



SZAKDOLGOZAT

**OE-KVK
2022.**

Hallgató neve: **Szarka Péter**

Hallgató törzskönyvi száma: T007433/FI12904/K

Budapest, 2022



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Mikroelektronikai és Technológia Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Szarka Péter
Szakdolgozat száma: SZD21012111308970
Törzskönyvi száma: T007433/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven)
Specializáció: Mikroelektronika és technológia specializáció

A dolgozat címe: Napelemes tápegység

A dolgozat címe angolul: Solar cell power supply

A feladat részletezése: Válasszon ki egy kereskedelmi forgalomban kapható integrált áramkört, ami alkalmas akkumulátorok napelemről való táplálására a lehető legnagyobb hatásfokkal, és alkalmas lehet egy Cubesat 1U méretű kisműhold tápellátására. Ismertesse a választási szempontokat. Készítsen mérőkapcsolást napelemmel és végezzen méréseket. Ezek eredményét vesse össze az adatlapi adatokkal és ezek alapján mutassa be az áramkör működési elvét és alkalmazási módjait. Tervezzon egy egyszerű napelemes akkumulátortöltő és tápellátó rendszert kisműhold teljesítményére szabva. Ismertesse a kisműholdakhoz használható napelemek és akkumulátorok típusait és jellemző paramétereit.

Intézményi konzulens neve: Horváth Márk

A kiadott téma elévülési határideje: 2023. február 28.

Beadási határidő: 2022. 05. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 11. 12.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

belső konzulens

.....
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2022.05.06.

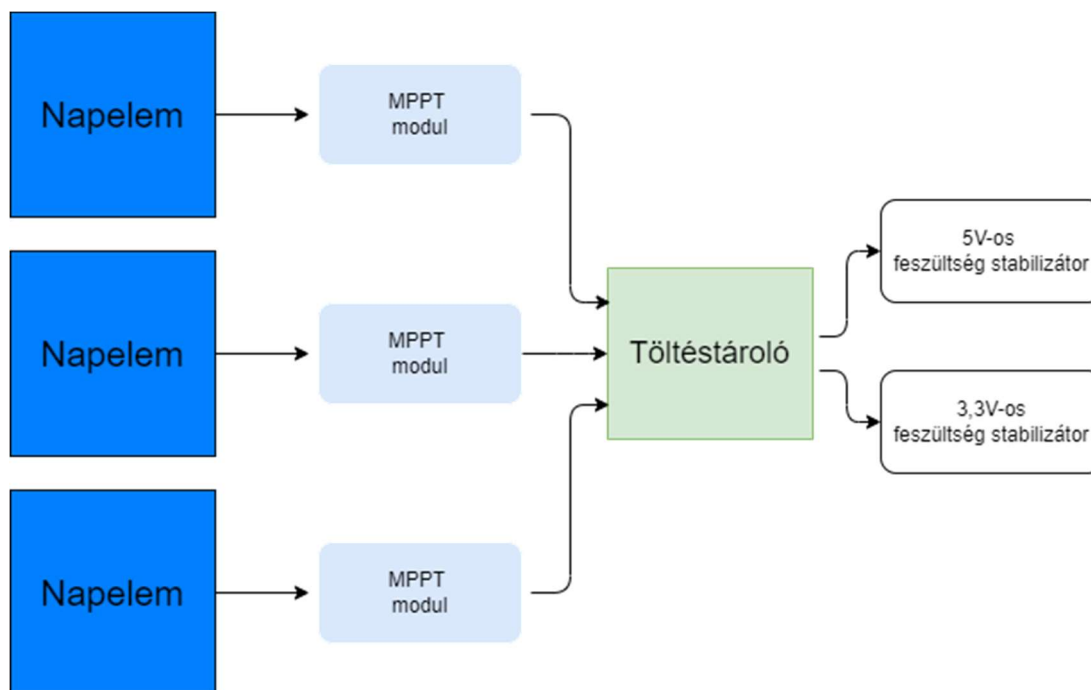
.....
hallgató aláírása

Tartalom

1.	Bevezetés	2
2.	Az eszköz megtervezése	3
2.1	Napelem kiválasztása	3
2.2	MPPT modul kiválasztása	4
2.3	Feszültség stabilizátorok	7
2.3.3	Integrált feszültség szabályozók.....	8
2.3.4	Kapcsolóüzemű tápegységek	9
2.3.5	Feszültség stabilizátor specifikációk, amiknek meg kell felelnie.....	11
2.3.6	Feszültség stabilizátor kiválasztása	12
3.	Feszültség stabilizátor tervezése és mérése	13
3.1	Feszültség stabilizátorok mérése	21
3.2	MT3608 kapcsolóüzemű tápegység értékelése	31
4.	Napelem vizsgálata.....	32
4.1	Napelem mechanikai vizsgálata	32
4.2	Napelem jelleggörbéjének felvétele	33
4.2.1	Napelem fix terheléses mérése.....	37
4.2.2	Napelem hőmérséklet függés mérése	40
4.2.3	Napelem I-U karakterisztikájának felvétele	42
4.2.4	Napelem értékelés	45
5.	MPPT modul tervezése és mérése	47
5.1	MPPT modul működése	52
5.2	MPPT modul mérése	55
6.	Összeépített áramkör vizsgálata	58
7.	Összefoglaló	61
8.	Summary	62
9.	Felhasznált irodalom	63
10.	Ábrajegyzék	64

1. Bevezetés

A szakdolgozatomban egy napelemes tápegységet fogok tervezni, illetve megvalósítani, ami el tudna látni egy vagy több mikrovezérlőt és a hozzá tartozó egyéb csatlakoztató szenzorokat, érzékelőket is. Javasolt alkalmazási lehetőségek: egy kis műhold tápellátása, illetve egy kültéri meteorológiai állomás. Ennek megfelelően a megbízhatóság, a kis méret, és a jó hatásfok a főbb tervezési szempontok.



1. ábra: Napelemes tápegység blokkvázlat

Az 1. ábrán látható egy egyszerű blokkvázlat, ami megmutatja, hogy körülbelül milyen elemekből fog állni a megvalósítandó eszköz. A napelemek olyan áramkörre vannak csatlakoztatva, ami a napelemek felé olyan terhelést mutat, hogy azok a legnagyobb teljesítményt adják le különböző megvilágítás és terhelés mellett is, másrészt vezérli a rákapcsolt akkumulátor töltését. Erre van csatlakoztatva egyrészt az akkumulátor vagy szuperkondenzátor, másrészt a rendszer további része felé stabilizált feszültséget adó tápegység modulok.

2. Az eszköz megtervezése

2.1 Napelem kiválasztása

Ahhoz, hogy elkezdhessem, először is utána kellett néznem, milyen fajta napelemek léteznek és melyik lenne a legmegfelelőbb, ha elkészül az eszköz. A kereskedelemben kapható napelemek előállítási technológiájuk szerint 3 csoportba sorolhatók:

- Monokristályos
- Polikristályos
- Amorf

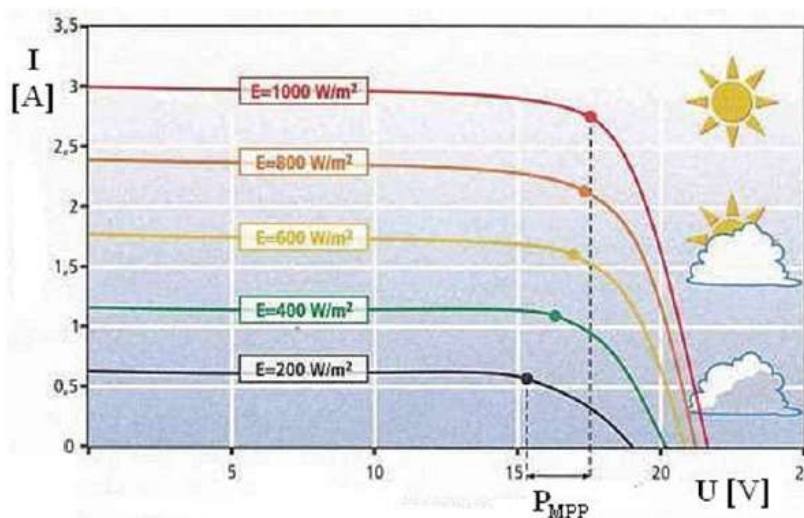
A szilícium mono- és a polikristályos napelemek hatásfoka 13-18%, ez gyártástól függ, laboratóriumi körülmények között a 23%-ot is elérheti a hatásfokuk. Az amorf technológiával készült napelemek hatásfoka alacsonyabb, 6-8%. A monokristályos napelemeket egy kristály húzással állítják elő. Egy nagy tömböt hoznak létre, amit a későbbiekben felszeletelnek vékony lapokra. A kész napelemdarabok igen sérülékenyek, mechanikai behatásra könnyen törnek. A polikristályos napelemeket párologtatással, CVD technológiával állítják elő. Az amorf napelem vékonyréteg technológiával készül, a szilíciumot felgőzölik a közvetítő felületre. Mivel ez a fajta technológiai megoldás elég sokrétű, hajlékony és akár áttetsző is lehet. Sokféle felhasználás elképzelhető, mint például ablakokba beépítve, vagy ruhára varrva, futás vagy sétálás közben lehetséges tölteni különböző elektronikai eszközöket. Sajnos a teljesítménye a mono- és a polikristályos napelemhez képest elég kevés, így ugyanakkora teljesítmény eléréséhez 2-3-szor akkora felületre van szükség. [2]

A legnagyobb hatásfokú gallium-arzenid alapú napelemeket a műholdakon használják, mivel a hatásfoka elérheti a 46%-ot is. Az ilyen napelemek azért képesek ilyen nagy hatásfokot elérni, mert a p-n átmeneteket a gyártás során egymásra építik, akár 8 vagy több rétegben is. A gallium-arzenid napelem nehezen hozzáférhető, mivel a piacon nem állítanak elő közfelhasználásra nagy mennyiségben. A mono- és polikristályos napelem beszerzése könnyebb, mivel ezeket a napelemeket használják a háztartások. Ha lehetne akkor speciális

napelemet használnék, ami gallium-arzenid alapú. Amit használni fogok, az egy mono- és egy polikristályos napelem a mérésekhez. [1] [2]

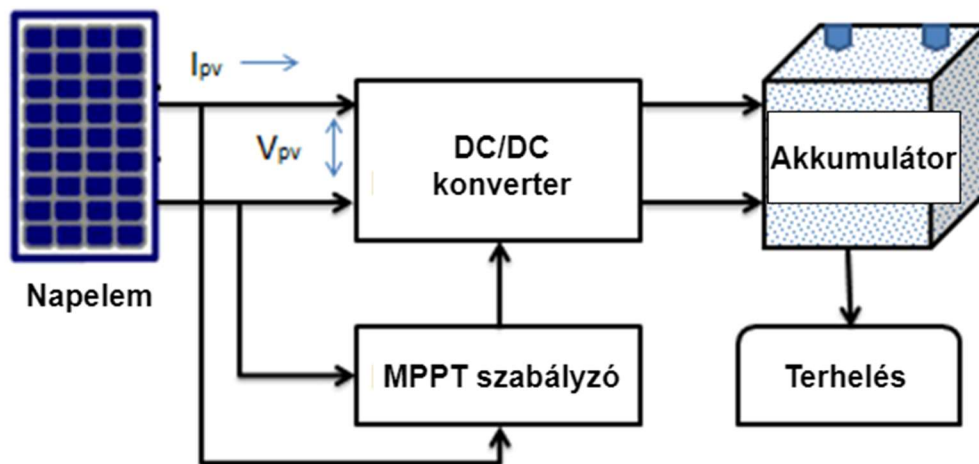
2.2 MPPT modul kiválasztása

A napelemek és a feszültségszabályzók közé az ún. MPPT áramkörök csatlakoznak. Angolul ez a Maximum Power Point Tracking rövidítése, magyarul a maximális teljesítményű munkapont beállítása. Ennek az a célja, hogy a napelemből a lehető legnagyobb teljesítményt vegye ki, függetlenül az utána kötött terheléstől. A 2. ábrán látható a napelem karakterisztikája különböző megvilágítások esetén. Be vannak jelölve az optimális munkapontok. A munkapont helye a terheléstől is függ, az viszont nem feltétlenül optimális, így az MPPT áramkör feladata, hogy egy olyan látszólagos terhelést mutasson a napelem felé, ami az optimális munkapontba helyezi. Az MPPT szabályzó egybe van építve általában egy DC-DC konverterrel, ami a kimenetén egy fix feszültséget állít elő.



2. ábra: MPPT teljesítmény szabályozása [1]

Ha csökken a megvilágítás mértéke, akkor csökken a napelem árama is. Minden megvilágításhoz másik görbe tartozik. Az MPPT minden egyes görbénél kiszámítja, melyik a legoptimálisabb pont, ahol a legnagyobb teljesítményt tudja kinyerni a napelemből. Úgy csökkenti a napelem kapcsain a feszültséget, hogy a legnagyobb teljesítményen működtesse a napelemet. A 3. ábrán az MPPT modul blokkvázlata található, amely egyszerűsítve bemutatja a működést.



3. ábra: MPPT egyszerűsített blokk vázlat [2]

A következő lépés egy napelemvezérlő modul keresése, ami megfelel ezeknek a feltételeknek:

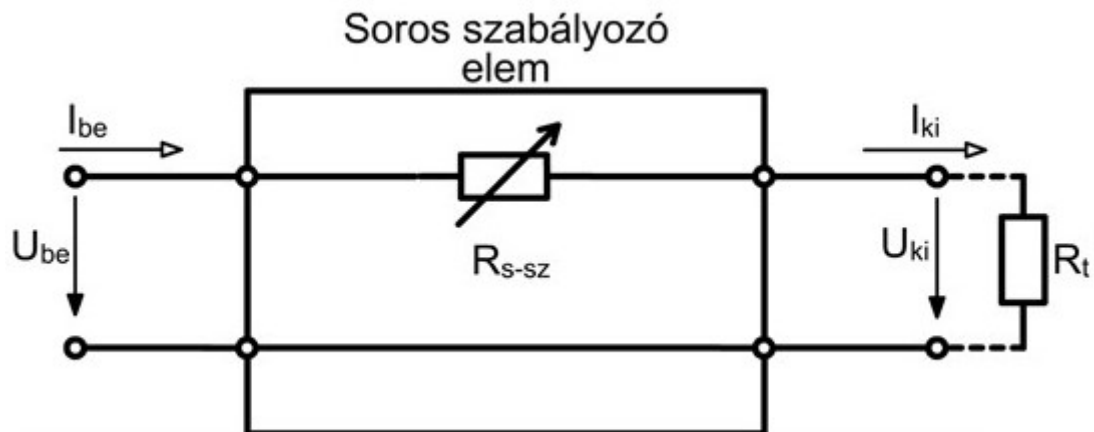
- Kis teljesítményfelvétel
- Jó hatásfok
- Kis bemeneti feszültségről való működés
- Nem foglal nagy helyet a nyákon
- Több MPPT modul párhuzamosítható legyen az esetleges meghibásodások miatt.

Ezen szempontok alapján kerestem MPPT modult, ami leginkább megfelel az előírt szempontoknak. Nagyon sokfajta ilyen MPPT található, kis és nagy teljesítményű. Nem könnyű megtalálni azt, ami pont a legmegfelelőbb. Hosszas keresgélés után rábukkantam a Texas Instruments bq típusjelzésű integráltáramkör családjára, amiben nem kevés napelem vezérlő és töltő található. Sok fajta napelem szabályozó van ezek között. Bq24650 - például ez egy olyan, aminek a működési feszültsége 5V -tól 24V-ig terjed és 12 és 24 voltos rendszerek ellátásához tervezték. 500mA-tól 10A kimeneti áram előállítására képes. Másik bq családhoz tartozó napelem vezérlő, amit találtam, a bq25570 típusú. Ez már 600mV bemeneti feszültség hatására szabályozza a napelem karakterisztikát és nyugalmi árama csak 488nA. Ezek után bukkantam rá még a bq25504 típus jelzésű MPPT moduljára, aminek még kisebb a minimum cold-start feszültsége. 600mV helyett csak 330mV és a nyugalmi áramfelvétele is

mindössze 330nA. Azért a bq25504-re esett a választásom, mert ennek a specifikációi voltak a legmegfelelőbbek. Mint kis indulási feszültség és kis nyugalmi áramfelvétel, ami abból a szempontból jó, ha hosszú ideig nem érkezik a napelemre fény, nem fogja feleslegesen fogyasztani a telep töltését. Jó a hőmérséklet tűrése, -40°C és 125°C közti hőmérsékleten képes működni. Így például szabadtéri meteorológiai állomásra is be lehet építeni megfelelő tápellátásnak. Ez tágabb, mint egy akkumulátor által általában elviselt hőmérséklettartomány, így nem ez fogja a szűk keresztmetszetet jelenteni.

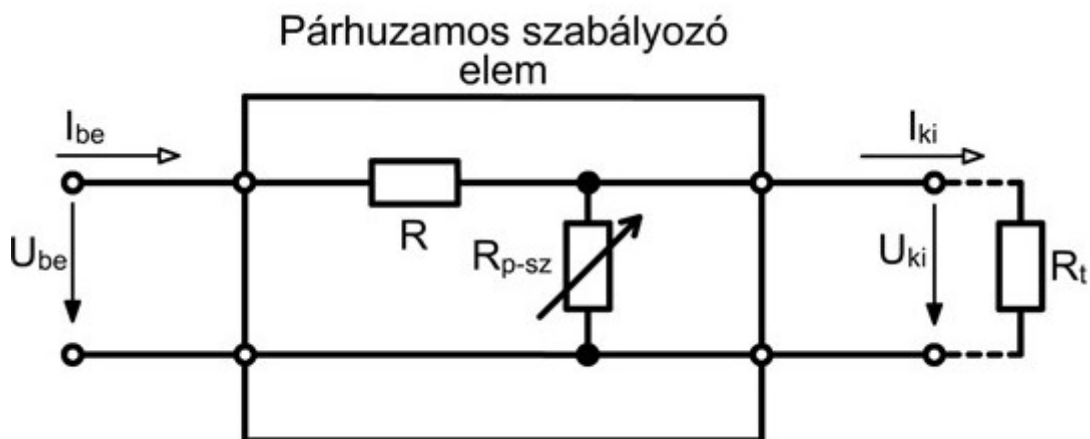
2.3 Feszültség stabilizátorok

A feszültségstabilizátorok olyan áramkörök, amelyeknek az a feladata, hogy a fogyasztó feszültségét állandó értéken tartsák a tápfeszültség, a terhelés és a környezeti hőmérséklet változása esetén. Létezik soros és párhuzamos feszültség szabályozó. A soros szabályozóelem esetén a terheléssel sorosan van kapcsolva. A szabályozó úgy viselkedik, mint egy vezérelt potenciométer, amelynek növekedése a kimeneti feszültség csökkenését eredményezi.



4. ábra: Soros szabályozó [3]

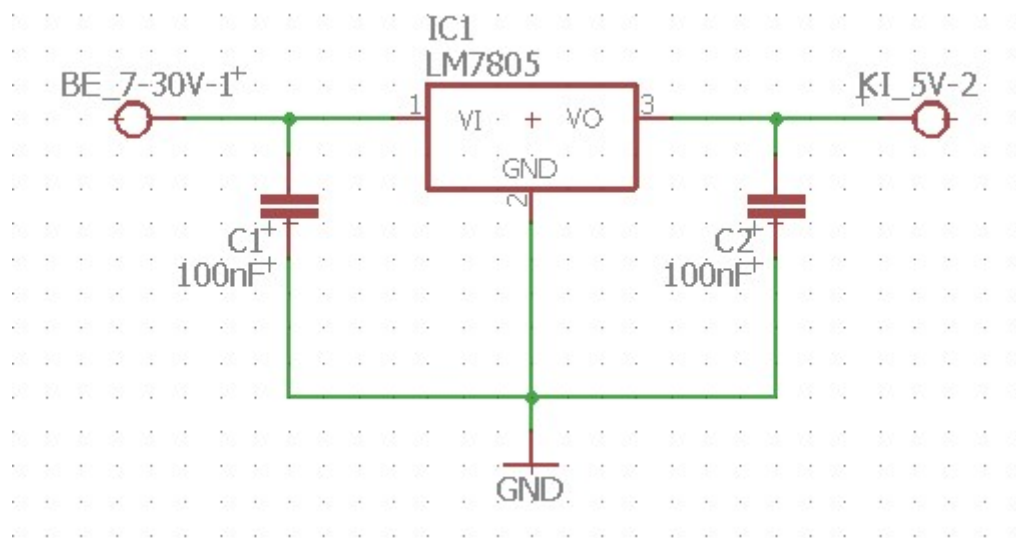
A párhuzamos stabilizátor ellenállásának változtatásával azonos irányba változik a kimeneti feszültség.



5. ábra: Párhuzamos szabályozó [3]

2.3.3 Integrált feszültség szabályozók

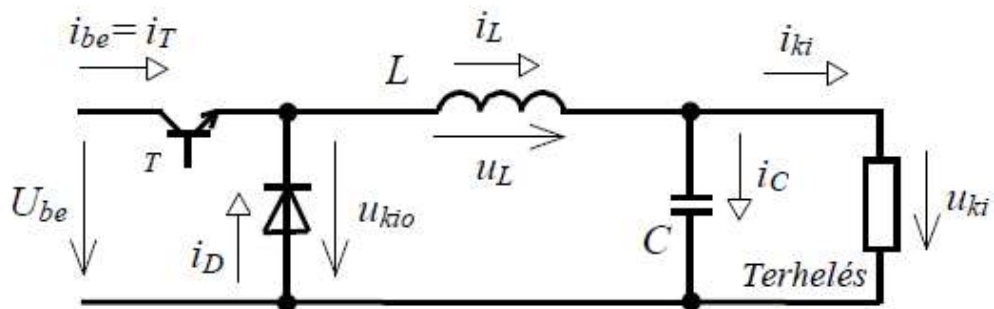
A belső felépítése a soros szabályozó felépítésére hasonlít visszacsatolásokkal ellátva, és a belső áramköri kapcsolásuk megegyezik a diszkrét elemekkel felépített változatokéval. Mivel ugyanolyan alkatrészekből épül fel belül, mint a soros szabályozó, így ennek a szabályozónak a hatásfoka sem valami jó azokhoz képest. Sajnos ennek a feszültség stabilizátornak a hátránya az is, hogy csak akkor ad fix feszültséget, ha eléri vagy meghaladja a bemeneti feszültség a kívánt kimeneti feszültséget, és a felesleges feszültséget hő formájában eldisszipálja.



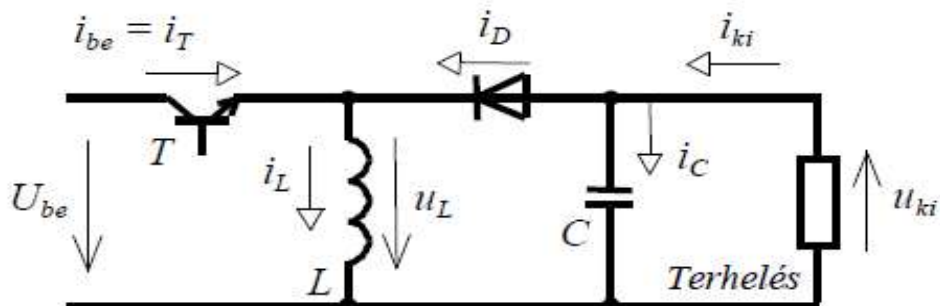
6. ábra: Integrált feszültségstabilizátor kapcsolása

2.3.4 Kapcsolóüzemű tápegységek

Három féle kapcsolóüzemű tápegység létezik: feszültség-növelő, feszültség-csökkentő, feszültség-növelő/csökkentő egyben. Ezeknek az alaptípusoknak a felépítései ideális alkatrészekből megegyeznek. Előnye a disszipatív feszültség szabályozókhoz képest a jobb hatásfok, és hogy kisebb feszültségről is képesek működni. Hátrányuk, hogy elektromágneses zavarokat kelthetnek az áramkörben, kimenetük nem lesz tökéletes egyenfeszültség, valamint, hogy egyes érzékeny eszközök meghajtásánál további feszültségstabilizálást kell végezni.

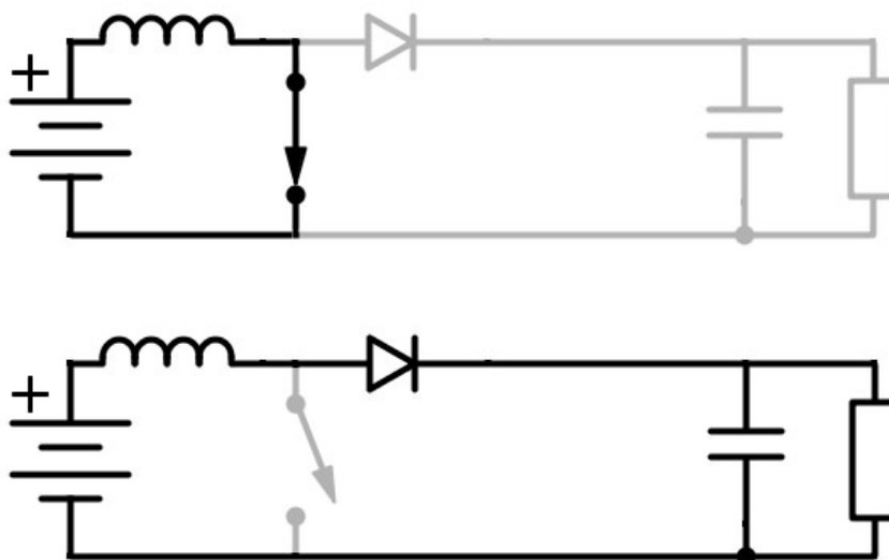


7. ábra: Ideális feszültség-csökkentő [4]



8. ábra: Ideális feszültség-növelő/csökkentő [4]

Egy ideális feszültség-növelő alap kapcsoláson fogom bemutatni a kapcsolóüzemű tápegységeknek a működését. Az ideális tranzisztort egy kapcsolóval helyettesíttem.



9. ábra: Ideális feszültség-növelő konverter működése [5]

Amikor a kapcsoló bekapcsolt állapotban van, az induktivitás elkezd töltődni, kialakul a mágneses tere, miközben a terhelésre jutó feszültség nulla. A kapcsoló kikapcsolásakor a tekercsben tárolt mágneses energia ismét elektromos energiává alakul, és a telep mellett másodlagos feszültségforrásként táplálja az áramkört. A diódán keresztül a telep feszültségénél nagyobb feszültséggel kezdik el táplálni a terhelést és tölteni a kimeneti kondenzátort. Amikor a kapcsoló ismét kikapcsol, a kondenzátor elkezd kisülni. Ha a kapcsolgatás elég gyors ahhoz, hogy a kondenzátor ne süljön teljesen ki a következő ciklus előtt, akkor a terhelésre jutó feszültség értéke mindig a bemeneti feszültség felett marad. Így működik ideális esetben egy ideális feszültségnövelő kapcsolóüzemű tápegység. A valós kapcsolóüzemű tápegység annyival tér el az ideálistól, hogy a kapcsoló nem tud végtelen kapcsolást végrehajtani 1 másodperc alatt. A kapcsoló be van építve egy integrált IC-be, vagy külön kell rákötni a vezérlő IC-re, ami szabályozza a kapcsolási frekvenciát és nézi a kimeneti feszültséget, hogy a kívánt feszültség legyen a kimeneten. Más szóval, vissza van csatolva a kimenet a vezérlő IC-be, ami a kitöltési tényezőt vagy a frekvenciát változtatva korrigálja a kimeneti feszültséget a feszültség csökkenése, illetve növekedése alapján. [8]

[9]

2.3.5 Feszültség stabilizátor specifikációk, amiknek meg kell felelnie

A feszültség stabilizátoroknak megfelelő feszültség szint mellett a megfelelő áramot is biztosítaniuk kell. Egy meteorológiai állomás vagy Cubesat-ban több mikrovezérlőt, rádiós adóvevőt és szenzorokat is el kell látni. A méreteket figyelembe véve néhány wattnál nagyobb napelem teljesítménnyel nem számolhatunk, így 5V vagy 3,3V tápfeszültség mellett néhány száz mA áramfelvételt biztosíthatunk, ami elegendő lehet több mikrovezérlő és kiegészítő áramkör működtetéséhez. (A rádió működését lehet rövid időtartamokra korlátozni, így olyankor az akkumulátor segítségével rövid időre nagyobb teljesítményt is leadhatunk.)

Célszerű csak egyetlen tápfeszültséget használni. A két legelterjedtebb (hobby szinten is kapható eszközöknél) a 3,3V és az 5V. Az 5V eszközök gyakran használhatóak kisebb feszültségről is, így a 3,3V tápfeszültség választása célszerű lehet akkor, ha néhány eszközt könnyebb megtalálni ezen feszültséghez.

2.3.6 Feszültség stabilizátor kiválasztása

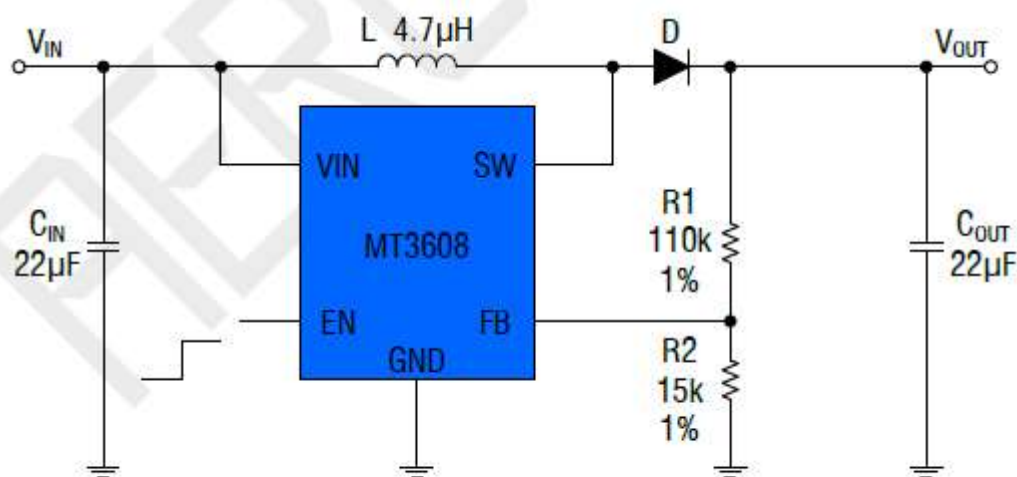
Mivel az előző feszültség szabályozók nem valami jó hatásfokúak és nagyobb feszültség kell a bemenetükre, hogy a kimenetükön a kívánt stabil feszültséget előállítsák, így másik megvalósítási módot választottam a feszültség stabilizálására. Ezt kapcsolóüzemű tápegység segítségével fogom beállítani a megfelelő feszültség szintre. A kapcsolóüzemű tápegységek kis méretük ellenére nagy áramokat is képesek magukból kiadni, jó hatásfokkal. A kapcsolóüzemű tápegységek hatásfoka 80-95% között van és nagy teljesítményt képesek leadni magukból. A nyugalmi áramfelvételük is kisebb, mint a többi feszültség stabilizátornak. Nehéz volt megtalálni a megfelelő kapcsolóüzemű tápegység vezérlőt, mert elég nagy bemeneti feszültségtől kezdenek el működni. Nem több száz voltot kell elképzelni, hanem 6-9V feszültséget. Rendes utánajárást kellett végezni, hogy megtaláljam azokat, amik számomra megfelelőek lesznek. Az egyik, amire esett a választásom, az a Hexin gyártmányú feszültségnövelő és feszültségcsökkentő egyben, ami képes 1,8V-tól 5V-ig bemeneti feszültségen működni, ez a HX4002-3.3 jelzésű IC. Ez alapvetően egy charge pump, magyarul töltéspumpa. Ez egy olyan áramkör, ami különbözik a kapcsolóüzemű tápegységektől. Nincs benne tekercs, csak egy vezérlő IC-ből és egy kondenzátorból áll. Ezt a kondenzátort tölti a vezérlő is, és mikor eléri a beállított feszültséget, a kimenetre kapcsolja, ha visszaesik a feszültség, akkor ismét tölteni kezd. Ez 1,8V-tól már képes a kimenetén 3,3V-ot előállítani és 100mA terhelő áramot képes biztosítani. A másik kapcsolóüzemű tápegység, amit választottam, az Aerosemi gyártmányú integrált áramkör, MT3608-as jelzésű. Ez az IC 2V bemeneti feszültségtől kezd el működni. Ez egy feszültségnövelő kapcsolóüzemű tápegység. A kimeneti feszültsége állítható 5V-tól 20V-ig, a maximális áram, amit képes magából kiadni, az 2A is lehet.

3. Feszültség stabilizátor tervezése és mérése

A tervezés kezdetén mindig az egyik első lépés, hogy az adatlapot tüzetesen áttanulmányozom, hogy milyen feltételek mellett tudnak az egyes alkatrészek működni. Ha ez megvan, akkor kezdem csak el megtervezni az áramkört. Sokszor célszerű egyes alkatrészekből direkt nagyobb teljesítményűt választani. Ha minden rendben működött és nem volt semmi gond a mérés során, és terhelés hatására sem ment tönkre semmi, akkor esetleg, hogy kisebb, kompaktabb legyen az áramkör, akkor egyes alkatrészekből kisebb teljesítményűt választok a végleges verzióban. De mielőtt az is bekerülne, ugyanazon a tesztelési folyamaton kell átesnie, mint az első verziónak. Ha nincs vele gond, akkor végleges összeépítésre kerül.

Tervezés előtt azért szeretem mindig a kezemben tartani az egyes alkatrészeket, hogy ne legyen esetleges meglepetés. Nem jó, ha nyákgyártás után derül ki, hogy a rendelt alkatrész nem megfelelő és az egész gyártás mehet a kukába. Nem valami jó, amikor 2-10 darab nyák mehet a kukába, mert nem megfelelő a lábkiosztás. Nem raszteres az alkatrész, vagy rosszul volt fent a rendelési honlapon, a dokumentum változott, vagy más beszállítótól jött és kicsit más. Láttam erre példát beültető cégnél. Szerencsére ott figyeltek erre, hogy a felmerülő selejt gyártást elkerüljék. Elég akár csak egy alkatrész elnézése, és nem kicsi kár keletkezett volna. Én ezért szeretek mindent előre megnézni, hogy rendben van-e. Mint az előzőekben írtam, a feszültség stabilizátoroknál kifejtettem, hogy mért is a kapcsolóüzemű tápegységet választottam ennek a feladatnak a megvalósításához. A jó hatásfok, kis nyugalmi áram és a kis feszültségtől való működés miatt. Az első áramkör, aminek nekiálltam megrajzolni a nyáktervét, egy fix 5V-os feszültséget előállító step-up konverter kapcsolás volt.

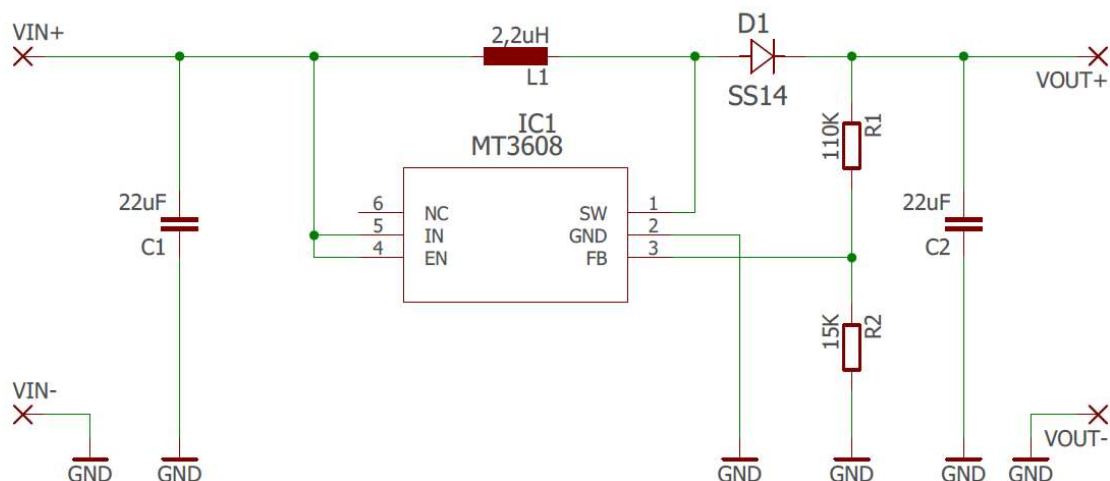
Mint említettem, egy feszültségnövelő áramkört építék a MT3608 IC segítségével. Az MT3608 IC adatlapján javasolt egy kapcsolást.



10.ábra: Kapcsolási rajz adatlapon 5V feszültség stabilizátorhoz [6]

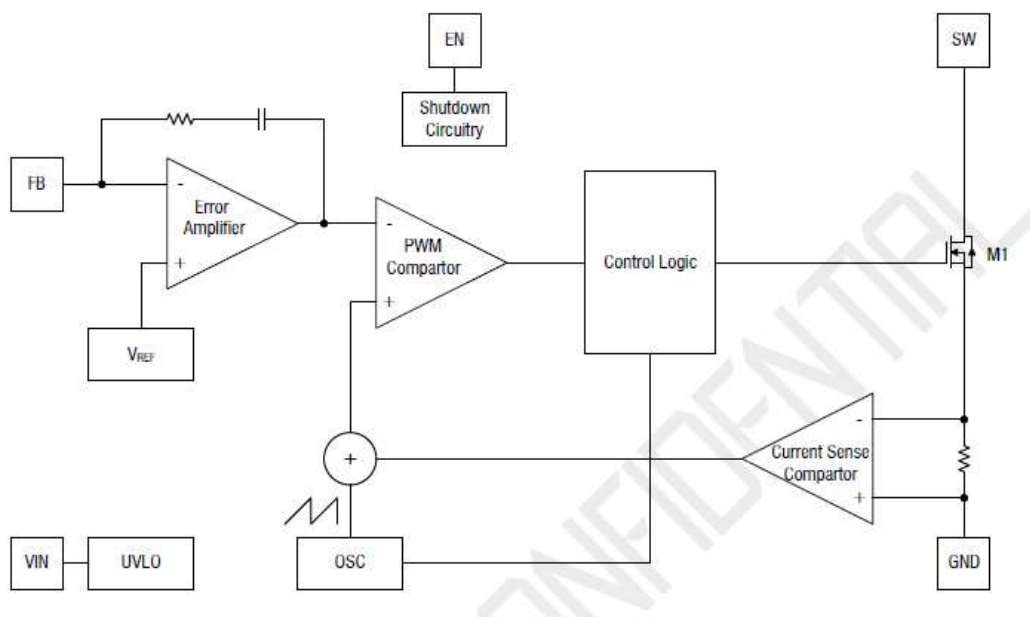
A 10. ábrán látható a megvalósítandó kapcsolás, melyet az Eagle szoftverben terveztem meg. Az első lépés az alkatrészek ellenőrzése volt, hogy minden lábméret megfelelő és hogy fellelhető-e az Eagle könyvtárában. Mint kiderült, ilyen típusú IC, amit én fogok használni, nem található. Így meg kellett terveznem a kapcsolási rajzjelét és a lábkiosztását, *footprint*-jét is mind a két IC-nek, amit használni fogok. Szerencsére ugyanolyan tokozású mind a kettő, és csak a láb elnevezést kellett megváltoztatnom. Nem kellett kétfajta IC típust létrehoznom. Mind a két IC, amit használni fogok, SOT23-6 tokozású. Small Outline Transistor a SOT jelentése, felületre szerelhető, a kivezetések két oldalon vannak, a tokozás élén, egy irányba hajlítva, és 6 lába van. Ennek megtervezése után már csak egy-két paramétert kellett megváltoztatni az egyes alkatrészeknél, hogy könnyebb legyen a forrasztás.

A tervezést elkezdve, egy egyszerű alap kapcsolást összetéve már kész is volt az áramkör rajza.



11. ábra: Kapcsolási rajz 5V feszültség stabilizátorhoz

Mint ahogyan a 11. ábrán is látszik, nem nagyon tér el az alap kapcsolástól a kész áramköri rajz. Annyi különbség van, hogy a tranzisztor helyett bekerült a vezérlő IC és plusz két darab ellenállás, valamint egy kondenzátor a bemenetre.



12. ábra: MT3608 belső blokk diagram [6]

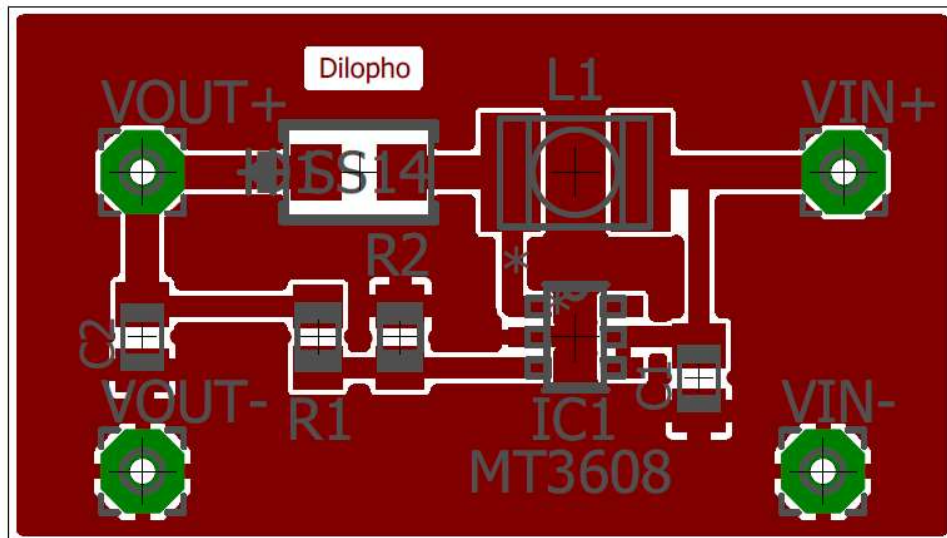
A 12. ábrán található a kapcsoló, ami ebben az IC-ben egy kiűrtéses N-csatornás MOSFET. Ez végzi a kapcsolást. Beépített oszcillátora van, ami 1,2MHz kapcsolási sebességre képes. A kimeneti feszültség beállítása a FB lábon történik egy feszültségosztó segítségével.

A huzalozási rajz (13. ábra) elkészítésében voltak szabályok, amik az IC leírátában meg voltak adva. Mint például a C_{IN} , az én esetemben itt a C_1 , a legrövidebb elvezetéssel kellett összekötni a 2-es és az 5-ös lábbal, hogy jól működjön a konverter.



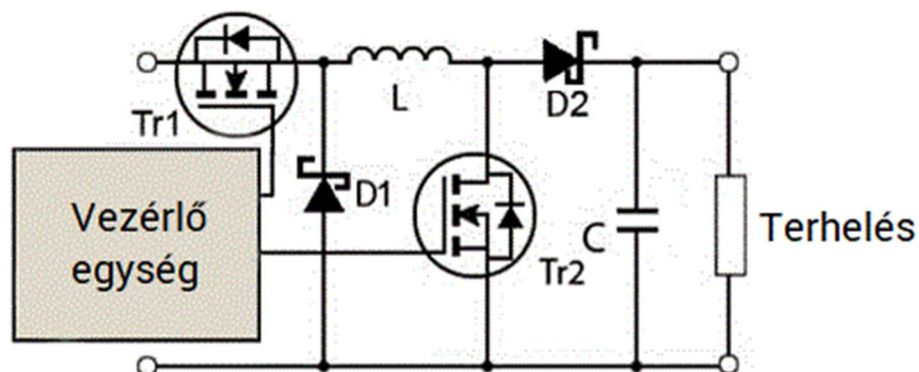
16

használni. A 14. ábrán található a nyáktervem az 5V-os feszültség stabilizátorhoz.



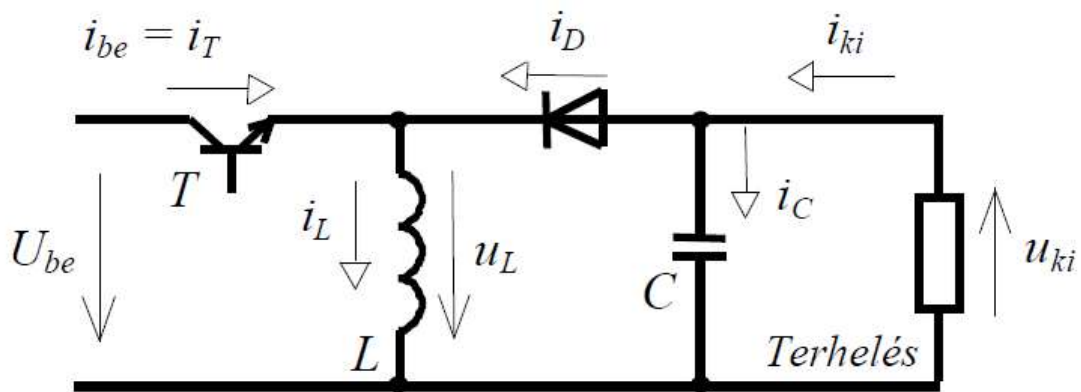
14. ábra: Nyákterv 5V-os feszültség stabilizátorhoz

A második áramkör egy fix 3,3V -os feszültség előállításra képes kapcsolóüzemű step-up/down konverter. A buck-boost konvertereket többféleképpen is meg lehet építeni. Az egyik az, hogy ötvözzük a két konvertert egy kapcsolásban. A két konverter kapcsolás kombinálásával olyan szabályozó áramkört lehet előállítani, amely a bemeneti feszültségek széles skáláját képes kezelni, akár magasabb, akár alacsonyabb értéket, mint az ellátandó áramkör számára kellő feszültségszint. Szerencsére mind a buck, mind a boost konverter nagyon hasonló alkatrészeket használ; így csak át kell „kapcsolni” őket a bemeneti feszültség szintjétől függően.



15. ábra: Feszültségnövelő-csökkentő konverter kettő az egyben [9]

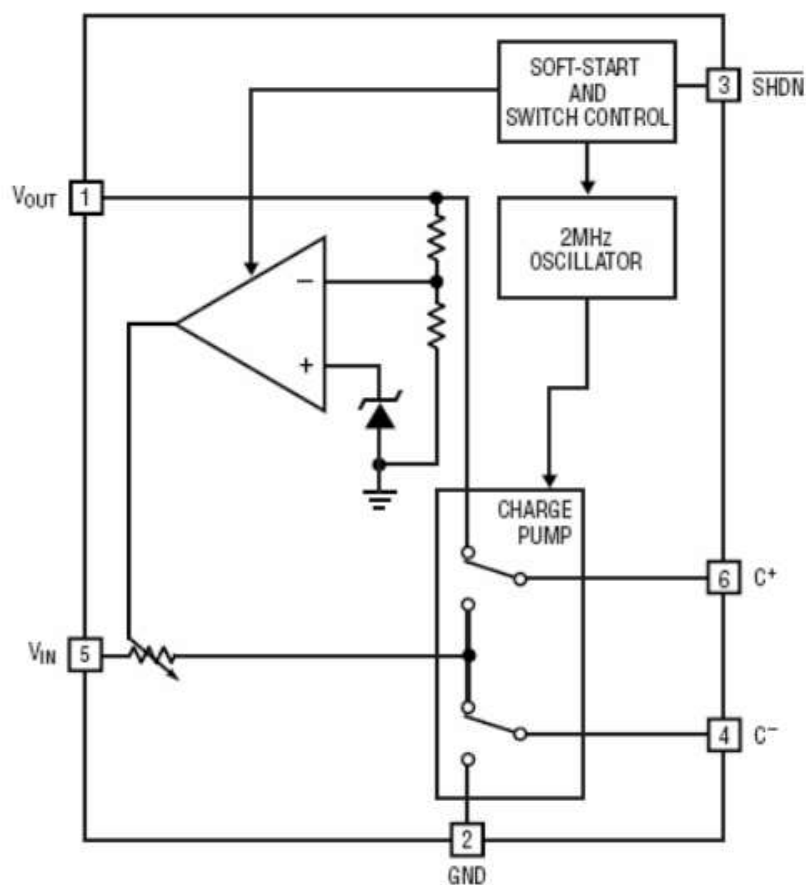
Az 15. ábrán a buck és a boost konverter közös alkotóelemeinek kombinációját láthatjuk. Szükséges hozzá továbbá ez a vezérlőegység, amely érzékeli a bemeneti feszültség szintjét, majd kiválasztja a megfelelő áramköri kapcsolást. A példa áramkörben a tranzisztorok MOSFET-ek, a diódák pedig ún. Schottky típusok, amelyek alacsony nyitóirányú feszültséggel és magas kapcsolási sebességgel rendelkeznek. A másik kapcsolás (16. ábra) kicsit más, mint az előző. Ez is buck-boost konverter, csak a kimeneti feszültsége polaritást vált, a bemenethez képest negatív feszültség jelenik meg a kimenetén.



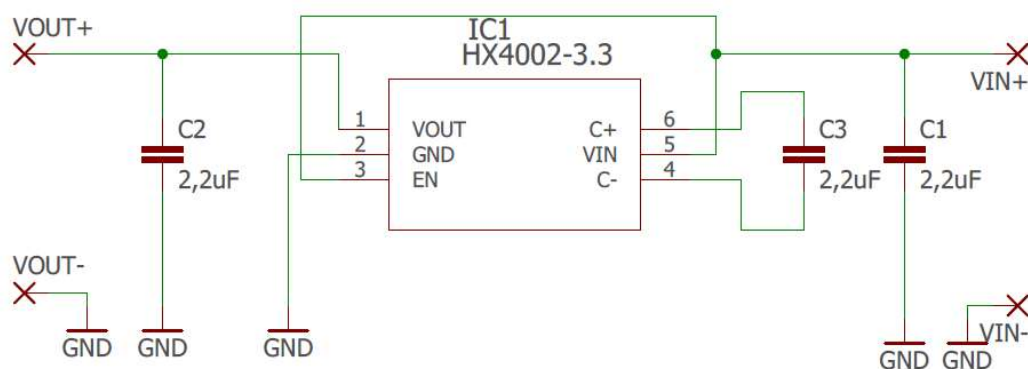
16. ábra: Buck-Boost konverter [4]

Ez a kapcsolás is megfelelt volna nekem, de találtam egy nála sokkal kevesebb alkatrészből állót, ami egyszerűbb és a nyugalmi árama is kisebb, így arra esett a választásom. Mindössze 4 alkatrészből áll a vezérlő IC-vel együtt és csak kondenzátorok kellenek hozzá.

Amit én használok, az teljesen más elven működik, mint ezek a buck-boost konverterek. Egy vezérlő IC-ből (18. ábra) és egy rácsatlakoztatott kondenzátorból áll, aminek a belsejében töltő elektronika található. Egy ellenálláson keresztül tölt egy külső kondenzátort, és ha eléri a megfelelő feszültség szintet, akkor a kimenetre rákapcsolja (17. ábra). Utána megint tölteni kezdi a kondenzátort. Ha visszaesik a kimeneti feszültség, ismét rákapcsolja a kondenzátort. Ezt a metódust ismétli egyfolytában.

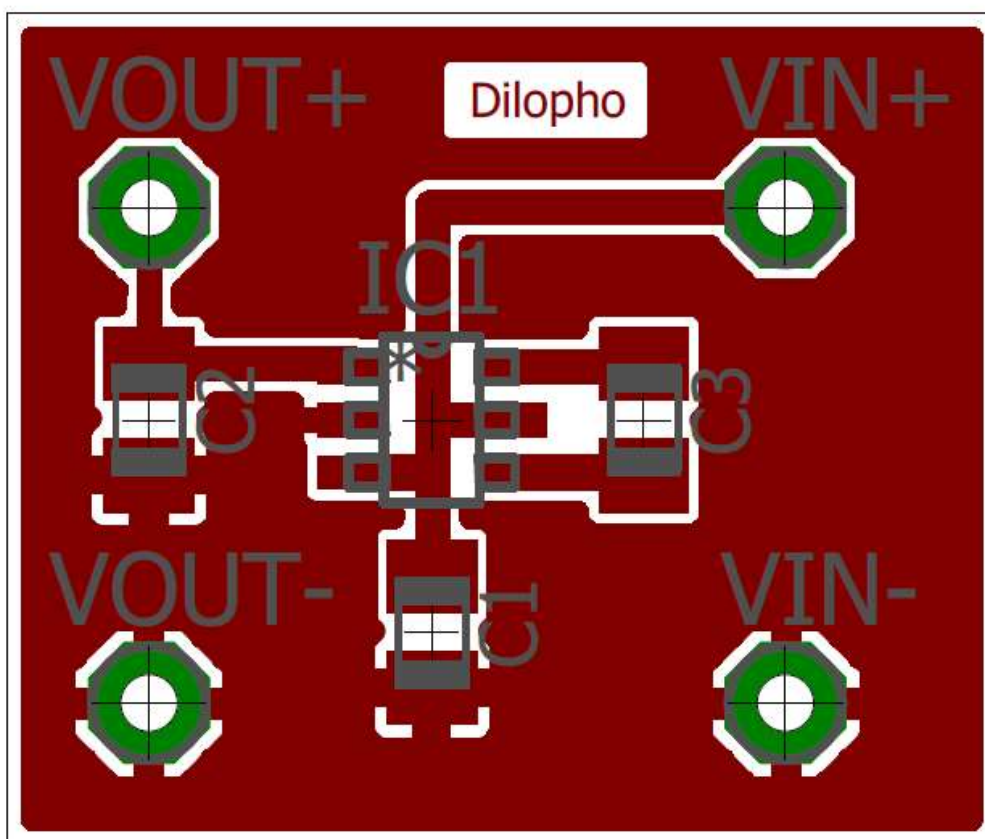


Így néz ki maga a kapcsolás, amit összeraktam (18. ábra):



A C1 és a C2 kondenzátor csak a pufferek, hogy ne essen vissza a bemeneti és a kimeneti feszültség. Elég kevés alkatrész szükséges a megépítéséhez,

nagyon kis helyre elfér egy nyomtatott áramkörön. A hátránya az, hogy a maximális kimeneti árama 100mA papíron. Ez az áramerősség megfelelő egy mikrokontroller meghajtásához.



19. ábra: Nyákterv 3,3V-os feszültség stabilizátorhoz

A huzalozás készítése elég könnyedén ment (19. ábra). A tokozás készítői figyeltek arra, hogy ne kelljen vezető sávokat keresztbe kötni, kényelmesen el lehessen helyezni az alkatrészeket. Egy 15x15mm helyen kényelmesen elfér úgy, hogy még mellé lehet helyezni más alkatrészeket is. Hogy könnyebb legyen a mérés, próbáltam minél nagyobbra tervezni azt a helyet, ahol el fogom helyezni.

3.1 Feszültség stabilizátorok mérése

Méréshez felhasznált eszközök és elrendezés:

UNI-T UT61E Digitális Multiméter

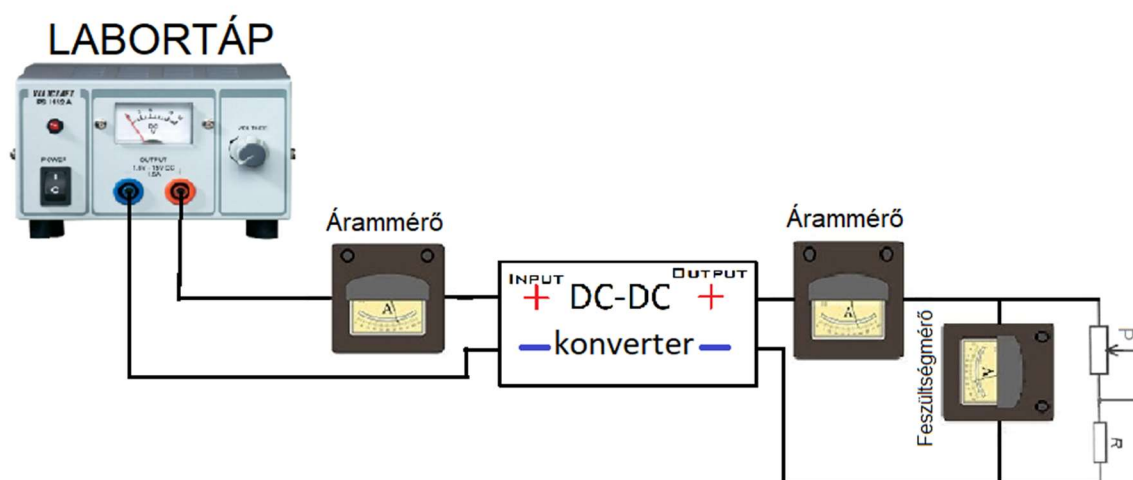
UNI-T UT139E/S Digitális Multiméter

UNI-T UTP3310TFL/FFL Digitális Labortápegység

RIGOL DS1000Z Digitális Oszilloszkóp

Potenciométer $P=10k\Omega$

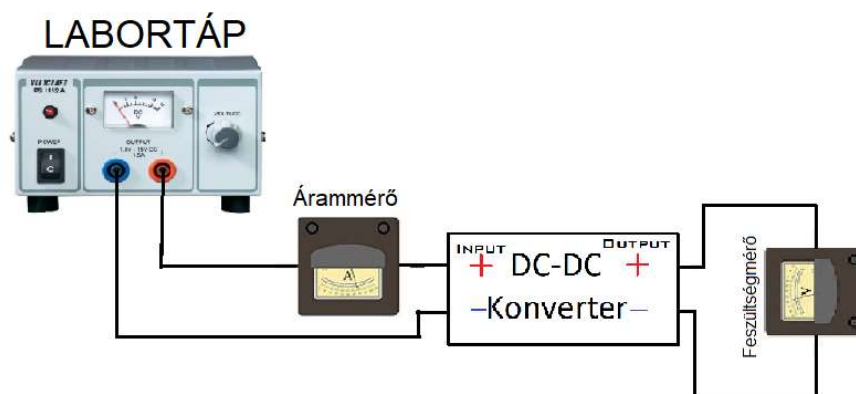
Ellenállás $R=34\Omega$



20. ábra: Feszültség stabilizátor mérési elrendezés terheléses mérés

Mérés rövid leírása (20. ábra, 21. ábra):

Labor tápegységről megválasztva a kapcsolóüzemű tápegységet mérjük, hogy mekkora áramot vesz fel, ha nincs rajta terhelés. A bemeneti feszültséget 0-5V között változtatva megmérjük, mikor jelenik meg a beállított feszültség a kimenetén. Ha megjelent a beállított kimeneti feszültség a kapcsolóüzemű tápegységen, a bemeneti áramot is rögzítjük mellé. Ezek után rácsatlakoztatjuk a terhelést, a potenciométert és a vele sorba kötött ellenállást. A sorba kötött ellenállás azért kell, hogy ha a potenciométert nulla állásba csavarjuk, ne menjen át a kimenet rövidzárba.



21. ábra: Feszültség stabilizátor mérési elrendezés terheletlen mérés esetén

A mérés lépései:

- 1) Labor tápegység áramkorlátjának beállítása 200mA áramkorlátra
- 2) Helyes kapcsolás mérési elrendezés összeállítása
- 3) Megfelelő mérési határ megválasztása
- 4) Terheletlen mérés lemérése, adatok táblázatba foglalása
- 5) Terheléses mérés mérési eredményeinek táblázatba való rögzítése

Méréseket csak az MT3608-sal hajtottam végre, HX4002 IC-t nem sikerült vásárolnom, de a későbbiekben az is sorra kerül.

Első mérés: a kimenet szabadon van, nincs rajta terhelés.

$R_t = \infty$		
$U_{be}(V)$	$I_{be}(\mu A)$	$U_{ki}(V)$
0	0	0
0,5	4	0,41
1	10	0,905
1,5	37	1,34
2	200	5,09
2,5	175	5,05
3	160	5,05
3,5	166	5,05
4	169	5,05
4,5	192	5,05
5	160	5,06

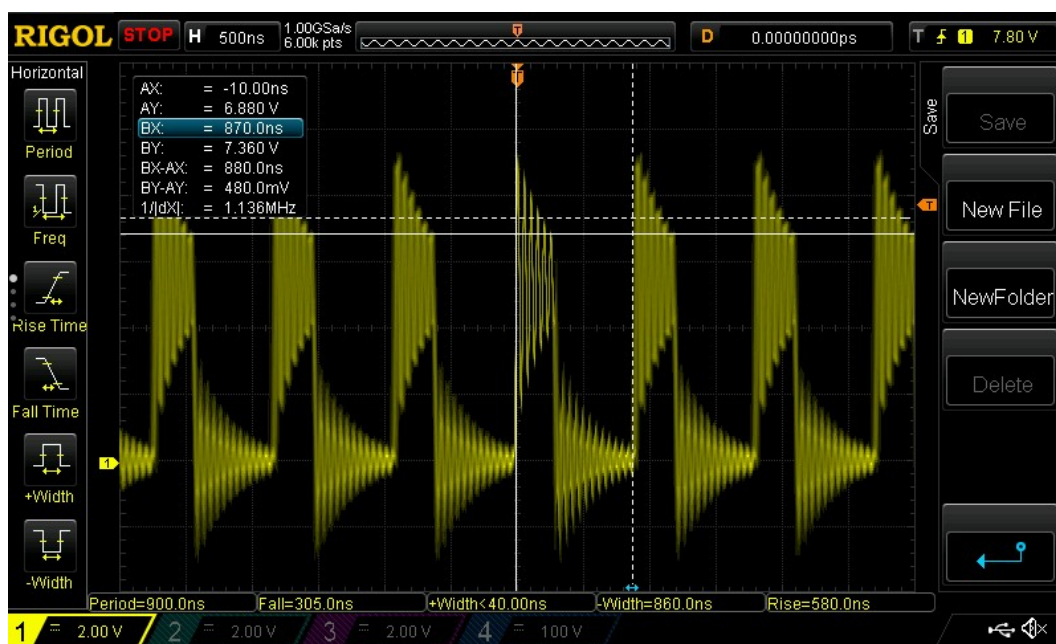
1.Táblázat: MT3608 terheletlen kimenet esetén

A dokumentáció alapján a vártnak megfelelő értékeket produkálta az áramkör. Ezek után a kimeneten 240 Ohm-os terhelést állítottam be. A bemeneti feszültséget változtattam. Közben mértem az IC 1-es lábán a kapcsolási frekvenciáját.

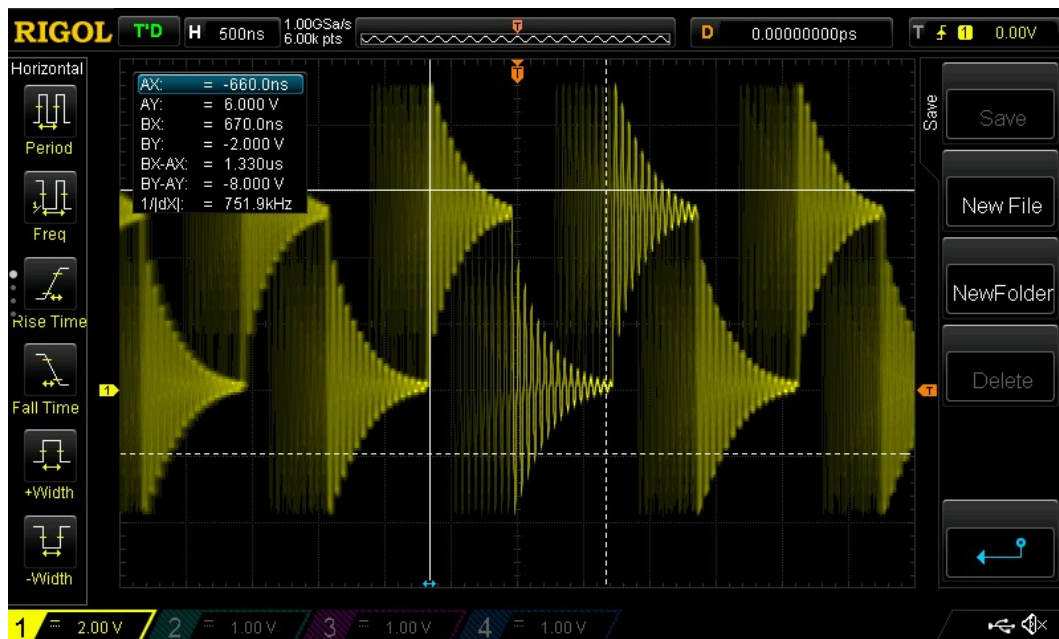
U _{be}	U _{ki}	Kapcsolási frekvencia	Ábra
1,9	4,994	1,2MHz	22
2,487	4,972	751kHz	23
3,03	4,97	571kHz	24
3,5	4,97	490kHz	25
4	4,97	442,5kHz	26
4,758	4,97	230,4kHz	27

2. Táblázat: MT3608 kapcsolási frekvencia vizsgálata

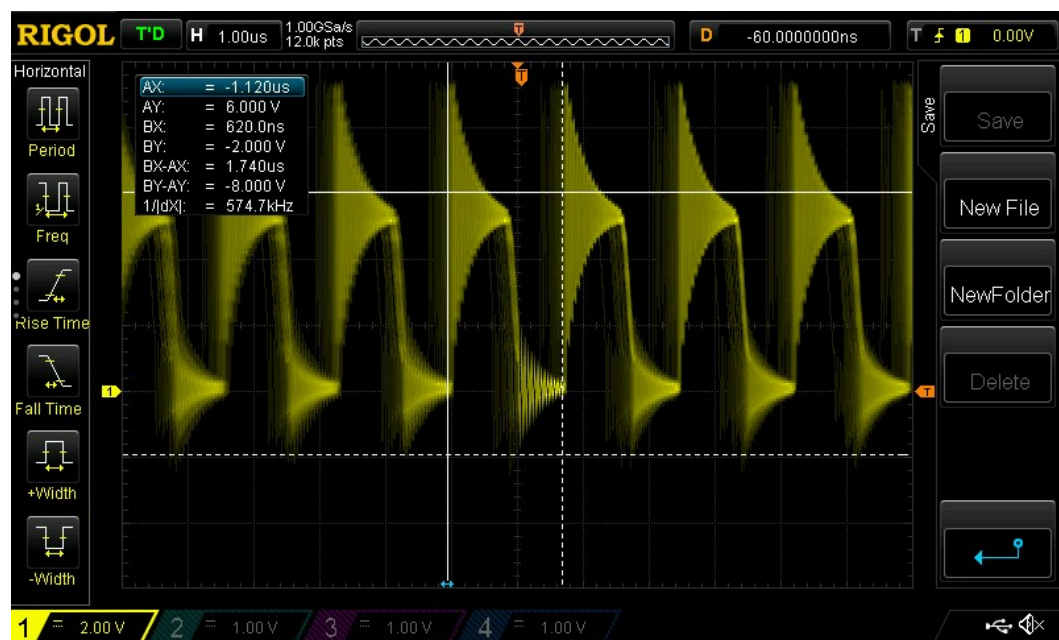
Mint az a táblázatból és az alábbi oszcilloszkóp képeken is látszik, fix terhelés mellett minél nagyobb a bemeneti feszültség, annál kisebb a kapcsolási frekvenciája az áramkörnek. Az értékek eltérnek a dokumentációban lévő értékekhez képest (minél nagyobb a bemeneti feszültség, annál nagyobb a kapcsolási frekvencia).



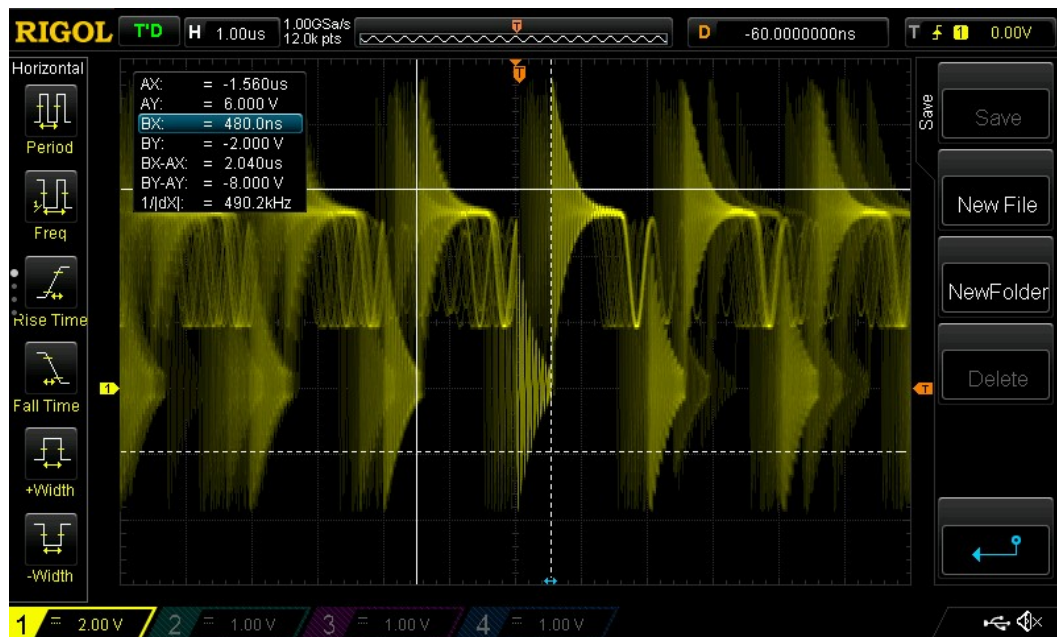
22. ábra: MT3608 kapcsolási frekvencia vizsgálata U_{be} 2 V esetén



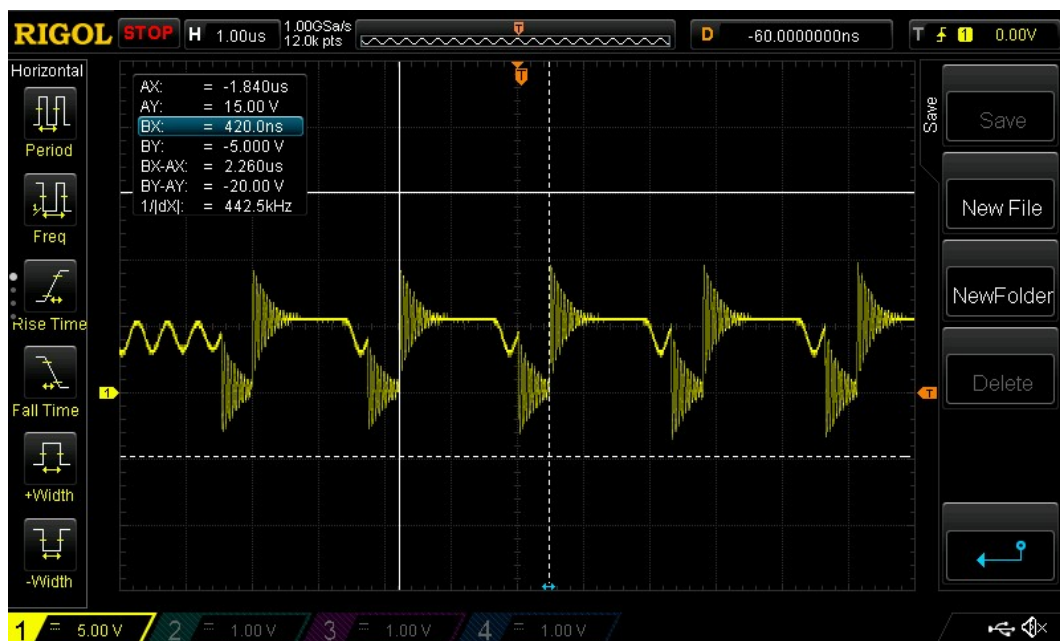
23. ábra: MT3608 kapcsolási frekvencia vizsgálata Ube 2,5V esetén



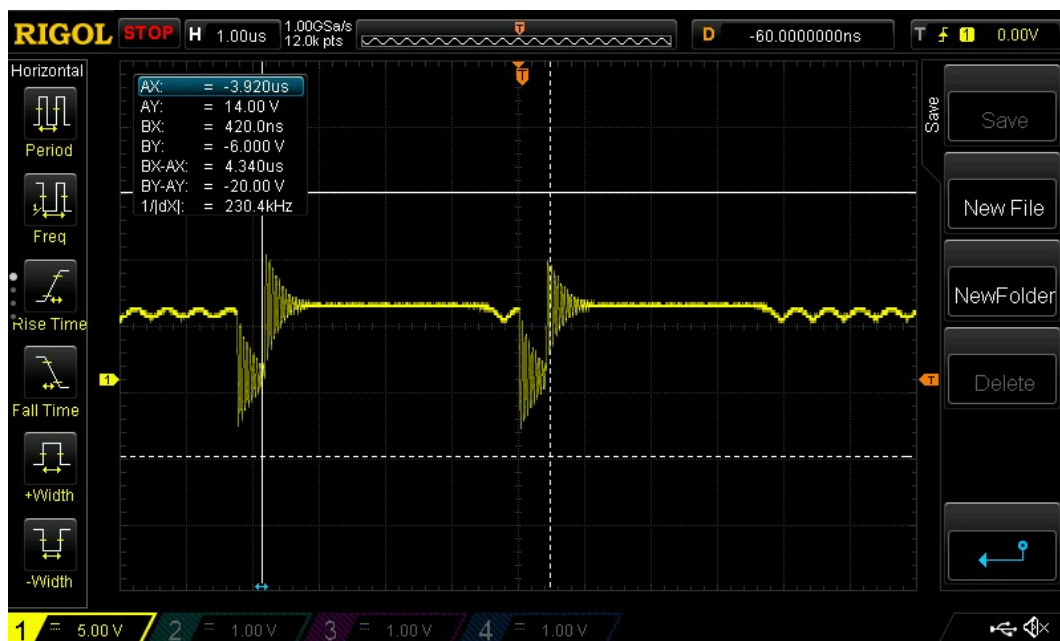
24. ábra: MT3608 kapcsolási frekvencia vizsgálata Ube 3V esetén



25. ábra: MT3608 kapcsolási frekvencia vizsgálata Ube 3,5V esetén



26. ábra: MT3608 kapcsolási frekvencia vizsgálata Ube 4V esetén



27. ábra: MT3608 kapcsolási frekvencia vizsgálata Ube 4,7V esetén

R _t =10034Ω			
U _{be} (V)	I _{be} (μA)	I _{ki} (μA)	U _{ki} (V)
0	0	0	0
0,5	40	35,5	0,4
1	92	82	0,88
1,5	150	125	1,4
2	1582	460	5,02
2,5	1268	460	5,04
3	1060	460	5,04
3,5	985	460	5,04
4	930	460	5,05
4,5	869	460	5,04
5	760	460	5,04

3.Táblázat: MT3608 10kΩ terhelés esetén

10kohmos terhelés hatására az áramkör ugyanúgy viselkedik működés szempontjából, mintha nem lenne rajta terhelés. Ugyanúgy a frekvenciáját szabályozza folyamatosan. Ahogy növelem a bemeneti feszültség értékét, a kapcsolási frekvenciája úgy csökken. Csak a belső frekvencia mérője segítségével tudtam leolvasni az egyes értékeket, de ezek ugyanazok az értékek voltak, mint az terheletlen mérésnél.

$R_t=196\ \Omega$			
$U_{be}(V)$	$I_{be}\ (mA)$	$I_{ki}(mA)$	$U_{ki}(V)$
2	72,34	25,01	4,92
3	40,65	25,06	4,93
3,5	40,32	25,62	5,04
4	30,75	25,62	5,04
5	30,34	25,82	5,08

4. Táblázat: MT3608 196 Ω terhelés esetén

Ha a terhelés elég kicsi, akkor az IC nem a frekvenciáját kezdi el szabályozni, hanem a kitöltési tényezőjét is, úgy próbálja meg a beállított kimeneti feszültséget előállítani.



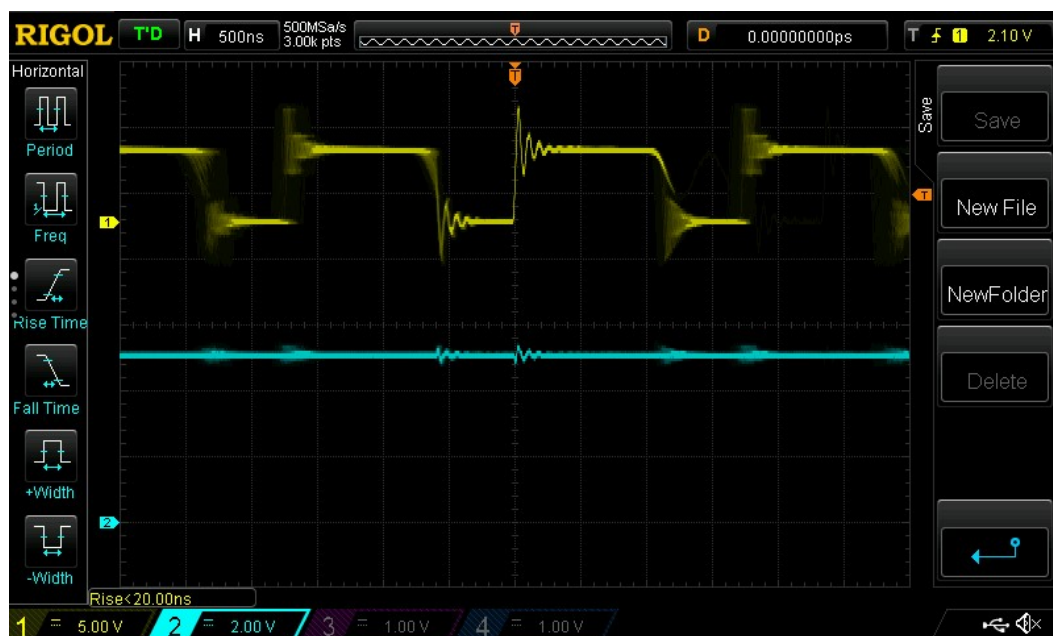
28. ábra: MT3608 2V bemenet 196 Ω terhelés esetén

A 29. ábrán 2V bemenet esetén a kimeneti tápfeszültség látható. A kék jel a kimeneti 5V és a sárga a tekercsen mért feszültség. A sárga jel frekvenciája 1,2MHz, ami a maximális vezérlési frekvencia, amit a szabályzó tud. Itt a szabályzó a kitöltési tényezőt változtatja.

Ha növelem a bementi feszültséget, úgy nő a kitöltési tényező, a szabályozó frekvencia pedig csökkenni kezd.



29. ábra: MT3608 3,5V bemenet 196Ω terhelés esetén



30. ábra: MT3608 4V bemenet 196Ω terhelés esetén

Ahogy látható az 28-29-30. ábrákon, nő a kitöltési tényező és a frekvencia is változik. Ahogy nő a bementi feszültség, kevesebb kapcsolást kell végezni, hogy a kimeneten a beállított 5V-os feszültség megjelenjen.

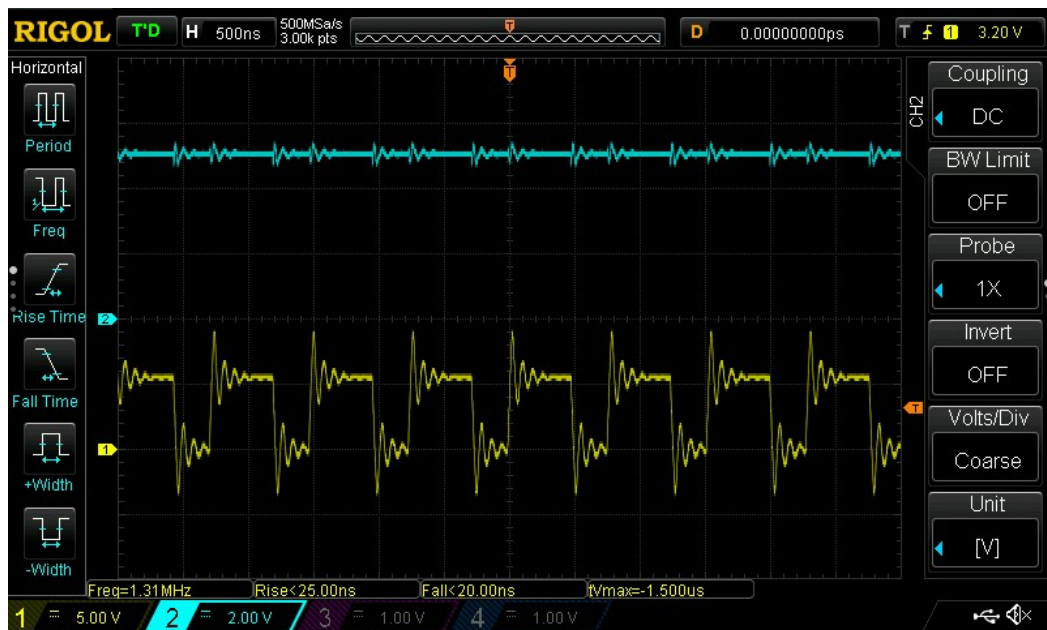
Ha tovább növelem a kimeneti áram nagyságát, más szóval csökkentem az ellenállást, akkor bekapcsol a 200mA áramkorlát a tápon, mivel nem tud 2V-os

bemeneti feszültség mellett 200mA áramkorlát esetén 5V és 147mA áramot előállítani. R_t értéke ilyenkor 34Ω .



31. ábra: MT3608 2V bemeneti feszültség és 34Ω terhelés esetén

Ilyen esetben (31.ábra) a kimeneten nem 5V feszültség jelenik meg, hanem csak 3,13V. Hiába látszik az oszcilloszkópon, hogy megjelenik a kimeneten az 5V feszültség, annyira nagy az áramfelvétel a kimeneten, hogy visszaesik a feszültség. Az IC próbálja frekvenciát és a kitöltési tényezőt is változtatni, hiába nem bírja a kimenetet a beállított értékre szabályozni. Ha maradok a 200mA áramkorlát mellett, csak akkor tudja a megfelelő kimeneti feszültséget előállítani, ha elkezdem növelni a bemeneti feszültséget. Ezt 3,5V környékéig kell növelnem, hogy a kimeneten a beállított 5V érték megjelenjen.



32. ábra: MT3608 3,5V bemeneti feszültség és 34Ω terhelés esetén

A 32. ábrán a szabályzó nagyon erőlködik. A kapcsolási frekvenciája 1,31MHz, ami kicsit magas. Ha tovább növelem a bemeneti feszültséget, akkor a szabályzó frekvenciája elkezdi csökkenni és az áramkorlát is kikapcsol.

Ha nem korlátozom a bementi áramot, akkor 2V bemeneti tápfeszültségről is előállítja a kimeneti 5V-os feszültséget. Igaz, ekkor a bemeneti áramfelvétele az áramkörnek 420mA, ami nem valami kevés, de elvégezte a feladatát. A kimeneti kapcsok között 5V-os feszültség jelent meg és az az áram volt a kimeneten, amit beállítottam.



33. ábra: MT3608 2V bemeneti feszültség és 34Ω terhelés esetén áramkorlát nélkül

3.2 MT3608 kapcsolóüzemű tápegység értékelése

Ha minden feltétel teljesül, megkapja a 2V bemeneti feszültséget és az áramot, akkor egy nagyon jó strapabíró fix feszültség előállítására alkalmazható az áramkör, ameddig túl nem lépi a beállított feszültséget. Üresjáratú árama is alig van, így tökéletes, ha kis fogyasztás a cél. A kimeneti feszültség beállító ellenállások növelésével lehet még inkább csökkenteni az üresjáratú áram felvételét, de vigyázni kell, hogy ne legyenek túl nagyok, mert akkor nem fog rendesen működni az áramkör. Egészen addig lehet növelni az értéküket, míg a FB bemenetre legalább 10nA folyik be. Ha ennél kisebb, akkor mintha nem is lenne visszacsatolva az áramkör.

4. Napelem vizsgálata

Kétféle napelemet tudtam beszerezni, egy monokristályos (34.ábra) és egy polikristályos (35.ábra) napelemet. Ezeket vizsgálom meg, hogy melyik lenne megfelelő számomra majd a későbbiekben.



34. ábra: Monokristályos napelem



35. ábra: Polikristályos napelem

4.1 Napelem mechanikai vizsgálata

A polikristályos napelem, amit sikerült beszerezni, nincs felragasztva semmilyen hordozóra. Nyers kristály, mechanikailag magában nagyon rideg és törékeny. Forrasztható csatlakozói nehezen forraszthatók, hiába használtam hozzá kétféle folyasztószert is. Nagy felülete, és jó hőelvonó képessége van, így az ón nehezen

tudott megömleni a felületén, hiába a nagy teljesítményű páka. Talán alsó fűtéssel lehetséges lenne a forrasztása.

A monokristályos napelem, ahogy a képen is látszik, egy készre szerelt napelem. Eléggé strapabíró a fizikai behatásoknak, egy műgyantaágyba vannak elhelyezve a napelem darabok, melyek 10 sorba vannak kötve és mindegyik darabbal párhuzamosan még egy van kötve benne, a hátulján már pozitív-negatív kivezetéssel van ellátva a panel. Ha ezt is nyersen szereztem volna be, ezt is nehezen lehetett volna készre szerelni.

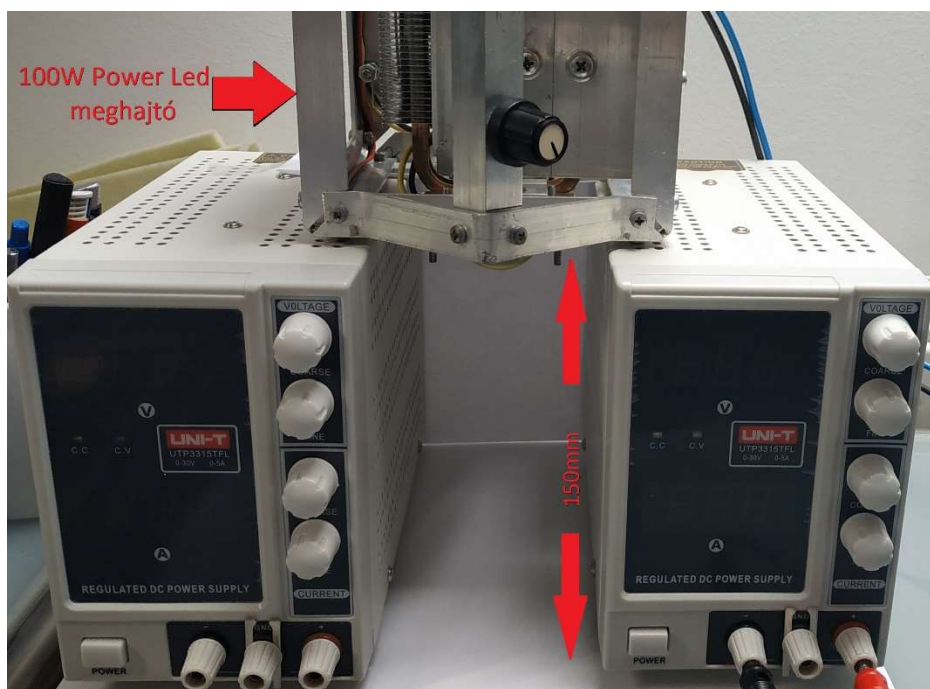
Sajnálatos módon, mivel a polikristályos napelemet nem sikerült rendes kivezetésekkel ellátni, ahogy szerettem volna, ridegségének köszönhetően a második mérés megkezdése előtt szilánkosra tört. A rövidzárási áramot és feszültséget sikerült az első meréssel meghatározni. A kimeneti rövidzárási áram HM8012 segítségével történt úgy, hogy a műszert olyan állásba állítottam, ahol a belső árammérős ellenállás értéke ismert volt és ezen mértem le a rövidzárási áramot, így ki tudtam számolni a rövidzárási feszültséget is.

4.2 Napelem jelleggörbéjének felvétele

Állítható fényforrást alkalmazok, amin lehet finoman szabályozni a fényáramot és mindig ugyanazt a fényáramot tudom visszaállítani, hogy a mérés reprodukálható legyen a későbbiekben.

Többféle fényáram mellett megmérem, mekkora áramot képes magából kiadni a napelem, ha egy fix ellenállással terhelem a kimenetét.

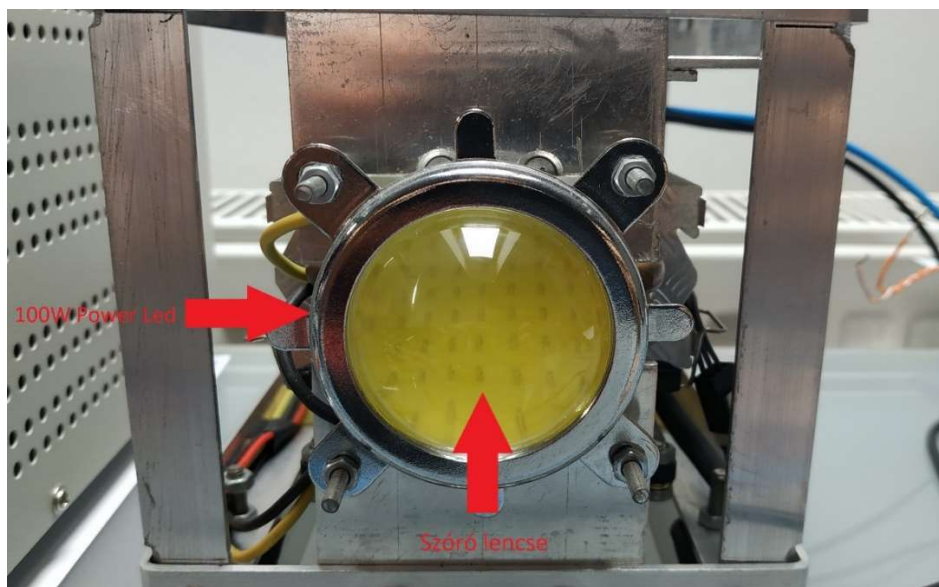
A mérés elrendezés a következőképpen nézett ki. Egy fix távolságban tartottam a fényforrást, hogy mindig ugyanazt a megvilágítást kapja a napelem.



36. ábra: Mérés elrendezés napelem méréshez

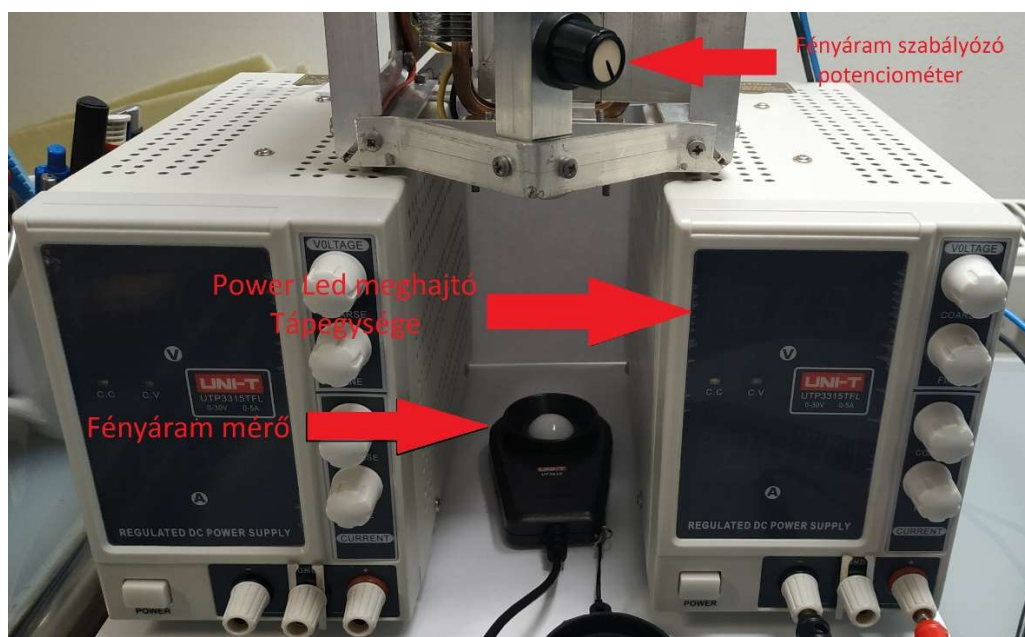
Mint látszik, a 36.ábrán a fényforrás és a megvilágított felület között 150mm távolság van, ez mindig ennyi marad. A mérés során nem változik a megvilágítási távolság.

Ahova a napelem kerül, ott fehér papírral fedtem le alul és hátul, valamint a mérés során elöl is, hogy visszaverődött fény is jusson a napelemre.



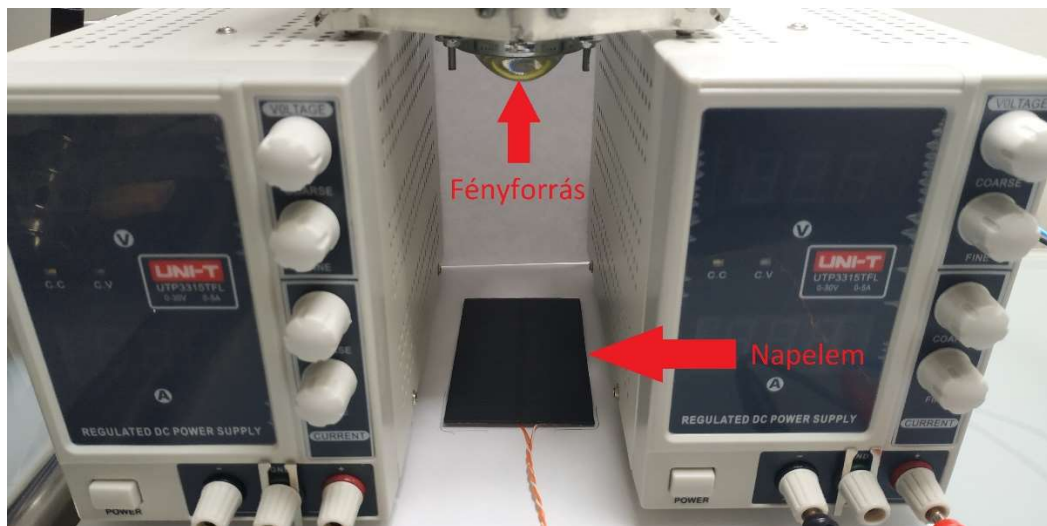
37 ábra: 100W Power Led

A 37.ábrán látszik a 100W Power Led és egy szórólencse. Azért használok szórólencsét, mivel 150mm-re van a Power Led-től a napelem és így túl kis helyre fókuszálna a fény a napelemre és egy részét nem világítaná meg.



38. ábra: Fényáram beállításának elrendezése

Fényáram beállításának elrendezése látható a 38.ábrán. Fényáram szabályzó potenciométer segítségével finoman állítjuk a fényáram erősségét, miközben folyamatosan mérjük annak erősségét és megfelelő lépték közzel állítjuk a mérés során. Majd, ha beállítottuk a megfelelő fényáramot, akkor lekapcsoljuk a megvilágítást és vigyázunk, hogy a potenciométerhez ne érjünk hozzá. Ha eltávolítottuk a mérőműszert, akkor behelyezzük a napelemet a fényforrás alá, majd visszakapcsoljuk a fényforrást és megmérjük a napelemen folyó áramot.



39. ábra: Napelem elhelyezése mérés során

Ezt a metódust annyiszor ismételjük meg, míg végig nem mértük a napelem karakterisztikáját a megvilágítás arányában. Luxban fogom mérni a megvilágítás mértéket. A lux a megvilágítás mértékegysége, megmutatja, hogy egységnyi területre mekkora fényáram jut.

A műszerből kifolyólag, amit használok 0 lux-tól 200,000 lux-ig tudom mérni a megvilágítás mértékét. Minden megvilágítási lehetőséget meg lehet vizsgálni napkeltétől napnyugtáig, borús égboltól a közvetlen napsütésig.

Minek felel meg a megvilágítás	Lux
Sötétség	≤ 1
Alkonyat	≤ 10
Nagyon borús égbolt	≤ 100
Borús nap	≤ 1000
Teljes napfény nem közvetett (árnyékban)	$\leq 10,000$
Közvetlen napfény	$\geq 100,000$

5. Táblázat: Megvilágítás mértékei

4.2.1 Napelem fix terheléses mérése

Méréshez felhasznált eszközök és elrendezés:

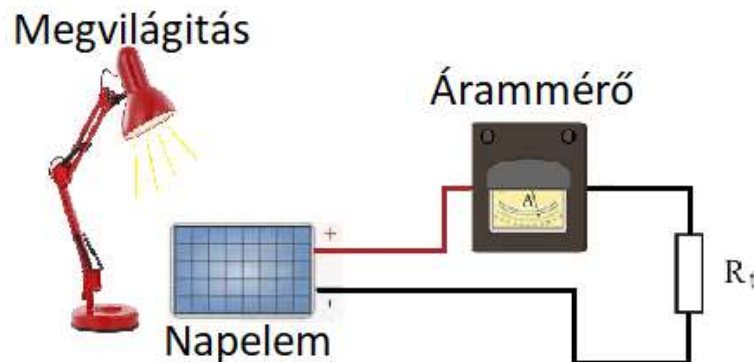
UNI-T UT383S Digitális Megvilágításmérő

UNI-T UTP3310TFL/FFL Digitális Labortápegység

UNI-T UT61E Digitális Multiméter

Megvilágítás 100W Power Led

$R_t = 66,55\Omega$ 5W kerámia ellenállás



40. ábra: Napelem mérési elrendezése

Mérési lépések:

- 1) Mérési elrendezés helyes összekötése
- 2) Megfelelő mérési határ megválasztása
- 3) Megfelelő megvilágítás beállítása fényáram szabályzó potenciométer segítségével, közben UNI-T megvilágításmérővel folyamatosan figyeljük, míg be nem állítjuk a megfelelő értéket.
- 4) Fényerősség mérő eltávolítása fényforrás alól, napelem behelyezése a fényforrás alá.
- 5) Pár másodpercet várni, míg az árammérőn nem változik a kijelzett érték.

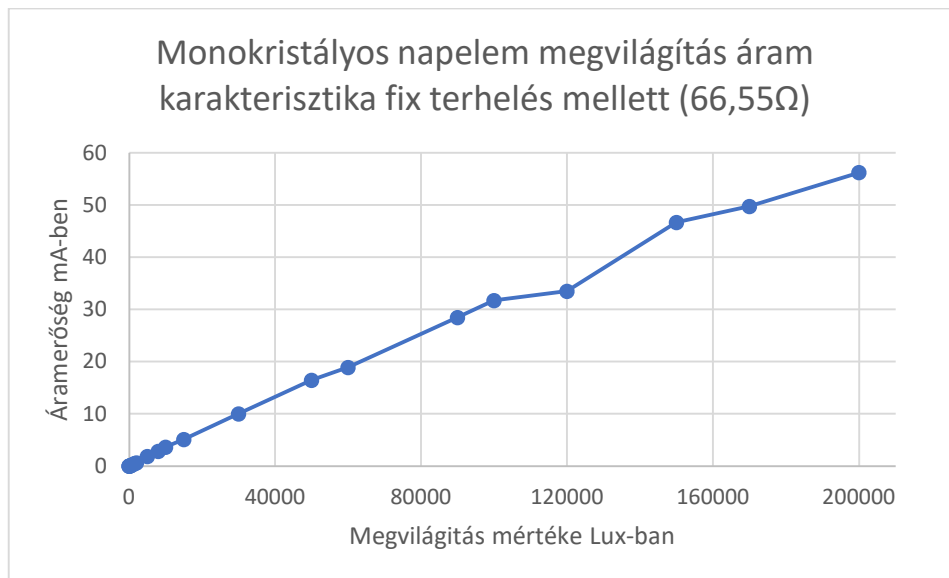
A mérés eredményeit egy táblázatban rögzítettem (6. táblázat) és ebből számítottam ki a kimeneti feszültséget az Ohm-törvény segítségével. Mivel a kimeneti terhelő ellenállást én választottam meg, így ismert volt az értéke, de pontosan meg tudtam mérni az értékét mérés előtt. Egy kerámia teljesítmény ellenállást választottam azért, hogy az esetleges túlmelegedést elkerüljem,

mégpedig azért, hogy a mérés során hő hatására ne változzon az ellenállás értéke. Így ideális ellenállásnak tekinthető, mivel nagy robosztus teste van egy sima kis ellenálláshoz képest és sokkal nagyobb a hőkapacitása.

Monokristályos napelem mérése			
	Megvilágítás mértéke (Lux)	Áramerősség (mA)	Kimeneti feszültség számított (V)
1	0	0	0
2	10	0,005	0
3	100	0,037	0,002
4	300	0,106	0,007
5	500	0,172	0,011
6	1000	0,32	0,021
7	1500	0,529	0,035
8	2000	0,645	0,042
9	5000	1,852	0,123
10	8000	2,834	0,188
11	10000	3,63	0,241
12	15000	5,133	0,341
13	30000	10	0,665
14	50000	16,48	1,09
15	60000	18,91	1,25
16	90000	28,51	1,89
17	100000	31,71	2,11
18	120000	33,51	2,23
19	150000	46,7	3,10
20	170000	49,75	3,31
21	200000	56,23	3,74

6. Táblázat: Monokristályos napelem mérési eredmények

A táblázatból lehet látni a megvilágítás és a kimeneti áram arányát, hogy mekkora megvilágítás mellett milyen áramot tud magából a napelem kiadni.



41. ábra: Napelem megvilágítás áram karakterisztika

A táblázatból grafikont készítve (41. ábra) meg lehet figyelni, hogy a megvilágítást növelve fix terhelés mellett a kimeneti áramerősség közel lineárisan változik a megvilágítással, valamint a feszültség is, ahogy az várható volt az elméletben tanultak alapján.

4.2.2 Napelem hőmérséklet függés mérése

Méréshez felhasznált eszközök és elrendezés:

UNI-T UT383S Digitális Megvilágításmérő

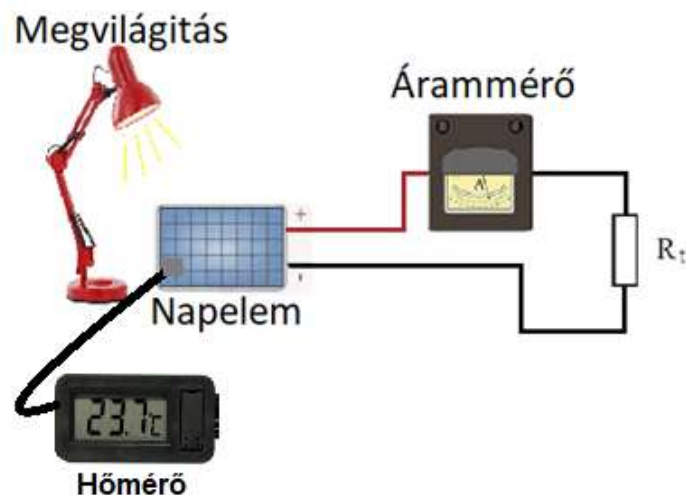
UNI-T UTP3310TFL/FFL Digitális Labortápegység

UNI-T UT139E/S Digitális Multiméter

UNI-T UT61E Digitális Multiméter

Megvilágítás 100W Power Led

$R_t = 66,55\Omega$ 5W kerámia ellenállás



42. ábra: Hőmérséklet függés mérése

Mérési lépések:

- 1) Mérési elrendezés helyes összekötése
- 2) Megfelelő mérési határ megválasztása
- 3) 120,000lux megvilágítás beállítása fényáram szabályzó potenciométer segítségével, közben UNI-T megvilágításmérővel folyamatosan figyeljük, míg be nem állítjuk a megfelelő értéket.
- 4) Fényerősség mérő eltávolítása a fényforrás alól, napelem behelyezése a fényforrás alá.
- 5) Napelem hőmérsékletének megmérése a folyamat során
UNI-T UT139E/S-re csatlakoztatott hőmérővel
- 6) Terhelő ellenálláson folyó áram mérése, később a feszültség kiszámítása az ellenálláson.

A mérés eredményeit egy táblázatban rögzítettem és ebből számítottam ki a kimeneti feszültséget az Ohm-törvény segítségével. Mivel a kimeneti terhelő ellenállást én választottam meg, így ismert volt az értéke, de pontosan meg tudtam mérni az értékét mérés előtt. Egy kerámia teljesítmény ellenállást választottam azért, hogy az esetleges túlmelegedést elkerüljem, valamint, hogy a mérés során hő hatására ne változzon az ellenállás értéke. Így ideális ellenállásnak tekinthető, mivel nagy robusztus teste van egy sima kis ellenálláshoz képest és sokkal nagyobb a hőkapacitása.

Hőmérséklet	Áram(A)	Feszültség számolt (V)
26°C	44,1m	2,90
27°C	43,3m	2,88
28°C	42,2m	2,81
29°C	42,1m	2,80
30°C	42,03m	2,80
32°C	41,99m	2,79
33°C	41,52m	2,76
35°C	39,5m	2,63
36°C	38,2m	2,54
38°C	37,5m	2,50
41°C	36,77m	2,45
44°C	36,2m	2,41

7. Táblázat: Monokristályos napelemem hőmérséklet függése

Az elmélet alapján próbáltam megmérni a napelem hőmérséklet függését, miszerint, ha kb. 25°C emelkedés mellett a napelem 20%-kal csökken, a feszültsége viszont a leadott áramot nem befolyásolja jelentősen. A mérésekből látszik, hogy minél melegebb a napelem, annál kisebb a napelem feszültsége, az én mérésemnél a napelem árama is ugyanúgy csökkent a melegedés hatására, ugyanolyan százalékban, ahogy a feszültség csökken. [1] [2]

4.2.3 Napelem I-U karakterisztikájának felvétele

Méréshez felhasznált eszközök és elrendezés:

UNI-T UT383S Digitális Megvilágításmérő

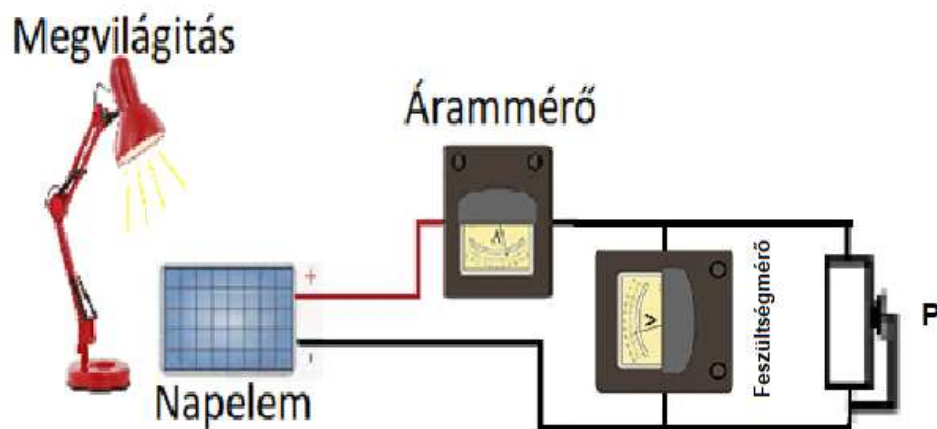
UNI-T UTP3310TFL/FFL Digitális Labortápegység

UNI-T UT61E Digitális Multiméter

UNI-T UT139E/S Digitális Multiméter

Megvilágítás 100W Power Led

$R_t = 55\text{k}\Omega$ potenciométer



43. ábra: Napelem áram feszültség felvételi elrendezése

Mérési lépések:

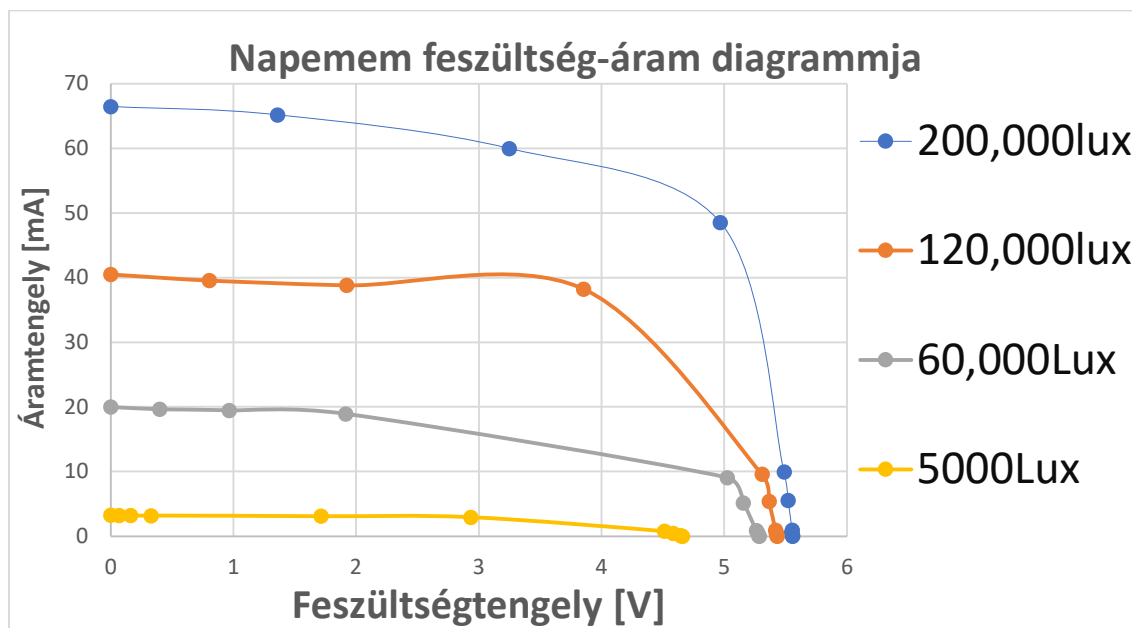
- 1) Mérési elrendezés helyes összekötése
- 2) Megfelelő mérési határ megválasztása
- 3) Megfelelő megvilágítás beállítása fényáram szabályzó potenciométer segítségével, közben UNI-T megvilágításmérővel folyamatosan figyeljük, míg be nem állítjuk a megfelelő értéket.
- 4) Fényerősség mérő eltávolítása a fényforrás alól, napelem behelyezése a fényforrás alá.
- 5) Potenciométer segítségével végigmérjük 0-tól $55\text{k}\Omega$ -ig változtatjuk a potenciométer értékét, közben feljegyezzük az áram feszültség értékeket
- 6) Mérés vége után az adatokból diagramot készítünk és meghatározzuk az egyes megvilágításoknál a $P_{\max}$ teljesítményt

200,000Lux			120,000Lux		
I(mA)	U(V)	P(mW)	I(mA)	U(V)	P(mW)
62,9	0	0	40,51	0	0
62,5	0,802	50,125	39,57	0,8011	31,69953
61,8	2,354	145,4772	38,84	1,92	74,5728
61,65	3,117	192,1631	38,25	3,85	147,2625
47,8	4,788	228,8664	26,45	4,928	130,3456
9,94	5,486	54,53084	18,56	5,138	95,36128
5,55	5,519	30,63045	10,5	5,306	55,713
0,97	5,551	5,38447	5,39	5,363	28,90657
0,55	5,546	3,0503	0,94	5,416	5,09104
0,11	5,5547	0,611017	0,54	5,421	2,92734
0	5,555	0	0,1	5,426	0,5426
			0	5,43	0

8.táblázat: Napelem áram feszültség megvilágítás hatására

50,000Lux			5000Lux		
I(mA)	U(V)	P(mW)	I(mA)	U(V)	P(mW)
20,01	0	0	3,3	0	0
19,67	0,399	7,84833	3,25	0,0659	0,214175
19,49	0,9639	18,78641	3,22	0,1605	0,51681
18,93	1,913	36,21309	3,2	0,327	1,0464
16,46	4,524	74,46504	3,11	1,712	5,32432
12,54	4,862	60,96948	2,95	2,933	8,65235
10,81	4,936	53,35816	0,78	4,51	3,5178
9,08	5,022	45,59976	0,45	4,581	2,06145
5,18	5,153	26,69254	0,09	4,641	0,41769
0,91	5,259	4,78569	0	4,658	0
0,53	5,269	2,79257			
0,1	5,279	0,5279			
0	5,282	0			

9.táblázat: Napelem áram feszültség megvilágítás hatására



44. ábra: Napelem áram feszültség megvilágítás hatására

Négyféle megvilágítás mellett mértem le a napelem áram feszültség karakterisztikáját és számoltam ki az egyes megvilágítások mellett a legnagyobb teljesítményt. A pirossal kiemelt értékek az egyes megvilágítások mellett a legnagyobb teljesítményt jelölik a táblázatokban (8-9. táblázat). Ezeket az adatokat egy diagramon ábrázoltam (44. ábra). [2]

Polikristályos napelem vizsgálata

Az előzőkéből kiindulva, hogy nem sikerült rendes kivezetéssel ellátni és mérés közben sajnálatos módon szét is tört, így csak egy mérést sikerült végrehajtani rajta. A mérés Hameg8012 multiméter segítségével történt, mégpedig úgy, hogy a multiméter belső mérőellenállása, amin átfolyik az áram, annak ismerjük az értékét és ebből tudtuk meghatározni a kimeneti feszültséget. A mérőellenállás értéke, amin mértük az áramot, 1Ω belső ellenállása volt a műszernek, amelyen átfolyt az áram. Ezen a beállításon mértünk 500mA áramot. A megvilágítás mértéke körülbelül 10klux volt. A kimeneti feszültség ekkor a számítás szerint 0,5V.

4.2.4 Napelem értékelés

Nézzük meg, mekkora megvilágítás mellett mekkora áram jutna egy négyzetmilliméterre, ha egymás mellé pakolnánk szorosan a napelemeket. Mivel a polikristályos napelemet csak egyszer tudtam mérni, utána tönkrement. Így csak egy adattal tudok viszonyítani egymáshoz két napelemet. A monokristályos felülete be van vonva műgyantával, ami szürke, így nem a 10,000luxos megvilágítást vettem ott alapul, hanem annak a 6-szorosát 60,000luxot, így kb. ugyanannyi megvilágítás érkezik a napelemre. Így kb. azonosnak mondható a megvilágítás mértéke, ami a napelemeket érte és egy adattal is lehet összehasonlítást végezni. A két napelem befoglaló mérete a következő: a polikristályos mérete $125\text{mm} \times 125\text{mm} = 15625\text{mm}^2$; a monokristályos mérete $107\text{mm} \times 61\text{mm}$, de ez nem a napelem mérete. Maga a napelem darab, ami rajta van, sokkal kisebb, mint az egész. Két kis napelem darab van párhuzamosan kötve egymással és 10 db van sorba kötve, ebből úgy jön ki az üresjárási feszültség, ami 5V és egy darab ilyen kettes csoport feszültsége pedig 0,5V; a két kis napelem felülete pedig $(25\text{mm} \times 9\text{mm}) \times 2 = 450\text{mm}^2$.

Az egy négyzetmilliméterre jutó áramerősséget úgy számoltam ki, hogy a maximális áramerősséget osztottam a felülettel, így ezek az eredmények jöttek ki:

$$\text{Polikristályos napelem} \frac{\text{Áramerősség}}{\text{Felület}} = \frac{500\text{mA}}{15625\text{mm}^2} = 32 \frac{\mu\text{A}}{\text{mm}^2}$$

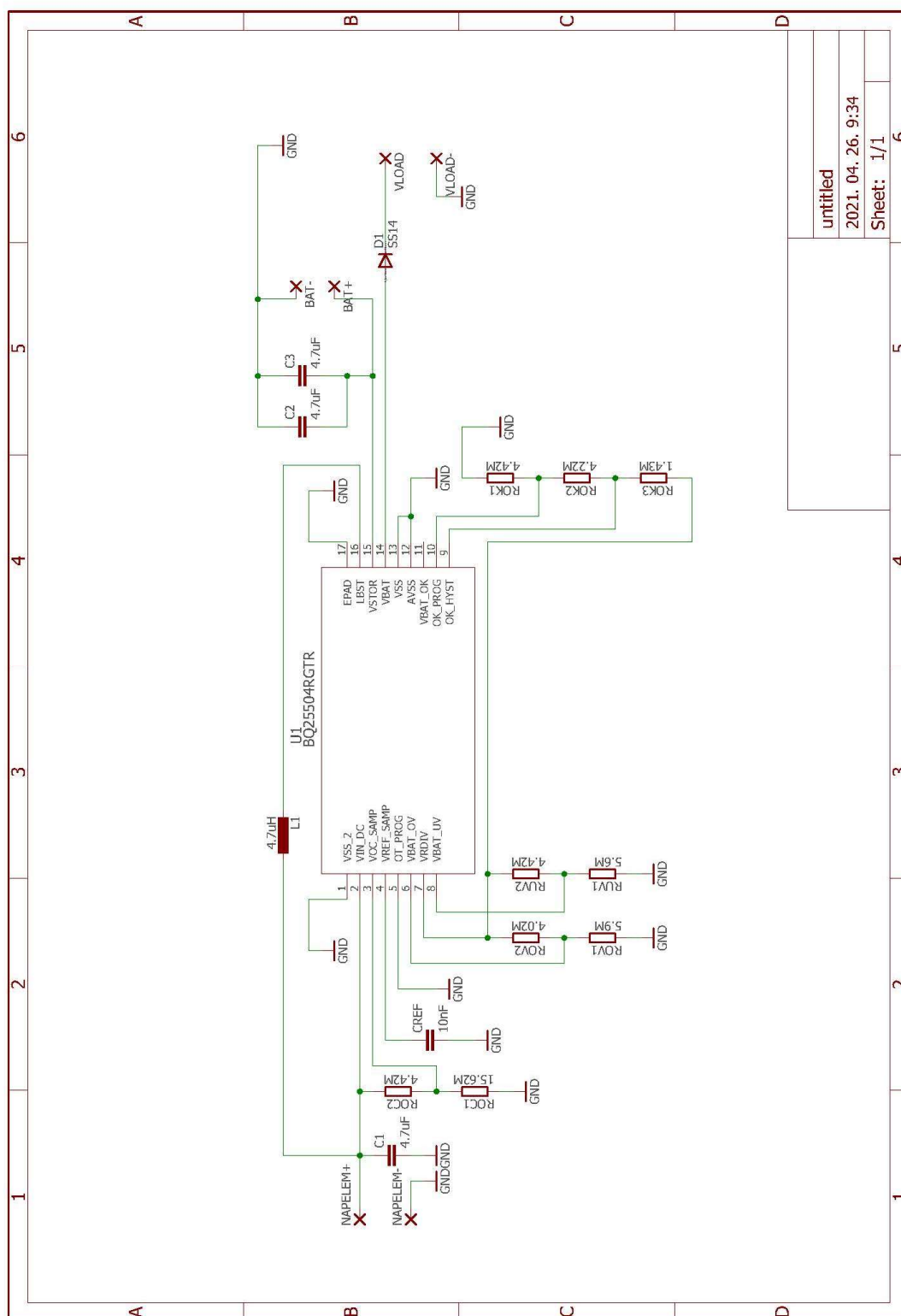
$$\text{Monokristályos napelem} \frac{\text{Áramerősség}}{\text{Felület}} = \frac{20\text{mA}}{450\text{mm}^2} = 44,44 \frac{\mu\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Mint látható, a monokristályos napelemnek jobb az 1mm^2 -re jutó áramsűrűsége, mint a polikristályos napelemnek, ezeknél a napelemeknél, amiket én használtam. Ez sok esetben változhat, mint például a gyártás minőségénél. A polikristályos napelem hatásfoka mindig kisebb, mint a monokristályosé. A monokristályos hatásfoka 18-20%, a polikristályos 13-18% között van. Cserébe a polikristályos napelem sokkal olcsóbb, mint a monokristályos napelem. Ezek alapján a monokristályos napelemet fogom majd használni a kész eszközben.

Egy Cubesat 1U-ra tervezem majd elhelyezni a monokristályos napelemet. A Cubesat 1U mérete 100x100x100mm. Ha 4 oldalára sikerül elhelyezni napelemet, akkor az oldalanként kb. 400mA áramot tudna biztosítani az MPPT modul számára megfelelő megvilágítás hatására.

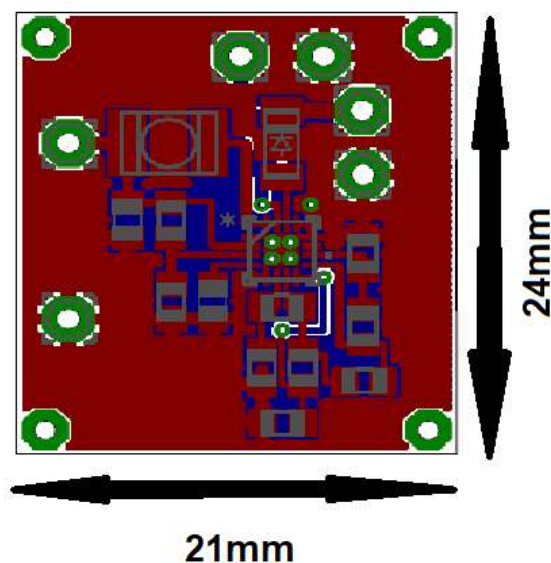
5. MPPT modul tervezése és mérése

Mint ahogy írtam, a feszültség stabilizátornál, előbb szeretem az alkatrészeket megnézni, hogy milyenek, nem kell-e módosítani a rajzolatot a nyák tervező programban, valamint az egyes alkatrészek dokumentációját átnézni. Ezek után már neki is állhattam összerakni a kapcsolási rajzot az Eagle-ben. De itt is voltak nehézségek: nem volt alapértelmezett könyvtárban az MPPT modul, így interneten kerestem először. Az Eagle hivatalos oldalán néztem utána, hogy esetleg készült-e kiegészítő könyvtár belőle. Szerencsére találtam, így sok időt megspóroltam az alkatrész megtervezésével. Most, hogy megvolt minden, ami kellett, nekiállhattam a kapcsolási rajz összeállításának. (45. ábra)



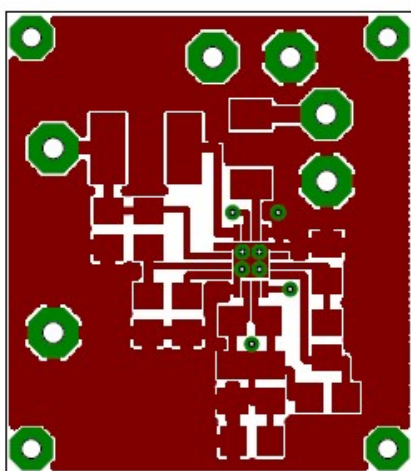
45. ábra: MPPT modul kapcsolási rajza

A kapcsolási rajz elkészítése után nekiláttam a huzalozási rajz megrajzolásának. Próbáltam először minél kisebb helyre összezsúfolni az alkatrészeket, hogy minél kompaktabb legyen. Mint ez kiderült, elég kis helyre sikerült összetennem.

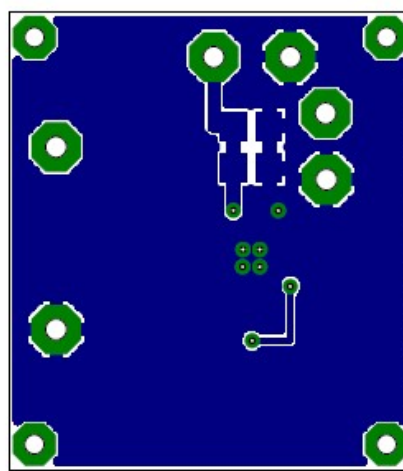


46. ábra: MPPT modul nyákterv

Kétoldalas nyomtatott áramkört terveztem, egy oldalra nehéz lett volna elrendezni ekkora méret mellett az alkatrészeket.

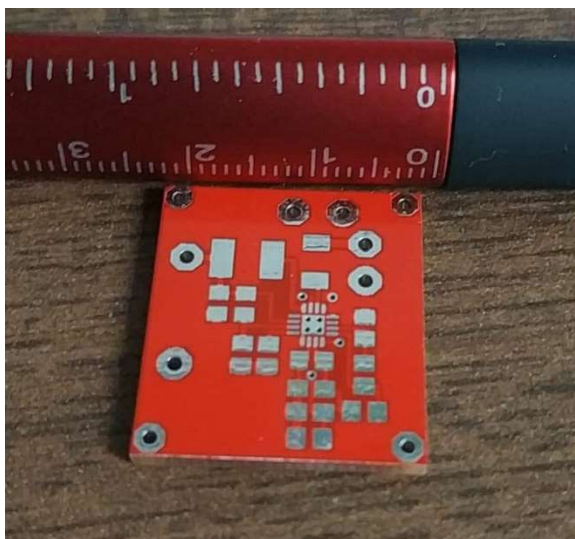


47. ábra: MPPT Top



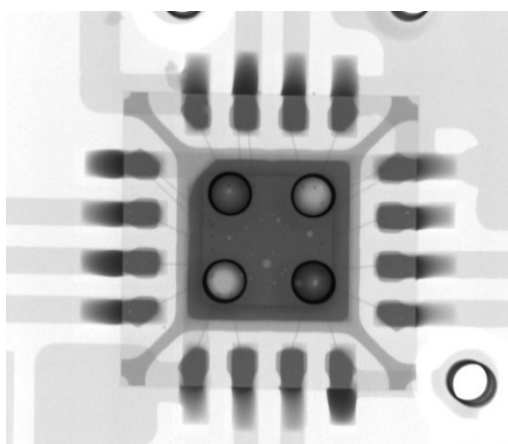
48. ábra: MPPT Bottom

Az alkatrészek elnevezését és értékét direkt hagytam ki, nem készült rá felirat, mivel nem lehetett elhelyezni sehol és a méretek miatt is olvashatatlan lett volna. Az így elkészült nyáktervet legyártattam és kézzel beforrasztottam az alkatrészeket.

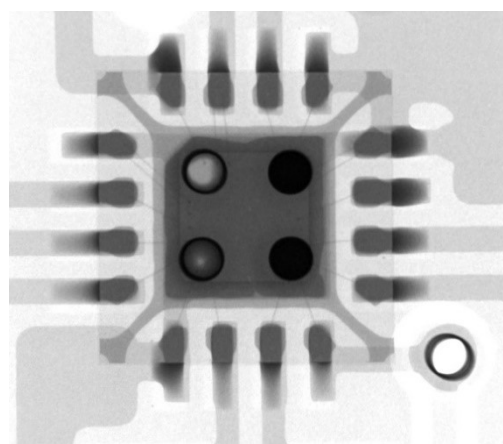


49. ábra: Elkészült nyomtatott áramkör

A forrasztás nem volt annyira könnyű, mivel maga az MPPT modul IC lábai a tokozás alján helyezkednek el. Így hőlégfúvóval kellett melegítenem, hogy rendesen illeszkedjen a helyére. Ezek után ellenőrzésképpen röntgen mikroszkóppal megvizsgáltam, hogy minden lába le lett-e forrasztva (50-51. ábra).



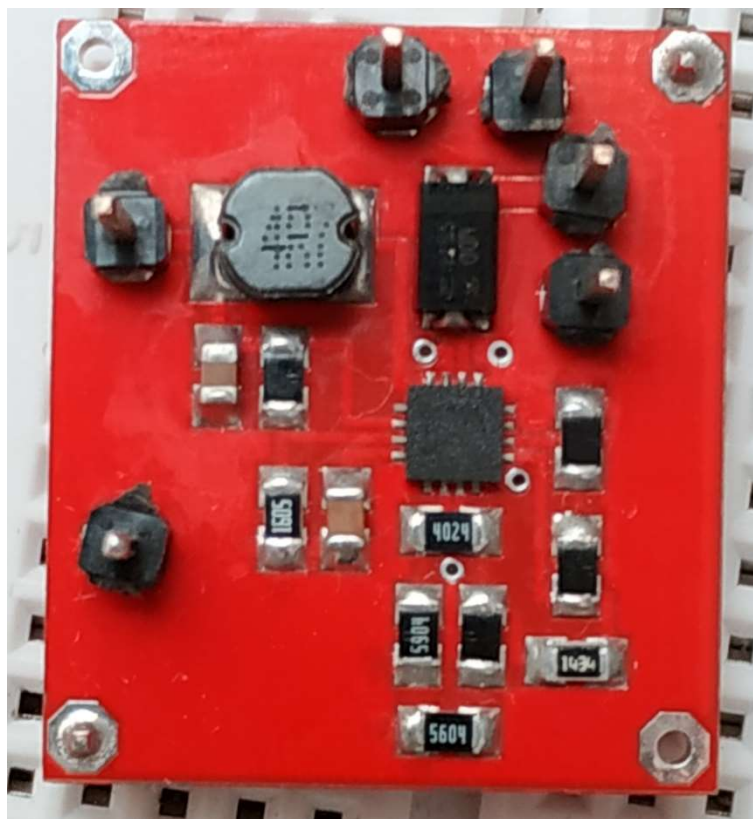
50. ábra: MPPT IC röntgen



51. ábra: MPPT IC röntgen

A sötétszürke pontok azok, ahol rendesen le van forrasztva az alkatrész. Minél sötétebb, annál jobb a kötés. A 50. ábrán a fehér pontok levegőbuborékok, amik alatta maradtak, ez nem gond. Nem befolyásolja a működését.

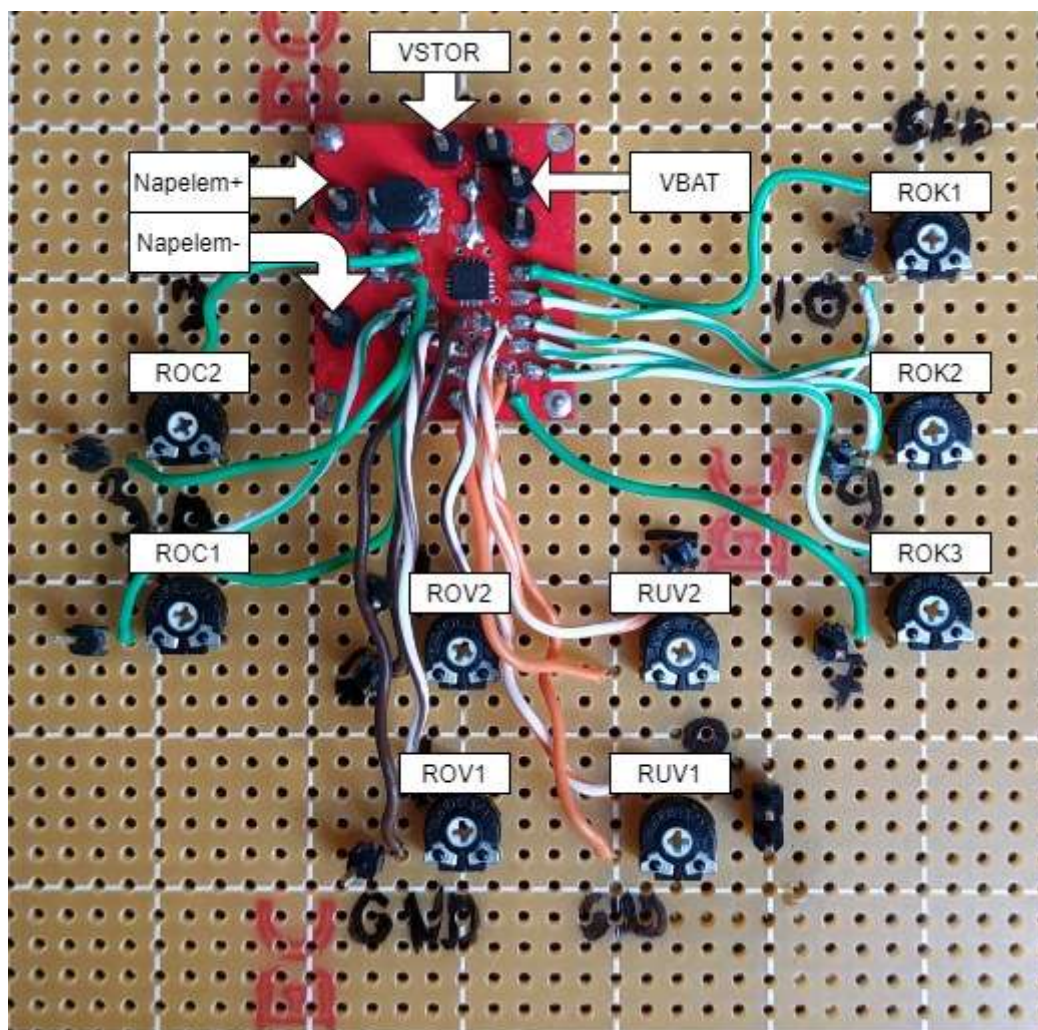
Egy napelem vezérlő teljesen be lett ültetve az IC dokumentációjában található alkatrész értékekkel. Egy másik panelre nem kerültek fel, csak a kondenzátorok és a vezérlő áramkör. Az egyes kivezetések ki lettek vezetve és potenciométerekre lettek rákötve, hogy az egyes munkapont változtatásokat mérni lehessen.



52. ábra: Beültetett nyák

A D1 diódát nem forrasztottam be a mérésre használt panelen, mivel az csak akkor kell, ha több napelem szabályzó kimenete össze van kötve egy akkumulátorra vagy szuperkondenzátorra.

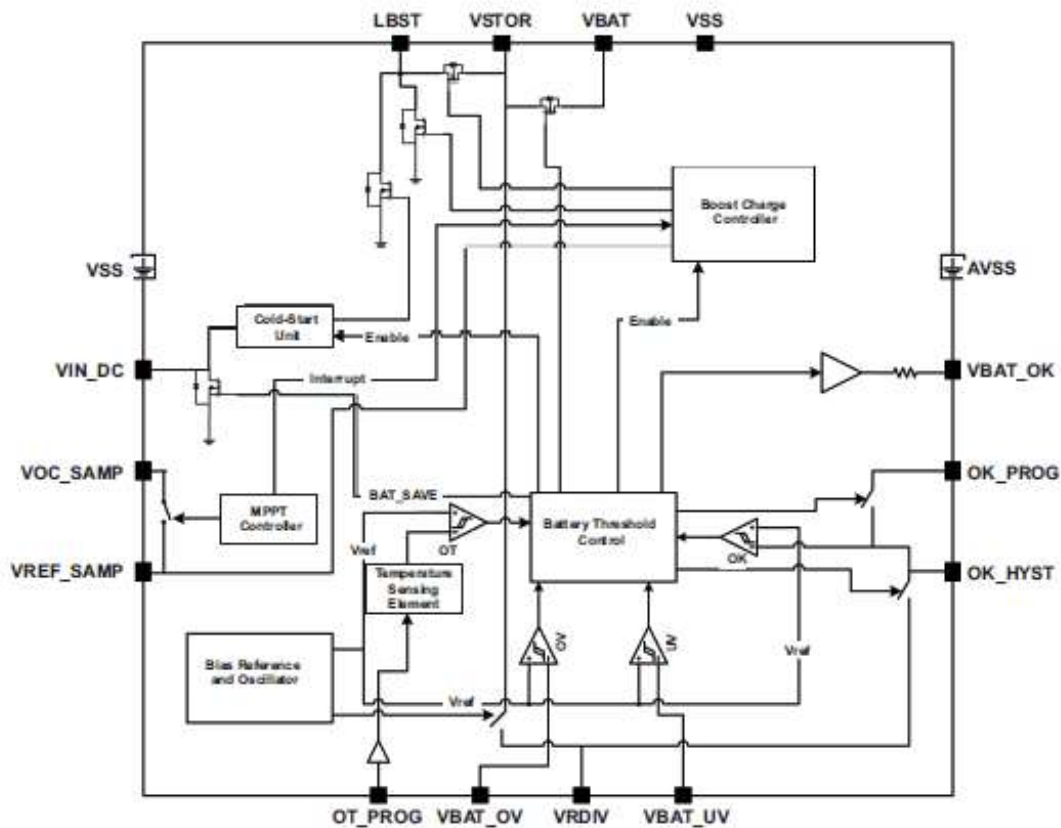
5.1 MPPT modul működése



53. ábra: Napelem szabályzó kivezetésekkel

Az 53. ábrán a ROC1 és ROC2 potenciométerrel a maximális teljesítmény követést lehet beállítani. A ROC1 a vezérlő IC 3-as lábára van kötve. Erről az ellenállásról az MPPT modul 16 másodpercenként vesz egy referencia feszültséget, ami, ha meghaladja a 300mV feszültséget, akkor a szabályzó működésbe lép. A mintavétel során a töltés letiltásra kerül 256ms-ra a tökéletes mintavétel érdekében. A 16 másodperces mintavételt sikerült lemérni stopper segítségével, ha terhelés alatt levettem a napelemet a bemenetről és visszatettem. A napelem feszültsége nem került egyből a VSTOR-ra, hanem 16 másodperc múlva kezdett csak el működni, mikor megvolt a mintavétel és elég nagy feszültség volt a CREF kondenzátoron. Ha nem volt elég a megvilágítás,

több 16 másodperces periódusnak is el kellett telnie, mire eléggé feltöltődött a kondenzátor a megfelelő értékre, hogy elkezdje a szabályozást.



54. ábra: Vezérlő IC belső blokk diagramja [7]

A RUV1 és RUV2 segítségével a minimális akkumulátor feszültséget lehet beállítani a VBAT_UV, hogy az esetleges túlmerítést megakadályozza és nehogy tönkremenjen. Ezzel az összefüggéssel lehet kiszámolni a minimális akkumulátor feszültséget a VBIAS az 1,25V-tal egyenlő.

$$VBAT_UV = VBIAS \left(1 + \frac{R_{UV2}}{R_{UV1}} \right)$$

A kimeneti maximális feszültséget a ROV1 és a ROV2 potenciométerrel lehet beállítani.

$$VBAT_OV = \frac{3}{2} VBIAS \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}} \right)$$

A ROK1, ROK2, ROK3 lehetőséget ad arra, hogy külön lehessen állítani azt a feszültséget, ami között a töltő tölteni fogja az akkumulátorunkat vagy a

szuperkondenzátort. Függetlenül attól, amit a R_{UV1-2} -vel állítottunk be minimum értéket és a R_{OV1-2} maximális értéktől. A $V_{BAT_OK_HYST}$ képlettel a minimális feszültséget lehet beállítani, ami független a minimális akkumulátor feszültségtől. A $V_{BAT_OK_PROG}$ pedig a maximális akkumulátor feszültséget lehet állítani függetlenül attól, amit megadtunk maximális értéknek.

$$V_{BAT_OK_HYST} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}} \right) \quad V_{BAT_OK_PROG} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}} \right)$$

5.2 MPPT modul mérése

Méréshez felhasznált eszközök és elrendezés:

UNI-T UT383S Digitális Fénymérő

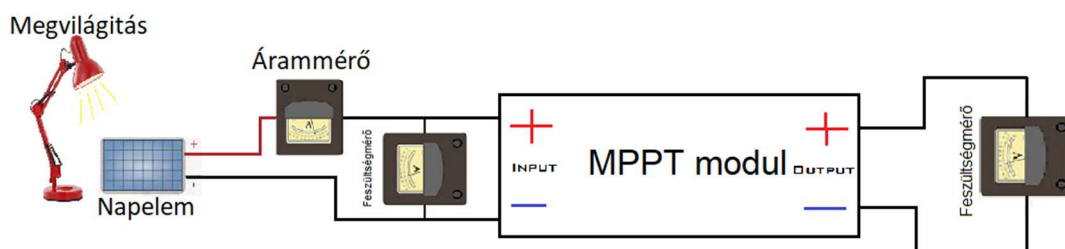
UNI-T UTP3310TFL/FFL Digitális Labortápegység

UNI-T UT61E Digitális Multiméter

UNI-T UT139E/S Digitális Multiméter

RIGOL DS1000Z Digitális Oszilloszkóp

Megvilágítás 100W Power Led



55.ábra: MPPT modul terheletlen mérése

A mérés lépései:

- 1) Mérési elrendezés helyes összekötése
- 2) Megfelelő mérési határ megválasztása
- 3) Megfelelő megvilágítás beállítása fényáram szabályzó potenciométer segítségével, közben UNI-T fényerősség mérővel folyamatosan figyeljük, míg be nem állítjuk a megfelelő értéket.
- 4) Fényerősség mérő eltávolítása a fényforrás alól, napelem behelyezése a fényforrás alá.
- 5) A bemeneti áram mérése, ami a napelemről jön és annak a feszültsége.
- 6) Kimeneti feszültség mérése VBAT és VSTOR lábon és a VOC_SAMP, hogy mikor kezd el működni.

Terheletlen mérés					
Megvilágítás Lux-ban	I _{be} (A)	VIN_DC (V)	VSTOR (V)	VBAT (V)	VOC_SAMP (V)
0	0	0	0	0	0
100	53,8u	0,364	0	0	0,156
500	200u	0,4	0,081	0	0,1749
1500	527u	0,389	0,1865	0,0625	0,167
5000	1,82m	0,357	0,365	0,529	0,154
8000	3m	0,398	1,23	1,02	0,165
10000	3,86m	0,399	1,63	1,4	0,176
15000	3,94m	4,22	4,22	4,287	1,9
30000	9,56m	4,228	4,3	4,3	1,88
50000	9,5m	4,243	4,31	4,31	1,87
100000	19,03m	4,23	4,31	4,31	1,872
170000	31,45m	4,245	4,32	4,32	1,87

10.táblázat: Napelem áram feszültség megvilágítás hatására terhelés nélkül

Terheletlen kimenet esetén, hogy a VBAT kimeneten nincs semmi, csak a feszültségmérő. Ha a VOC_SAMP eléri a 180mV feszültséget, akkor a napelem vezérlőn leáll a teljesítmény szabályozás és ráköti a napelem bemenetét a VSTOR-ra. Ezek után, ha a feszültség elérte a beállított értéket, akkor ismét elkezd a teljesítmény szabályozást a vezérlő. Ha csökkentem a megvilágítást, akkor csökken a bemeneti áram nagysága. A szabályozás korrigál, csökkenti a bementi feszültséget és legnagyobb teljesítményre próbálja szabályozni a napelemet. A belső DC-DC konverter segítségével állítja elő a feszültséget, ha kisebb a bemenetre jutó feszültség, mint a beállított feszültségünk, korrigálja. Ha elkezdem csökkenteni a fényerőt, akkor egészen 5000lux megvilágításig működik, amikor a bemeneten 2,93V és 3mA áram folyik be. Ilyenkor képes még előállítani a kívánt feszültséget a kimeneten. Ha tovább csökken a megvilágítás, akkor leáll a szabályozás és mivel nincs semmi töltéstároló elhelyezve a kimeneten, így a kimeneti feszültség visszaesik 0-ra.

Ha a kimeneten elhelyezünk egy szuperkondenzátort, akkor a következőképpen fog változni a működés:

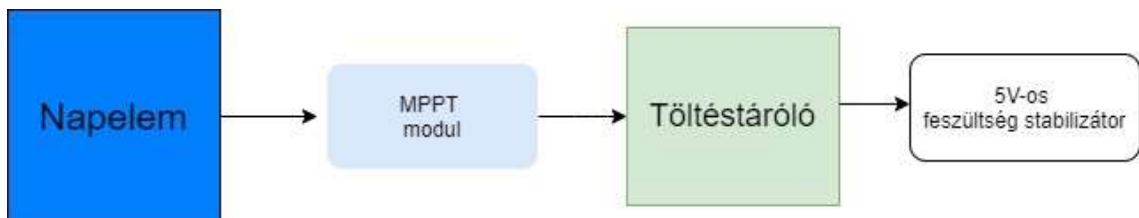
Terheletlen mérés kimenetén 1F szuperkondenzátorral 2,58V					
Megvilágítás Lux-ban	I _{be} (A)	VIN_DC (V)	VBAT (V)	VSTOR (V)	VOC_SAMP (V)
0	0	0	0	0	0
100	107,7u	0,384	2,58	0,0505	0,152
500	209u	0,413	2,58	0,0984	0,169
1500	584u	0,3516	2,58	0,405	0,142
5000	1.91m	0,357	2,58	0,8276	0,147
8000	3,1m	0,382	2,58	1,34	0,153
10000	3,43m	0,384	2,58	1,35	0,154
15000	5,57m	0,125	2,665	2,61	0,155
30000	9,13m	4,266	4,36	4,07	1,85
50000	12,01m	4,783	4,33	4,04	1,86
100000	32,6m	4,25	4,3	4,4	1,87
170000	40,5m	4,26	4,31	4,41	1,88

11.táblázat: Napelem áram feszültség megvilágítás hatására 1F

Amíg a VSTOR feszültsége nem egyezik meg a VBAT feszültségével, addig visszaszabályozza a napelemet, lassan tölti a VSTOR. Ha eléri a VBAT feszültségét a VSTOR, akkor elkezd növelni a napelem feszültségét. Ha nem elég a napelem feszültsége, akkor a DC-DC konverter rásegít addig, amíg el nem éri a beállított feszültséget. Ha elkezdem csökkenteni a fényerőt, ugyanúgy elkezd szabályozni, mint terheletlen esetben, ilyenkor viszont, ha nem kap elegendő megvilágítást a napelem és nem tudja előállítani a kívánt feszültséget, a kimentet lekapcsolja a VSTOR-ról és nem meríti a kondenzátort. Ha ismét elegendő megvilágítás éri a napelemet és a VSTOR ismét eléri a VBAT feszültségét, akkor ismét elkezd tölti a telepet, amíg el nem éri a maximális feszültséget, amit beállítottam.

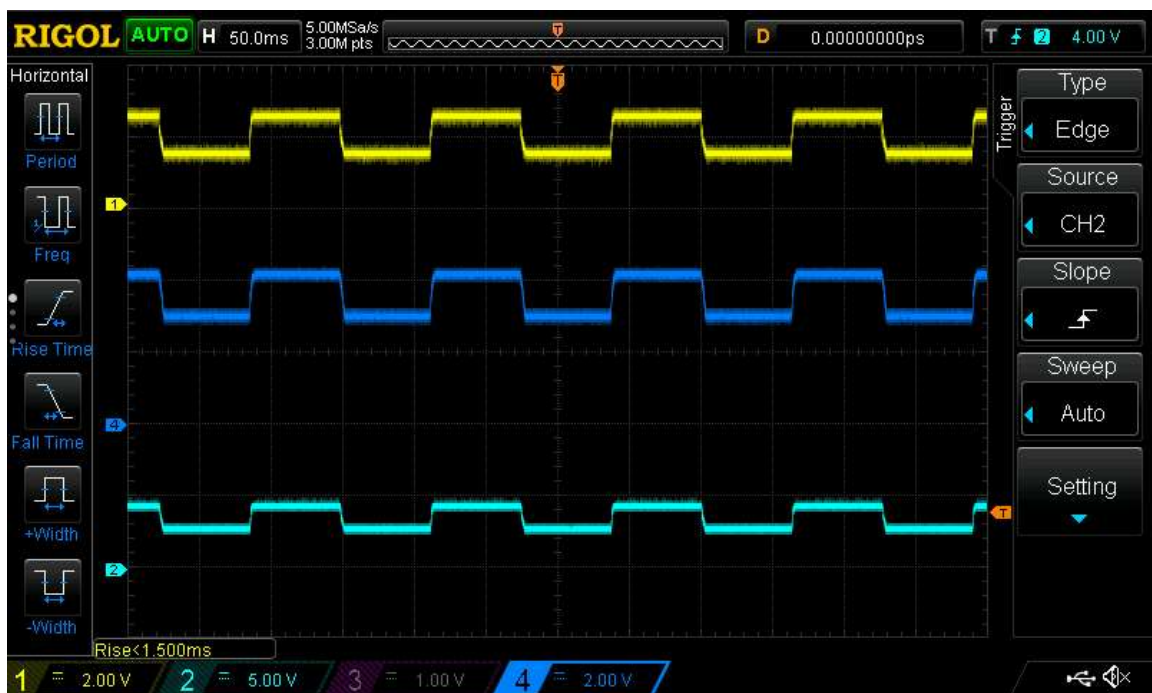
6. Összeépített áramkör vizsgálata

Ha összeépítem a megépített napelem vezérlőt, a kimenetére superkondenzátorral vagy lítium akkumulátort teszek és erre teszem a kapcsolóüzemű feszültség stabilizátort. Valahogy így fog kinézni blokk diagram képében (56.ábra).



56. ábra: Összeépített napelemes tápegység blokk diagram

Ha MPPT modul után nem teszek semmit és fix 120 000lux megvilágítás mellett rá van kötve 5V feszültségstabilizátor és 5mA terhelés az 5V feszültségstabilizátorra, akkor az 57. ábrán látható folyamat történik.



57. ábra: Töltés tároló nélkül vizsgálat 5mA terhelés mellett

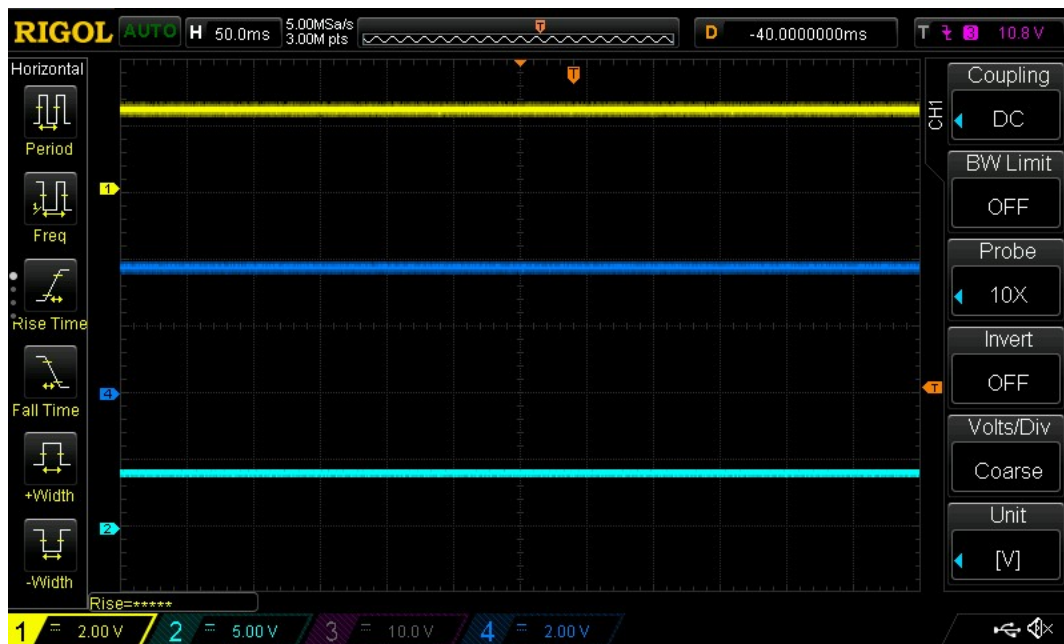
Az ábrán látható, hogy csak a maximális beállított feszültséget csak egy kis ideig tudja megközelíteni, sárga az IC VOC_SAMP lába, a kék a VSTOR és a türkiz a

VBAT. Próbálja a kimenetre a beállított értékre szabályozni. De mivel folyamatos a terhelés és nem tudja a törlést tárolni sehol, így nem sikerül a beállított feszültséget fenntartani.



58. ábra: 1F szuperkondenzátor mellet vizsgálat 5mA terhelés mellett

MPPT modul után teszek egy 1F szuperkondenzátort és fix 120 000lux megvilágítás mellett rá van kötve 5V feszültségstabilizátor és 5mA terhelés az 5V feszültségstabilizátorra. Mint látható, 1F szuperkondenzátor mellett el tud tárolni energiát úgy, hogy nem esik vissza annyira a töltéstárolón a feszültség a VSTOR és könnyebb a visszaszabályzás.



59. ábra: *Lítium akkumulátor mellett vizsgálat 5mA terhelés mellett*

MPPT modul után teszek egy lítium akkumulátort és fix 120 000lux megvilágítás mellett rá van kötve 5V feszültségstabilizátor és 5mA terhelés az 5V feszültségstabilizátorra. Mint látható, ebben az esetben nem esik vissza a feszültség az 5mA terhelésre. Nemhogy visszaesik, de még lassan tölti is az akkumulátort.

7. Összefoglaló

Feladatom az volt, hogy keressek forgalomban lévő integrált áramköröket és próbáljak megvalósítani egy napelemes tápegységet, ami el tud látni egy Cubesat 1U kisméretű műholdat vagy egy kültéri meteorológiai állomást.

Sikerült megvalósítani egyes áramköröket és méréseket végezni rajtuk. A napelem vezérlő képes ellátni feladatát, hogy töltse az akkumulátort. Nagyobb teljesítményű napelem sokkal hatékonyabban el tudná látni az akkumulátor töltését. Az akkumulátor választásnál próbálkoztam szuperkondenzátorral és lítium akkumulátorral is. Végül a mérések alapján a lítium akkumulátorra esett a választásom, mivel sokkal hatékonyabban tudja tárolni a töltést és használat közben nem esik vissza a töltöttsége annyira, mint a szuperkondenzátornak. A feszültség stabilizátor tökéletesen ellátja feladatát, 2V bemeneti feszültség esetén is képes 5V-os kimeneti feszültséget biztosítani. A 3,3V feszültség stabilizátor integrált áramkörét nem sikerült beszerezni a szakdolgozat leadásának határidejéig (chip hiány miatt), de a későbbiekben ennek is elkészül a mérése.

A dolgozatom alapján sikeresen meg lehet építeni egy napelemes tápegységet, egy napelem vezérlővel egy közös akkumulátorra csatlakoztatva képes ellátni a rácsatlakoztatott eszközöket.

Szeretném megköszönni tanáromnak, Horváth Márk Tanár Úrnak a sok segítséget, iránymutatást, ösztönzést. A forrasztásban való segítséget szeretném megköszönni a Vision SMT Kft. munkatársainak.

8. Summary

My task was to search for commercially available integrated circuits and try to implement a solar power supply that could power a Cubesat 1U small satellite or an outdoor meteorological station. I managed to implement some circuits and make measurements on them. The solar panel controller can perform its task of charging the battery. A more powerful solar panel could charge the battery much more efficiently. For battery choice, I tried both supercapacitor and lithium battery. In the end, based on my measurements, I chose the lithium battery because it can store charge more efficiently and doesn't lose as much charge during use as the supercapacitor. The voltage stabiliser does its job perfectly, providing 5V output voltage even with 2V input voltage. The integrated circuit of the 3.3V voltage stabiliser was not available by the deadline for this thesis (due to lack of chips), but will be measured later.

Based on my thesis, a solar power supply can be successfully built, with a solar panel controller connected to a common battery capable of powering the devices connected to it.

I would like to thank my teacher, Márk Horváth, for all his help, guidance and encouragement. I would like to thank the staff of Vision SMT Ltd. for their help in soldering.

9. Felhasznált irodalom

- 1) Bathó Vivien: A napelemek környezeti célú vizsgálata (utolsó megnyitás: 2021.04.15) http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:TJ-hREMeEdYJ:atomfizika.elte.hu/akos/tezisek/szd/bathovivien_szd.pdf+&cd=4&hl=hu&ct=clnk&gl=hu
- 2) Dr. Kádár Péter: Különleges energiaforrások: Napelemes energiatermelés Budapest, 2015
- 3) MT3608 DC-DC konverter adatlapja (utolsó letöltés 2020.03.03) https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131968/ETC1/MT3608/+01_2-8AXDyD8cPXYwtG+/datasheet.pdf
- 4) MPPT bq25504 modul adatlapja (utolsó letöltés 2020.03.03) https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/444832/TI/BQ25504/+3_48WWVRh/1wSAYvAz+/datasheet.pdf
- 6) Puskás István – Kovács Csongor: Analóg elektronika Budapest 2010
- 7) DC-DC konverter Step-Up & Step Down fix 3,3V kimenettel. (utolsó letöltés 2020.04.03) <https://cdn.datasheetpdf.com/pdf/1259350/HexinSemiconductor/HX4002/1>
- 8) Badacsonyi Ferenc: Teljesítményelektronika – 5.Kapcsolóüzemű egyen- egyen átalakítók – Budapest 2012
- 9) DC-DC kapcsolóüzemű feszültségátalakító működése (utolsó megnyitás: 2021.04.15) <http://www.techstorym2m.hu/dc-dc-kapcsolouzemu-feszultsegatalakitok-mukodese.html>
- 10) Buck-Boost konverter egyszerű megvalósítása (utolsó megnyitás: 2021.03.10) <http://www.malnasuli.hu/oktatas/lepcson-fel-lepcson-le-dc-dc-atalakitok/>
- 11) Vincze Zsolt: Alternatív energiaforrású töltőrendszer fejlesztése automata beágyazott mérőrendszerbe. (utolsó letöltés 2020.03.03) <http://dsp.mit.bme.hu/userfiles/diploma/vinczediploma15.pdf>
- 12) HX4002-3,3V charge pump (utolsó letöltés 2020.04.05) <http://www.hxsemi.com/upfiles/20141031121620.pdf>

10. Ábrajegyzék

- 1) Dr. Rácz Ervin Ph.D.: A napelemek Fizikai alapjai (utolsó letöltés 2022.03.03)
<https://docplayer.hu/48374413-A-napelemek-fizikai-alapjai.html>
- 2) MPPT egyszerűsített blokk vázlat (utolsó megnyitás: 2022.03.10)
https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-MPPT-controller_fig2_312972240
- 3) Soros párhuzamos feszültség szabályozók (utolsó megnyitás: 2022.04.15)
https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/0d0cc85d-f7b5-41fb-aec0-d1b8362c7ebf_e90c4562-46d5-4b3a-a5ed-d640f67b512a_102e5c57-b50f-4053-b4a3-c1a7c5aa564f_f940cea3-2aaf-4f85-9723-d0c1666de03a_95b02fda-724b-4a5f-933e-f121897cb1d2_6ee8402f-e935-40e1-ab46-465559d77f02
- 4) Badacsonyi Ferenc: Teljesítményelektronika 5.Kapcsolóüzemű egyen-egyen átalakítók Budapest 2012
- 5) DC-DC kapcsolóüzemű feszültségátalakító működése (utolsó megnyitás: 2021.04.15) <http://www.techstorym2m.hu/dc-dc-kapcsolouzemu-feszultsegatalakitok-mukodese.html>
- 6) MT3608 DC-DC konverter adatlapja (utolsó letöltés 2020.03.03)
https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131968/ETC1/MT3608/+01_2-8AXDyD8cPXYwtG+/datasheet.pdf
- 7) MPPT bq25504 modul adatlapja (utolsó letöltés 2020.03.03)
https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/444832/TI/BQ25504/+3_48WWVRh/1wSAYvAz+/datasheet.pdf
- 8) HX4002-3,3V charge pump (utolsó letöltés 2020.04.05)
<http://www.hxsemi.com/upfiles/20141031121620.pdf>
- 9) Buck-boost konverter (utolsó megnyitás: 2021.04.15)
<http://www.malnasuli.hu/alapok/lepcson-fel-lepcson-le-dc-dc-atalakitok/>