



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

# Komplex mérőrendszer napelemes rendszerek vizsgálatára

TDK DOLGOZAT

*Készítette*

Girgász Péter Ákos

*Konzulens*

dr. Dülk Ivor

2022. november 1.

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezető</b>	<b>2</b>
<b>2. A napelemes rendszerek felépítése</b>	<b>3</b>
2.1. A napelemcella és -panel . . . . .	3
2.2. A napelemcella elektromos viselkedése . . . . .	3
2.3. A mérendő villamos és környezeti paraméterek, főbb specifikációk . . . . .	4
<b>3. Napelemek elektromos viselkedésének mérése</b>	<b>7</b>
3.1. Első módszer: végigpásztázás aktív elektromos műterheléssel . . . . .	7
3.1.1. A méréshez szükséges időtartam meghatározása . . . . .	8
3.1.2. A mérési elrendezés vizsgálata MATLAB-ban . . . . .	10
3.1.3. Műterheléses mérés a gyakorlatban . . . . .	15
3.2. Második mérési módszer: terhelő kondenzátor feltöltésén alapuló mérés . . .	16
3.2.1. Szimuláció MATLAB Simscape környezetben . . . . .	17
<b>4. Mérési módszerek összehasonlítása</b>	<b>19</b>
<b>5. A mérőeszköz tervezése</b>	<b>20</b>
5.1. Feszültséghatárok . . . . .	20
5.2. Árammérés . . . . .	21
5.3. Kondenzátorok kisütése . . . . .	22
<b>6. A rendszer felépítése</b>	<b>26</b>
<b>7. Környezeti paraméterek, gerjesztések mérése</b>	<b>28</b>
7.1. Mérési eredmények továbbítása a környezetmérő szenzorokról . . . . .	28
7.2. Besugárzás mérése, GHI és GTI . . . . .	30
7.3. Szélsebességmérés . . . . .	31
7.4. Panelhőmérséklet-mérés . . . . .	33
7.5. Környezeti hőmérséklet-mérés . . . . .	33
<b>8. Demonstráció</b>	<b>36</b>
<b>9. Konklúzió, jövőbeni célok, kutatási és fejlesztési irányok</b>	<b>37</b>
<b>Felhasznált irodalmak</b>	<b>38</b>

# 1. fejezet

## Bevezető

Napjainkban egyre fontosabb szerephez jutnak a megújuló energiaforrások, ezek közül kiemelten fontos szerepe van a napelemes rendszereknek. Az egyre növekvő energiaigény és a károsanyag kibocsátás csökkentésére tett erőfeszítések eredményeképp egyre több és több ilyen rendszer kerül telepítésre mind háztartási, mind ipari méretekben.

Egy olyan, laboratóriumi és terepi körülmények között is használható mérőrendszer (műszer) tervezését mutatom be, amivel a napelemes rendszerek működését befolyásoló összes lényeges környezeti hatás és a napelemek (sztringek) elektromos viselkedése együttesen mérhető. Az így nyert információ a fotovoltaikus rendszerek alábbi területein nyújthat hasznos támogatást:

- Általános oktatási és tudományos célok, vizsgálatok,
- Napelem panelek elektromos karakterizálása és minősítése,
- Napelem panel (és rendszer) modellek identifikációja és validációja,
- A már meglévő, üzemelő rendszerek diagnosztizálása,
- Üzemelő és újonnan telepítendő napelemes rendszerek optimalizációja,
- Degradációs (öregedés), árnyékolási és egyéb jelenségek vizsgálata.

A dolgozatomban bemutatom a mérőrendszer (műszer) prototípusát: a főbb követelményeket és funkciókat, a rendszer architektúráját, a releváns fizikai mennyiségeknek és magának a napelemes rendszernek a mérésére szolgáló koncepciót, illetve a feladat során tapasztalt fontosabb méréstechnikai, mérnöki kihívásokat. A projekt hosszú távú célja a fentiekben is megfogalmazott optimalizációs és tudományos, kutatási célokban való aktív közreműködés, amelyhez elengedhetetlen a – például ebben a dolgozatban bemutatott – mérőműszer és az általa gyűjtött adatok, eredmények.

## 2. fejezet

# A napelemes rendszerek felépítése

### 2.1. A napelemcella és -panel

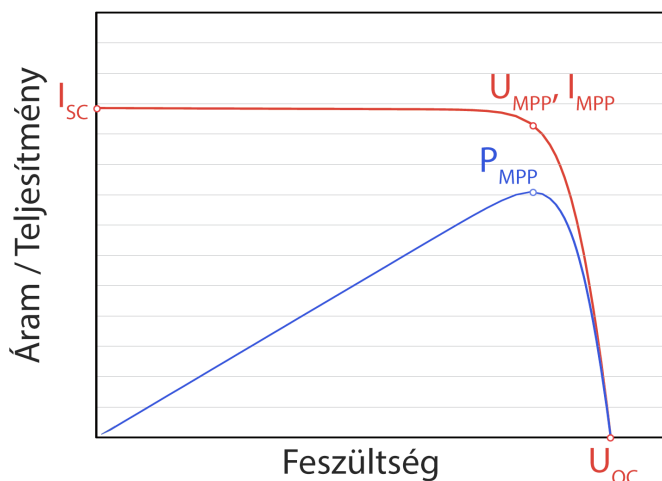
A rendszer központi eleme a napelemcella. Ez egy szilícium hordozó, amin a külső fény által megvilágítható pn átmenetet alakítanak ki, és az erre érkező fotonok hatására jön létre a számunkra hasznos villamos energia, amennyiben a cellára párhuzamosan egy terhelést kapcsolunk. A cella villamos viselkedése sok mindenben egy szilícium-diódához hasonlítható. A napelem cella röviden egy fény-elektromos átalakító, ami a beeső fény hatására DC elektromos feszültséget, megterhelve pedig áramot hoz létre.

Az egy cellán keletkező feszültség önmagában viszonylag kicsi, 0.6 V körüli érték. Ez az alacsony feszültség a közvetlen energia kinyerés (teljesítményátalakítás) szempontjából problémás, ezért általában több cellát kötnek sorosan egymással ahhoz, hogy nagyobb feszültséget lehessen elérni. Ebből a megfontolásból a napelemes rendszer legkisebb önálló egysége a gyakorlatban a napelem panel, amin általában 18, 36, 60 vagy 72 sorosan kapcsolt cella kap helyet, amivel így 11 V és 47 V közötti üresjárású feszültség érhető el. Ez már felhasználható kisfeszültségű rendszerekben, de ha a hálózatra szeretnénk táplálni vagy nagyobb teljesítményt szeretnénk elérni, akkor még nagyobb feszültségre van szükség. Ennek elérése érdekében a napelem panelek soros kapcsolásával jönnek létre az ún. sztringek (füzérék), amelyekkel 600 V, 1000 V vagy akár 1500 V névleges DC oldali rendszerfeszültség érhető el. Előbbi a háztartási, utóbbiak inkább az ipari, erőművi rendszerekre jellemző.

### 2.2. A napelemcella elektromos viselkedése

A napelem cellák, panelek, sztringek karakterisztikáját, elektromos viselkedését a feszültség-áram és a feszültség-teljesítmény görbéjükkel szokás jellemezni. Az előbbi görbe nevezetes pontjai az üresjárású feszültség ( $U_{OC}$ ) és a rövidzárási áram ( $I_{SC}$ ), az utóbbié pedig a maximális teljesítményű pont (Maximum Power Point, MPP), és az ehhez tartozó áram- és feszültségérték ( $I_{MPP}$  és  $U_{MPP}$ ). Ezeket az értékeket szinte kivétel nélkül feltüntetik a panelek adatlapjában, és a rájuk kerülő matricán is. Fontos megjegyezni, hogy ezek szabványosított körülmények között, adott teljesítményű és spektrumú besugárzás, és adott cellahőmérséklet ( $T_C$ ) mellett értendők (STC – standard test conditions –  $1000 \text{ W/m}^2$  és  $T_C = 25^\circ\text{C}$ ). Az elektromos viselkedést (U-I görbét) azonban sok tényező befolyásolja,

ezek közül a legjelentősebb a besugárzás (fény intenzitása) és a panel hőmérséklete. A besugárzott teljesítménnyel arányosan nő a cella rövidzárási árama, a hőmérséklettel pedig fordítottan arányosan változik a cella üresjárású feszültsége. Sok cella soros kapcsolása esetén pedig újabb érdekes jelenségek jönnek létre például részleges árnyékolás vagy egy cella meghibásodása esetén. Arról, hogy ilyenkor hogyan viselkedik a rendszer, már nem szolgál információval az adatlap, ezeket mérésekkel, szimulációkkal tudjuk megállapítani.



**2.1. ábra.** A napelem  $U$ - $I$  és  $U$ - $P$  görbéinek jellegzetes alakja és nevezetes pontjai

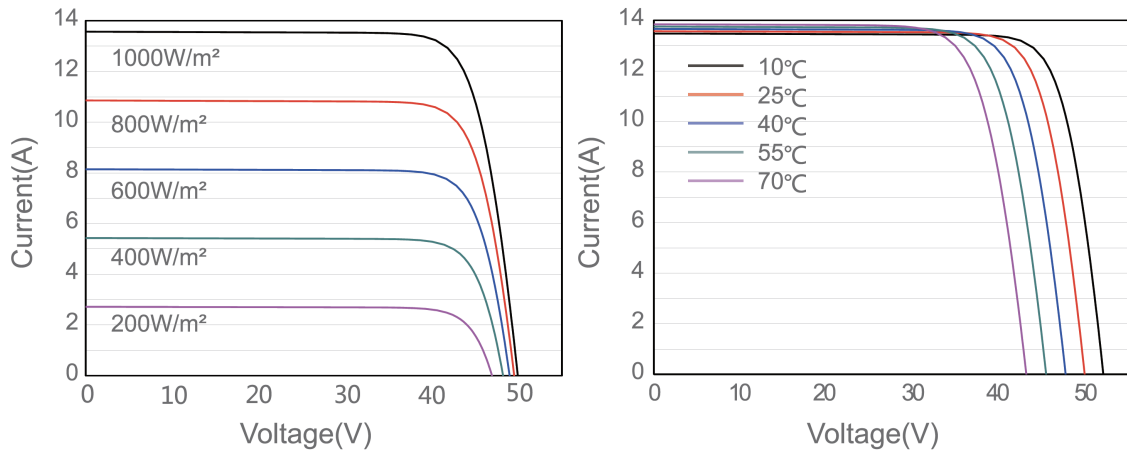
### 2.3. A mérendő villamos és környezeti paraméterek, főbb specifikációk

A legfontosabb mérés a napelem karakterisztikájának felvétele, vagyis az aktív energia-termelő térnegyedben a teljes kimenő feszültség ( $U$ ) és áram ( $I$ ) görbének a regisztrálása. A gyakorlatban ez véges, de kellően sok számú különböző munkapontban a cella  $U - I$  párjának kimérését jelenti az üresjárástól a rövidzárástig. Ahhoz, hogy ezt a görbét kontrollált módon felvehessük, tehát az  $U - I$  görbén végig mehessünk, a vizsgálandó rendszert egy erre alkalmas, változó műterheléssel kell ellátni és gerjeszteni. A műterhelésről, azaz a kigerjesztés és mérés módszeréről később a Mérőeszköz tervezése fejezetben lesz szó. Méréstechnikai szempontból a feszültség mérésére gyakorlati okok miatt két méréshatárt választottam meg:

- Egy darab, különálló panelek vizsgálatára alkalmas 60 VDC méréshatár,
- Sorosan kapcsolt panelek, azaz sztringek vizsgálatára alkalmas 1000 VDC méréshatár.

Az árammérés mindkét esetben 15 A-ig megy, ez csakugyan a piacon elérhető panelek alapján lett megválasztva. A cella árama a besugárzás mellett az alapterületével függ össze, a legnagyobb cellákkal készülő panelek (és az ilyenekből álló sztringek) sem lépik át ezt a határt jelenleg, de talán a közeljövőben sem.

Szintén lényeges a besugárzás mérése. A kitűzött hosszú távú célokhoz szükséges a vízszintes síkra érkező globális, összesített besugárzás (GHI – Global Horizontal Irradiation)



**2.2. ábra.** Az  $U$ - $I$  görbe változása a besugárzás (balra) és a cellahőmérséklet (jobbra) hatására. Grafikonok forrása: JASolar JAM72S30 525-550 panelek adatlapja.

és a mérendő napelem síkjába érkező besugárzás mértékének ismerete is. Ezekre a célokra rendelkezésre állnak nagy pontosságú (és igen drága) mérőberendezések, azonban én saját mérőeszközt készítek. Bár a pontosság várhatóan valamivel kisebb lesz egy profi berendezéshez képest, de a vizsgálatok nagy részéhez ez pontosság is elegendő, szükség esetén pedig természetesen precízebb műszerek használatának sincs akadálya.

A cellák hatásfokát, az  $U - I$  görbe alakját nagy mértékben befolyásolja a cella hőmérséklete, amit mindenképp mérni kell és vele pedig a környezeti hőmérséklet is. A környezeti hőmérséklet ugyan közvetlenül nem szükséges a napelem panel karakterizálásához (a panel hőmérsékletét közvetlenül mérjük), de hasznos információt szolgáltat a mérőrendszer esetleges termikus kompenzációjához, illetve későbbi termikus napelem modellek identifikációjához, validációjához. Hasonló elgondolás alapján a szélsébséget is szükséges mérni. A hőmérsékleti és szélsébség mérés határait az OMSZ alapján hazánkban uralkodó [12] környezeti feltételek és általános irodalomkutatás alapján választottam meg.

Globális besugárzásra, szélsébségre és környezeti hőmérsékletre vonatkozó mérések az ipari méretű erőművek többségében rendelkezésre állnak, akár visszamenőlegesen is. Ezeket az adatokat kiegészítendő készülnek a környezeti paramétereket mérő eszközök, mivel az egyes panelek hőmérséklete igen fontos, de erről nem szokott rendelkezésre állni adat, illetve egy konkrét, mérés alatt lévő panel mérőleges besugárzása is igen fontos, de erre sincs központi adat. A panelek, sztringek villamos paramétereiről adatlapok vannak, mérési eredmények nem igazán állnak rendelkezésre. Esetleg 5 perces vagy negyedórás bontásban az aktuális munkaponti feszültség, áram és teljesítmény adatokhoz lehet hozzáférni, de számunkra ezek az adatok nem elegendők.

	<b>Mérési tartomány</b>	<b>Pontosság</b>
<b>Feszültség</b>	0 - 60 V / 0 - 1000 V	0.1% / 0.1%
<b>Áram</b>	0 - 15 A	0.1%
<b>Környezeti hőmérséklet</b>	-15 °C - 60 °C	1%
<b>Panelhőmérséklet</b>	-15 °C - 85 °C	1%
<b>Globális besugárzás - GHI</b>	0 - 1500 W/m <sup>2</sup>	1%
<b>Merőleges besugárzás - GTI</b>	0 - 1500 W/m <sup>2</sup>	1%
<b>Szélesség</b>	0 - 120 km/h	1%

**2.1. táblázat.** *Főbb mérési specifikációk*

## 3. fejezet

# Napelemek elektromos viselkedésének mérése

A panelek, sztringek (device under test - DUT) villamos karakterisztikáinak mérése áll a téma középpontjában. A méréshez elő kell állítani a DUT összes munkapontját. A napelem a feszültség-áram koordinátarendszer első, második és negyedik síknegyedében tud működni, ezek közül normál üzemi körülmények között az első síknegyedben van a munkapontja, tehát ennek a mérésére szorítkozok. Előfordul a munkapont másik két síknegyedbe kerülése is, ez azonban kevésbé fontos, a jövőbeli tervek között szerepel ennek a megvalósítása.

Az első síknegyedben a napelem termelőként viselkedik, tehát (termelői pozitív irányrendszert használva) a feszültsége és árama is pozitív. A mérések során ideális esetben az összes munkapont rögzítésre kerülne, gyakorlatilag a cél minél több pont felvétele. A teljes feszültség-áram vagy feszültség-teljesítmény görbén nagyjából egyenletesen elosztva néhány száz pont már megfelelő felbontást ad.

Az üresjárás és a rövidzár között létrejövő munkapontok mindegyikéhez egy-egy látszólagos lezáró ellenállás tartozik, tehát triviális megoldásnak tűnik egy változtatható ellenállással lezárni a DUT-ot, és az ellenállásérték változtatása mellett folyamatosan mérni a feszültséget és az áramot. A gyakorlatban egy ilyen mérési elrendezés ugyan működőképes, de nem igazán praktikus. A manapság használt eszközökben két féle mérési megoldást szoktak használni, a következőkben ezek vizsgálatát mutatom be.

### 3.1. Első módszer: végigpásztázás aktív elektromos műterheléssel

Az elektromos műterhelés egy olyan eszköz, ami egy villamos fogyasztót helyettesít, rendszerint rádiófrekvenciás, audio, akkumulátoros rendszereket, tápegységeket vagy épp napelemes rendszereket vizsgálnak, minősítenek velük. Az első általam vizsgált  $U - I$  karakterisztika felvételi módszer egy ilyen műterhelés használatán alapul, természetesen saját, a kitűzött paramétereknek megfelelő műterhelés fejlesztésével.

Bár léteznek más megoldások is, legegyszerűbb a mérendő rendszerből kivett energiát hővé alakítani. Erre egy megoldás lehet több, különböző értékű ellenállás használata, amiket többféle kombinációban a DUT-ra lehet kapcsolni megfelelő kapcsolóelemekkel. Ezzel



talán a legnagyobb probléma, hogy csak diszkrét terhelőellenállásokat, így diszkrét munkapontokat lehet vele előállítani, ráadásul jelentősen nő az alkatrészek száma a megkívánt munkapontok számával. Tranzisztor használatával viszont dinamikusan változtatható viszonylag széles határok között a munkapont [9].

Fontos megemlíteni két pontot a kitűzött specifikációból. A maximális üresjárási feszültségre vonatkozó kritériumnak megfelelően kell megválasztani a tranzisztort, mivel nyilván el kell viselnie a rákapcsolt feszültséget. Főleg ipari erőművi környezetben pedig az üresjárási feszültség tényleg az 1000 V közelében járhat, és a rövidzárási áram is közelítheti a 15 A-t, bár ezek a szélsőséges értékek a gyakorlatban ritkán fordulnak elő, főleg egyszerre. Figyelemmel kell arra lenni, hogy itt valódi, aktív termelő rendszereket mérünk, ahol ezek a teljesítmények tényleg létrejönnek, tehát műterhelésnek bírni kell a 10-12 kW körüli csúcsteljesítményt, még ha csak egy-egy mérési idejére is, illetve a mérés során keletkező teljes energiamennyiség által fejlesztett hő is.

A tranzisztoros méréshez bipoláris vagy tervezérelt tranzisztort lehet használni. Az általános bipoláris tranzisztorok nem felelnek meg az 1000 voltos specifikációnak, mivel legjobb esetben is 800 voltos kollektor-emitter feszültséget viselnek el. Marad a bipoláris tranzisztorok szigetelt gate-tel rendelkező verziója, az IGBT és a tervezérlésű tranzisztor, azok közül is főleg a SiC verziók. Sajnos jelenleg a választást nem csak a tranzisztorok paraméterei és viselkedésük határozzák meg, hanem a piaci elérhetőségük is. Emiatt IGBT alkalmazása mellett döntöttem, mivel abból vannak megfelelő paraméterekkel rendelkező típusokból elérhető raktárkészletek.

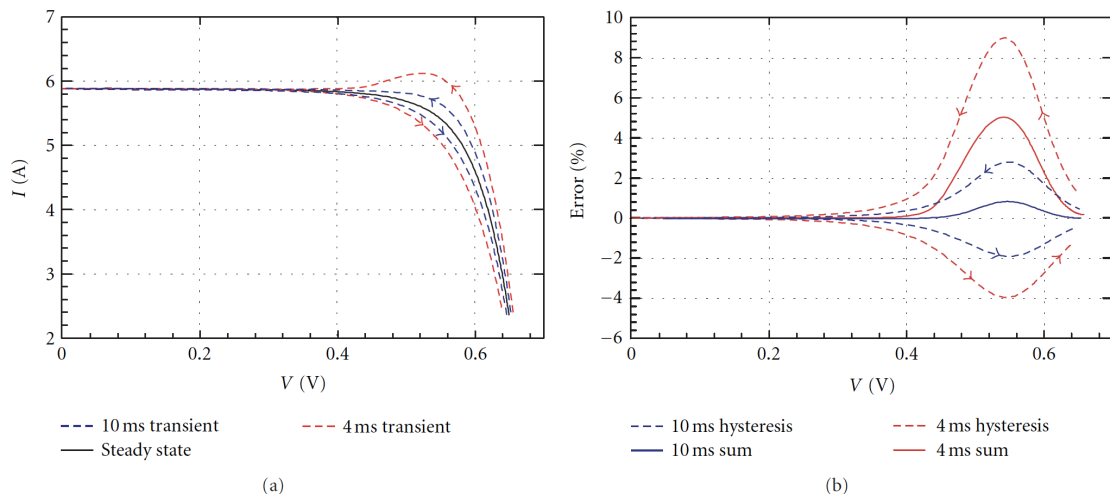
### 3.1.1. A méréshez szükséges időtartam meghatározása

Amellett, hogy a mérőtranzisztornak (vagy tranzisztoroknak) el kell tudni viselni a csúcsteljesítményt, lényeges a mérés során létrejövő energia mennyiségének kézben tartása is.

Mivel a nagymennyiségű hővé alakított energia hűtési kihívásokat vet fel, ezért a mérés időtartamát minimalizálni kell. A mérési idő minél rövidebben tartása amiatt is fontos, hogy a környezeti paramétereket állandónak tudjuk tekinteni a mérés során, mivel a sugárzásintenzitás és a hőmérséklet változása befolyásolja a mérendő görbét. Terepi körülmények esetén könnyen belátható, a nap és a felhők mozgása miatt dinamikusan változhat a besugárzás. Laboratóriumi körülmények között az STC szerinti besugárzást Napszimulátorral állítják elő, ez tipikusan nem képes néhány 100 milliszekundumnál tovább fenntartani az előírt teljesítményt. A cellahőmérséklet változása ugyan lassabb, de a napelem határfokából adódó melegedés, a környezeti hőmérséklet megváltozása és a szél miatt az hosszabb mérés alatt az is számottevő mértékben változhat.

Ugyanakkor a mérési idő nem csökkenthető minden határon túl. Egyrészt behatárolja a feszültség- és áramértékeket mérő eszköz (AD átalakító) mintavételi gyakorisága, ugyanis a kitűzött néhány száz mintát tartani kell. Ennél is fontosabb a cellák parazita kapacitása. Nagyon rövid idő alatt végrehajtott mérés esetén a parazitakapacitás jelentős hibát okoz a mérésben.

Az 3.1 ábrán folyamatos vonallal látható a görbe alakja egy monokristályos cella ese-



**3.1. ábra.** Az  $U$ - $I$  görbe hibája a mérési idő függvényeként ([1] - Figure 1)

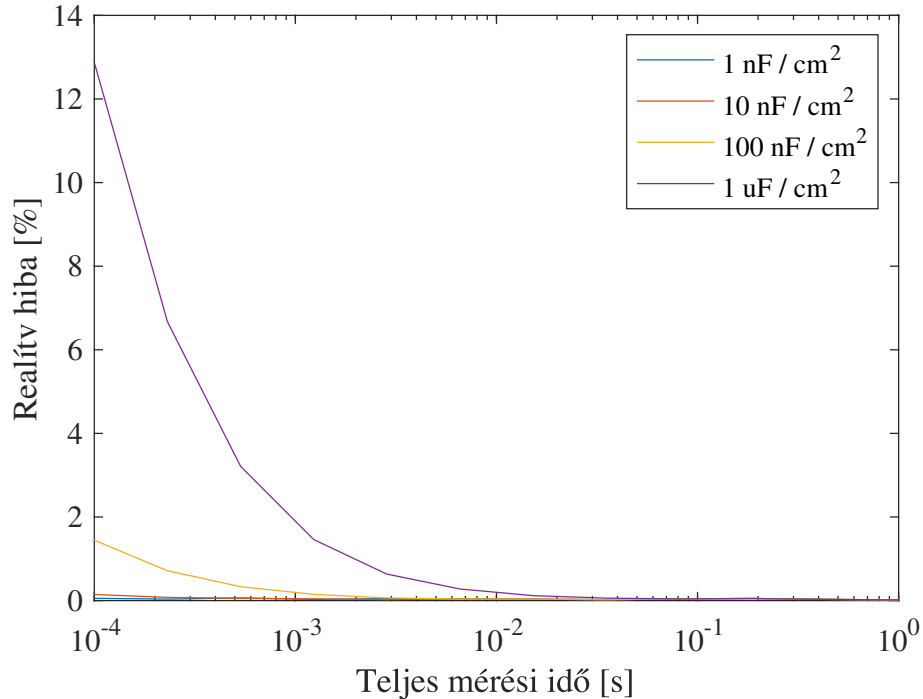
tén, ha – természetesen állandó környezeti feltételek mellett – minden munkapontban elég hosszú ideig várakozunk ahhoz, hogy elérjük az állandósult állapotot. Kék és piros szaggatott vonallal látható, ha a teljes mérést (egy irányba) 4 ms vagy 10 ms alatt hajtjuk végre. Üresjárásból rövidzár felé mérve a valós feszültség-áram görbe „fölé” megy a mérési eredmény, visszafelé pedig alá, a parazitakapacitás kisülése, illetve töltődése miatt.

Hacsak nem várakozunk minden pontban végtelen hosszú ideig, a parazitakapacitás hibát fog okozni, azonban választható olyan mérési időtartam, ahol a hiba egy megkívánt határérték alá csökken. Műterheléses mérés esetén a mérés mindkét irányba végrehajtható, ezt kihasználva a két görbe különbségéből ellenőrizhető, hogy mekkora hibával mértünk.

Elképzelhető lenne olyan megoldás, hogy mindkét irányba végig menve a görbén a kelténél gyorsabban hajtjuk végre a mérést, akár többször is, különböző időtartamokkal, majd az eredménypárokat felhasználva határozzuk meg a valódi görbét. Ez azonban nem tehető meg egyértelmű módon ([1]), tehát mindenképp megfelelő hosszúságú mérési időt kell alkalmazni.

MATLAB és Simscape segítségével elkészítettem a mérési elrendezés modelljét, és szimulációval megvizsgáltam, hogy mekkora mérési hibát okoz a cella parazitakapacitása a mérési idő és a kapacitás függvényében. [1], [2] alapján látható, hogy a parazitakapacitás a cella alapterületétől függ. Sajnos a panelek adatlapjában nem szerepel parazitakapacitásra vonatkozó adat, és az interneten sem lehet sok adatot fellelni a tipikus értékekkel kapcsolatban, mivel ennek a normál üzem szempontjából nincs jelentősége. A két említett (és néhány másik) publikáció eredményei alapján nem számítok  $100 \text{ nF/cm}^2$ -nél nagyobb kapacitásra egy átlagos panelnél [1], [2], [3], [4], de egy nagyságrenddel nagyobbra is végeztem szimulációt. A mérendő cella mérete  $10 \times 15 \text{ cm}$  volt. A relatív hibát az [1]-ben javasolt módszerrel határoztam meg, tehát az azonos lezáróellenállásokhoz tartozó pontokat hasonlítottam össze, és ezen hibáknak vettem a maximumát.

A szimuláció eredménye a 3.2 ábrán látható. A továbbiakban 100 ms körüli mérési időtartammal fogok tervezni, mivel még  $1 \mu\text{F/cm}^2$  kapacitás esetén is csak 0.5% alatti hibát okoz a panel parazitakapacitása. Ahogy korábban említettem, a minimális mérési



**3.2. ábra.** *Mérési hiba a cella parazitakapacitása függvényében, szimulációval meghatározva*

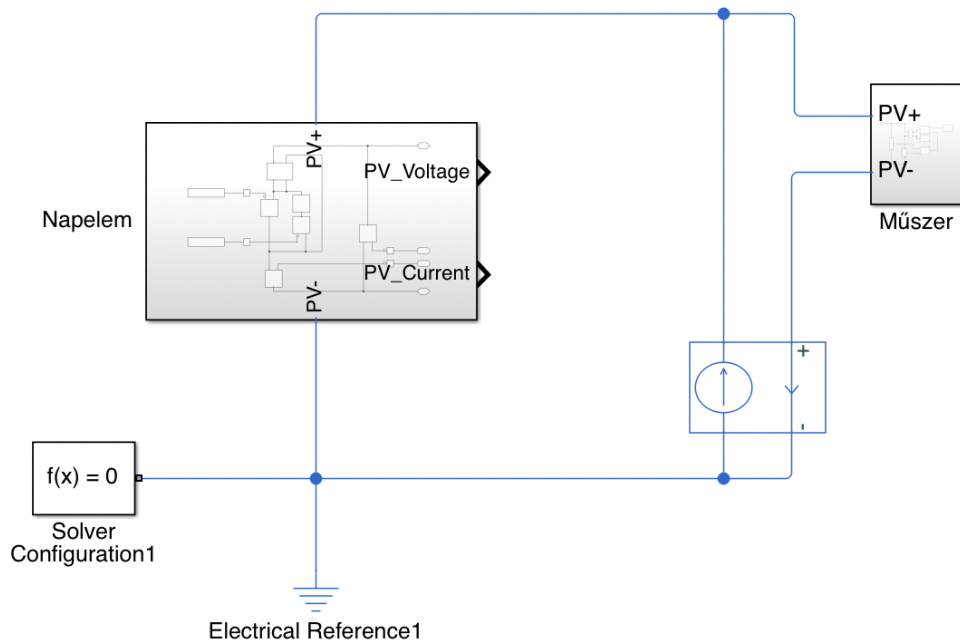
idő szempontjából az AD átalakító maximális mintavételi gyakorisága is mérvadó. Egy 24 bites szigma-delta AD átalakítót választottam a feladatra. Ha 100 ms alatt 1000 mintát szeretnék venni, akkor 10000 minta/másodperc gyakoriságra van szükség, ezt a választott AD átalakító 22 bites effektív bitszámmal teljesíteni tudja, tehát megfelelő lesz a 100 ms mérési időtartam.

### 3.1.2. A mérési elrendezés vizsgálata MATLAB-ban

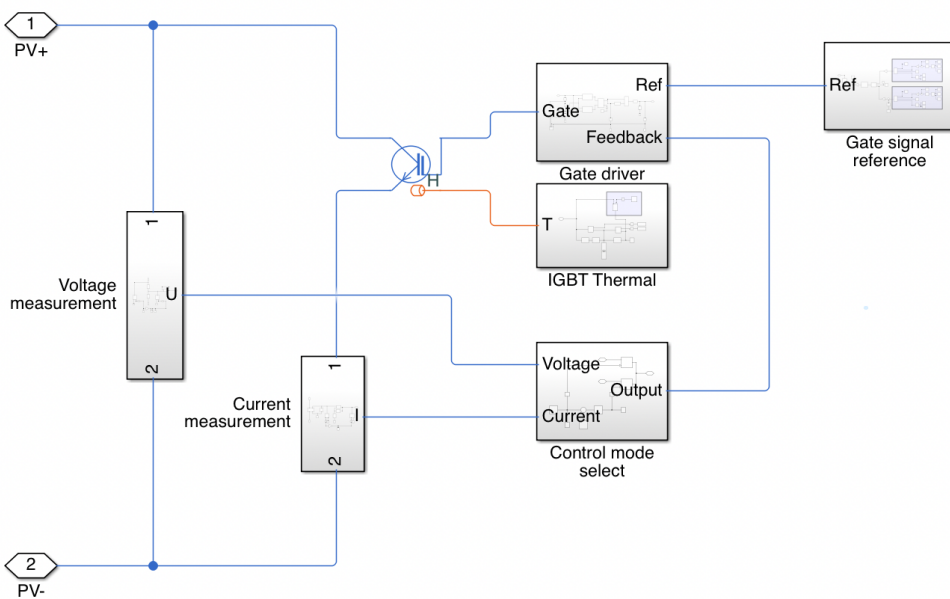
A tranzisztoros mérési módszer esetén a két komoly kihívás vetődik fel: a tranzisztorok melegedése és a rendszer szabályozása a görbe felvételéhez. Ezek megoldására szintén MATLAB Simscape szimulációkat használtam.

A szimuláció alapvető felépítését a 3.3 ábra mutatja be. Két fő blokk van, a bal oldali a mérendő panelt vagy sztringet szimulálja az általam megadott paraméterek alapján. Itt a Simscape beépített solar cell blokkját használtam fel, ami egy elég jó pontosságot biztosító két-diódás modellt valósít meg [5], [14]. Kiegészítettem még a blokkot egy kondenzátorral, amivel a parazitakapacitás hatását modelleztem, mivel ezt alapesetben nem tartalmazza a blokk.

A másik blokk magát a műszert szimulálja. Itt egyetlen tranzisztort használok a szimulációban, viszont a valóságban nyilván nem fogja tudni egyetlen tranzisztor végrehajtani a mérést az erőművi sztringeken jelentkező teljesítmények esetében. Ezt a gyakorlatban párhuzamosan kapcsolt tranzisztorokkal lehet megoldani, a szimulációban pedig egy áramvezérelt áramforrást használtam ahhoz, hogy a párhuzamosan kapcsolt ágak hatását modellezem. Így egyszerre csak egy tranzisztor vizsgálom, de a DUT-ra a teljes terhelés kerül.

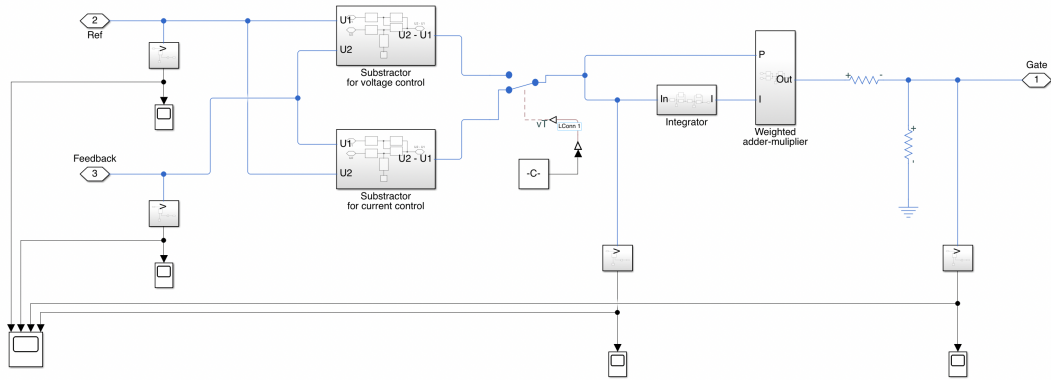


3.3. ábra. A szimuláció alapvető felépítése



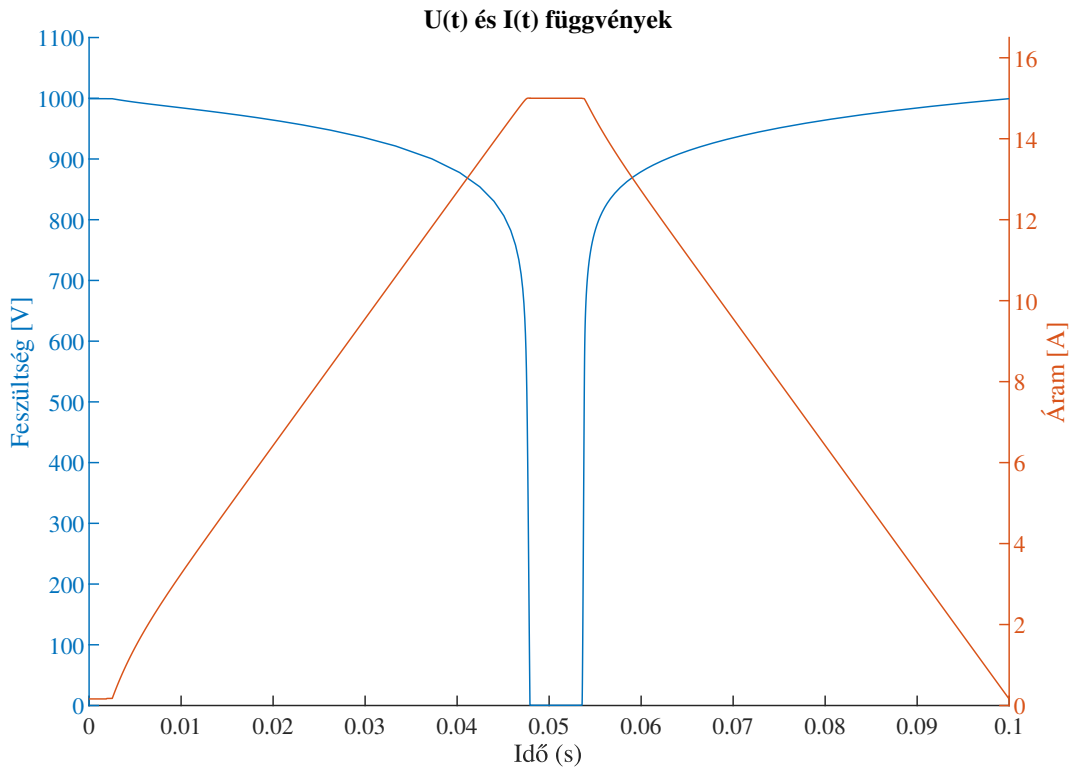
3.4. ábra. A műszer felépítésének modellje

A 3.4 ábra mutatja a műszer belső felépítését modellező áramkört a Simscapeben. A feszültségmérést egy egyszerű ellenállásosztóval és buffer erősítővel valósítottam meg, míg az árammérést egy nem invertáló erősítő kapcsolással. Egy analóg, PI típusú szabályzó ezeket a jeleket felhasználva irányítja a tranzisztort a Gate driver modulban megvalósítva, a Gate signal reference modulból kiadott referenciajel alapján.



3.5. ábra. A szabályozó felépítése

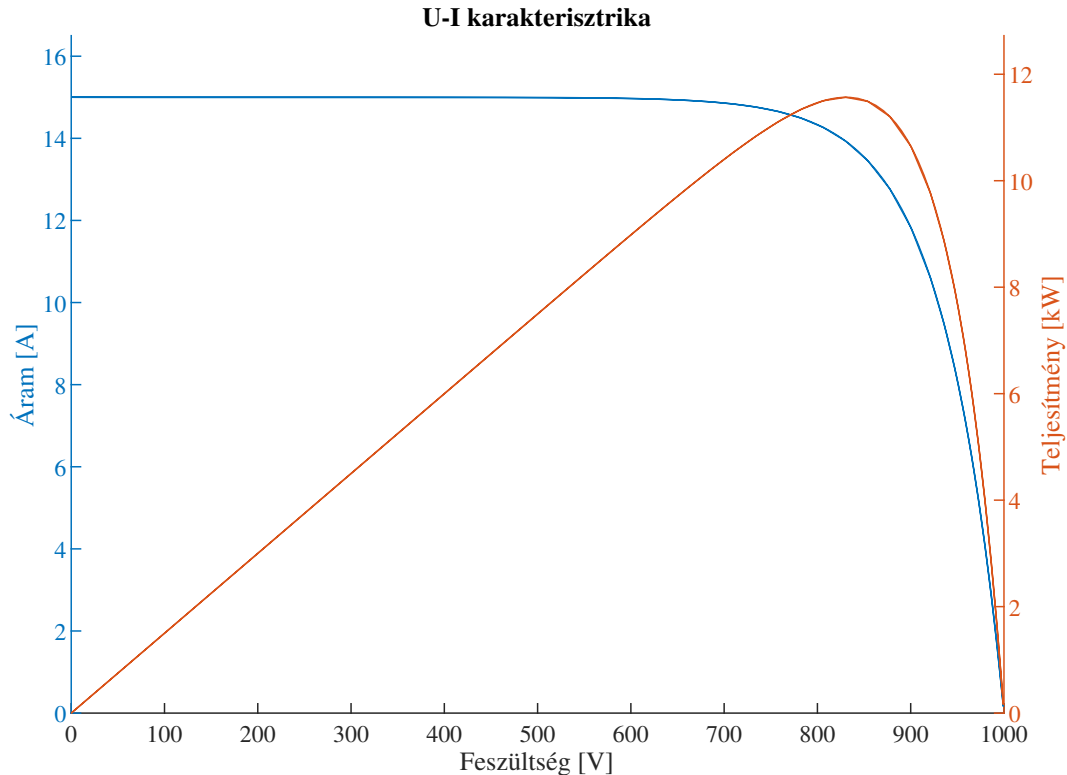
Az 3.5 ábrán látható a Gate driver modulban lévő teljesen analóg, művelti erősítővel megvalósított PI szabályozó, ami feszültségre és áramra is tudja szabályozni a rendszert.



3.6. ábra. Mérési szimuláció, a mért sztring feszültség- és áram-idő függvényei

A PI szabályozó robusztusságának köszönhetően rövid hangolás után már elég jó eredményeket lehet elérni, ezeket mutatja a 3.6 és 3.7 ábra. A mérendő sztring modelljének paraméterei a műszerrel mérni kívánt legnagyobb értékek, tehát 1000 V és 15 A voltak. A szabályozás áramra történt háromszög alapjellel, ez a 3.6 ábrán jól látható. A tetején lévő lecsapást az okozza, hogy a sztring rövidzárási árama 15 A, de alapjelnek egy kicsivel nagyobb csúcsertékű háromszögjelet állítottam be.

Megfigyelhető, hogy az áram eleinte nulla, majd hirtelen felugrik 1 A körüli szintre. Ezt az okozza, hogy a szabályozó beavatkozási jelének először el kell érnie az IGBT gate-



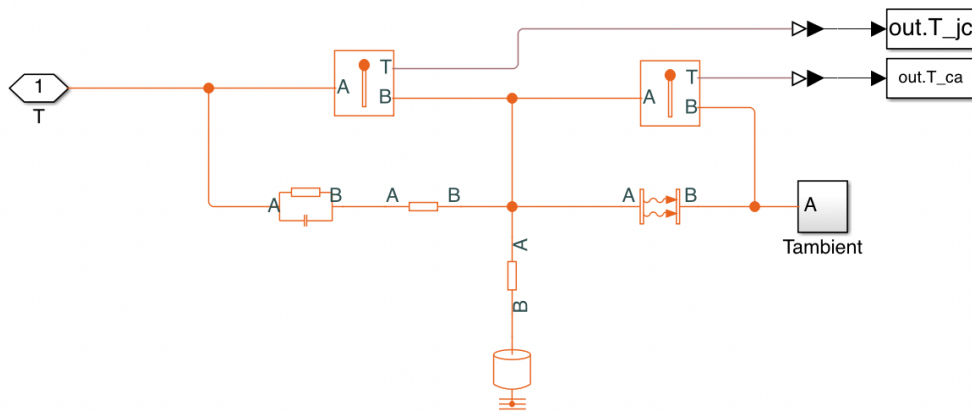
**3.7. ábra.** Mérési szimuláció, feszültség-áram és feszültség-teljesítmény görbék az 3.6 ábrán látható időfüggvények alapján számítva

source küszöbfeszültségét ( $U_{GS,th}$ ), hogy elkezdjen kinyitni, addig nem fog áram folyni rajta keresztül a szivárgó áramon kívül. Ehhez viszont az szükséges, hogy az integráló tagban megjelenjen akkora hiba, amivel már felhúzza a gate feszültségét a megfelelő szintre. Ezt a jelenséget azzal tudtam kiküszöbölni, hogy először egy minimális, néhány 10 mA-es alapjelet adtam ki, majd megvártam, míg a tényleges áram eléri a beállított értéket (tehát a hiba egy adott szint alá csökken), majd ezután indítottam el a háromszögjelet. Ezzel el tudtam érni, hogy a szabályzó először megtalálja az  $U_{GS,th}$  küszöbfeszültséget, majd onnan indítottam a tényleges mérést.

A görbe felvétele már megtörtént a szimulációban, viszont most jön képbe az IGBT thermal modul, amiben a tranzisztor melegedését szimuláltam.

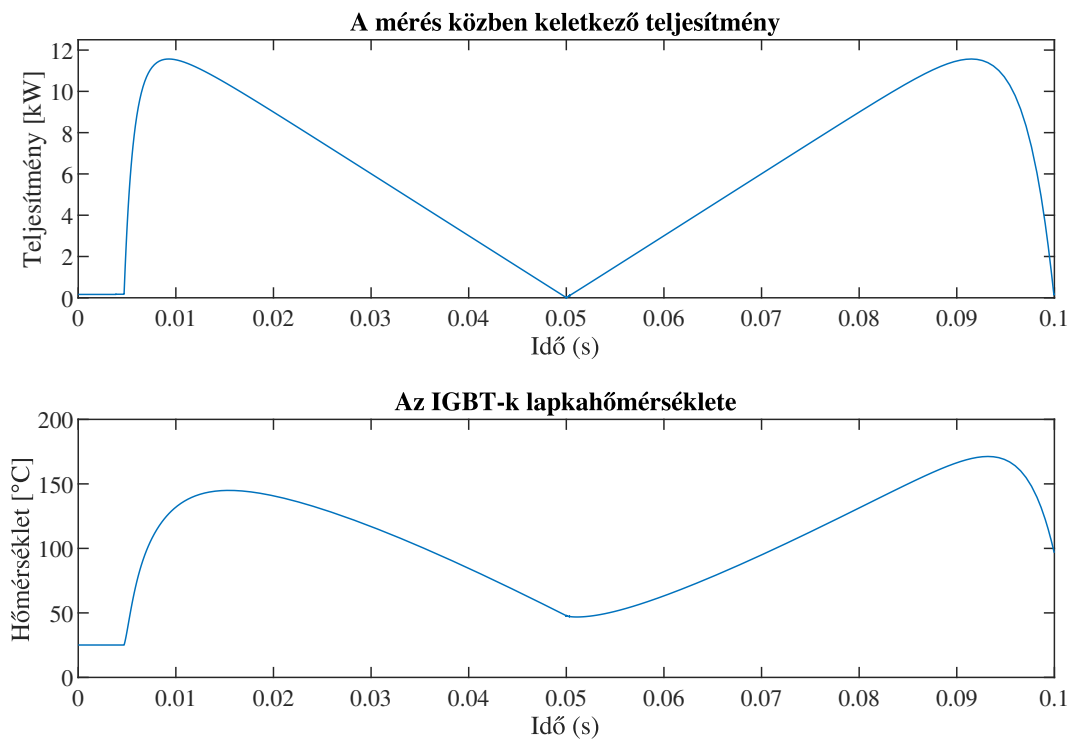
Megfelelő IGBT-ből is csak néhány típus érhető el a piacon, ezeknek viszont szerencsére az adatlapjában meg van adva a Foster termikus modelljük paraméterei, ez a junction-case átmenet viselkedését adja meg. A Foster-modell használatával ráadásul nem csak az álladósult állapot számítható, hanem a tranzienis viselkedés is. A tranzisztor hőleadó felülete belül a kollektor lábbal van összekötve, tehát megjelenik rajta az 1000 voltos feszültség. Annak érdekében, hogy ez a hűtőbordán ne jelenleg meg, olyan hővezető anyagot kell alkalmazni, ami egyúttal villamos szigetelést is biztosít. Ez a hőátadó anyag viszont további hőellenállást jelent a tranzisztor és a hűtőboroda között, így ezt is figyelembe vettem a modellben.

A célnak megfelelő tulajdonságokkal rendelkező IGBT-k TO-247-es tokozásban kaphatók. Ennél a tokozásnál a hővezetés a hátsó hőleadó felület felé több mint két nagyság-



**3.8. ábra.** Az IGBT thermal modul Simscape-ben

renddel nagyobb, mint a tok többi része felé. Emiatt a számításoknál azzal a közelítéssel éltem, hogy a tranzisztor nem ad le a környezeti levegőnek hőt, kizárólag a hűtőbordának.



**3.9. ábra.** Az IGBT-k összesített pillanatnyi teljesítménye és lapkahőmérséklete egy mérési ciklus alatt

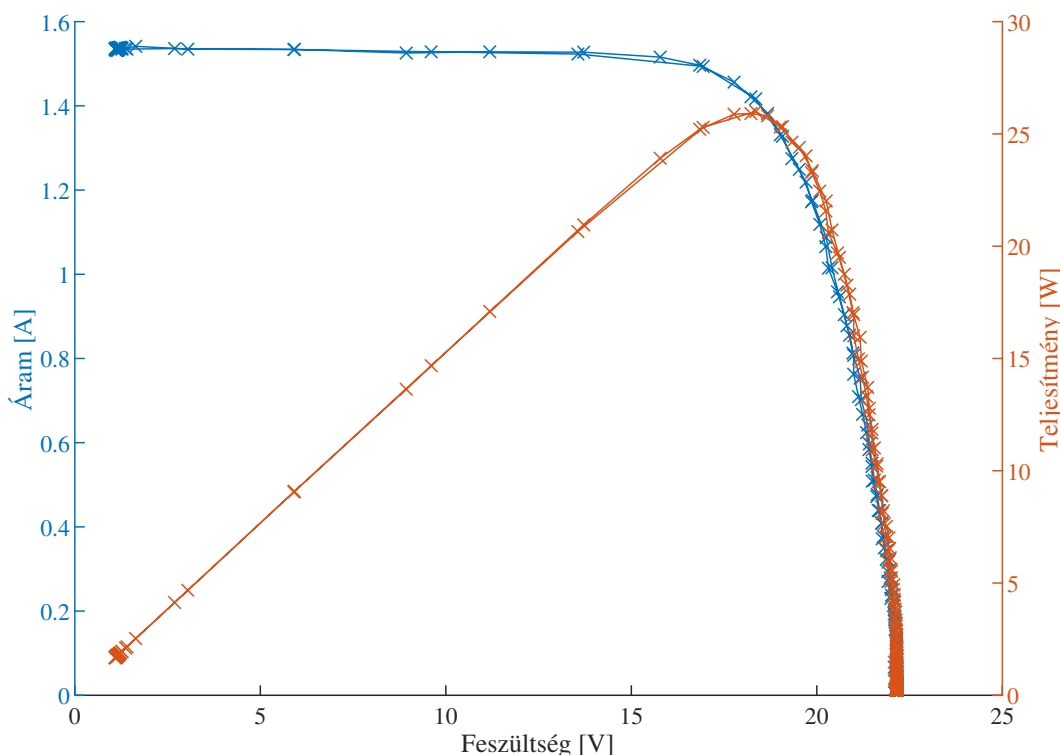
A szimuláció alapján azt határoztam meg, hogy a kívánt paraméterek mellett 48 darab IGBT-re van szükség. Ez elég költséges és helyigényes, ugyanakkor előnye, hogy az áram jól megoszlik közöttük (312,5 mA a csúcs tranzisztoronként), így a maradékfeszültség alig éri el a 100 mV-ot, tehát elég jól megközelíthető a rövidzár mérésakor. Az IGBT-k esetén a párhuzamosítás a  $V_{CE}$  pozitív hőmérsékleti együtthatója miatt nem probléma.

### 3.1.3. Műterheléses mérés a gyakorlatban

A mérési módszer gyakorlati teszteléséhez elkészítettem egy deszkamodell jellegű mérési összeállítást egy IGBT felhasználásával. Ezzel 30 W-os polikristályos napelempanelket vizsgáltam.

A mérési elrendezés annyiban különbözik a Simscape szimulációban lévőttől, hogy nincs benne szabályozási kör, hanem a mikrokontrollereben lévő DA átalakító által szolgáltatott alapjel egy műveleti erősítőn keresztül közvetlenül kerül az IGBT gate-jére, tehát a feszültségre vagy áramra szabályozás helyett egy egyszerű vezérlés került megvalósításra.

Az összeállításhoz egy STM32F446-os mikrokontrollert tartalmazó Nucleo fejlesztői kártyát, egy HG11N120CND típusú IGBT-t és LM324 műveleti erősítőket használtam fel.

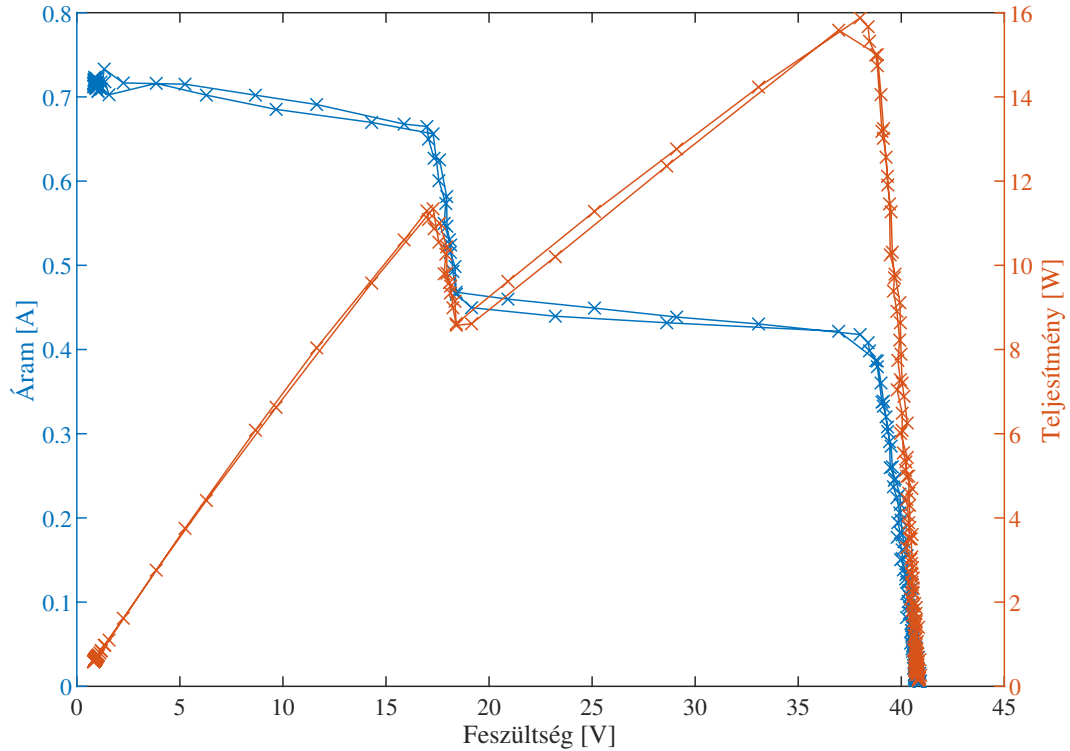


**3.10. ábra.** A műterheléses módszer deszkamodelljével felvett feszültség-áram és feszültség-teljesítmény görbék napos időben egy 30W-os polikristályos napelempanelen

A 3.10 ábrán napos időben látható egy darab panel feszültség-áram és feszültség-teljesítmény karakterisztikája. A mérési módszer láthatóan működőképes. A direkt vezérlés miatt a görbe üresjárás felé lévő részén sűrűbben vannak pontok, míg a rövidzár felé haladva egyre ritkábban, mivel az áram lineáris változtatásához a gate-emitter feszültséget exponenciálisan kellene változtatni. A szabályozóval megvalósított verzióban a pontok egyenletesen helyezkednek el a görbe mentén, mivel ott a szabályozási kör biztosítja a megfelelő  $U_{GS}$  feszültséget.

Ideális esetben egyébként nem okoz jelentős mérési hibát ez a jelenség, mivel a görbe a rövidzárhoz közeledve gyakorlatilag egyenes, tehát a viszonylag távol elhelyezkedő pontok nem jelentenek nagy problémát. Más a helyzet akkor, ha részeges árnyékolás vagy hotspot jelenség van, mivel ilyenkor ez a szakasz közel sem ilyen egyenes.





**3.11. ábra.** A műterheléses módszer deszkamodelljével felvett feszültség-áram és feszültség-teljesítmény görbék napos időben, de részleges árnyékolás mellett két darab sorosan kapcsolt 30W-os polikristályos napelempanelen

A 3.11 ábrán két sorba kapcsolt panelből álló sztringen végzett mérés eredménye látható részleges árnyékolás mellett. Ez a mérés néhány nappal a 3.10 ábrán látható mérés után készült, más környezeti paraméterek mellett, enyhén felhős időben. A breadboardon összerakott viszonylag pontatlan mérés ellenére egész szépen látható, hogy az árnyékolás nélküli panel nagyjából 450 mA áramot tud leadni, míg a másik csak 200 mA körül, tehát nagyjából a fele lehetett árnyékolásban.

### 3.2. Második mérési módszer: terhelő kondenzátor feltöltésén alapuló mérés

Ennél a mérési módszernél egy kondenzátort alkalmazunk, amit kisütött állapotban a mérendő panel vagy sztring kapcsaira csatlakoztatunk. A kondenzátor kezdetben rövidzárként viselkedik, a feltöltés végére pedig szakadásként, a kettő között pedig a DUT minden munkapontja létrejön. A kondenzátor feszültsége és árama közötti összefüggést az 3.2.1 képlet írja le, itt  $u_C$  a kondenzátor feszültsége,  $i_C$  az árama. A kondenzátoros módszer esetén nincs szükség aktív szabályozásra, a pásztázás az előbbi összefüggés miatt automatikusan megtörténik.

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(\tau) d\tau \quad (3.2.1)$$

A piacon rengeteg 1100-1200 voltos feszültségű elektrolit- és fóliakondenzátor elérhető, tehát az 1000 voltos specifikáció nem jelent problémát.

A kondenzátoros mérés esetén a mérési idő a kondenzátor kapacitásától, és a napelem villamos tulajdonságaitól függ, és jól becsülhető a 3.2.2 képlettel [6], ahol  $C$  a mérőkondenzátor kapacitása,  $I_{SC}$  a napelem rövidzárási árama,  $U_{OC}$  pedig az üresjárási feszültsége.

$$t_m = 2C \frac{I_{SC}}{U_{OC}} \quad (3.2.2)$$

A mérési idő megválasztására nagyrészt itt is a műterheléses mérésnél bemutatott megfontolások érvényesek. A mérési idő minimumát ugyan úgy a mintavétel és a parazita kapacitás határoolja be. Ebben az esetben a hosszú mérési idő inkább csak a környezeti paraméterek állandósága szempontjából érdekes, mivel az energia itt első körben a kondenzátorban tárolódik el, közvetlenül nem képződik belőle hő. Annak érdekében, hogy minél sűrűbben lehessen méréseket csinálni, és biztosan ne legyen probléma a környezeti paraméterekből, a mérés hosszát most is 100 ms-ra választottam meg.

Adott mérési idő esetén a szükséges kapacitás

$$C = \frac{t_m U_{OC}}{2 I_{SC}} \quad (3.2.3)$$

amit nem csak a kiválasztott mérési idő befolyásol, hanem az üresjárási feszültség és a rövidzárási áram is.

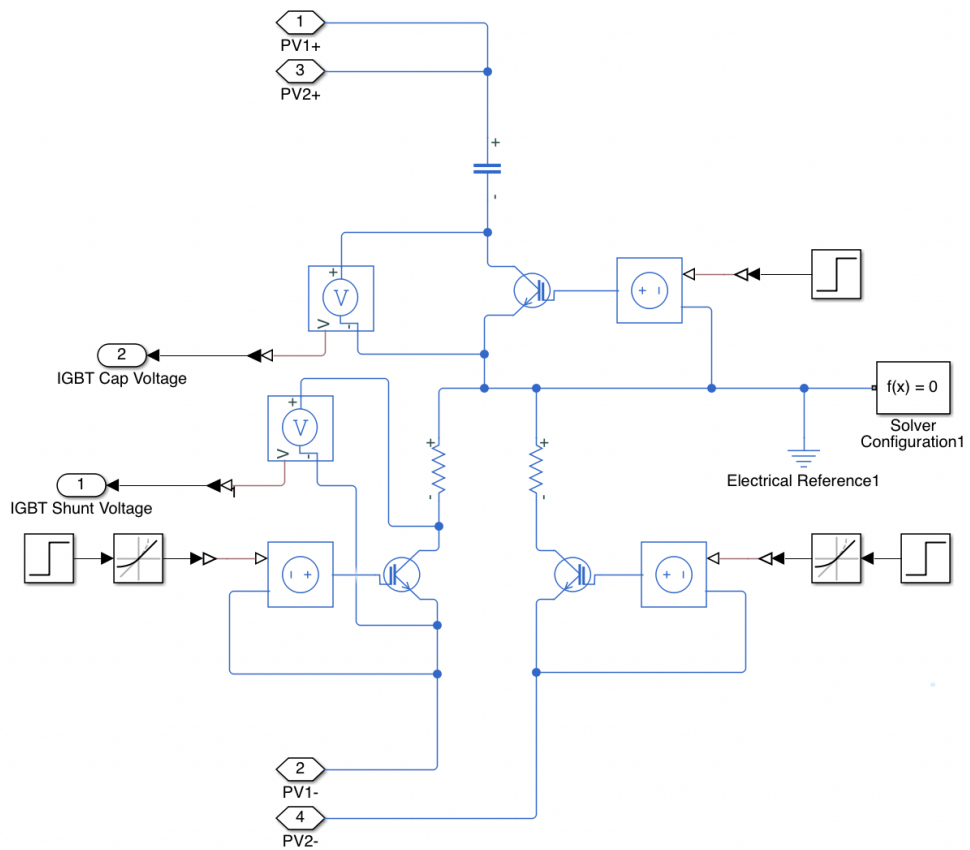
Ha egy gyárban a gyártás végén elvégzett flash-teszthez szeretnénk mérőberendezést tervezni, akkor ez alapján meg lehetne választani a szükséges kondenzátort, de egy univerzális célú műszerben mind a feszültség, mind az áram széles határok között változik, tehát egy kondenzátor nem elegendő.

### 3.2.1. Szimuláció MATLAB Simscape környezetben

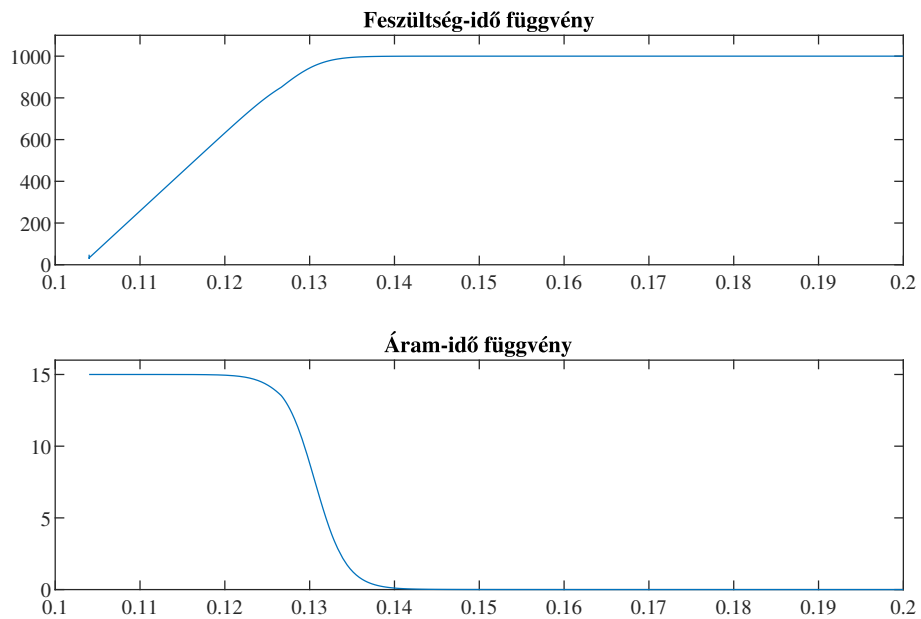
A műterheléses mérés modellezéséhez felhasznált Simscape modellt átalakítottam a kondenzátoros módszer vizsgálatához, ezt a 3.12 ábra mutatja be. Itt a nagy különbséget a műszerben a tranzisztor kondenzátorral való helyettesítése jelenti.

A szimuláció alapján látható a mérési eljárás működőképessége, és a fent bemutatott, a mérési idő becslésére szolgáló képlet helyessége.

Megfigyelhető, hogy a műterheléses, szabályozott mérési eljárással szemben itt a görbék alajka kevésbé szabályos, mivel azt a magára hagyott rendszer alakította ki, a fent bemutatott karakterisztikája szerint.



3.12. ábra. A kondenzátoros mérésen alapuló módszer Simscape modellje



3.13. ábra. Szimulációs eredmények a kondenzátoros mérési módszerrel

## 4. fejezet

# Mérési módszerek összehasonlítása

A jelenleg alkalmazott mérőberendezésekben a fent bemutatott két mérési módszert szokták alkalmazni. Ezeket megvizsgálva, szimulálva és a műterheléssel breadboardon is megvalósítva a kondenzátor felöltésen alapuló mérési módszer mellett döntöttem.

A műterheléses módszer előnye, hogy mindkét irányban felvehető a görbe, ezzel ellenőrizhető a helyessége, aminek fontos szerepe van például a parazitakapacitás szempontjából. A kondenzátoros módszer esetén értelemszerűen csak rövidzár felől üresjárás felé vehető fel a görbe. Másik előnye a műterheléses módszernek, hogy bármelyik munkapontot hosszabb ideig is fent tudja tartani (ha csak nem merülnek fel melegedési problémák), szemben a kondenzátorossal, ahol minden munkapont csak egy-egy pillanatra jön létre.

Hátránya azonban a műterheléses módszernek, hogy a kitűzött specifikációk mellett sok, drága IGBT-re van szükség, amik ráadásul a hűtőbordákkal együtt elég sok helyet elfoglalnak, ráadásul a rendszer tervezése termikus szempontból rendkívül érzékeny, kritikus. A megfelelő termikus disszipáció miatt sok párhuzamosan kapcsolt IGBT eredőjében az elzárt és teljesen nyitott állapot között csak igen kicsi lineáris tartomány fog rendelkezésre állni, amiben változtatni kell az  $U_{GS}$  feszültséget. Ez ideális körülmények között, többé-kevésbé idealizált alkatrészekkel a szimulációban jól működik, de a gyakorlati megvalósítása nehézkes. A kondenzátoros megvalósítás esetén viszont egyáltalán nincs szükség szabályozási körre és a termikus, túlmelegedési kérdések is sokkal kevésbé relevánsak, tekintve, hogy ott az energiát eltároljuk (és majd később, kontrolláltan elfűtjük). Az egyszerűség és robusztusság érdekében viszont cserébe feláldozzuk az aktív szabályozási lehetőséget.

## 5. fejezet

# A mérőeszköz tervezése

A műterhelésen alapuló mérési módszert tipikusan laboratóriumi körülmények között alkalmazzák, mert általában rendelkezésre áll vezérelhető műterhelés és valamilyen mérés-adatgyűjtő rendszer.

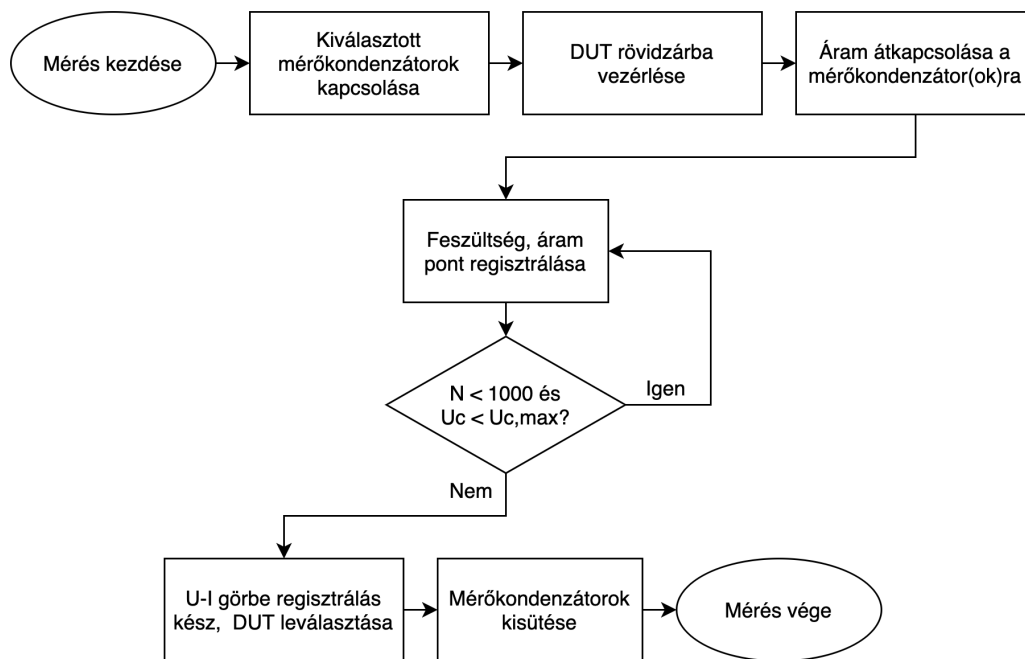
A kondenzátoros megoldás a terepre szánt, kézi műszerekben található meg, néhány típus érhető el a piacon. Ezek azonban általában háztartási méretű kiserőművekben, vagy ipari méretű erőművekben használt panelekhez vannak méretezve, ez eléggé behatárolja a rövidzárási áramot és az üresjárási feszültséget is a mérendő napelemek esetén. Ezek alapján könnyen megválasztható egy olyan kondenzátor, ami az adott körülmények között a legtöbb esetben megfelelő lesz. Megjegyzendő, hogy sok terepi felhasználásra szánt, napelemes rendszerekhez szánt műszer nem is veszi fel a feszültség-áram és feszültség-teljesítmény görbét, csak üresjárási feszültséget és rövidzárási áramot mérnek, tehát az adatlapi adatok ellenőrizhetők velük [10], [11].

Fontos funkciója az általam tervezett műszernek, hogy lehetőség van két panelt vagy sztringet is kötni rá, és ezeket képes külön-külön, vagy párhuzamosítva mérni. A külön-külön, felváltva történő mérés például nagy kiterjedésű, különböző besugárzást kapó sztringeknél (ipari méretű erőmű esetén), vagy másfelé néző paneleknél hasznos (HMKE – Háztartási Méretű Kiserőmű). A párhuzamosítási mérés fontos adatokat szolgáltat olyan alkalmazásokra, mikor az áram növelése érdekében egy inverter egy munkapontkövetőjére több sztringet is párhuzamosítanak.

### 5.1. Feszültséghatárok

A főbb specifikációkat bemutató 2.1 táblázat alapján is látható, hogy a műszernek két felhasználási területe van, panelek és sztringek mérése. Itt jelentősen eltérő feszültség szintek vannak, a panelek közül a jelenleg kapható, legtöbb cellával rendelkezők üresjárási feszültsége 50 V körül van, míg a sztringek feszültsége 1000 V-ig is felmehet. Ezeket figyelembe véve érdemes a két mérési esetet hardveresen különválasztani, tehát két méréshatárt csinálni. A nagyobbik méréshatár 1000 V, a kisebbik pedig 60 V lesz.

A kondenzátorokat tranzisztorokkal kapcsolom a panelre. Az 1000 V-os méréshez IGBT tranzisztort választottam, mivel jóval olcsóbbak a SiC FET-eknél, és bírják a szükséges



**5.1. ábra.** Egy mérési ciklus folyamata.  $N$  az felvett mérési pontok aktuális száma,  $U_C$  a mérőkondenzátor(ok) pillanatnyi feszültsége,  $U_{C,max}$  pedig a megengedett legnagyobb feszültségük, 63 V illetve 1100 V.

feszültséget és áramot. A maradékfeszültségük teljesen nyitott állapotban 1 V alatt van 15 A mellett, tehát az üresjárási feszültséghez képest jól meg lehet közelíteni így is a rövidzárási áramot a legnagyobb esetben is. Emellett a maradó feszültség adatlapban adott, és ki is mérhető, így szükség esetén korrekcióba is lehet venni.

A 60 V-os oldalra alkalmas FET-eket már jóval olcsóbban lehet találni. Itt a legfontosabb tulajdonság a csatornaellenállás telítésszerű állapotban, szintén a rövidzárási mérési miatt. Olyan FET-et választottam, aminek a  $R_{DS,on}$  paramétere  $2.8\text{ m}\Omega$ , így 15 A mellett is csak 42 mV esik rajta.

A sztringek méréséhez legalább 1000 V feszültségű kondenzátorra van szükség, esetleg több kondenzátor soros kapcsolására. Mindkét esetben elmondható, hogy a kondenzátorok térfogata meglehetősen nagyra adódik ekkora feszültség mellett. Az 1000 voltos mérés-határban három mérőkapacitást választottam:  $300\ \mu\text{F}$ ,  $30\ \mu\text{F}$  és  $3,3\ \mu\text{F}$ . Ezek három nagyságrendet fednek le, tehát széles feszültség- és áramtartományokon lehet mérni velük.

A 60 V-os oldalon 6 kapacitást is választottam. A jóval kisebb helyigény és ár miatt megéri, hogy még finomabban lehessen megválasztani a kapacitást. Itt a választásaim  $22\ \mu\text{F}$ ,  $100\ \mu\text{F}$ ,  $330\ \mu\text{F}$ ,  $1000\ \mu\text{F}$ ,  $2200\ \mu\text{F}$ . Természetesen itt is, és a nagyfeszültségű oldalon is tetszőlegesen kombinálhatók a kapacitások, tehát 8 illetve 64 lépcső van a konkrét mérőkapacitás kiválasztására.

## 5.2. Árammérés

Az áram mindkét esetben 0-15 A között mérhető. A 24 bites szigma-delta AD átalakító miatt nem tartom szükségesnek több mérés-határ létrehozását, mivel a felbontás kisebb,

mint 1  $\mu\text{A}$ .

Az árammérés söntellenállással történik az alsó ágban. A söntellenálláson eső feszültséget mérőerősítő erősíti.

A mérendő panelek vagy sztringek pozitív oldalai vannak összekötve (lásd 3.12 ábrán). A felső tranzisztorok (IGBT-k, illetve FET-ek) kapcsolják ki és be a kondenzátorokat a mérés dinamikájának változtatásához. Az ezek alatt lévő pontot tekintjük GND-nek az áramkörben, majd ezek alá kerülnek a söntellenállások és a mérőerősítők. Értelemszerűen nem lehet a napelem negatív kivezetése a GND, mivel akkor nem tudna megvalósulni a párhuzamosítási mérés, mert a két csatorna mindkét végén össze lenne kötve. A negatív oldalak összekötése és a pozitív oldalak szétválasztása pedig azért nem szerencsés, mert így a felső ágba kerülnének a söntellenállások, és 1000 voltos feszültségen lennének.

A mérőerősítő bemeneteire jutó feszültség pozitív, így a kimenetén is pozitív feszültség jelenik meg annak ellenére, hogy a söntellenállás felső része van GND potenciálon, az alja pedig egy negatív potenciálon van.

### 5.3. Kondenzátorok kisütése

Bár a műterheléses módszerrel szemben itt a mérés során közvetlenül nem keletkezik hő, a kondenzátorban tárolt energiát végül itt is hővé kell alakítani. A célkitűzésem az, hogy nagyjából 1 másodperces gyakorisággal lehessen mérést végezni, ami a 100 ms mérési időt figyelembe véve 900 ms időt hagy a kondenzátorok kisütésére.

A kondenzátorban tárolt energiát a

$$Q = \frac{1}{2}CU^2 \quad (5.3.1)$$

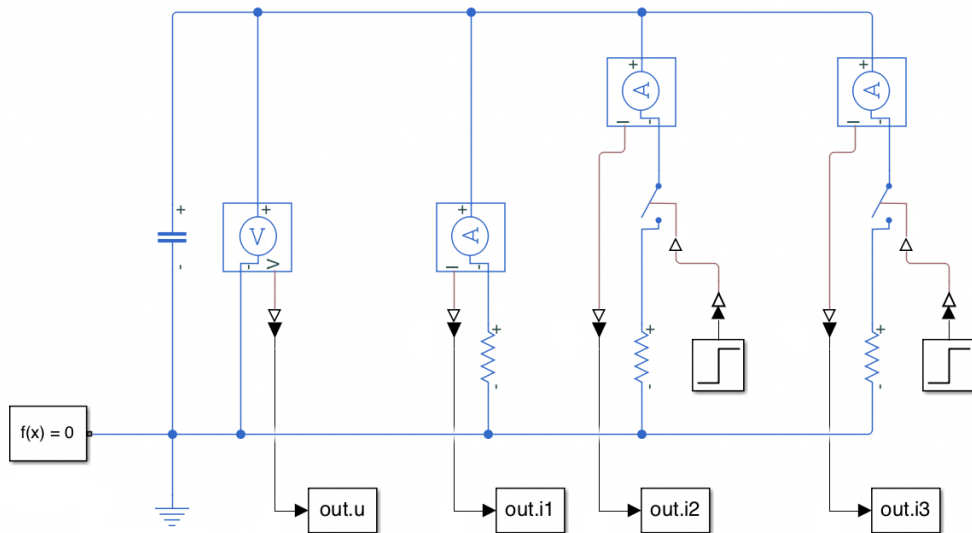
képlet adja meg, ez akkor a legnagyobb, ha 1000 V feszültséget érnek el a kondenzátorok, és mindhárom csatorna be van kapcsolva a nagyfeszültségű oldalon (a kis- és a nagyfeszültségű oldal kisütése külön történik).

Ilyenkor

$$Q = \frac{1}{2}(300\mu\text{F} + 30\mu\text{F} + 3.3\mu\text{F})(1000\text{V})^2 = 333.3 \text{ W s} \quad (5.3.2)$$

333.3 Ws energiát kell eldisszipálni, ráadásul a végén a kondenzátor feszültségének egy adott határ alá kell csökkennie. Határértéknek 1 mV-ot választottam meg, ez elhanyagolhatóan kicsi a nagyfeszültségű oldalon mérendő feszültségekhez képest. Látható, hogy ha másodpercenként egy mérésre van szükség, akkor 333.3 W átlagos teljesítményt kell tudnia az ellenállásnak elviselni. A teljesítményellenállások esetén ekkora teljesítmény nem jelent problémát, mivel kifejezetten nagy, folyamatos termikus gerjesztésekhez vannak tervezve.

Nagy értékű kisütőellenállás választása esetén a kisütés nagyon hosszú ideig fog tartani, ellenben túl kicsi értékű ellenállás esetén az ellenálláson megjelenő pillanatnyi teljesítmény lesz igen nagy, mivel az  $U^2/R$  pillanatnyi teljesítmény a feszültséggel négyzetesen függ össze. Ez a kettő között kell optimumot találni, ehhez szintén a MATLAB-ot és a Simscape-et hívtam segítségül. A szimulációhoz használt modell felépítése a 5.2 ábrán látható.



5.2. ábra. A kisütőellenállások méretezéséhez használt Simscape modell.

A rövid kisütési időre és a kicsi maradékfeszültségre vonatkozó feltétel csak több ellenállás felhasználásával elégíthető ki. A kisütést úgy oldottam meg, hogy egy viszonylag nagy értékű ellenállás elviszi a feszültség nagy részét, majd arra párhuzamosan kapcsolok még egyet, ami tovább csökkenti a feszültséget, és végül egy harmadikat is, ami már csak minimális energiát disszipál, de ez csökkenti le a szükséges küszöbérték alá a kondenzátorok feszültségét.

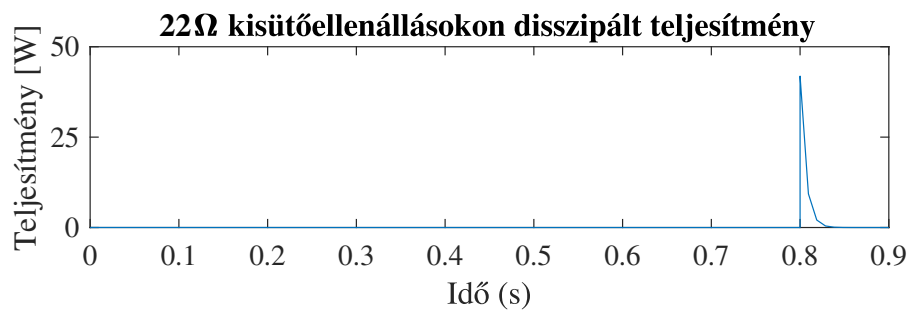
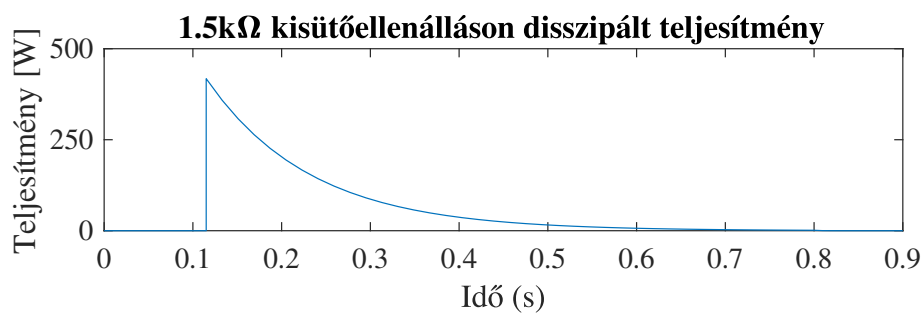
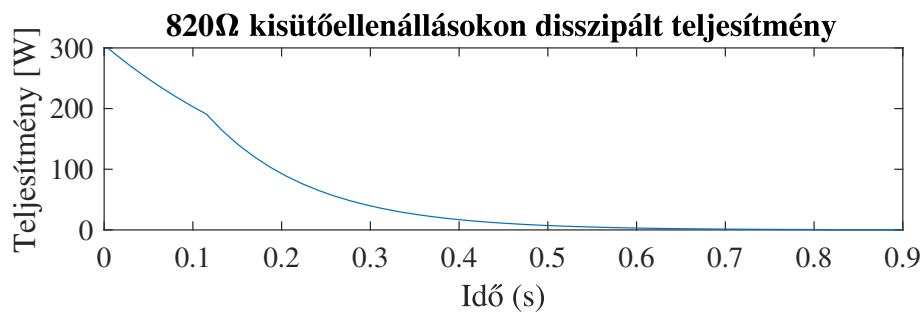
Az 1000 voltos kondenzátorok kisütéséhez három ágat használok, a 60 voltos részhez pedig csak egyet, hasonló felépítésben. A szimulációban ez első ellenállás bekapcsolását nem szimuláltam külön kapcsolóval, mivel a kondenzátor feszültsége kezdeti értéként adott, és úgy tekintem, hogy a szimuláció az első kapcsoló bekapcsolásakor indul.

A 60 V-os esetben jóval egyszerűbb a helyzet, mivel a 5.3.1 összefüggés miatt itt mind a kondenzátorokban tárolt energia, mind a fellépő pillanatnyi teljesítmény jóval kisebb. Ebben az esetben egyetlen kisütőellenállás is elegendő.

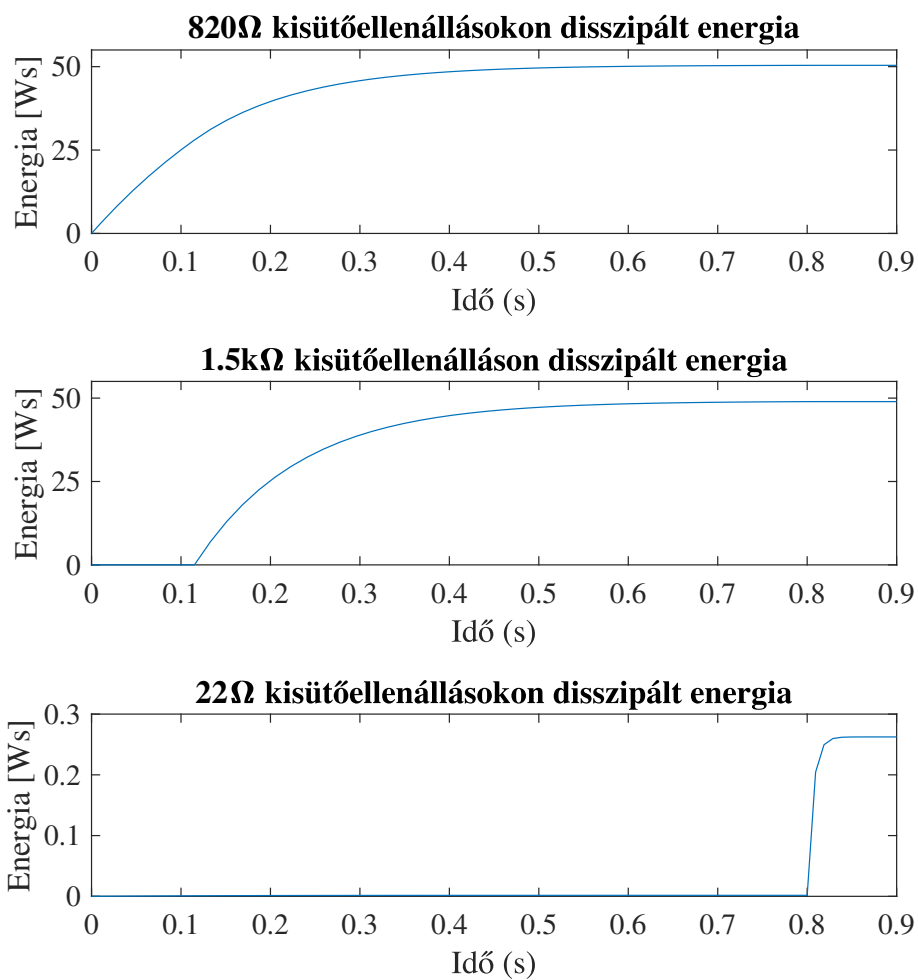
A 22  $\Omega$ -os kisütőellenállásokon kívül a többi 50 W-os lesz, a jelentkező átlagos teljesítménynek megfelelő számban párhuzamosan kapcsolva. Megfelelő lett volna kevesebb darab, de nagyobb teljesítményre méretezett ellenállás is, azonban a többi kisméretű ellenállást jobban el lehet helyezni a készülékben, és az aktív hűtésük is hatékonyabb. A szimulációban a párhuzamosan kapcsolt ellenállásokat egyetlen ellenállásként modelleztem, természetesen az értéküket megfelelően módosítva.

A kondenzátorokat kisütő ellenállásokon jelentős teljesítmény disszipálódik, ezért mérni fogom a hőmérsékletüket. Erre egyrészt két darab NTC hőmérőt alkalmazok, ami csavarral van rögzítve egy-egy kisütő ellenálláshoz. Emellett erre is felhasználom a műszerben lévő feszültségmérő rendszert, és felveszem a kondenzátorok kisülésének karakterisztikáját is. A kisülés időállandója a kapacitástól és az ellenállástól függ. A kapacitást állandónak feltételezve az időállandó változását az ellenállás változása okozza, ebből elég jól lehet következtetni az ellenállások melegedésére.





**5.3. ábra.** *A kisütőellenállásokon disszipálódó teljesítmények az idő függvényében.*



5.4. ábra. A kisütőellenállásokon disszipálódó energia az idő függvényében.

## 6. fejezet

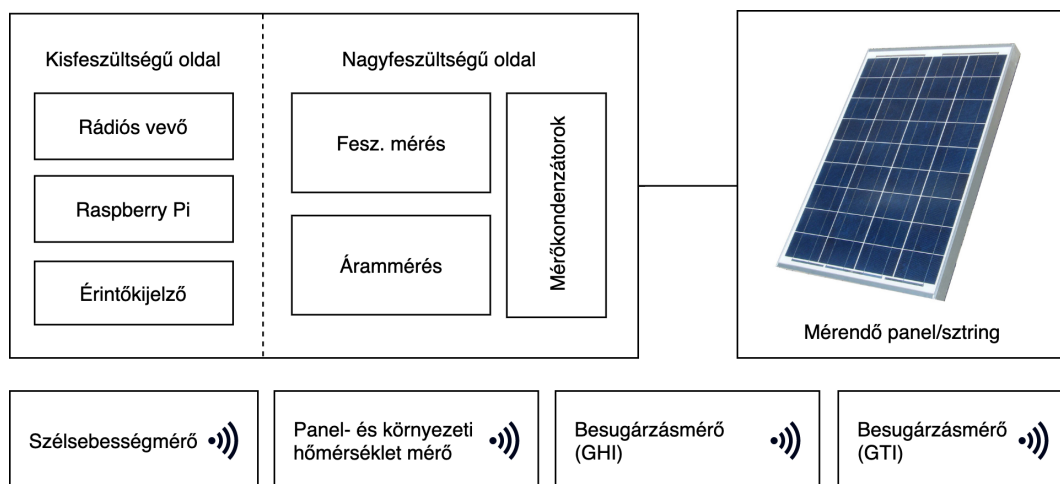
# A rendszer felépítése

A mérőrendszer egy központi egység köré épül. Ez az egység végzi el a villamos karakterisztika felvételét mind a 60 V-os panelmérésre, mind az 1000 V-os sztringmérésre való esetben. Ezen az egységen helyet kap egy 7"-os érintőképernyő, amihez egy Raspberry Pi csatlakozik. Ezen keresztül lehet a mérési paramétereket beállítani, a mérést elvégezni, és az adatokat elmenteni.

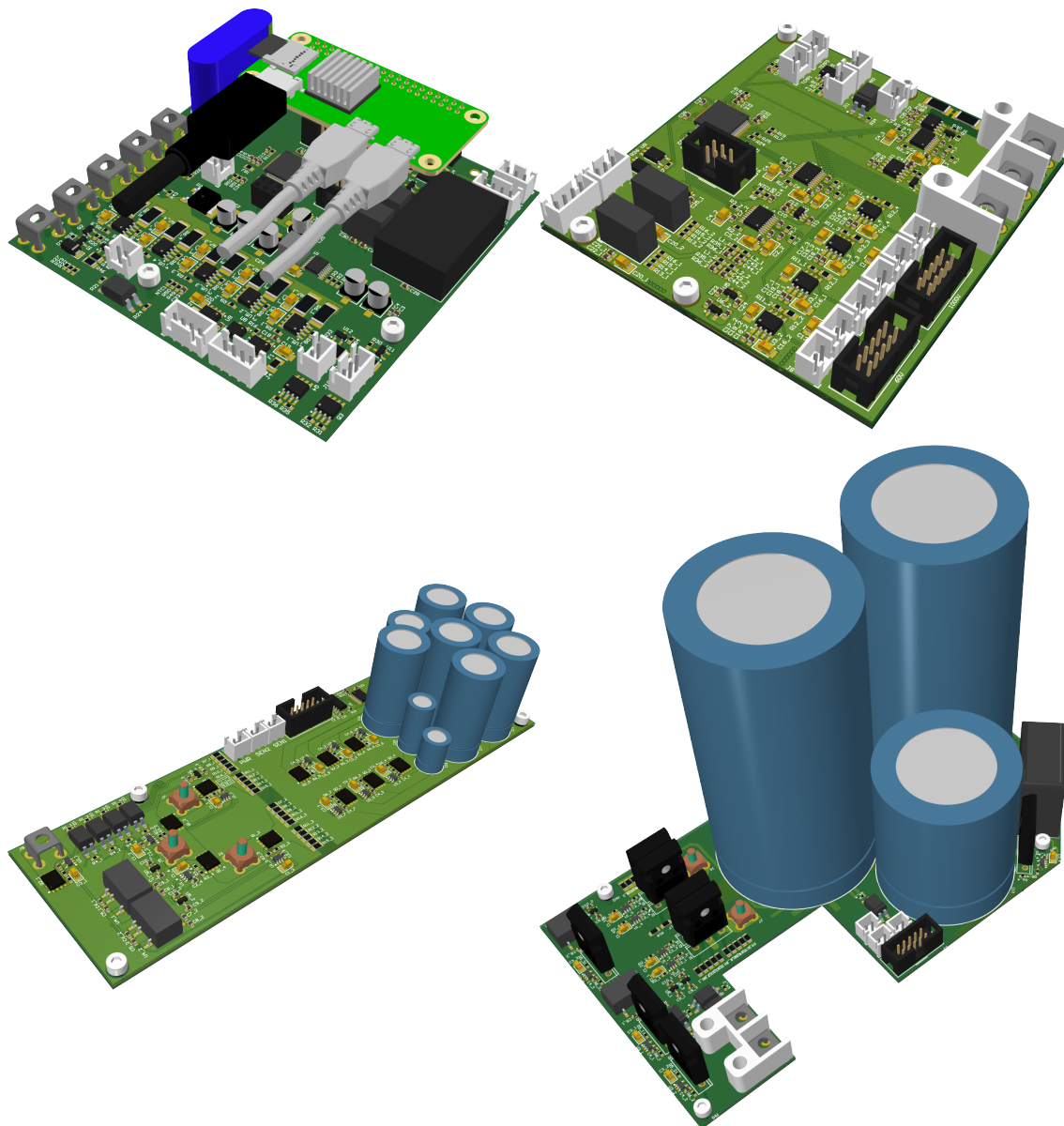
A központi egység képes USB-n keresztül számítógéphez csatlakozni. Ilyenkor lehetőség van a mérési eredmények letöltésére, illetve a műszer távvezérlésére is, ez utóbbi főleg laboratóriumi körülmények között hasznos.

A szükséges környezeti paramétereket különálló egységek mérik, amik rádiós úton továbbítják a mérési eredményeiket a központi egység felé. Ezeket az egységeket a következő fejezetben mutatom be részletesebben.

Minden egység saját akkumulátorral rendelkezik, amik egy egész napos terepi méréshez szükséges energiát biztosítanak.



6.1. ábra. A mérőrendszer felépítése (Napelempanel kép: solarplaza.hu)



**6.2. ábra.** *Néhány kép a műszer központi egységébe kerültő PCB-kről: a kisfeszültségű oldal alaplapja, a nagyfeszültségű oldal alaplapja, a 60 V-os mérésekért felelős és az 1000 V-os mérésekért felelős PCB*

## 7. fejezet

# Környezeti paraméterek, gerjesztések mérése

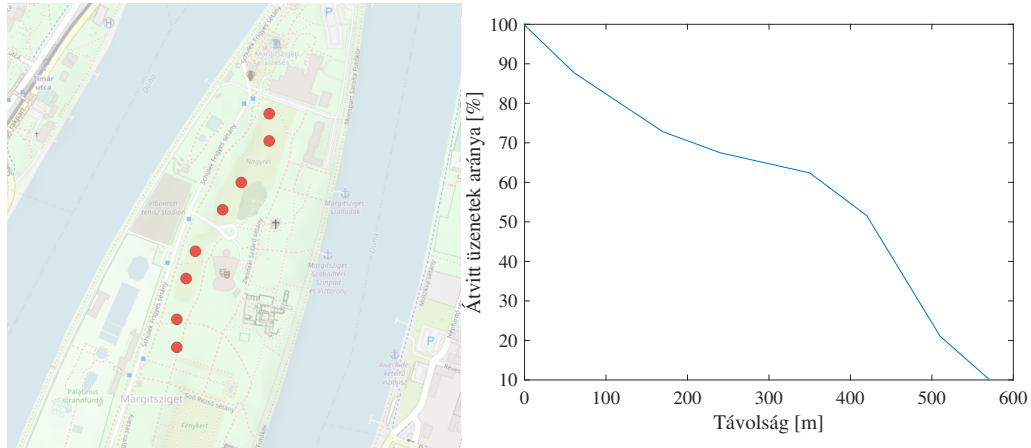
### 7.1. Mérési eredmények továbbítása a környezetmérő szenzorokról

A környezeti paramétereket mérő szenzorok mérési eredményeit a központi egység jelzi ki és tárolja el. Terepi mérések esetében, kisebb méretű erőműveknél a szélsébség, a levegő hőmérséklete és a globális vízszintes besugárzás (GHI, Global Horizontal Irradiation) az erőmű területén állandónak tekinthető, így ezeket a szenzorokat elegendő egy helyre letenni, nem kell mindig a mérendő panelhez vagy sztringhez elvinni. A panelhőmérséklet és az azt érő merőleges besugárzás nyilván nem egyforma minden panel esetén, így azokat a mérőeszközöket mindig a mérendő panelre kell elhelyezni. Ezek kapcsolódhatnak akár vezetékkel is a központi egységhez, de az a legkényelmesebb, ha minden szenzor rádiós kapcsolaton keresztül küldi a mérési eredményeit.

A rádiós kommunikáció főbb paraméterei az adatátviteli sebesség és a hatótávolság. A választásom egy 2.4 GHz-es ISM csatornát használó, 2 Mbps adatátviteli sebességű, 1 km hatótávolságot ígérő, olcsónak mondható modulra esett. Mivel az interneten fellelhető értékelések alapján az egy kilométeres hatótáv megkérdőjelezhető, ezért én magam is elvégeztem egy erre vonatkozó mérést.

Készítettem egy tesztösszeállítást, ami egy adó és egy vevő egységből állt. Az adó egység egy STM32 blue pill fejlesztőpanelt és egy nRF24L01-es modult tartalmazott, a vevő egység pedig egy STM32 Nucleo fejlesztőpanelt, az nRF24L01-es rádiós modult és egy OLED kijelzőt. Az első tesztek során azt vettem észre, hogy a távolság növekedtével az figyelhető meg, hogy egyre kevesebb üzenet érkezik meg a vevő oldalra, ezért a terepen elvégzett mérésre kifejezetten egy olyan szoftvert készítettem, ami a (hibátlanul) megérkezett üzenetek arányát jelezte ki az elküldött üzenetekhez képest.

A mérést a Margit-szigeten végeztem el, a 7.1 ábrán láthatók az eredmények. Körülbelül 570 méter távolságban már csak az üzenetek 10%-a érkezik meg a vevőhöz. A napelemes mérésekhez elegendő, ha másodpercenként egy mérési eredményt biztosítanak a környezetmérő szenzorok. Bár a 90%-os csomagvesztés elég magas, ha másodpercenként 10 csomagot küldök, akkor átlagosan másodpercenként egy megérkezik, ami elegendő lesz. A mérésnél



**7.1. ábra.** Balra a mérési pontok a térképen, jobbra pedig a sikeresen átvitt üzenetek aránya

a jel útjába volt a Margitszigeti Szabadtéri Színpad, ami egy nagy beton építmény, tehát valószínűleg rontotta a hatótávolságot. Ilyen a napelemparkokban kevésbé fordul elő.

Mire elég az 500-600 méteres hatótávolság? Magyarország jelenleg legnagyobb napelemparkja a Kaposváron található, 100 MW beépített teljesítménnyel, a műholdas képe a 7.2 ábrán látható.



**7.2. ábra.** A kaposvári napelempark a Google Maps műholdképén

Itt a legnagyobb távolság az erőmű nyugati és keleti szélé között kb. 2,4 km, amit egy út kettéoszt. A két fele nagyjából 1,2-1,2 km, amit már várhatóan le tud fedni a rádiós modul, ha középen van elhelyezve. Egy ekkora méretű erőműnél persze az sem feltétlenül probléma, ha néhányszor odébb kell vinni a mérőeszközöket.

A következők a paksi, mátrai, felsőlőszolcai és százhalombattai erőművek 20,6-17,6 MW beépített teljesítménnyel. A műholdképes méréseim szerint ezeknek a legnagyobb mérete 900 m és 1,2 km között van, tehát hasonló módon, ha sikerül középen elhelyezni a statikus mérőeszközöket, akkor nincs gond a hatótávval.

A leggyakoribb erőmű méret az 0.5 MW-os, mivel ezek még a kiserőmű kategóriába tartoznak, így jóval kevesebb megkötés vonatkozik az építésükre és az üzemeltetésükre.

Ezek az erőművek nagyjából azonos területet foglalnak el, persze az alakjuk elég változatos tud lenni. 11 erőművet vizsgáltam, szintén műholdas kép alapján, a legnagyobb méretük tipikusan 100-150 méter, amit bőségesen lefed a választott rádiós modul.

A modul tartalmaz egy teljesítményerősítőt az adó módhoz, és egy kiszajú erősítőt a vevő módhoz, mindkettőnek állítható az erősítése. A fixen elhelyezett mérőeszközök esetén ezt érdemes maximálisra állítani. A panelhőmérsékletet és a merőleges besugárzást mérő szenzorokat mindig a központi egységgel együtt fogjuk mozgatni, így azoknál nincs szükség a nagy hatótávolságra, ellenben ilyenkor pont az erősítők telítése a probléma, tehát ilyenkor az adóteljesítményt és a vevő erősítését csökkenteni kell.

## 7.2. Besugárzás mérése, GHI és GTI

A közvetlenül a napkorongból érkező sugárzást direkt besugárzásnak nevezzük, mérésére pirheliométert használnak. A Föld légkörében található pára, felhők, különböző szennyeződések ezt a sugárzást megszőrják, ezt nevezzük diffúz vagy szórt sugárzásnak. A direkt és a diffúz sugárzást együttesen globálsugárzásnak nevezzük, mérésére a piranométer szolgál. A diffúz sugárzást szintén piranométerrel mérik, azzal a kiegészítéssel, hogy egy, a Nap járását követő szerkezet kitakarja előle a direkt besugárzást. Az említett sugárzások mind lefelé haladó, rövidhullámú sugárzások. Létezik még felfelé haladó, és hosszúhullámú sugárzás is, azonban azokat a napelemek nem tudják hasznosítani, így nem érdekesek számunkra.

A piranométer működési elve, hogy az érkező besugárzás hatására hőmérséklet-különbség alakul ki a műszertest, az érzékelőlemez és az üvegbúra között, aminek hatására elektromos áram indul meg, aminek nagysága szoros kapcsolatban van a sugárzás intenzitásával. Ezzel a mérési módszerrel nagy pontosságot lehet elérni, viszont igen drága egy ilyen műszer. A besugárzás intenzitásának meghatározására egy másik módszer a referenciapanel használata. A napelemcella rövidzárási árama szorosán összefügg a besugárzással, így egy olyan cellával, aminek a karakterisztikáját jól ismerjük, akár 5% alatti hibával mérhetjük a besugárzást [7]. Ez a mérési módszer jóval alacsonyabb költséget jelent, mint a piranométeres megoldás, ezért egy saját, referenciapanelen alapuló mérési módszert valósítottak meg.

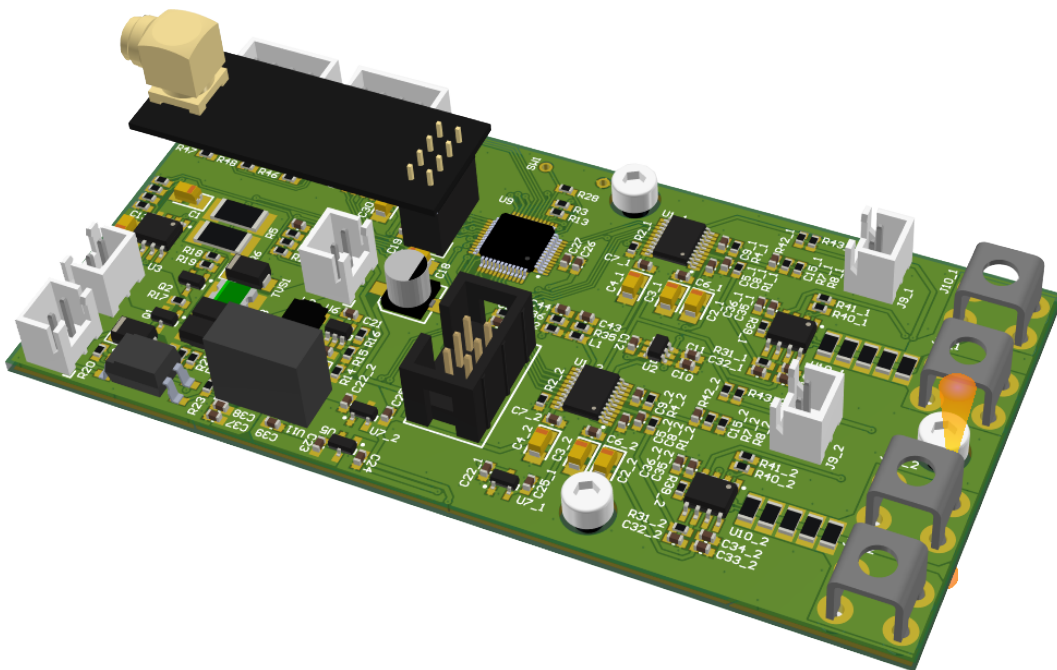
A napelemes rendszerek vizsgálatához egyrészt a GHI-t, másrészt a globális besugárzás azon részét kell mérnünk, amiben a direkt besugárzás a napelempanelre merőleges irányból érkezik.

A mérésekhez 5 W-os, kisméretű panelt választottam [13]. Ez viszonylag kis méretű, kb. 1,5x5 cm-es cellákat tartalmaz, emiatt kifejezetten érzékeny arra, ha valamelyik cella, vagy cellák más besugárzást kapnak, mint a többi, például valamilyen szennyeződés következtében. Ez hibás mérési eredményhez vezet, azonban észrevenni nem lehet a mérési eredményből. Hogy az ilyen hibák kiküszöbölhetőek legyenek, két-két panelt használok, így összehasonlítható a mérések eredménye, és ha nem egyeznek, akkor nem használható fel az eredmény.

A mérés a panel rövidzárási áramának mérésén alapul, sőtellenálláson keresztül, szintén 24 bites AD átalakító használatával. Az Európában jellemző legnagyobb besugárzások alapján a méréshatárt  $1500 \text{ W/m}^2$ -re választottam. A napelemcella rövidzárási áramát

nagyrészt a besugárzás intenzitása határozza meg, azonban kisebb mértékben függ a cella hőmérsékletétől is, kb. 0,06%-ot változik Celsius-fokonként [8]. A terepi mérések esetén előfordul  $-10^{\circ}\text{C}$  is, de egy nyári mérési alkalommal a mérőpanel hőmérséklete  $60^{\circ}\text{C}$ -ra is könnyen felmehet, ez összesen  $70^{\circ}\text{C}$  változás, ami 4,2% különbséget jelent. Ez alapján szükséges a cella hőmérsékletét is mérni, erre egy NTC termisztort használók.

A referenciapaneleket egy piranométer segítségével fogjuk kalibrálni. Ez a napelemcellák paramétereinek, a söntellenállás értékének bizonytalanságát, a műveleti erősítő és AD átalakító offset- és erősítéshibáját is figyelembe veszi, mivel a besugárzásértékhez hasonlítjuk az ADC kimeneti kódját. Ezzel a módszerrel a rendszeres hiba egészen kis mértékűre csökkenthető, a referencia piranométer pontossága elég jól megközelíthető.



7.3. ábra. A besugárzásmérő szenzorokba kerülő PCB CAD modellje

### 7.3. Szélsebességmérés

A szélsebesség mérésére is sokféle módszer létezik, az egyszerűsége miatt a kanalas szélsebességmérési módszer mellett döntöttem. A szélsebességet a specifikáció szerint 0-120 km/h tartományon kell tudni mérni. Az egészen kicsi, néhány kilométer per órás szélsebességek mérése esetleg problémás lehet a csapágyazás (tapadási) súrlódásai miatt, azonban az ilyen kis szelek a panelek hőmérsékletére sincsenek igazán hatással, tehát ez nem jelent problémát.

A kanalak átmérőjét 50 mm-re választottam, a kanalak középpontja pedig 70 mm-re van a forgástengelytől. A forgórészen 4 darab mágneset helyeztem el, amiket az állórészen egy Hall-szenzor érzékel. A szenzor jelei alapján számítható a forgórész szögsebessége, abból



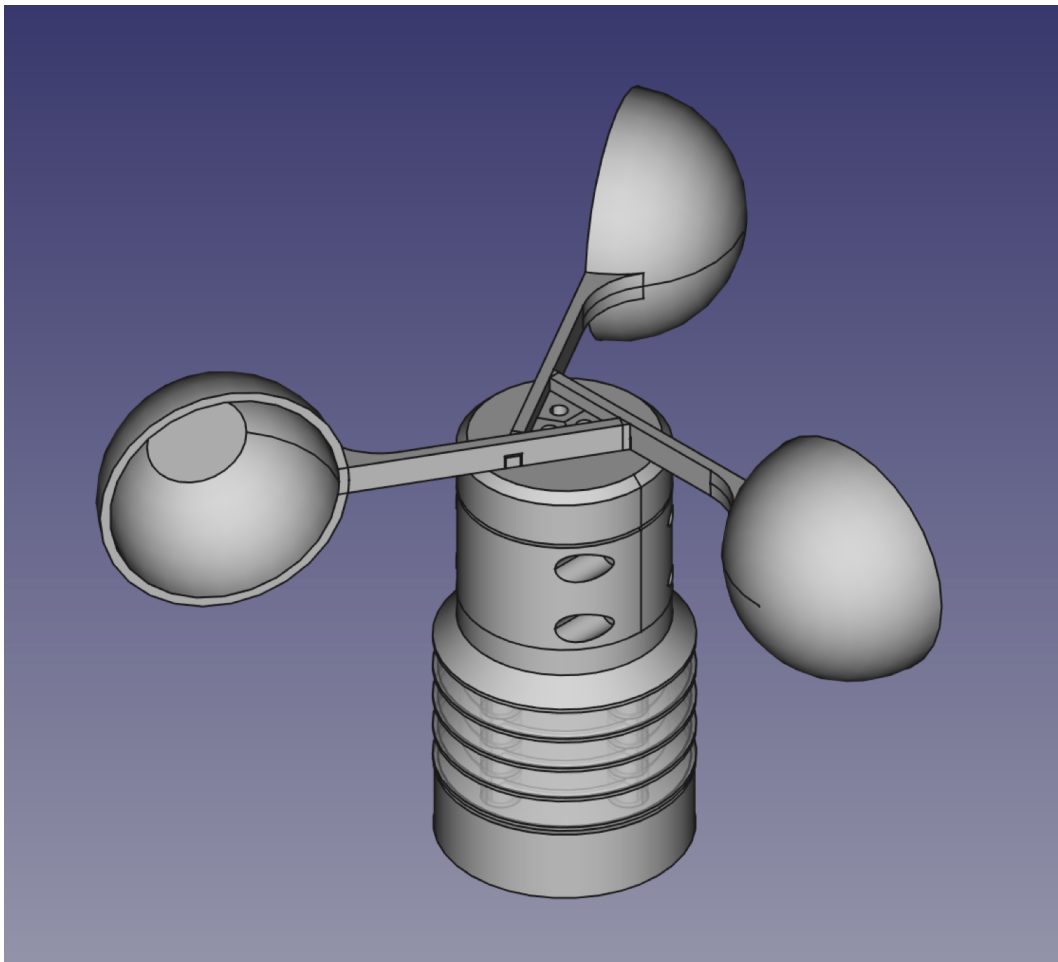
pedig a szélesebbég. A szél sebessége a

$$v = k \cdot n = 2\pi r \cdot n \quad (7.3.1)$$

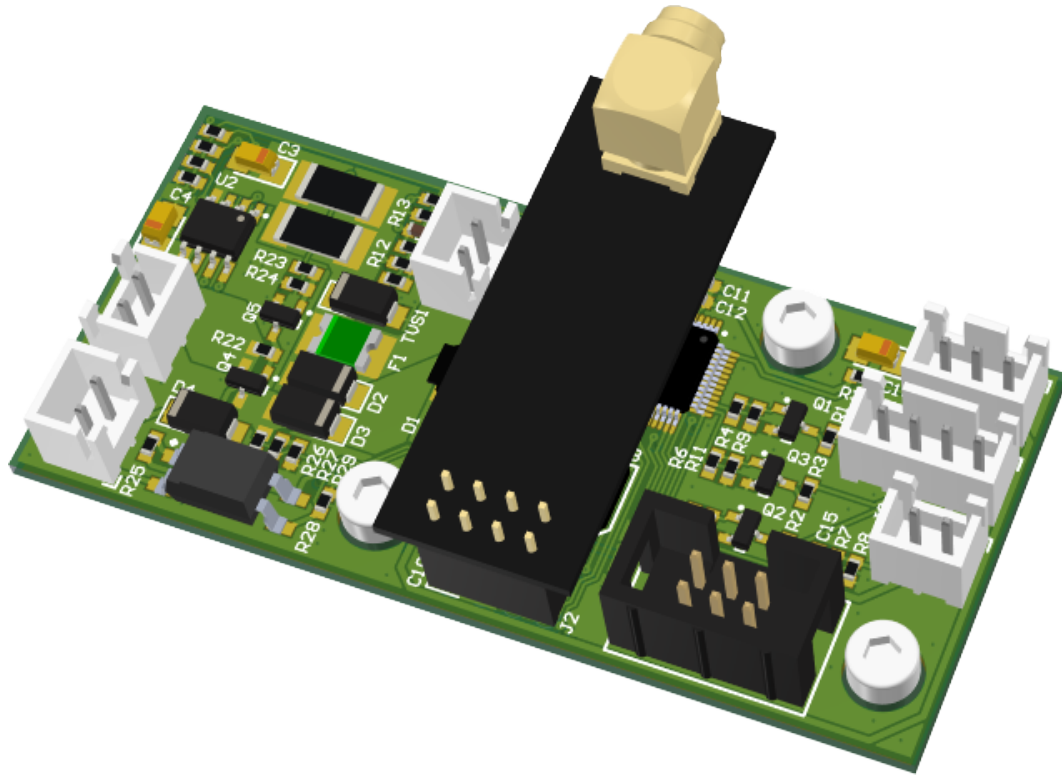
képlettel számítható,  $k$  a kerület, amit a lapátok középpontjai sűrolnak,  $n$  a fordulatszám [1/s],  $r$  pedig a lapátok középpontjának távolsága a forgástengelytől, tehát 70 mm. Ebből a várható fordulatszám, vagy frekvencia

$$n = \frac{v}{2\pi r} = \frac{v}{2\pi \cdot 70[mm]} = \frac{v}{439,82[mm]} = \frac{v}{0,439[m]} \quad (7.3.2)$$

egy mágnese estén, négy mágnese esetén pedig négyszer ekkora. A legnagyobb mérendő szélesebbég 120 km/h, ami 33,33 m/s-nak felel meg, ez négy mágnese 303 Hz-et jelent, míg 1 km/h-ás szélesebbég 2,531 Hz frekvenciát jelent. A mikrokontroller számlálójának órajele 80 MHz, és minden egyes periódust külön mérünk, ami a leggyorsabb szélnél 3,8 ppm, míg a lelassabb esetén 0,0316 ppm hibát jelent.



**7.4. ábra.** A szélesebbégmérő CAD modellje 3D nyomtatáshoz.



7.5. ábra. A szélsebességmérő szenzor PCB-je.

#### 7.4. Panelhőmérséklet-mérés

A panelhőmérséklet-mérés mindig annak a panelnek a mérését jelenti, aminek a villamos karakterisztikáját vesszük fel, vagy a mérés alatt lévő sztringen lévő valamelyik panelét. A hőmérséklet mérésekor a legnagyobb problémát a mérendő panel és a hőmérő eszköz közötti termikus kapcsolat létrehozása jelenti, mivel itt nem egy állandó kapcsolat van, hanem mindig másik és másik panelt kell mérni. A legtöbb mérési módszer esetén szükséges a fizikai kontaktus, azonban az infravörös alapon működő mérésnél erre nincs szükség, ezért ezt a megoldást választottam. A mérőegységet tapadókorongokkal lehet a mérendő panelekhez rögzíteni. Az eddigi tapasztalataim szerint még enyhén koszos panel esetén is megfelelő a tapadás.

A mérendő hőmérsékletek itt  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  között mozognak, ezt a tartományt lefedi az általam választott Omron IR hőmérő. A felbontás  $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a pontosság  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ami megfelelő a mérésekhez.

#### 7.5. Környezetihőmérséklet-mérés

A levegő hőmérsékletének mérésénél fontos, hogy a napsugárzás ne melegítse a hőmérőt, mivel az így keletkező melegezés mérési hibát okoz. Az ilyen melegedést elkerülendő a hőmérő köré ún. solar shield-et terveztem, ami engedi a levegő mozgását, azonban direkt napsugárzás nem tudja érni a hőmérőt.

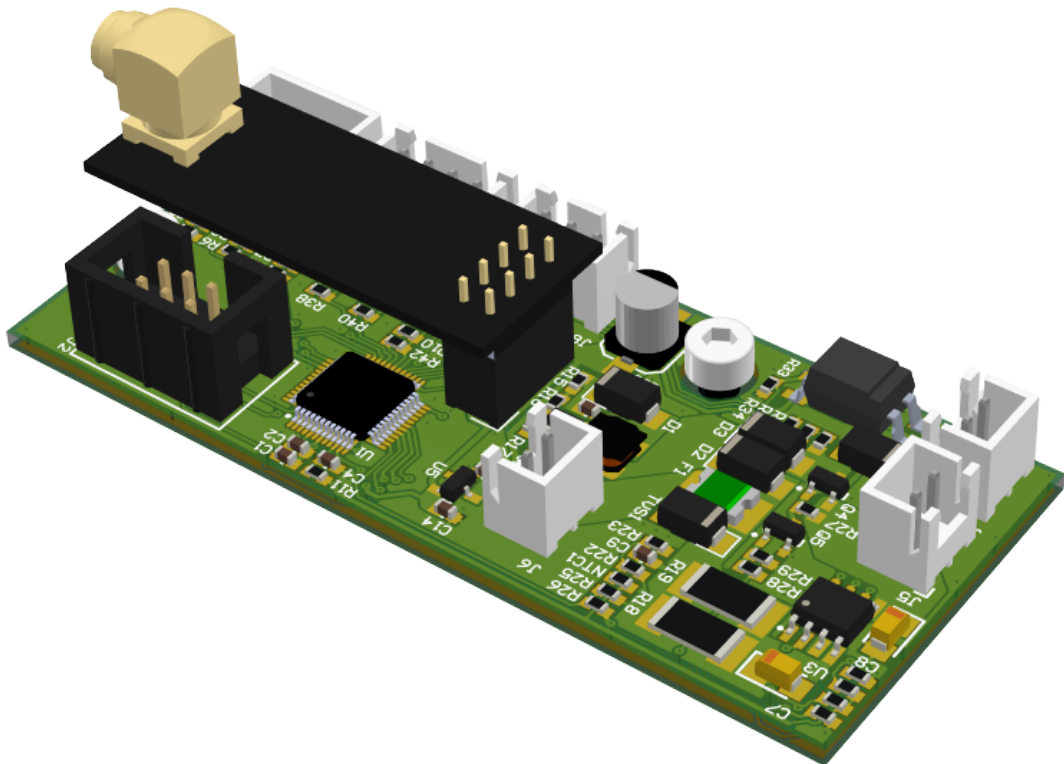
Az alkatrészek számának és így a bonyolultság és költség csökkentése érdekében ezt a szenzort összevontam a panelhőmérsékletet mérő szenzorral. A nagy kiterjedésű erőművek-



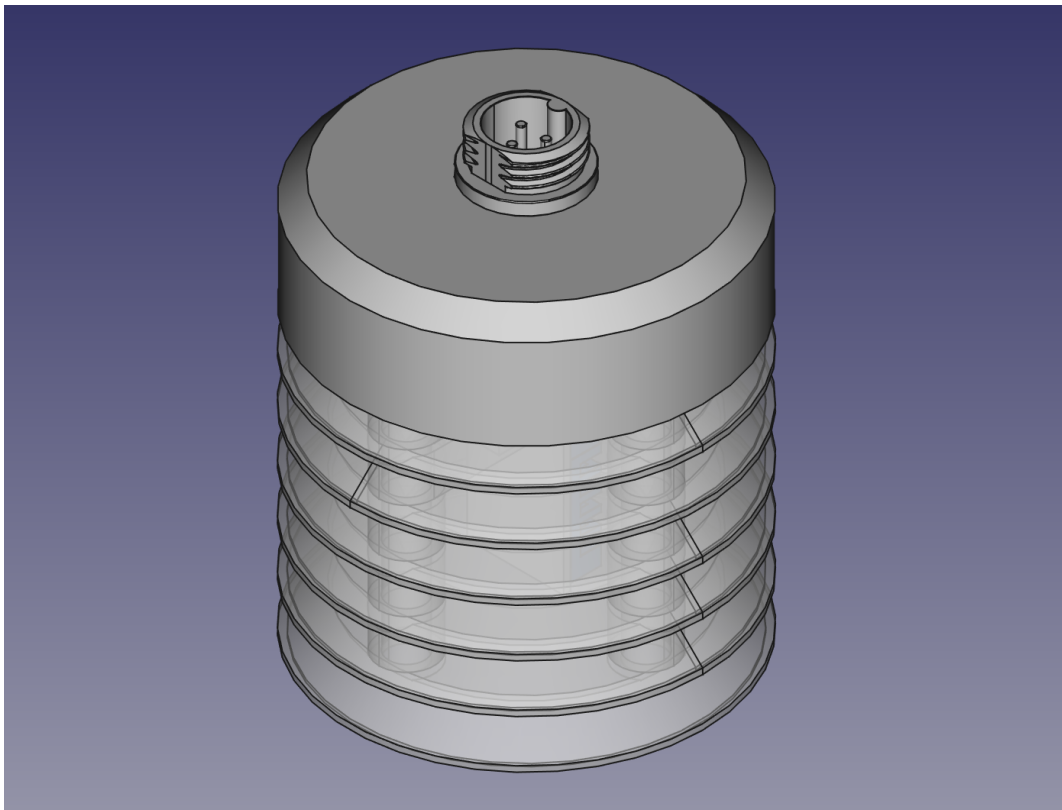
**7.6. ábra.** Az IR hőmérő szenzor (Forrás: a gyártó honlapja)

ben kialakulhatnak hőszigetek, de így mindig a mérendő egység mellett mérjük a környezeti hőmérsékletet is. A napsütés elleni védelemre szolgáló solar shield-es árnyékolását jól kiegészíti a mérendő panel árnyéka is.

Erre a mérésre egy készen kapható hőmérséklet- és páratartalommérő modult használok, csak a rádiós adattovábbítást kapcsoltam hozzá, és az árnyékolást terveztem meg hozzá.



**7.7. ábra.** A környezeti hőmérsékletet és panelhőmérsékletet mérő szenzor PCB-je



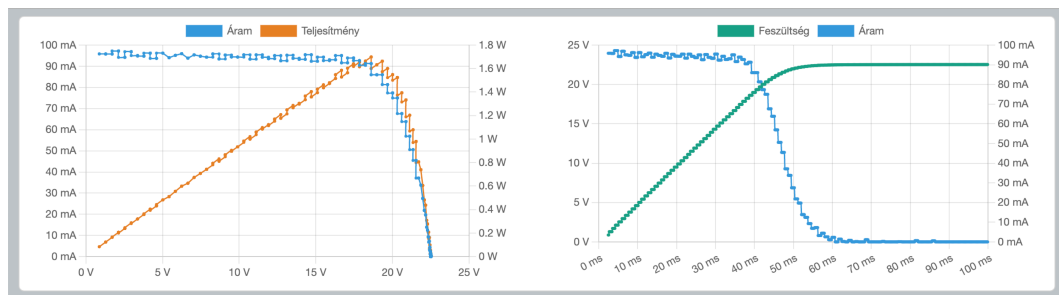
**7.8. ábra.** *A környezeti hőmérsékletet mérő szenzor CAD modellje 3D nyomatáshoz.*

## 8. fejezet

# Demonstráció

A műszer prototípusához elkészítettem a PC oldali program első verzióját is, amivel a műszer működése ellenőrizhető. Jelenleg néhány alapvető fontosságú funkció van csak a programban.

A 14. ábrán egy 5 W-os panelen elvégzett mérés látható. Az őszi idő miatt a besugárzás kicsi volt, így a panel kevesebb, mint 100 mA rövidzárási áramot és 1.7 W maximális teljesítményt produkált.



8.1. ábra. A mérési eredmények megjelenítése a PC alkalmazásban.

The screenshot shows the PC application interface. It has several sections: 'USB kapcsolat' with a dropdown menu set to 'USB port' and buttons for 'Frissítés' and 'Csatlakozás'; 'Mérőkapacitás' with a slider set to 11000 µF and an 'Alkalmazás' button; 'Mérés' with a 'Mérés indítása' button and a checkbox for 'Folyamatos mérés' set to '2 mp'; 'Mentés és betöltés' with a text field 'Megjelenítve: 5W\_2ref\_100mA' and buttons for 'Betöltés' and 'Mentés'. On the right side, there are several numerical values:  $U_{OC} = 22.53 \text{ V}$ ,  $I_{SC} = 97.19 \text{ mA}$ ,  $U_{MPP} = 18.61 \text{ V}$ ,  $I_{MPP} = 91.27 \text{ mA}$ , and  $P_{MPP} = 1.7 \text{ W}$ .

8.2. ábra. Beállítások, a mérés irányítása és a mérési eredményekből számolt fontosabb paraméterek megjelenítése a PC alkalmazásban.

A mérésben szereplő áram alig teszi ki a teljes (15 A-es) mérési tartomány 0,6%-át, ami miatt a környezetből összeszedett elektromos zajok kifejezetten jelentősek lettek, ez jól mutatja az utólagos, digitális szűrés szükségességét.

## 9. fejezet

# Konklúzió, jövőbeni célok, kutatási és fejlesztési irányok

A mérőrendszerből a dolgozatban bemutatott eszközök megtervezésre kerültek, emellett eddig elkészült a 60 V-os méréshatárban mérni képes rész, a szélsősebességmérő és a besugárzásmérő első prototípusa. A demonstrációban bemutatott PC programmal csak a villamos karakterisztikát rögzítő rész kommunikál, a környezeti paramétereket mérő szenzorok rádiós jeleit a központi egység másik része fogja fogadni.

A jövőben szeretném a mérőrendszert kiegészíteni azzal, hogy ne csak a feszültség-áram koordinátarendszer első, hanem második és esetleg negyedik síknegyedében is lehessen mérni az eszközzel, ami az árnyékolási hatások részletesebb vizsgálatára, illetve a bypass diódák minősítésére is jobb lehetőséget ad.

A mérőrendszert a jövőben napelemes rendszerek vizsgálatára, optimalizációjára, és azok fejlesztésével kapcsolatos kutatási célokra szeretném felhasználni mind laboratóriumi, mind terepi mérések elvégzésével.

# Felhasznált irodalmak

- [1] Matic Herman, Marko Jankovec, Marko Topic (2012) Optimal I-V Curve Scan Time of Solar Cells and Modules in Light of Irradiance Level
- [2] Mauro Praveetoni Daren Poh, Jai Prakash Singh, Jian Wei Ho and Kenta Nakayashiki (2021) The effect of capacitance on high-efficiency photovoltaic modules: a review of testing methods and related uncertainties
- [3] Chen Wei, Lim Li Hong Idris (2018) An Improved Oblique Asymptote Method for Parameter Identification of PV Panels
- [4] Petru Adrian Cotfas, Daniel Tudor Cotfas, Paul Nicolae Borza, Dezso Sera, Remus Teodorescu (2018) Solar Cell Capacitance Determination Based on an RLC Resonant Circuit
- [5] Kashif Ishaque, Zainal Salam Hamed Taheri (2011) Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules
- [6] Marwan M. Mahmoud (2005) Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I–V characteristics
- [7] Alae Azouzoute, Ahmed Alami Merrouni, El Ghali Bennouna, Abdellatif Gennioui (2019) Accuracy Measurement of Pyranometer vs Reference cell for PV resource assessment
- [8] S. K. Krawczyk, A. Jakubowski and M. Zurawska (1981) Temperature dependence of the short-circuit current in MIS solar cells
- [9] Pierluigi Guerriero, Pasquale Cennamo, Santolo Daliento (2018) A Two Legs Darlington Based Circuit for on Site Tracing of Solar Panels I-V Curve
- [10] Pierluigi Guerriero, Pasquale A. Cennamo, Santolo Daliento (2018) A portable circuit for real time curve tracing for solar panels embedded in solar fields
- [11] Ashish V. Joglekar, Balachandra Hegde (2018) Online I-V Tracer for per string monitoring and maintenance of PV panels
- [12] Megdőlt a napi legnagyobb szélökés országos rekordja (2021.08.01.)  
[https://www.met.hu/omsz/OMSZ\\_hirek/index.php?id=4363&m=2](https://www.met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=4363&m=2)

[13] <https://www.tme.eu/Document/bab057a8a844396ef052688645558ec2/CL-SM5P.pdf>

[14] <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/solarcell.html>