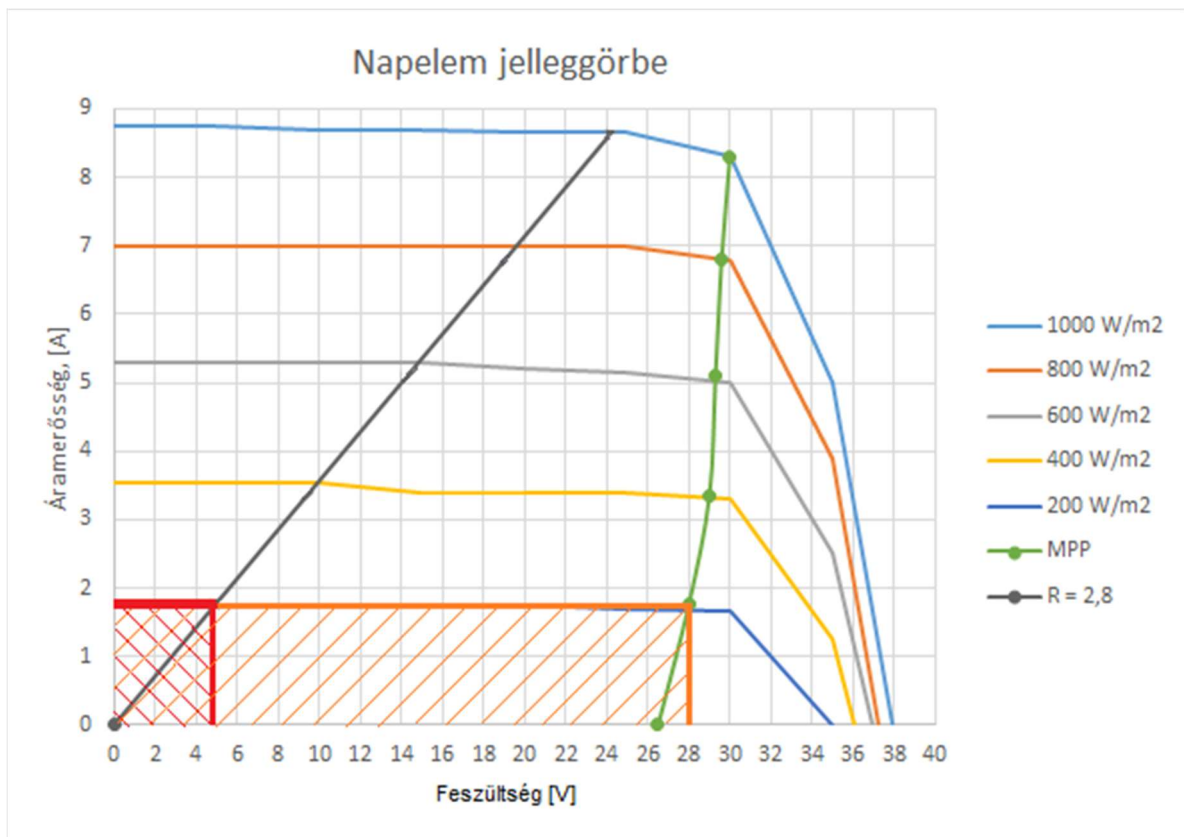
A villamos energia fűtési és melegvíz-előállítási célú felhasználása egy évtizedek óta létező, ám kevésbé elterjedt gyakorlat, mint a földgáz ilyen módon való hasznosítása. Azonban a napelemek elterjedésével ez a tendencia változhat, a nagy igények kedvezően hatnak a beszerzési árakra, s így a megtérülési idő is csökkenhet. Ennek tükrében érdemes megvizsgálni olyan területeken is a napelemek alkalmazását, ahol eddig nem vagy alig foglalkoztak a kérdéssel.

Ilyen terület a fűtési célú illetve a használati melegvíz-előállítás (HMV), melyet eddig napkollektorokkal valósítottak meg. A napelemes vízmelegítésnek azonban számos előnye van napkollektorral szemben:

- egyszerűbb felépítés – nincs szükség bonyolult csőhálózatra, keringtető szivattyúra, költséges fagyálló folyadéokra, mindössze két vezetékre van szükség, melyet a fűtőelemre kötünk
- kedvezőbb beruházási költség – az előbb említett berendezések jelentős költségvonzattal bírnak, melyek nem terhelik a felhasználót
- kiforrott biztonsági rendszerek – a fel nem használt villamos energia visszatáplálható a hálózatba vagy a beépített puffertároló fűtésével/hőn tartásával elvezethető; az elektromos eszközöknél használatos biztosítékok és védelmi áramkörök alkalmazása nem ütközik akadályokba

Mindezek után kitérek magára a szóban forgó napelemes vízmelegítő készülékre is. Ha a napelemre közvetlenül csatlakoztatunk egy fűtőszálat, akkor az állandó ellenállású elemként a 15. ábrán, szürkével jelölt görbe szerint fog viselkedni. Ahol a napelem adott intenzitású görbáját elmetszi, abban a munkapontban tud csak működni. Az ahhoz a ponthoz tartozó feszültség- és áramértékekből pedig

meghatározhatjuk az előállított villamos teljesítményt, melyet a piros sraffozott téglalap szemléltet. Ez önmagában nem sokat jelentő adat, ezért érdemes összevetni a napelem maximális teljesítményű pontjaival (MPP). A pontok a napelem adatlapján szereplő adatok, ezekből készítettem a 15. ábra zölddel jelölt görbéjét. Az előbb ismertetett módon előállítom a keresett munkapontokat és meghatározható az előállított teljesítmény, mely a narancssárgával sraffozott területtel egyenértékű.

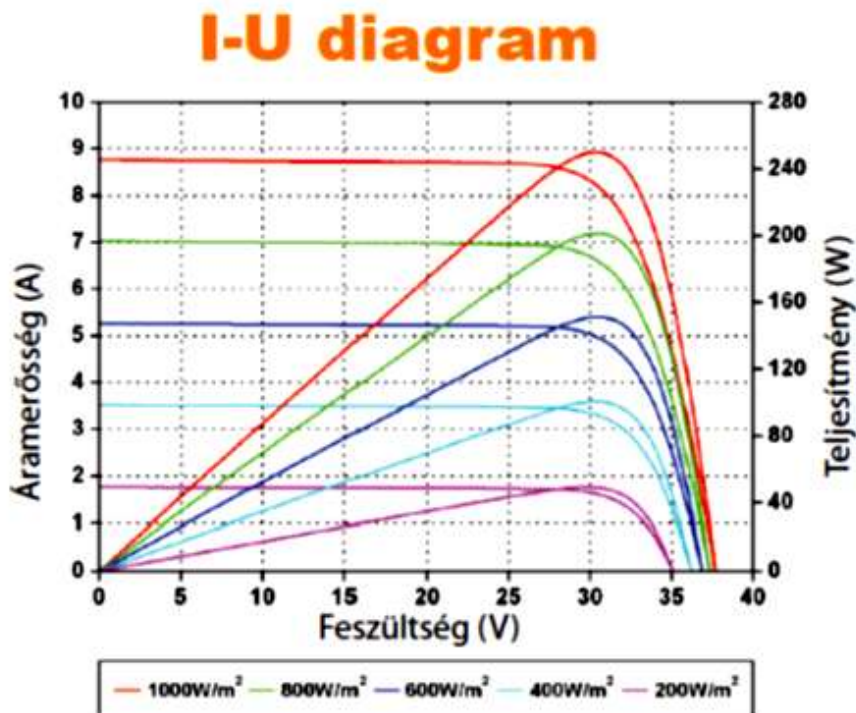


15. ábra: Egy állandó értékű ellenállás és az MPP-k összevetése

Jól látható, hogy a különbség számottevő, melynek oka, hogy az állandó értékű ellenállás jelleggörbéje nem követi a maximális teljesítményű pontokat. Az ellenállás értékének változtatásával kis mértékben javítható az adott fényintenzitásokon meglévő teljesítmény értéke, azonban lényegi változás csak változtatható ellenállással érhető el. A klasszikus változtatható ellenállás alkalmazása nem célszerű, mivel állandó felügyeletet és beavatkozást igényelne. Egy maximális teljesítményű pontokat minél jobban követő, ezáltal magasabb hatásfokú, áramkör tervezése, megépítése, valamint működésének részletes ismertetése a következő fejezetekben olvasható.

4.2 A megvalósítás előkészítése

A feladat kidolgozása során az Amerisolar AS-6P30-250 W típusú 250 W_p névleges teljesítményű napelem modulra méreteztem a kapcsolást. A modul karakterisztikája az 16. ábrán tekinthető meg.



16. ábra: Az AS-6P30-250W típusú napelem modul jelleggörbéi [7]

A napelem kiválasztása utáni első lépésben összegyűjtöttem minden szükséges paramétert, mely meghatározza a leendő kapcsolás jellemzőit. Az adatok a napelem adatlapjáról származnak, mely tartalmaz mindent, ami a telepítéshez és a várható energiahozam számításokhoz elengedhetetlen. Ezen paraméterek két különböző mérési eljárás, az ún. szabványos tesztkörülmények (Standard Test Condition /STC/) és a névleges üzemelési tesztkörülmények (Nominal Operation Test Condition /NOTC/) szerint lettek megmérve. A szabványos mérési feltételeket az 1. táblázatban részletezem.

A következő jellemzők, mint határfeltételek között a vezérlő áramkörnek képesnek kell lenni:

- $I = (0 \dots 10)$ A áramerősség tartományon és
- $U = (0 \dots 30)$ V feszültség tartományon

tartósan üzemelni, valamint az $U-I$ karakterisztikája minél jobban illeszkedik a maximális teljesítményű munkapontok (Maximum Power Point /MPP/) által kijelölt görbére (a 15. ábra zölddel jelölt görbéje).

1. táblázat: A szabványos mérési feltételek

Jellemzők	STC (Standard Test Condition)	NOCT (Nominal Operation Cell Temperature)
Besugárzás értéke [W/m^2]	1000	800
Levegő hőmérséklete [$^{\circ}C$]	25	20
AM (Air Mass)	1,5	-
Légsebesség [m/s]	-	1

Amennyiben a változó besugárzási értékek mellett szeretnénk biztosítani a maximális teljesítmény-leadást, akkor arra kell törekedni, hogy az áram nagyságrendileg 20 V-os cellafeszültség mellett induljon meg és meredeken növekedjen a névleges teljesítményhez tartozó feszültség és áramértékekig.

Ennek megvalósítására egy olyan áramkört képzeltem el, melyben a napelemet érő fizikai jelenségek hatására változik a működési jelleggörbe. A szóba jöhető jelenségek a fényintenzitás és a hőmérséklet megváltozása. Mivel a fényintenzitás hatására a napelem jelleggörbéje folyamatosan változik – eltolódik az abcisszatengellyel párhuzamosan „fel” vagy „le” – ezért az elsődleges megoldandó feladat ennek lekövetése, majd ennek további finomítása a hőmérséklet figyelembe vételével.

Az ilyen feladatot ellátó eszközöket MPPT (Maximum Power Point Tracker) szabályozóknak nevezzük (magyar rövidítése a maximális teljesítményre szabályozás /MTSZ/). Ezeket a berendezéseket a bennük található mikroprocesszor algoritmusai vezérlik magas, átlagosan 92-97 %-os átalakítási hatásfokkal dolgozva. A kinyerhető többletenergia nyáron 10-15 %, télen 20-45 % körül alakul, az adott időszak időjárásától vagy éppen az alkalmazott akkumulátor típusától függően. Az MPPT szabályozókat legtöbbször akkumulátort is tartalmazó rendszerekben használják, emiatt működési paramétereik egy jelentős részét az akkumulátorok védelme határozza meg.

Mivel a pontos értékek még nem ismertek, csak nagyságrendileg, ezért egyelőre az áramkör főbb elemeinek kiválasztásánál és a kapcsolatban elfoglalt helyükkel kapcsolatban a villamosságtanból valamint elektrotechnikából megismert összefüggésekre és törvényszerűségekre hagyatkozhatunk.

Figyelembe véve ezen elgondolásokat, az alábbi tulajdonságú eszközre/eszközökre van szükség:

- folyamatosan vezérelhető,
- ki- és bekapcsolható,
- képes adott esetben a termelődő hőt elviselni, illetve hűtése megoldható,
- működési tartománya egybeesik az igényelt áram- és feszültség intervallummal,
- rugalmasan változtatható a jelleggörbéje, és
- könnyen és olcsón beszerezhető, összeállítható.

Mindezeket átgondolva a legalkalmasabb eszköznek a tranzisztor tűnt, mivel szinte maradéktalanul megfelel a támasztott követelményeknek. Ami különösen fontos, hogy a tranzisztor ellenállása egy adott feszültségértéken hirtelen lecsökken, mely érték szabadon beállítható, amit a későbbiekben részletesen bemutatok.

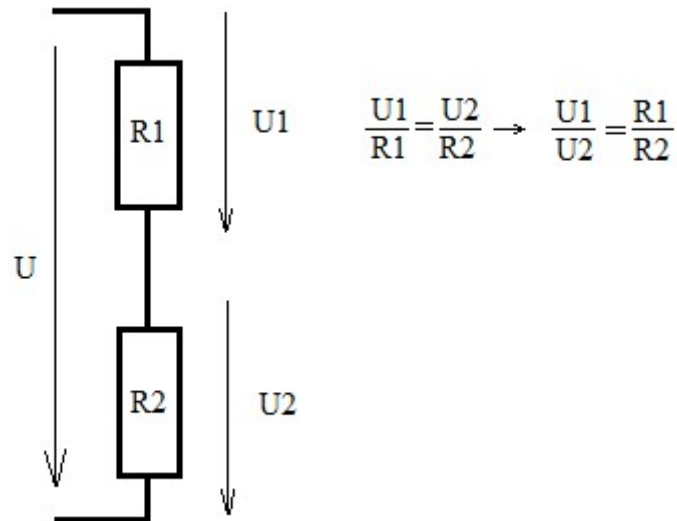
A megfelelő tranzisztor kiválasztásához az előzőkben vázolt feszültség és áramértékeket vettem alapul. A konkrét eszközök kiválasztását a következő 4.2.1 pontban ismertetem részletesebben.

Ezután további szakirodalom kutatást végeztem azzal a céllal, hogy kialakítsam a kapcsolat további jellemzőit. A tranzisztoroknak három elterjedt alapkapcsolása ismert, a földelt bázisú,- emitterű és – kollektorú. Ezek közül a földelt emitterű, másnéven feszültségkövető, elrendezés mellett döntöttem, mivel ilyen elrendezés mellett valósítható meg egy adott tranzisztorral a legnagyobb áram-, feszültség- és teljesítményerősítés.

Miután előállt az alapkapcsolás, a következő megoldandó feladat a bázisáram beállítása volt. A tranzisztorok olyan villamos eszközök, melyek folyamatos vezérlőáramot igényelnek működésük közben. Emiatt a kívánt jelleggörbe elérésének egyik sarokköve a bázisáram adott karakterisztika szerinti változtatása, mivel az áramerősítési tényező vagy a maximális kollektoráram mind-mind magától a konstrukciótól függnék, azok a külső paraméterek (U_{CE} kollektor-emitter feszültség, I_C kollektoráram, $T_{körny}$ környezeti hőmérséklet stb.) hatására egy adott jelleggel változnak. Tehát adott bázisáram adott kollektor- és emitteráramot generál, nem függ annak értékétől egyik jellemző sem.

A tranzisztoros alapkapcsolások részletes tanulmányozása során arra jutottam, hogy egy ún. bázisosztó megvalósítása kínálja a legoptimálisabb feltételeket. A bázisosztó

egy olyan egyszerű feszültségosztó, melyben két sorba kapcsolt ellenállás található. Mikor feszültséget kapcsolunk az ellenállásokra, akkor a rajtuk eső feszültségek aránya megegyezik az ellenállások értékeinek arányával. Vagyis a nagyobb ellenállás kapcsain fog a nagyobb feszültség megjelenni, ahogy az a 17. ábrán feltüntetett összefüggések alapján látható.



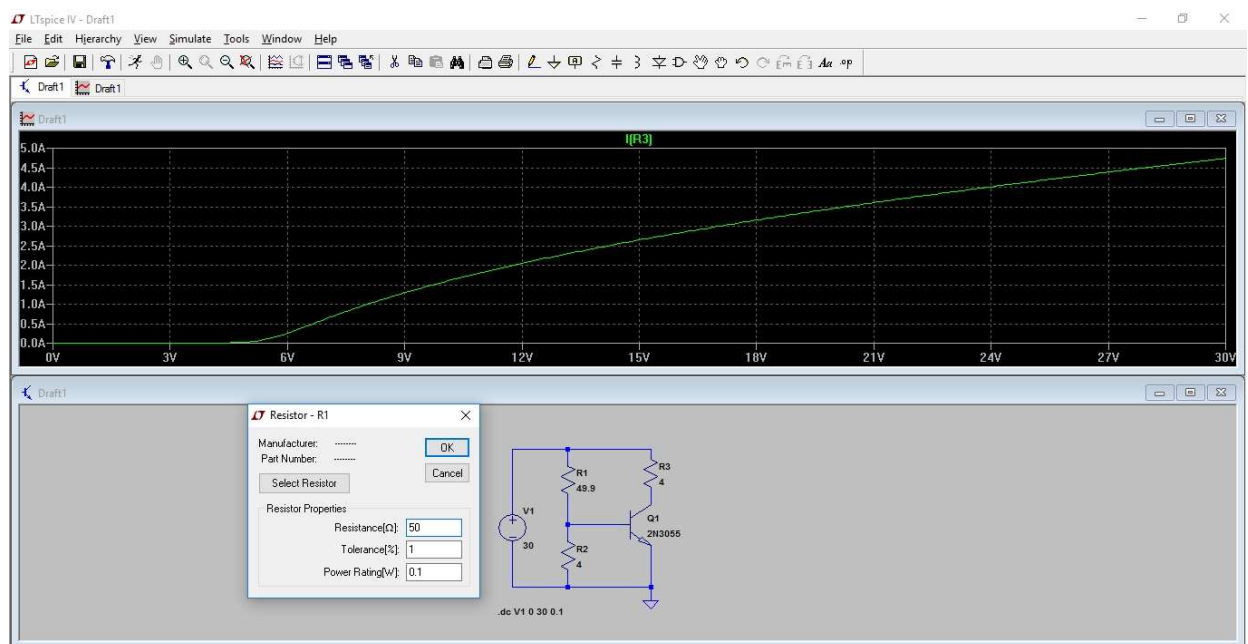
17. ábra: A feszültségosztó

Kiindulásként tehát az alábbi kérdéseket kell tisztázni: milyen jelleg szerint változzon az irányítási kívánt bázisáram, ehhez mekkora ellenállásokat kell választanom és milyen elrendezésben. A cél az, hogy a bázisáram akkor kezdjen el folyni, mikor a tápfeszültség körülbelül 20 V nagyságú, majd fokozatosan növekedjen 30 V-ig ahhoz hasonlóan, mint az MPP görbe a 15. ábrán. Ehhez a kisebb ellenállást tartalmazó ágról kell levenni a feszültséget – vagyis a feszültségosztó alsó ellenállása lesz a kisebb. Az ellenállások kiindulási értékei a szakirodalomból származnak, ott 5-10-szeres nagyságbeli különbséget javasolnak, így először $R_1 = 5 R_2$ arányt választottam. Ezt később a szimuláció során finomítottam és az $R_1 = (11...15) R_2$ értékek tűntek a legjobb választásnak.

A fűtőszálat, mely egy nagy hőteljesítmény leadására képes kis ellenállású eszköz, előzetesen a tranzisztor kollektor ágába helyeztem, mivel itt folyik a legnagyobb értékű áram, ezért úgy tűnik innen vehető ki a legnagyobb villamos teljesítmény. A végső szót, mint ahogy az eddig felvetődött kérdésekben is, a szimuláció mondta ki.

4.2.1 Az LTSpice alkalmazása

Az LTSpice IV egy olyan áramköri szimulációs program, melyben egyen- és váltakozó áramú kapcsolások készíthetők el a villamos eszközök széles skálájának felhasználásával. Az eszköz típusának kiválasztása után beállíthatók annak alapvető jellemzői, például a maximális hőteljesítmény, egyes jellemzők tűrése, a modellezés során használt feszültség- és/vagy áramgenerátor paraméterei, egyszóval minden, ami a vizsgálat során érdeklődésre tarthat számot. Az adatok beállítása után a számított értékek diagramon megjeleníthetők és több formátumban exportálhatók a programból. Készíthető darabjegyzék a felhasznált alkatrészekről, valamint egyes alkalmazások esetén lehetőség nyílik hatások meghatározására is. A program kezelőfelülete és alapvető felépítése egy példán keresztül megtekinthető a 18. ábrán. Látható, hogy a menü angol nyelvű, azonban a szabványos jelöléseknek hála gördülékenyen kezelhető.



18. ábra: Az LTSpice IV szimulációs program

A program segítségével először a tranzisztor típusának meghatározásával kezdtem a munkát. Ez a feladat egyik legfontosabb eleme, mivel sok, nemegyszer egymással ellentétes hatást kiváltó paramétert kell figyelembe venni. Ahhoz azonban, hogy átláthatóbb legyen a folyamat, először röviden bemutatom a tranzisztorok gyakorlati paramétereit.

A gyártók adatlapokat készítenek minden egyes eszközükről, melyekből táblázatokon és diagramokon keresztül tájékozódhatunk. A teljesség igénye nélkül tartalmazzák:

- a megengedhető áram és feszültség értékeket,
- a maximális disszipálható hőteljesítményt,
- az üzemelés és tárolás hőmérséklettartományát,
- a váltóáramú alkalmazások esetén lényeges kapcsolási időket,
- az üzemelés frekvenciatartományát,
- az áramerősítési tényezőket,
- mindezen értéket tűrését, bizonytalanságát és hőmérséklettel való változását, valamint
- a biztonságos üzemelési tartományt (Safety Operating Area /SOA/).

A maximális áram értékénél biztonsági okokból a kollektoráram felső határát szokás megadni. Ugyanis ha a bázisáramot adnák meg és figyelmetlenségből nem az üzemeléskor fennálló kollektor-emitter feszültséggel (U_{CE}) számolnak, akkor az áramerősítési tényező nagyobb volta esetén a tranzisztor tönkremehet. Így viszont a megadott I_{Cmax} úgy kerül meghatározásra, hogy a legrosszabb esetet (worth case) veszik lapul, vagyis mikor az áramerősítés a lehető legnagyobb, emiatt csak akkor adódhat probléma, ha már az eszköz, más okból, amúgy is károsodna.

A feszültség és áramerő értékek együttesen meghatározzák azt a tartományt, melyen belül a tranzisztor biztonságosan üzemeltethető. Az abszolút tartomány nagyságát az I_{Cmax} és az U_{CEmax} kijelöli, azonban ezen felül még vannak egyéb befolyásoló tényezők is. Ilyen például a másodfajú letörés, mely a maximális disszipálható hőteljesítményt reprezentálja és ezen keresztül a félvezető anyag és a környezeti hőmérséklet is hatást gyakorol. Ezentúl az is fontos, hogy egyenáramú vagy váltóáramú a megtáplálás, vagyis folyamatosan vagy csak impulzusszerűen kell az eszköznek adott körülményeket elviselnie. Egy ilyen diagram látható a 19. ábrán.

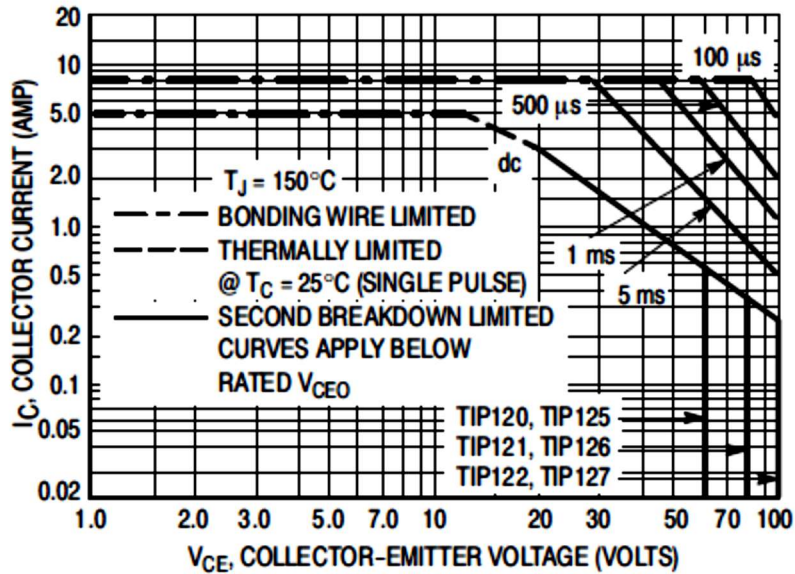


Figure 6. Active-Region Safe Operating Area

19. ábra: A TIP 121 tranzisztor biztonságos üzemelési tartománya

Megjegyzendő, hogy több szakirodalom megkülönböztet nyitó-, illetve záróirányú, valamint az aktív tartományban (a telítési és a letörési nem) érvényes SOA tartományt. A megengedhető feszültségnél a már említett U_{CE} a mérvadó, ennek is rögzítenek egy maximumot, különben átütne a tranzisztor, de ami fontosabb, hogy ennek függvényében kerül megadásra például az I_{Cmax} és a h_{FE} (egyenáramú erősítési tényező, direct current gain) értéke is.

Az üzemelés és tárolás hőmérséklettartományának megadása a különböző műszaki berendezések használata során bevett gyakorlat. Egy tranzisztor esetében ez különösen fontos a szilícium, mint alapanyag alkalmazása miatt. A félvezetők olyan anyagok, melyek külső energia hatására – úgymint fény, hő vagy villamos energia – képesek szigetelő tulajdonságú anyagból villamos vezetővé válni. Ezt a jelenséget intrinsic (tiszt) félvezetésnek nevezzük, mert magára az anyagra jellemző, ekkor adalékolásról még nem beszélhetünk.

A tranzisztorok által megengedett elvezethető hő mennyisége egy megadott tartományon belül a névleges értéken állandó, majd a hőmérséklet növekedésével fordítottan arányosan csökken. Emellett szerepel az adatlapon a félvezető lapka és a tok közötti hőellenállás, illetve a félvezető és a környezet közt fellépő hőellenállás is. Ezek az adatok a hűtés méretezésénél játszanak fontos szerepet.

Mindezen szempontok figyelembevételével a program könyvtárában fellelhető tranzisztorok közül csak az FZT849 és a 2N3055 jelű elemek jöhetnek szóba. Néhány

elrendezést után világossá vált, hogy egy tranzisztor nem képes megoldani a feladatot, emiatt úgy döntöttem, hogy mindkettőt felhasználom, méghozzá Darlington-kapcsolást alkalmazva. A Darlington-kapcsolás egy speciális lehetőség, melynek az alábbi előnyei mutatkoznak:

- kis árammal vezérlehető,
- nagyon nagy áramerősítés – akár több ezerszeres erősítés is elérhető, illetve
- két eltérő karakterisztikájú eszköz kapcsolható úgy, hogy mindkét eszköz előnyös tulajdonságait kidomborítja, míg hátrányai mérsékelhetőek.

A bázisosztó ellenállásait $R_2 = 210 \Omega$ -nak és $R_3 = 14 \Omega$ -nak választottam néhány előzetes modellezés után.

Ezt az elrendezést, mint kiindulási alapot állítottam össze azzal a céllal, hogy ellenőrizzem az elméletem helyességét. Az elmélet abból a szempontból beigazolódott, hogy a kapcsolás jellege megfelel az általam elvártnak, azonban erős kompromisszumokkal valósította meg a feladatot. Legfőbb hiányosságait a következő táblázatban foglaltam össze.

2. táblázat: A kiinduló kapcsolás hiányosságai

	Hiányosság	Lehetséges oka
1.	az áram karakterisztikája nem éri el a kívánt értéket, a 8,3 A-t	<ul style="list-style-type: none"> – a fűtőszál ellenállása nagy – túl kicsi a bázisáram
2.	a bázisáram kisebb tápfeszültség mellett indul meg, mint amit elvárunk	<ul style="list-style-type: none"> – nem megfelelő bázisosztó arány
3.	nem elég meredek a jelleggörbe	<ul style="list-style-type: none"> – gyenge a tranzisztorpár áramerősítése – nem megfelelő bázisosztó arány

Mivel az áramkör modellezéséhez a fellelhető két legnagyobb megengedett kollektor áramú tranzisztort választottam és a kapott jelleggörbe nem felelt meg az elvárásaimnak, emiatt az eszközök cseréje mellett döntöttem. Több gyártó termékeit megvizsgálva megállapítottam, hogy léteznek az általam keresett paraméterekkel tranzisztorok, melyek nagyobb áramerősítési tényezővel rendelkeznek, viszont a program könyvtára nem tartalmazza az eszközök modelljét, ezért nem szimulálható a működésük. A problémát részlegesen sikerült megoldani: az FZT849-es jelű példányt

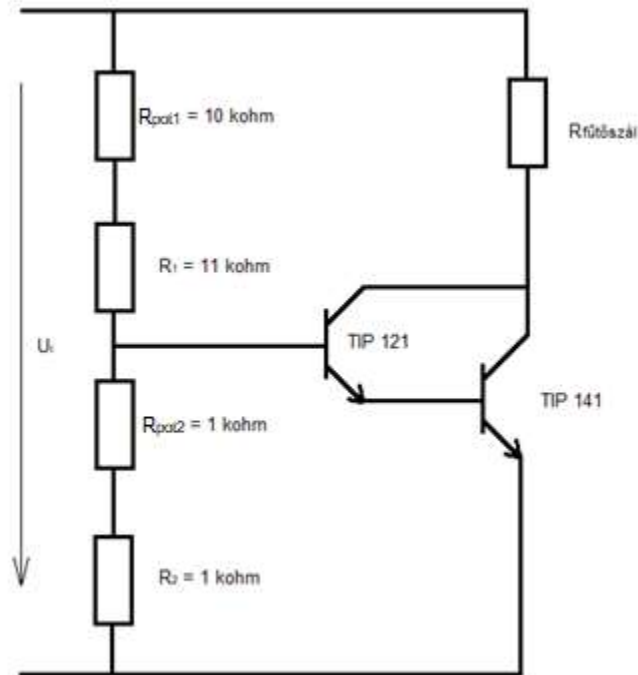
a TIP121-es Darlington-tranzisztorral váltottam, melynek modelljével bővítettem a program eszköztárát. A 2N3055-öst nem tudtam kiváltani, mivel az azt helyettesítő tranzisztor modelljét nem értem el a bővítő könyvtárak egyikében sem. Így az új, kisebb kollektor áramú darab után az eddig alkalmazott erősebb tranzisztor vizsgáltam és úgy döntöttem, amennyiben ugyanolyan ellenállásokat alkalmazva a kapott eredmények kedvezőbbek, mint voltak, akkor ezzel építem meg a kapcsolást.

Ekkor arra voltam kíváncsi, hogy a kiválasztott új tranzisztor jobb karakterisztikát eredményez-e, mint elődje. A második szimuláció kapcsolási rajzát és eredményeit a 1. függelék tartalmazza. Mint látható, két lényeges különbség tapasztalható. Az egyik, hogy nagyobb tápfeszültség mellett kezd el vezetni a áramkör, mely számunkra kedvező, hiszen így a munkaponti feszültség magasabb lesz. A másik pedig az, hogy az előzőnél kisebb áramértéket ért el. Ez amiatt nem gond, mivel a megépítendő kapcsolatban a második fokozatként funkcionáló egység egy sokkal nagyobb erősítési tényezőjű példány lesz, amely hasonló jelleg mellett bizonyosan magasabb áramértéket fog szolgáltatni.

4.3 Az áramkör megépítése

Az áramkör megvalósítása során törekedtem arra, hogy a kész kapcsolat minél jobban megközelítse egy valós rendszer jellemzőit. Éppen ezért nagy gondot fordítottam a beépítésre szánt alkatrészek kiválasztására. Mivel a tranzisztorok kiválasztásáról és szimulálásáról már korábban beszámoltam, ezért most a többi komponens bemutatására koncentrálok.

Az alapvető elrendezésen nem változtattam, így szükségem volt a bázisosztó elkészítéséhez két ellenállásra. Ezek megválasztásánál figyelembe vettem a modellezés során szerzett tapasztalatokat, vagyis például azt, hogy az ellenállások értéke és egymáshoz viszonyított aránya nagyon fontos eleme a rendszernek, emiatt a következő felépítést alkalmaztam. A bázisosztó egyik ágába egy $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ értékű, 5 %-os tűrésű fix ellenállást és vele sorba egy ugyanekkora nagyságú, $R_{pot1} = 10 \text{ k}\Omega$ értékű potenciométert, a másik ágba egy $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ -os ellenállást és egy $R_{pot2} = 1 \text{ k}\Omega$ -os potenciométert helyeztem el szintén sorba kötve. Az elrendezés sémája a 20. ábrán figyelhető meg.



20. ábra: A megépített áramkör kapcsolási rajza

A beépített két potenciométer biztosítja azt, hogy az ellenállások értékei tág határok között módosíthatók legyenek, így a mérési eredmények alakulásának függvényében „hangolható” a kapcsolás. Ez a megoldás a kész, egy adott vízmelegítő rendszerhez tervezett áramkörnél is alkalmazható, mivel így rendelkezésre áll egy finomhangolási lehetőség az üzembeállítás előtt.

A különböző elektromos berendezésekben az áramköri elemeket leggyakrabban forrasztással illesztik egymáshoz. A forrasztás célja fémes kapcsolat létesítése az összekapcsolandó alkatrészek között. A folyamat során csak a hozaganyag olvad meg, a kötést az alkatrészeknél alacsonyabb olvadáspontú forrasztóanyag hozza létre (felületi kötés) [23].

Forrasztással az állandó értékű és a változtatható ellenállások (potenciométerek) összekapcsolása viszonylag egyszerű: benedvesítjük a felületet, a forraszt megolvasztjuk, bevonjuk vele a felületeket, majd ahogy az lehűl, kialakítja a kapcsolatot. A tranzisztorok forrasztása annyival komplikáltabb, hogy azok kivezetését nem szabad sokáig magas hőmérsékletnek kitenni, mivel az eszközök érzékenyek az intenzív hőhatásokra és tönkremehetnek. Ezért a forrasztást határozott mozdulatokkal, gyorsan kell elvégezni.

Az áramkör egyes elemeit egyeres rézdróttal kapcsoltam össze, azonban a drót kiválasztásánál figyelni kellett annak vastagságára (keresztmetszetére), mivel a

kapcsolás egyes ágaiban 8 A körüli áram fog folyni, melyet a vékony vezetékek nem viselnek el. Miért fontos ez? A vezetéken feszültség hatására áram folyik keresztül, miközben annak ellenállása miatt hőt termel, vagyis veszteség keletkezik. A hőfelszabadulás megegyezik a vezetéken átfolyó áramerősség négyzetének és a vezeték ellenállásának szorzatával.

$$P = I^2 R \quad (4.1)$$

Az ellenállás meghatározásának egyik jól ismert összefüggése:

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (4.2)$$

ahol ρ a vezeték fajlagos ellenállása, l annak hossza és A a keresztmetszete. Ez a hőmennyiség adott esetben olyan nagy is lehet, hogy megolvasztja a vezeték szigetelő burkolatát, mely így érintésvédelmi szempontból veszélyessé, gyakorlati szempontból pedig használhatatlanná válik. Ezt a vezeték méretének és anyagának helyes megválasztásával kerülhetjük el.

A kapcsoláson négy kivezetést alakítottam ki (négy pólus), kettőt a tápegység számára és kettőt a fűtőszálnak, mivel ennek az ellenállásnak az értékét is változtatni akartam annak érdekében, hogy megtaláljam az optimális jellemzőket.

Az egész áramkör célja az, hogy maximalizálja a napelemtől levehető villamos teljesítményt, s ezáltal az előállítható hőenergia mennyiségét. Az áramkör saját hőfejlődése nem jelentős, viszont a tranzisztorok elég nagy hőt termelnek ahhoz, hogy megfelelő hűtés nélkül károsodjanak. Jelen fázisban még nincs meg a fűtendő közeg – a víz – ami biztosíthatná a hűtést a rendszer számára, így külön hűtést kellett beépíteni a megfelelő üzemelés biztosításához. Ehhez az egész áramkört egy ventilátorral egybeépített hűtőtönkre szereltem úgy, hogy a hűtőtönc felülete és a tranzisztorok közé hővezető pasztát kentem a minél jobb termikus kapcsolat elérése érdekében.

Az egész berendezést végül apró lábakra helyeztem, hogy a ventilátor által létrehozott légáram minél hatékonyabban el tudja vezetni a hőt. A 12 V-os megáplálásról külön egyenáramú tápegység gondoskodott. A megépített áramkört a 2. függelék tartalmazza.

4.4 Az alkalmazott tápegységek és mérőeszközök

4.4.1 TR-9175/A egyenfeszültségű stabilizált tápegység

A berendezés rendeltetése a hálózati feszültségnek stabilizált egyenfeszültséggé történő átalakítása. Alkalmazható különféle áramkörök működtetésére, mint kis belső ellenállású feszültség-, vagy nagy belső ellenállású áramforrás. A készülék feszültség és áramgenerátoros üzemmódja teljesen egyenértékű egymással, s az átkapcsolás egyik üzemmódból a másikba automatikusan történik. A tápegység a terhelés nagyságától függően automatikusan kapcsol át konstans feszültségű (constant voltage /CV/), vagy konstans áram (constant current /CC/) üzemmódba. A tápegységgel a hűtőventilátor energiaellátását valósítottam meg, mely alapvető jellemzőit a 3. táblázatban foglaltam össze [24].

3. táblázat: A TR 9175/A tápegység jellemzői [24]

Paraméter	Érték	
Feszültségtartomány	0 – 40 V	
Áramtartomány	0 – 2 A	
Stabilitás	CV	CC
	0,02 % + 3 mV	0,1 % + 4 mA

4.4.2 A VOLTcraft DPPS-32-30 tápegység

A programozható labortápegység, mint potenciálfüggetlen egyenáramú feszültségforrás kiefeszültségű fogyasztók üzemeltetésére szolgál. A beállítható kimenet az elülső oldalon maximum 5 A-ig, a hátoldalon a névleges áramerősségig terhelhető. A csatlakozás az előlapon 4 mm-es biztonsági aljakon keresztül, a hátoldalon nagyáramú csavaros szorítókon keresztül történik. A feszültség és áram beállítását digitális forgószabályozó végzi fokozat nélkül, durva- és finombeállítással. A készülék túlterhelés- és rövidzárlat ellen védett, valamint biztonsági hőmérséklet lekapcsolással rendelkezik. Ennek a tápegységnek a feladata a vizsgálataim során az volt, hogy a napelemet, mint energiaforrást, helyettesítse, ezzel a kívánt paraméterek időjárástól függetlenül reprezentálhatók és a kísérletek megismételhetők lesznek. A műszer legfontosabb paraméterei a 4. táblázatban találhatóak meg [25].

4. táblázat: A DPSS-32-20 tápegység jellemzői [25]

Paraméter	Érték
Tápfeszültség	220 – 240 V AC, 50 – 60 Hz
Max. bemeneti áram	3,1 A
Max. kimeneti teljesítmény	640 W
Kimeneti feszültség	1 – 32 V DC
Max. kimeneti áram	0 – 20 A
Kijelzési pontosság	$\pm (0,2\% + 0,3 \text{ V/A})$

4.4.3 A MA-TECH MY-64 multiméter

A multiméterek univerzális mérőeszközök, számtalan fizikai mennyiség mérésére alkalmasak, legyen az feszültség, áramerősség, frekvencia vagy akár hőmérséklet. A vizsgálat során a műszert feszültség- és ellenállásmérésre használtam. Az eszköz tulajdonságait tartalmazza az 5. táblázat.

5. táblázat: A MY-64 multiméter jellemzői [26]

	Méréshatár		Pontosság	
	AC	DC	AC	DC
Feszültség	700 V	1000 V	0,8 %	0,5 %
Áramerősség	AC	DC	AC	DC
	10/20 A	10/20 A	1,8 %	1,5 %
Ellenállás	200 M Ω		0,8 %	
Kapacitás	20 μ F		4,0 %	
Frekvencia	20 kHz		1,5 %	
Hőmérséklet	-20 – 1000 °C		1,0 %	

4.4.4 A PCE-DC1 érintkezésmentes árammérő

A kapcsolatban az áramerősséget a PCE Instruments érintkezésmentes műszerével – elterjedt elnevezése a lakatfogó – mértem. Az eszköz specifikációi a 6. táblázatban találhatóak meg.

6. táblázat: A PCE-DC1 műszer jellemzői [27]

		Tartomány	Lépésköz	Pontosság
Áramerősség	AC	max. 200 A	0,1 A	$\pm 3,0 \%$ + 8 számjegy
	DC	max. 200 A	0,1 A	$\pm 1,2 \%$ + 8 számjegy
Frekvencia		40 – 50 Hz	0,01 Hz	$\pm 1,2 \%$ + 5 számjegy
		51 – 510 Hz	0,1 Hz	$\pm 1,2 \%$ + 3 számjegy
		0,51 – 1 kHz	0,001 kHz	$\pm 2,8 \%$ + 3 számjegy
Vezeték max. átmérő		18 mm		

4.5 A mérés folyamata

Ahhoz, hogy minden kétséget kizáróan megbizonyosodhassak a megépített áramkör helyes működéséről, elengedhetetlen a meghatározó paramétereket mérni és rögzíteni. Ez egy olyan mérési metódus felállításával érhető el, mely során a valós üzemelési körülmények minél jobban reprezentálhatók. Továbbá fontos a tesztek megismételhetősége, valamint hitelesített mérőeszközök alkalmazása. Ezen feltételek akkor határozhatók meg, ha előzetesen felmérjük, az aktuális vizsgálat során mire vagyunk kíváncsiak és ehhez mely jellemzőkből szükséges mintákat venni. Így kiválaszthatjuk a megfelelő mérőeszközöket és kialakíthatjuk a mérések menetét.

Jelen fejezetben a korábbiakban bemutatásra került áramkör mérésének menetét kívánom részletesen ismertetni. A cél az, hogy az adatok alátámasszák azon feltevésem, miszerint a megvalósított tranzisztoros kapcsolás egy ilyen vízmelegítő rendszer esetén egy MPPT szabályozóval összevethető mértékben képes javítani az energiateljesítmény hatékonyságán. Ezt úgy tudom megvalósítani, ha az egyes konfigurációkban mért értékeket összevetem és az elvárásaimnak jobban megfelelő görbe jellemzőiből megkeresem azt, amely a pozitív változásért felel. Ezután iteratív módon ezt addig ismétlem – addig tart a mérési sorozat –, amíg el nem jutok az általam legjobbnak vélt megoldásig.

Ennek megállapításához a rendszer villamos mennyiségeinek mérésére került sor. Először a bázisosztó és a fűtőszál ellenállásainak mérését végeztem el. A beépítés előtt célszerű egy ellenőrző mérést végezni annak érdekében, hogy kiderüljön az esetleges hibás alkatrész. Multimétert használtam a művelethez és elsőként az eszköz belső ellenállását határoztam meg úgy, hogy a két mérővezetékét összeérintettem –

lényegében rövidre zártam. Miért tehettem ezt meg? A multiméter az ellenállás mérése során feszültséget kapcsol a mérendő elemre (a benne található akkumulátorból), így a kialakuló áramkörben egy feszültségforrás lesz sorba kapcsolva a belső ellenállással és a mérendő elemmel (jelen esetben ez nincs a körben), majd a feszültség és a megindult áram értékeiből előáll a keresett ellenállás. Ha más ellenállást mérünk – az esetek döntő többségében – akkor a mérendő kör nem lehet áram alatt, mert az károsíthatja a berendezést. A kapott eredmény nem egy jelentős érték, azonban kis értékű ellenállások esetén nagymértékben növeli a pontatlanságot. A belső ellenállás értéke $R_b = 0,6 \Omega$ -nak adódott, vagyis ezt az értéket minden esetben ki kell vonni a kijelzett értékből. Például a fűtőszálat helyettesítő tolóellenállást kezdetben $R_{fűtőszál} = 3,0 \Omega$ -nak választottam, így a beállítás során akkor értem el a kívánt értéket, mikor a műszer $3,6 \Omega$ -ot mutatott.

A bázisosztó ellenállásainál ugyanígy jártam el: a forrasztási pontoknál, ahol az eltérő elemek kapcsolódnak, odaérintve az ellenállás két végéhez (kivezetéséhez) a mérővezetékeket a mért érték megjelent a kijelzőn. Egymás után mindig legalább háromszor lemértem minden esetet, ezzel igyekeztem kiküszöbölni az eszköz kerekítéseiből, a leolvasási hibából és egyéb pontatlanságokból eredő eltéréseket. A kapott eredményeket átlagoltam, majd feljegyeztem. Ezután diagramot készítettem belőlük, hogy láthatóvá váljanak a jellegzetességei: mikor kezd el nyitni a tranzisztor, milyen meredek a felfutása, mekkora az áramerősítés értéke, vagyis meddig emelkedik az áramerősség. Arra törekedtem, hogy megismerjem melyik ellenállás hogyan képes a karakterisztikát megváltoztatni, majd megpróbáltam tudatosan előidézni a változtatásokat. Ezzel csökkenteni tudtam a mérések számát és gyorsítottam az optimalizálás folyamatát. A megfigyeléseimet az eredményekkel együtt részletesen bemutatom a következő fejezetben.

Fontos még megemlíteni, hogy a minél pontosabb mérés érdekében tudni kell a mérendő mennyiség nagyságrendjét. Az eszköz széles tartományban (Ω -tól $M\Omega$ nagyságrendig) képes elvégezni a mérést, azonban a méréshatár beállítása manuális, vagyis nekünk kell ezt elvégezni, lehetőleg a vizsgálatot megelőzően.

Ezeket túl vizsgáltam a tápfeszültséget, vagyis a napelemet helyettesítő tápegység által biztosított feszültséget. Az eszköz alkalmazása azért fontos, mert általa az időjárás hatásaitól mentesen, megismételhető módon, előállítható az az egyenfeszültség, melyet a valóságban a napelem állítana elő. A 0-30 voltos tartományon elemeztem az áramkört azért, hogy a teljes teljesítmény intervallumról

képet kapjak. Ezen kívül a paraméterek mind időjárásfüggők, vagyis előre nem tudható, hogy melyik intenzitáshoz tartozó görbe mentén fognak az áramértékek változni, így fel kell készülni mindre. A feszültségmérést szintén a multiméterrel végeztem. A kapcsolás kivezetéseihez érintve a mérővezetékeket, ügyelve a polarításokra (máskülönben negatív előjellel jelenne meg a mért érték), megkaptam a feszültséget. A méréshatár beállítása itt is fontos, mert az eszköz tizedes jegy pontossággal képes megjeleníteni az eredményt és túl nagy határt beállítva a kerekítéssel nem kívánt pontatlanság vihető a folyamatba. A tápfeszültség mérése egyike volt az ellenőrző lépéseknek, mivel a tápegység kijelzi az aktuális feszültség- és áramértékeket, azonban a vezetéken felléphet olyan mértékű feszültségesés, mely már korrigálást igényel. Ez a vezeték vastagságának helyes megválasztásával szinte nullára redukálható. Azonban fontos tudni, hogy okoz-e megjelenő eltérést vagy ez nullának vehető, mivel a mérés során törekedni kell a minél „sterilebb” körülmények elérésére az alapvető jellemzők felvételénél. Ez nincs ellentmondásban a valószerű tesztkörülmények igényével, mivel először az ideális paraméterek felvétele kell, hogy megtörténjen, melyeket azután ki lehet tenni a különböző hatásoknak is, például a hőmérsékletváltozás miatt eltolódott jellegű görbe esetén.

A legfontosabb vizsgálandó jellemző a fogyasztón – a fűtőszálon – áthaladó áramerősség. Az áramot egy érintkezésmentes eszközzel, ún. lakatfogóval mértem, mely a Hall-effektust kihasználva működik. Ennek lényege, hogy mágneses erőterbe helyezett villamos vezetőben haladó töltéshordozókra Lorentz-erő hat. Ez az erőhatás eltéríti a részecskéket, így azok nem egyenlő mértékben oszlanak meg a vezető keresztmetszetében. A kialakuló töltéssűrűség-különbség (potenciálkülönbség) feszültséget eredményez a vezető két oldala között, mely már kimutatható, ez az ún. Hall-feszültség. Ennek értéke $U_H = 26 \text{ mV}$. Maga az eszköz, nevéből következtethetően, egy fogóra hasonlít, melynek „csőrébe” kell a mérni kívánt vezetőket helyezni és ahogy megindul az áram, úgy a mérőeszköz a fent leírt módon megméri, majd kijelzi az eredményt. A méréshatár kiválasztása ennél az eszköznél automatikusan történik, itt csak azt kell beállítani előre, hogy egyen- vagy váltóáramot fogunk-e vizsgálni. Az áramerősség változását az alábbi lépésekben követtem nyomon:

1. Ellenőrzés: csatlakozások megfelelőek-e (épek, jó elemeket kapcsolnak össze)
2. Tápegységeket feszültség alá helyezem
 - a. A hűtés tápegységén 12 V DC beállítása – ventilátor indítása

- b. A fő tápegységet indítom – $U_t = 0,8 \text{ V}$ alapjel megjelenése
3. U_t -t el kezdem növelni – a tápegység CV (constant voltage) üzemmódban van
4. Az adatokat rögzítem – a feszültséget és az áramerősséget nyomon követem
 - a. a mérési pontokat $0,5 \text{ V}$ -onként I - U párokban táblázatban felvezetem
5. Ha komplikáció nélkül elérem az $U_t = 30 \text{ V}$ értéket, akkor egy elrendezés vizsgálatának vége, ha még nem, akkor vissza a 3. pontra
6. A fő tápegységet alapállapotba visszaállítom
7. Ellenállásokat megváltoztatok (bázisosztó, fűtőszál)
8. Vissza az 1. pontra

A művelet során figyelmemmel kísértem a tranzisztorokon képződő hőmennyiséget, melyet a mérés egésze alatt a hozzákapcsolt hűtőventilátor és hűtőtönk kiválóan elvezetett. Az eszközök szinte végig tapinthatóak maradtak, hőmérsékletük abban a tartományban maradt, mikor képesek a katalógusban előírt hőteljesítmény elvezetésére.

Minden egyes elrendezés adatait táblázatban rögzítettem, majd ezekből diagramot készítettem, a mért adatokat, az áramerősséget a tápfeszültség függvényében ábrázoltam. Az adatok rendszerezése nagyon fontos, mivel nagyméretű adathalmazról beszélünk, ahol az összetartozó értékpárokat és kapcsolódó jellemzőket célszerű a vizsgálattal párhuzamosan feljegyezni a nyomon követhetőség érdekében. Mindezek feldolgozása, elemzése és kiértékelése a következő, 4.6 fejezetben lesz kifejtve.

4.6 Eredmények

Ebben a fejezetben a mérés során nyert adatok elemzését mutatom be. A vizsgálatból táblázatba rendezett feszültség és áramértékeket nyertem, azokat a következőképpen dolgoztam fel.

Először a maximális teljesítményű munkapontokat (MPP) határoztam meg a napelem adatlapjának segítségével. A gyártó különböző fényintenzitásokon megadja az I - U és P - U görbéket, melyeket általában a szabványos tesztkörülmények (STC) között vesznek fel. Az említett görbesereg megtalálható a 4.2 fejezet 16. ábráján. A P - U görbe maximumához tartozó feszültség értékét rávetítettem az I - U görbére, majd a kapott ponthoz megkerestem a hozzá tartozó áramértéket. Ezt elvégeztem mind az öt intenzitás esetén és így előálltak a keresett munkapontok. Tekintsük úgy, hogy a maximális teljesítményre való szabályozás (MPPT) során az eszköz tökéletesen képes

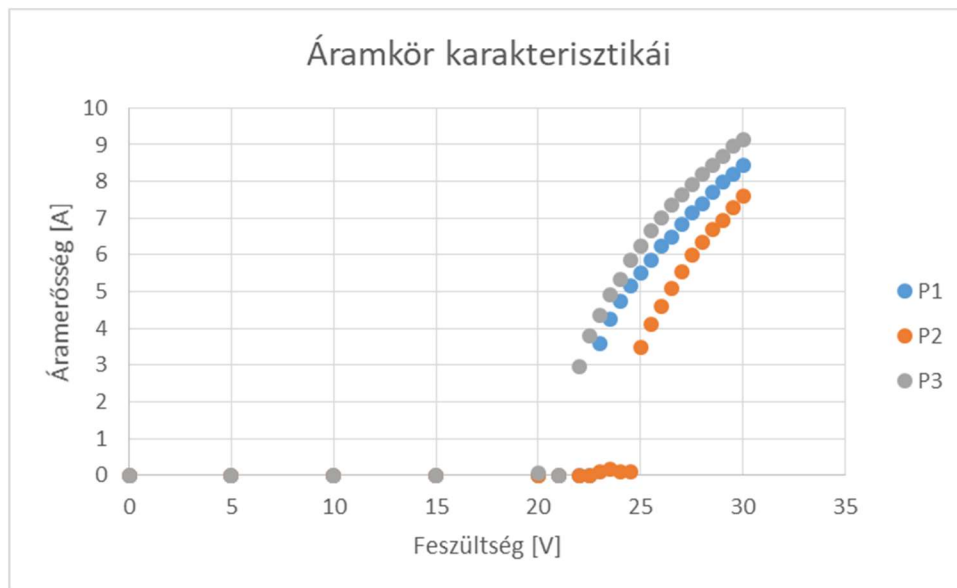
ezeket a pontokat követni és a rendszert itt üzemeltetni. Ezért a továbbiakban a vizsgált áramkör paramétereit az MPPT szabályozóhoz fogom viszonyítani.

Miután meghatároztam az MP pontokat, a mérési eredmények elemzését végeztem el. A táblázat adataiból diagramot készítettem és ábrázoltam a pontthalmazokat. A diagramot az adatok jobb átláthatóságának érdekében két részletben mutatom meg az 1. függelékben. Látható, hogy az összes görbe nagyon hasonló jellegű: 20 V-os tápfeszültségig nem folyik áram a körben, majd tovább növelve a feszültséget 22-24 V közötti tartományban megindul az elektronáramlás, és nagy meredekséggel növekszik egészen 30 V-ig. Azonban az apró különbségeket főleg a bázisosztó ellenállásai okozzák, kisebb részt a fűtőszál ellenállása hat a mért jellemzőkre. A következőkben azt mutatom be, hogyan változtatható a kapcsolat karakterisztikája az ellenállások változtatásával.

4.6.1 A jelleggörbe módosítása az ellenállások változtatásával

Ahogy már korábban említettem, a bázisosztó ellenállásainak a feladata a bázisáram megfelelő értékek között tartása. Ez azért nagyon fontos, mert a tranzistor működéséhez folyamatosan szükség van vezérlő áramra, mely ebben az esetben a bázison át érkezik. A két sorosan kapcsolt ellenállás feszültségosztóként viselkedik, vagyis az ellenállások értékeinek az aránya megegyezik a feszültségek arányával. Ezt jól megválasztott elemekkel arra lehet használni, hogy az általunk elvárt módon változzon a bázisáram, s ezzel megvalósítottunk egyfajta passzív vezérlést.

A mérés kezdetén az első beállítás során a két ellenállást $R_1 = 13,45 \Omega$ -nak és $R_2 = 1,06 \Omega$ -nak választottam (P1). A második beállításnál az R_2 -t $1,007 \Omega$ -ra csökkentettem (P2), majd a harmadik esetben $1,198 \Omega$ -ra növeltem (P3). A módosítások hatása a 20. ábrán figyelhető meg.

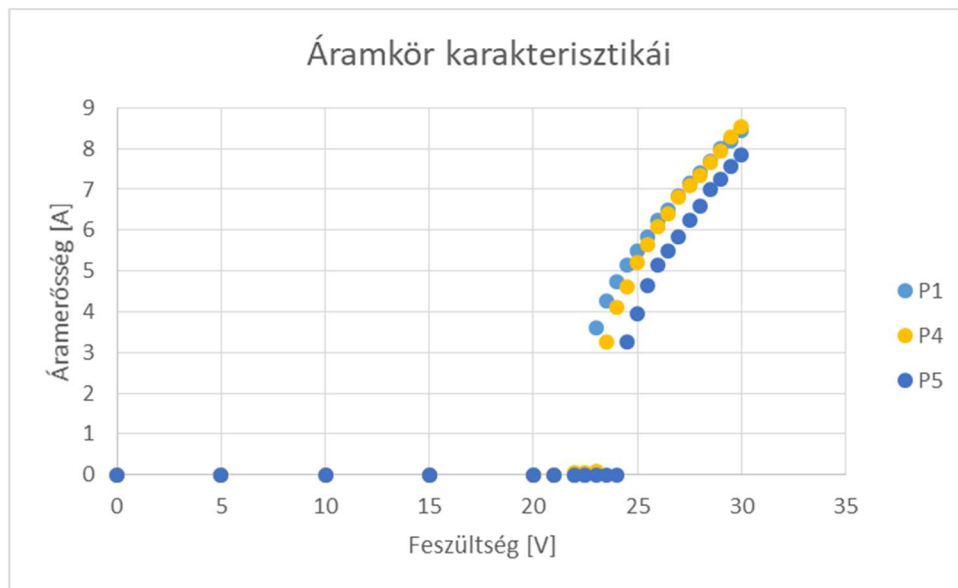


21. ábra: A bázisosztó kisebb ellenállás módosításának hatása

Az ábrán kék színnel az első, narancssárgával a második és szürkével a harmadik verziót jelöltem. A változtatások az alábbi hatásokkal vannak a karakterisztikára:

- a második esetben csökkentettem az R_2 -t, ennek eredményeképpen a bázisáram magasabb tápfeszültség esetén kezdett el folyni, ezzel magasabb kitöltési tényező érhető el, valamint a maximális áramerősség nagysága csökkent, ami viszont rontja azt,
- a harmadik esetben növeltem az R_2 -t, ennek következtében a bázisáram „hamarabb” indul meg és a legnagyobb áramerősség az első esethez képest megnőtt,
- a fűtőszál ellenállása mindhárom esetben változatlan, $R_{\text{fűtőszál}} = 2,8 \Omega$.

Ezt követően a bázisosztó nagyobb ellenállásának értékeit változtattam, egyszer $R_1 = 14,43 \Omega$ -ra (P4), majd $15,48 \Omega$ -ra növeltem (P5), miközben az $R_2 = 1,198 \Omega$ maradt. Ekkor a jelleggörbe a 21. ábrán látható módon fog alakulni.



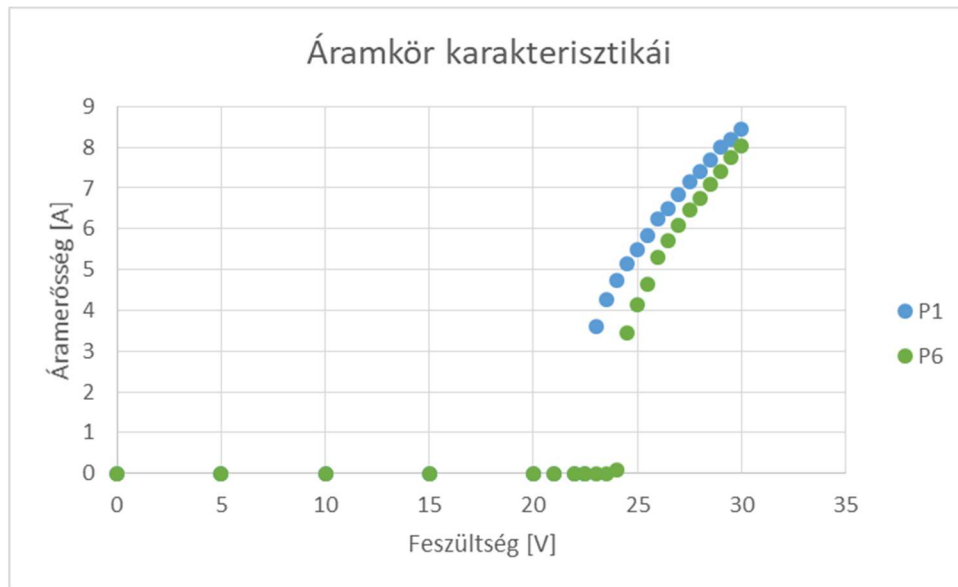
22. ábra: A bázisosztó nagyobb ellenállásának hatása a jelleggörbére

A kezdeti beállítást viszonyítási alapként meghagytam a diagramon, csak a másik két görbét cseréltem le – a sárga szín az első esetet jelöli, mikor növeltem az ellenállást, a sötétkék a másodikat. A beállítások nyomán újabb két, finoman eltérő ponthalmazt nyertem, melyekről elmondható:

- az első növeléssel a bázisáram megindulása „későbbre” tolódott, meredeksége picit nőtt, ahogy a maximális áramerősség is,
- tovább növelve az ellenállás értékét a bázisáram felfutása még később indul meg, viszont csökkent az erősítés mértéke, már nem éri el az előzőekben tapasztalt tartományt, és
- a fűtőszál ellenállása továbbra is változatlan, $R_{\text{fűtőszál}} = 2,8 \Omega$.

Ezek után a két ellenállás arányát vizsgáltam azon oknál fogva, hogy a feszültségosztó esetén a feszültségek nagyságát ez befolyásolja. Ekkor az eddig vizsgált esetekben beállított ellenállások értékeit arányítottam egymáshoz és rendre 11 és 13 közötti számokat kaptam. Innen kiindulva a 13-at választottam aránynak, de az ellenállások nagyságát megnöveltem. Azt vizsgáltam, hogy az arányok mellett azok nagysága eredményez-e behatásokat, s ha igen, milyeneket. E két paraméter módosítása jelentősen javította a kapcsolás kimenő jellemzőit – amellet, hogy a bázisáram viszonylag magas feszültség esetén indult meg, az elért áramerősítés megfelelt elvárásaimnak, ráadásul a ponthalmaz által kijelölt görbe meredeksége is kielégítő volt. Az eredményt – továbbra is az első beállítással összevetve, $R_{\text{fűtőszál}} = 2,8 \Omega$ mellett – a 22. ábrán jelenítem meg (P1 esetén az ellenállások aránya: $R_1/R_2 = 12,69$; a P6

ponthalmaznál ez az érték 13,07). A zöld színnel jelölt ponthalmaz az új konfiguráció értékei.

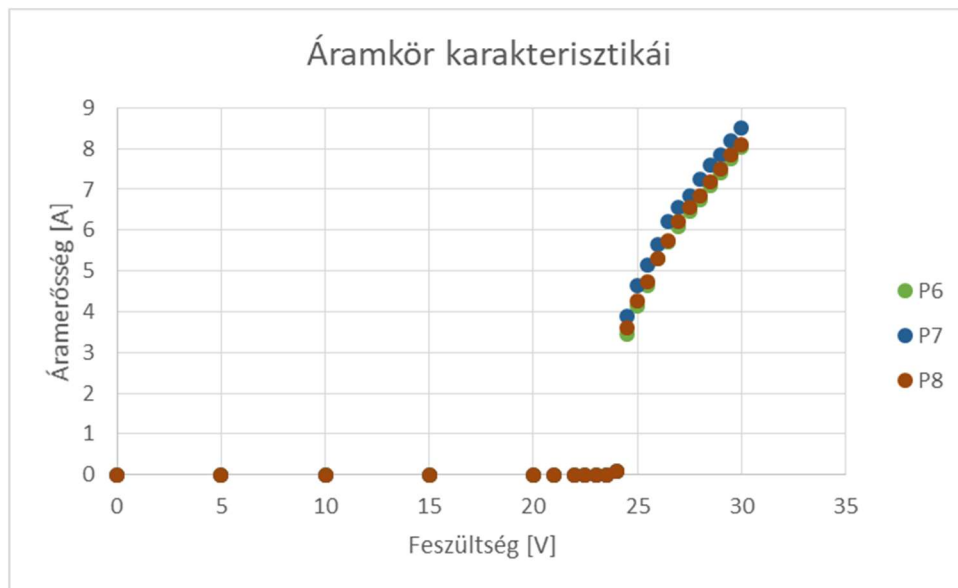


23. ábra: Az ellenállások arányának és nagyságának hatása

Az utolsó, eddig kimaradt paraméter, a fűtőszál ellenállása. Ezt viszonylag szűk tartományban van lehetőség változtatni, mivel ez felel a maximális áram korlátozásáért, ezért teljesen tetszőleges értéket nem vehet fel. Az optimális ellenállás értéke, amennyiben közvetlenül kapcsolódna a napelem a fűtőszállal:

$$R_{opt} = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}} = \frac{30 \text{ V}}{8,31 \text{ A}} = 3,61 \Omega.$$

Ebben az esetben a maximális áramerősség éppen az I_{MPP} , azonban ilyen érték mellett valamivel kisebb áramerősséget mértem, emiatt picit csökkentettem a nagyságát. Mindezt az utolsó, eddigi legkedvezőbb ellenállásokkal mértem, megnézve hogyan hat a kedvező paraméterekre. A kapott jellemzőket sötétkékkel (P7) és barnával (P8) tüntettem fel a 23. ábrán. Az előbbinél feleztem az ellenállást, $R_{fűtőszál} = 1,8 \Omega$ lett, melynek hatására rendre magasabb áramértékek adódtak, míg a második esetben enyhén csökkentettem, $R_{fűtőszál} = 3,2 \Omega$ -ra állítottam, és nagyon hasonló jelleggörbét kaptam, mint a kiinduló, szám szerint 6. esetben.



24. ábra: A fűtőszál ellenállásának módosító hatása

A mérés során szerzett tapasztalatokat figyelembe véve megállapítható, hogy megfelelő mennyiségű laboratóriumi mérés után kiismerhető az egyes áramköri elemek ráhatása az egész áramkör működésére. Ezeket külön-külön vizsgálva felmérhetők a kedvező és kedvezőtlen folyamatok, melyek a változtatások következményeként jöttek létre. A végső elrendezés kialakításánál azonban figyelembe kell venni azt a tényt, hogy az imént megismert hatások a gyakorlatban szuperponálódnak, vagyis az egyes részhatások összeadódnak – ez lehet előnyös és hátrányos is. Ezért körültekintően kell eljárni minden módosítással, érdemes részletesen feljegyezni azokat, ugyanis minden igyekezet ellenére egy-egy javító beállítás is okozhat negatív változásokat. Összefoglalva tehát az egyes elemek módosító hatásait:

1. A bázisosztó nagyobb ellenállása
 - a. növelés esetén: a bázisáram később indul meg, azonban az áramerősítést gyengíti, ezért ennek kiküszöbölésére a másik ellenállást is növelni kell, ugyanis az arányuk meghatározó
 - b. csökkentés esetén: a bázisáram kisebb tápfeszültség esetén megindul, a pontok által kijelölt görbe meredeksége kicsit csökken
2. A bázisosztó kisebb ellenállása
 - a. növelése esetén: a bázisáram hamarabb kezd el folyni az áramkörben és jelentősen csökken a görbe meredeksége

- b. csökkentés esetén: a bázisáram később fog megindulni, nő a görbe meredeksége, de csökken az áramerősítés, s így a maximális áramerősség értéke is

3. A fűtőszál ellenállása

- a. növelése: korlátozza a maximális áram értékét és enyhén hat a meredekségre – csökkentve azt
- b. csökkentése: a maximális áram értéke nő, valamint növeli a karakterisztika meredekségét.

4.6.2 A különböző rendszerek összehasonlítása

Az áramkör feladata az, hogy a maximális pontokban vagy azokhoz minél közelebb alakítson ki munkapontot. Ezt szemléletesen úgy lehet megjeleníteni, ha a mérési pontokra egy közelítő függvényt illesztünk, ennek meghatározom az egyenletét, majd a már ismert, különböző sugárzási intenzitású napelem jelleggörbéket elmetszem vele. A metszéspont x és y koordinátái – az adott ponthoz tartozó feszültség és áramértékek – lesznek a munkapont jellemző paraméterei. Ehhez különböző beállításokkal rendelkező áramkörök mért eredményeiből kiválasztottam a két legkedvezőbb adatsort, mely a 6-os és 8-as számmal jelölt lett. A két ponthalmaz közelítő függvényei:

$$(6): I = -0,069U^2 + 4,5619U - 66,813$$

$$(8): I = -0,0658U^2 + 4,3873U - 64,312$$

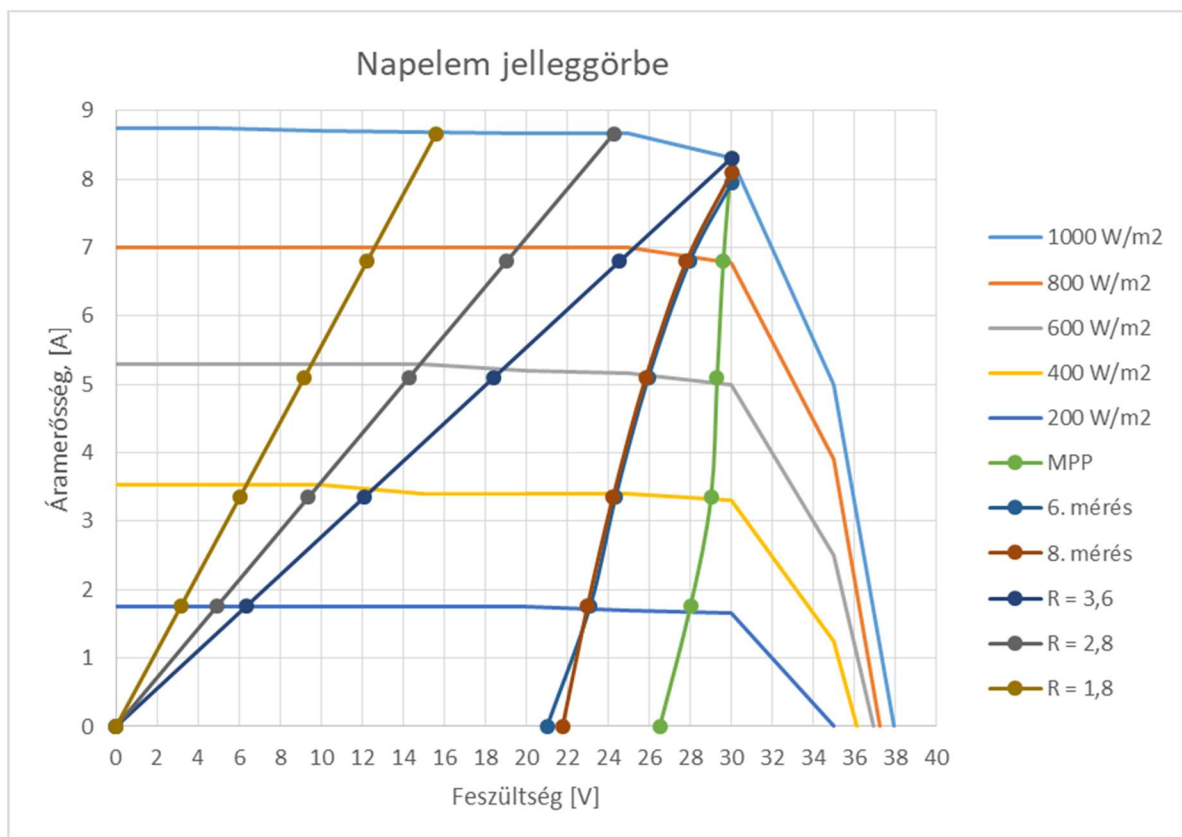
A már ismert napelem jelleggörbékkel való metszéspont meghatározásához kihasználtam azt a jellemzőjüket, hogy egy jelentős tartományon közel állandónak vehetjük az áram értékét. Így nincs más teendő, mint az I helyére behelyettesíteni az adott számértéket és megoldani a másodfokú egyenletet. A két megoldás közül az lesz a munkapont feszültség koordinátája, mely 0-30 között található. A másik megoldást egyszerűen elhagyjuk. Ezt a műveletet mind az öt intenzitásszinten elvégezve előállnak az adott beállítású áramkör munkapontjai.

Az eredmények megjelenítése előtt még felvettem a maximális teljesítményű esetet, illetve három állandó ellenállás munkapontjait azért, hogy összehasonlítani alappal rendelkezzenek az előállt eredmények. Az ellenállások értékeinek a fűtőszál értékeit választottam, ezek jelenítik meg azt az esetet, mikor a napelemre közvetlenül csatlakozik a fűtőelem. A mért eredmények közül kiválasztottam a két legideálisabbat, mint a megvalósításra érdemes beállításokat. A különböző megvalósítások munkaegyenesei tekinthetők meg a 25. ábrán.

Ezután meghatároztam az összes munkapontban a villamos teljesítményt az alábbi képlet szerint:

$$P = U \cdot I. \quad (4.3)$$

Az összefüggés amiatt vehet fel ilyen egyszerű alakot, mert a napelem egyenáramot állít elő, emiatt nem kell figyelni a vonali és fázisfeszültségekre vagy a fázisszögre sem.



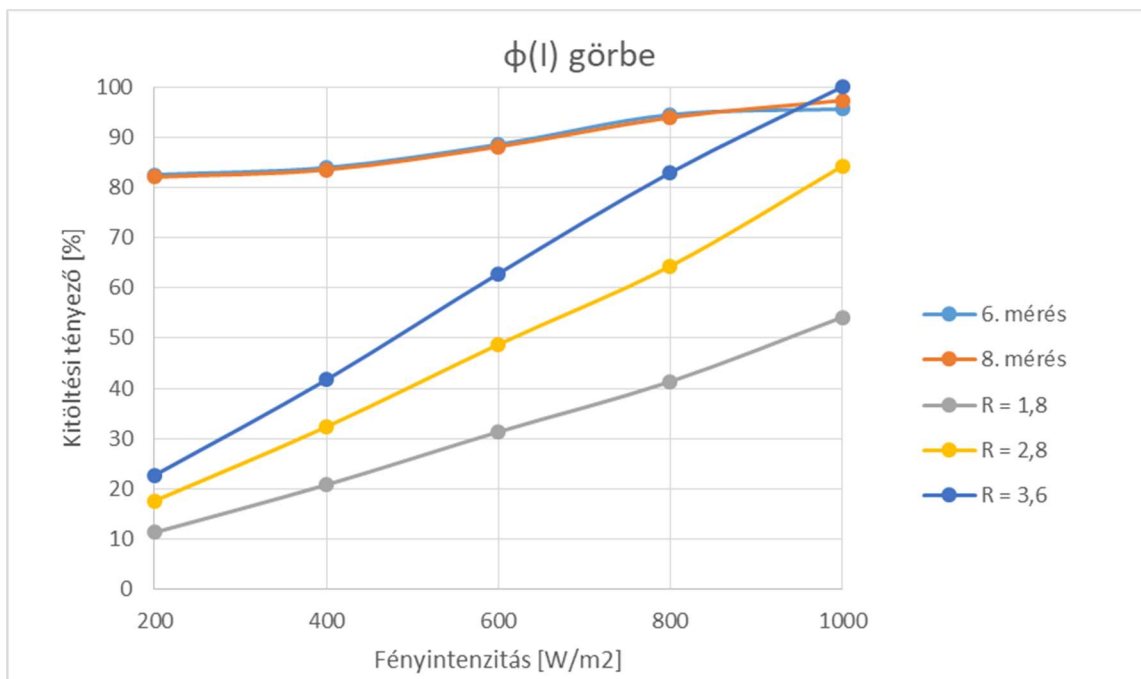
25. ábra: A különböző megoldások munkaegyenesei

A meghatározott villamos teljesítmények önmagukban kevés információval szolgálnak egy berendezés hatékonyságával kapcsolatban, ezért két dimenziótlan mennyiség segítségével fogom összehasonlítani a fűtőellenállásokat, az MPPT szabályzót és az általam megvalósított kapcsolást.

Az egyik ilyen mennyiség a már korábban bemutatott kitöltési tényező, mely azt mutatja meg, hogy a vizsgálandó szerkezet által biztosított villamos teljesítmény hány százaléka az elméletileg elérhető maximális feszültség- és áramerősség által generált teljesítménynek. Ezt annyiban módosítottam, hogy a maximális teljesítménynek az MPPT szabályzó által előállított értéket vettem és ehhez viszonyítottam a többi rendszert. Mindez képlettel felírva:

$$\varphi' = \frac{P_{jell}}{P_{MPP}} \cdot 100 [\%]$$

Ismert, hogy napelemek esetén az áramerősség értéke egyenesen arányos a fényintenzitással. Ezt kihasználva, az imént kapott φ' jellemzőket ábrázolhatjuk a sugárzási intenzitás függvényében, mivel a munkapontok áramkoordinátáihoz egyértelműen hozzárendelhetők a napelem adott fényintenzitáson mért jelleggörbéi. A felrajzolt diagramon, mely a 26. ábrán látható, az MPPT szabályozóhoz tartozik a 100 %-os érték.

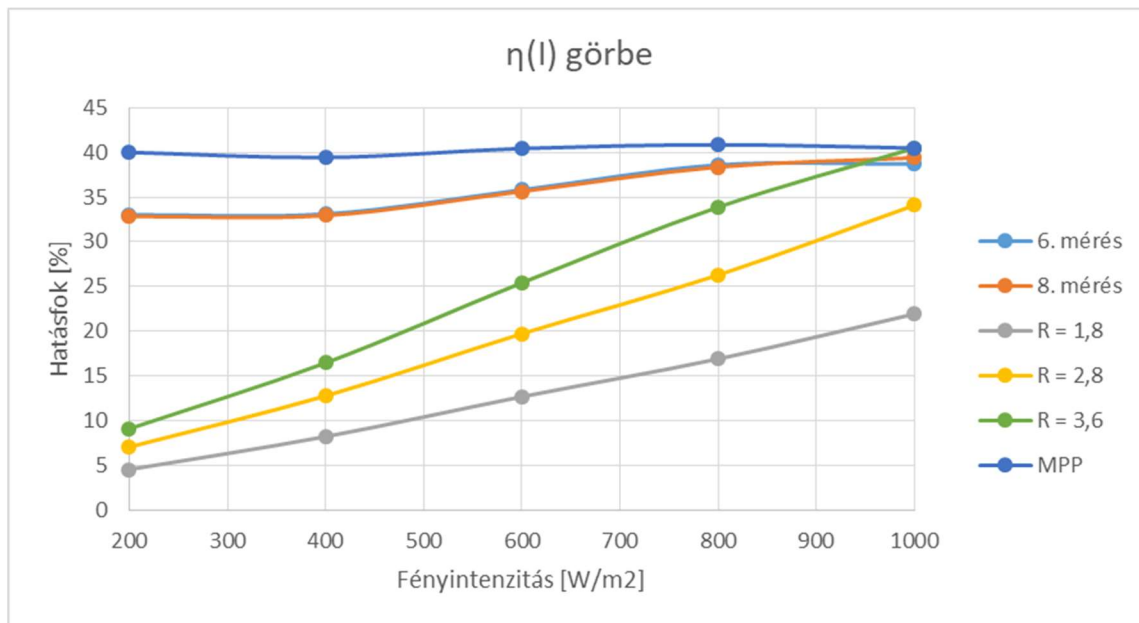


26. ábra: A különböző megoldások kitöltési tényezője a fényintenzitás függvényében

Az ábrán látható, hogy a különböző értékű (állandó) ellenállások kitöltési tényezője függ a fényintenzitástól – minél erősebb napsugárzásra van szükségük a jobb teljesítmény kihasználás eléréséhez. Egy ilyen rendszer hátránya az, hogy, a hazai időjárási viszonyokból kiindulva, az év jelentős részében a felhővel való borítottság olyan mértékű, ami a legkedvezőbb üzemelési tartományban való működést nem teszi lehetővé. Ezzel szemben az általam vázolt áramkör közel állandó, az MPPT szabályozóhoz viszonyítva, 80 %-ot meghaladó teljesítmény kihasználással bír, mely főleg a felhős, kis fényintenzitású időszakban – ősztől tavaszig – jelent plusz előnyt. Ezt követően megvizsgáltam azt, hogy a napelem felületére érkező energiából hány százalékot képesek hasznosítani az egyes rendszerek, melyet az alábbi összefüggés szerint határoztam meg:

$$\eta = \frac{P_{jell}}{E \cdot A} \cdot 100 [\%],$$

ahol P_{jell} az adott berendezés villamos teljesítménye [W], E a besugárzási érték [W/m^2], és A a napelem felülete [m^2]. A kapott hatásfok értékeket a 27. ábrán lehet megtekinteni.



27. ábra: Az egyes hatásfokok a fényintenzitás függvényében

A diagramon jól látható, hogy a fűtőellenállások hatásfoka, ahogyan a kitöltési tényezőjük is, csak a nagyobb intenzitású, $800 W/m^2$ -et meghaladó intervallumban rendelkezik viszonylag kedvező hatásfokkal. Azonban az ellenállás értéke jelentős hatással van a hatásfokra, az optimálisan illesztetthez képest akár 20 %-os eltérés is mutatkozhat. Könnyedén leolvasható továbbá, hogy egy MPPT szabályozóval ellátott napelemes rendszer mennyi energiával állít elő többet ugyanakkora sugárzási intenzitás mellett. Az áramköröm hatásfoka 2-7 %-kal tér el az MPPT szabályozótól, ami igen csekély érték, figyelembe véve, hogy mindezt mikroprocesszor és bonyolult algoritmusok nélkül képes teljesíteni.

5. ÖSSZEGZÉS

Jelen dolgozat elkészítéséhez végzett irodalomkutatás és mérések sorozata után bizonyítást nyert, hogy analóg áramköri elemekkel megvalósítható egy olyan kapcsolás, mely segítségével egy napelemes vízmelegítő készülék hatékonyabb energiateljesítményűvel üzemel. Az alkalmazott elektromos eszközök (ellenállások és tranzisztorok) széles körben elterjedtek a gyakorlatban, kis költséggel beszerezhetők és egyszerűen szerelhetők. Működési tartományuk tág határok között mozog, ennek köszönhetően különböző napelemekhez illeszthetők anélkül, hogy kedvező tulajdonságaikról le kellene mondanunk.

Érdekes volt látni a mérések során, hogy az áramkör pontosan úgy működik, ahogyan néhány hónappal korábban azt elképzeltem. A ma használatos vezérlő és szabályozó eszközök körében egyre népszerűbb mikroprocesszorokat alkalmazni és a lehető legtöbb berendezéssel, szerverrel vezeték nélküli adatátvitel segítségével összekapcsolódni. Teszik mindezt úgy, hogy egyes alkalmazásokban egyszerűbb felépítésű és hasonló gyakorlati értékű alternatívák állnak rendelkezésre, mint például az előzőkben bemutatott példánál.

Meglátásom szerint az analóg áramköri eszközök ilyen módon történő felhasználása a megújuló energiák kiaknázásához hasonlatos: komoly potenciál rejlik bennük, azonban meg kell keresni annak a módját, hol és hogyan aknázható ki a leghatékonyabban mindez. Gondoljunk a napenergia-hasznosításra, melynek földi felhasználása még csak terjedőben van, azonban az úrkutatás során a vegyület napelemek szinte egyeduralmuk a műholdak és más űreszközök energiaellátása terén.

A lehetőségek adottak a bemutatott áramkör előtt is, hiszen a napelem, melyre az egész méretezve lett, csak a modellje egy valós villamos áram termelő rendszernek. Nagyobb méretekben, igazodva a modulok kapcsolásához és a telepítés körülményeihez, egy valamivel összetettebb, ám alapjaiban hasonló áramkör megvalósítása mindenképp indokolt annak bizonyítására, hogy egy családi házra méretezett háztartási kiserőmű termelt energiája hatékonyan fordítható-e melegvíz előállítására.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném megköszönni Szaszák Norbertnek a téma felvetését és annak megoldása során nyújtott hasznos tanácsokat, valamint végtelen türelmét, Farkas Lászlónak az áramkör megépítése során nyújtott segítségét valamint Varga Gábornak hasznos gyakorlati észrevételeit.

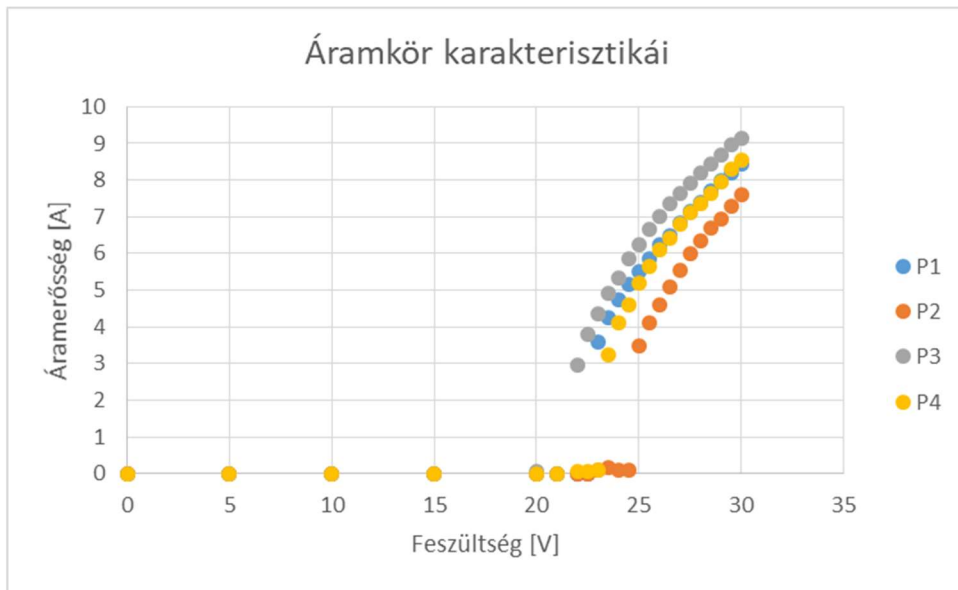
IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Világföldrajz, Tóth József (főszerkesztő), Akadémiai Kiadó, Bp., 2010.
- [2] ELTE távoktatási anyaga, László István, Csornai Gábor, Dr. Fekete István, Giachetta Roberto, <http://tamop412.elte.hu/tananyagok/taverzekelt/>, Utolsó megtekintés: 2017.november 19.
- [3] Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek, Mészáros Róbert, <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaiMuszerekEsMero rendszerek/ch04s03.html>, Utolsó megtekintés: 2017. november 19.
- [4] A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk, Hunyár Mátyás, Schmidt István, Veszprémi Károly, Vincze Gyuláné, Műegyetemi Kiadó, Bp., 2002.
- [5] Félvezető eszközök I., Várkövi József, http://uni-obuda.hu/users/varkovi.jozsef/vj/elmelet/felvez_elemei/felvezeto_1.pdf, Letöltve: 2017. november 20.
- [6] Fizika laboratóriumi gyakorlatok, Pannon Egyetem, Fizika és Mechatronika Intézet tanszéki munkaközösségének jegyzete, http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_fizika_laborgyakorlat/index.html, Utolsó megtekintés: 2017. november 21.
- [7] Amerisolar AS-6P30-250W napelem modul adatlapja
- [8] Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Környezetmérnöki szakának hallgatói jegyzetoldala, http://www.bmekornyesz.hu/sqlatm/dl.php?dir=silo%2FV%C3%A1laszthat%C3%B3+t%C3%A1rgyak%2FNapelemek%2F&a=dl&id=3493&f=silo/V%C3%A1laszthat%C3%B3%20t%C3%A1rgyak/Napelemek/4_gyakorlat.ppt, Letöltve: 2017. november 20.
- [9] A napelem és fejlesztési perspektívái, Nemcsics Ákos, Akadémiai Kiadó, Bp., 2001.
- [10] Villanszerelők Lapja – Épületvillamossági szaklap, 2016. január-februári szám, <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2016/januar-februar/3978-a-napelemgyartas-kulisszatitkai-3-a-napelemek-szive-avagy-a-napelemcellak-fajtai>, Utolsó megtekintés: 2017. november 13.
- [11] Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Csikósné Dr. Pap Andrea Edit, Villamosipari anyagismeret tantárgyi jegyzet, http://uni-obuda.hu/users/pap.andrea/BSc_anyagea/02Fazisatalakulas.pdf

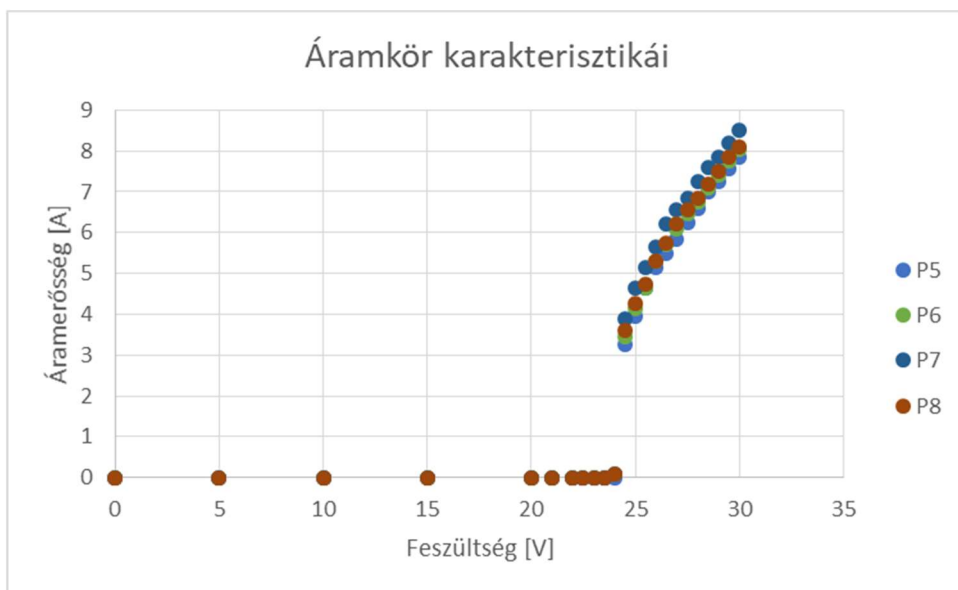
- [12] Graham R. Fisher, Mike Seacrist, Robert W. Standley, Silicon Crystal Growth and Wafer Technologies, 2012., https://www.researchgate.net/publication/260582305_Silicon_Crystal_Growth_and_Wafer_Technologies
- [13] Villanyszerelők Lapja – Épületvillamossági szaklap, 2016. márciusi szám, <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2016/marcius/4014-a-napelemgyartas-kulisszatitkai-3-a-nyomtatott-aramkoer>, Utolsó megtekintés: 2017. november 14.
- [14] Ecoprogetti nevű vállalat tájékoztatója, <https://ecoprogetti.com/electroluminescence-test-for-the-production-of-solar-panel/>, Utolsó megtekintés: 2017. november 19.
- [15] PV Pro Ltd. tájékoztató, <http://www.pvpro.co.uk/pv-panel/class/pv-module.html>, Utolsó megtekintés: 2017. november 19.
- [16] Villanyszerelők Lapja – Épületvillamossági szaklap, 2015. novemberi szám, <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2015/november/3893-a-napelemgyartas-kulisszatitkai-i>, Utolsó megtekintés: 2017. november 12.
- [17] ELTE, Kémiai Intézet, Analitikai Kémiai Tanszék, Zsigrainé Dr. Vasanits Anikó, A mintaelőkészítés műveletei c. előadás anyaga, <http://www.chem.elte.hu/departments/anal/vasanits/muszi%20eloadas%20elvtchnika/2015sampleprep.pdf>, Letöltve: 2017. november 11.
- [18] ELTE, Fizikai Kémiai Tanszék kiadott mérési segédlete, <http://phys.chem.elte.hu/tanarlab/meres/kalori/kaloribev.htm>, Letöltve: 2017. november 11.
- [19] Thorsten Muschler GmbH, <https://www.machineseeker.hu/Napelemes-rendszerek/ci-67>, Letöltve: 2017. november 16.
- [20] Villanyszerelők Lapja – Épületvillamossági szaklap, 2015. decemberi szám, <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2015/december/3934-a-napelemgyartas-kulisszatitkai-ii> Utolsó megtekintés: 2017. november 13.
- [21] Jüllich Glas Holding Zrt. ismertető anyaga, http://www.jullichglas.hu/hirek/313/napelem_technologia_es_az_uveg
- [22] Electro_Cord Kft., Szigetelőanyagok tulajdonságai, <http://electrocord.hu/doc253/>, Letöltve: 2017. november 12.
- [23] Miskolci Egyetem, Elektronikai és Elektrotechnikai Intézet, Szabó Norbert, Forrasztási technológiák, http://www.uni-miskolc.hu/~elkszabo/Oktatas/VA_Villamos_alaplabor_3_resz.pdf

- [24] <https://www.hobbielektronika.hu/forum/getfile.php?id=213970>, Letöltve: 2017. november 21.
- [25] Conrad Electronic Inc. termék katalógusa, <http://www.conrad-electronic.co.uk/ce/en/product/1086560/Bench-PSU-adjustable-voltage-VOLTCRAFT-DPPS-32-20-1-32-Vdc-0-20-A-640-W-USB-programmable-No-of-outputs-1-x>, Letöltve: 2017. november 21.
- [26] Somogyi Elektronik Kft. termék katalógus, <https://www.somogyi.hu/product/professzionalis-multimeter-my-64-2775>, Letöltve: 2017. november 21.
- [27] PCE Holding GmbH katalógusa, https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/clamp-meter-pce-instruments-mini-clamp-meter-pce-dc1-det_58404.htm, Letöltve: 2017. november 21.

F1. FÜGGELÉK

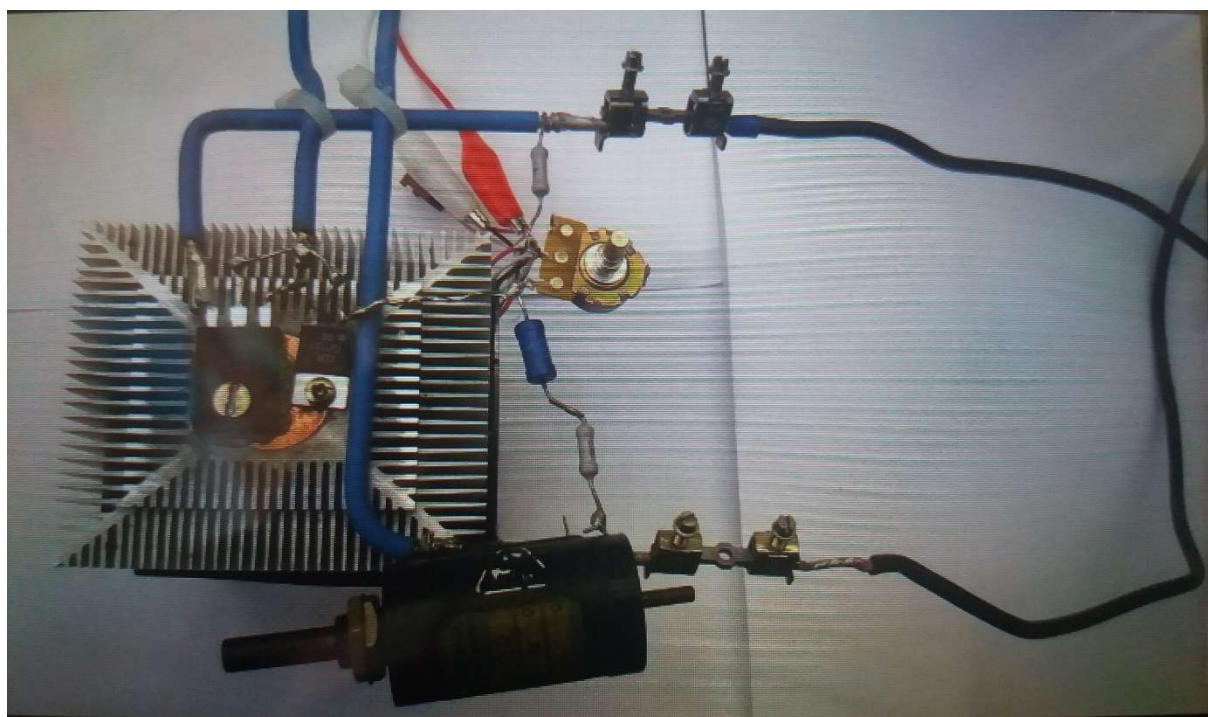


A mérési eredmények ábrázolása I.



A mérési eredmények ábrázolása II.

F2. FÜGGELÉK



A kész áramkör