



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Segédberendezés készítése a Smog-1 hallgatói műhold környezeti tesztjeinek támogatására

DIPLOMATERV

Készítette

Légrádi Máté

Konzulens

Dudás Levente

2016. május 26.

Tartalomjegyzék

Kivonat	3
Abstract	4
Bevezető	5
1. Smog-1 műhold	7
1.1. A műhold megismerése	7
1.2. Meteorológiai ballonos mérések	9
1.3. Felépítés	11
1.4. Alrendszer	11
1.4.1. Elsődleges energiaellátó-rendszer	11
1.4.2. Másodlagos energiaellátó-rendszer	11
1.4.3. Fedélzeti számítógép	11
1.4.4. Spektrummonitorozó és kommunikációs rendszer	11
1.4.5. Automatizált műholdvezérlő földi állomás	11
2. Környezeti tesztek	12
2.1. Az adatgyűjtő rendszer általánosan	13
2.2. A tápegység	15
2.2.1. Kapcsolási rajz	15
2.2.2. Nyomtatott áramköri terv	17
2.2.3. Mérési eredmények	19
2.3. Mikrokontroller panel	19
2.3.1. Kapcsolási rajz	20
2.3.2. Nyomtatott áramköri terv	21
2.3.3. Mérési eredmények	22
2.4. Hőmérőpanel	23
2.4.1. Dediált RTD chip felhasználásával megvalósított mérés	23
2.4.2. Precíziós áramforrás felhasználásával megvalósított mérés	24
2.4.3. Áramtükör felhasználásával megvalósított mérés	27
2.4.4. Összesített áramköri terv	28
Irodalomjegyzék	29

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott *Légrádi Máté*, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Budapest, 2016. május 26.

Légrádi Máté
hallgató

Kivonat

A MASAT-1 nyomdokaiban egy új, majdnem kizárálagosan hallgatók által készített oktatási célú pocketqube áll fejlesztés alatt a Műegyetemen. A leendőbeli műhold, Smog-1, a nevéből is adódóan az általunk a világűrbe juttatott elektroszmogot hivatott monitorozni, első közelítésben a rádióamatőr és DVB-T sávban. A pocketqube szabvány a cubesat szabvány 10x10x10 cm helyett 5x5x5 cm, így a felhasználható felület negyede, a térfogat nyolcada a MASAT-1-ének, ami jelentős kihívás. Előreláthatólag a pályára állítás 2017. első negyedévében történik majd.

A jelen diplomaterv témája a fejlesztés során végzett terepi mérések támogatása. Az űrbe kerülő eszközöknek számos teszten kell megfelelniük kezdve a rakéta rázási spektrumán át a kipárolgáson kívül a szélsőséges hőmérsékletekig. A mérések során az eszközt rázópadon, hőkamrában, vákuumkamrában valamint hő- és vákuumkamrában kell tesztelni, és folyamatosan monitorozni bizonyos analóg és digitális vonalak jeleit, valamint az oldallapok és disszipáló chipek hőmérsékletét. A feladat a hardver megtervezésétől a szoftveres feldolgozásig, archiválásig valamint validálásig terjed. A projektben csak nyílt forráskódú vagy szabadon elérhető szoftvereket használunk, ezzel is demonstrálva hogy nem szükséges nagy, vagy drága apparátus az oktatási műholdfejlesztéshez.

Abstract

After the initial success of MASAT-1, a new pocketqube class satellite is being developed in the Budapest University of Technology and Economics. Its aim is to be developed by only students and tutors. The forthcoming satellite, Smog-1, according to its name, is supposed to be monitoring the space for the electrosmog we emitted. Our range of interest is the digital terrestrial video broadcast and amateur band. The pocketqube standard is 5x5x5 cm instead of the 10x10x10 cm cubesat standard, so the usable surface area is one fourth, the volume one eighth of the initial MASAT-1, stating a great challenge. According to the foreseeable future, our launch will take place in the first quarter of 2017.

The aim of this thesis is to support the environmental tests during the development. Devices going into space have to comply numeral test, starting with the rocket's vibration spectrum through evaporation to extreme temperatures. During the tests the satellite will be placed in a vibration bench, thermal chamber, vacuum chamber and thermal-vacuum chamber. Vital analogue and digital signals, the temperatures of the solar cells and dissipating chips have to be constantly monitored. The task consist of designing the hardware, writing the processing software, archiving and validating. The project utilizes only open-source or freeware softwares hence demonstrating that there is no need demanding or expensive equipment in the educational satellite development. The aim of this thesis is to support the environmental tests during the development. Devices going into space have to comply numeral test, starting with the rocket's vibration spectrum through evaporation to extreme temperatures. During the tests the satellite will be placed in a vibration bench, thermal chamber, vacuum chamber and thermal-vacuum chamber. The temperatures of the solar cells and dissipating chips so as vital analog and digital signals have to be constantly monitored. The task consist of designing the hardware, writing the processing software, archiving and validating. The project utilizes only open-source or freeware softwares hence demonstrating that there is no need demanding or expensive equipment in the educational satellite development.

Bevezető

A MASAT-1 nyomdokaiban egy új, főként hallgatók által készített oktatási célú műhold fejlesztése zajlik a Műegyetemen. A készülő szerkezet egy pocketqube osztályú ūreszköz, mely a MASAT-1 10x10x10 cm-es szabványos cubesat méretek helyett mindössze 5x5x5 cm-es befoglalóméretekkel rendelkezik. Az oldalak hosszának feleződése miatt a felhasználható napelemfelület negyedére, míg az áramkörök és akkumulátorok számára rendelkezésre álló terfogat a nyolcadára csökken, ezzel jelentős feladatok elé állítva a mérnököket.

A projekt célja egy rádiófrekvenciás szennyezettséget mérő spektrummonitorozó rendszer Föld körüli pályára juttatása, ami a 430-860 MHz frekvenciasávban hivatott a rádióamatőr sáv valamint földfelszíni DVB-T adók által a világűrbe juttatott elektroszmogot mérni, innen a műhold beszédes neve: Smog-1. Elegendő ideig mérve egy elektroszmog térkép alakítható ki a Földről, hasonlatosan egy hőterképhez. Ezen felül másodlagos mérőrendszerként egy totál-dózismérő is helyet kap a fedélzeten. Pocketqube osztályú műholdból a dolgozat írásának idején csak 1 db kering (WREN-1), amelyik vélhetőleg az antennák nyitásának hiányában nem működik üzemszerűen (csak beaconjelet sugároz).[9][10] Előreláthatólag a pályára állításra 2017. első negyedévében kerül sor, mivel a felbocsátási szerződést megkötötte a Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék valamint a G.A.U.S.S. Srl (Group of Astrodynamics for the Use of Space Systems) csoport és a szerződésben foglalt összeg is átutalásra került. A Smog-1 a UNISAT-7 olasz fejlesztésű műhold fedélzetén kerül felbocsátásra, mint hasznos teher. A pályamagasság 550 és 600 km közé tehető, mellyel a várható élettartam több, mint 10 év. A pályával együtt járó élettartam jóval hosszabb, mint a tervezett mérések elvégzéséhez szükséges idő, ezért speciális hiszterézises anyagokkal tervezük csökkenteni az ūrszemét kialakulásának valószínűségét.[1][2]

A jelen diplomaterv témája a fejlesztés során végzett terepi mérések támogatása. Az ūrbe kerülő eszközöknek számos teszten kell megfelelniük, kezdve a rakéta rázási spektrumán át a kipárolgáson kívül a szélsőséges hőmérsékletekig. A mérések során az eszközt rázópadon, hőkamrában, vákuumkamrában valamint hő- és vákuumkamrában kell tesztelni, és folyamatosan monitorozni bizonyos analóg és digitális vonalak jeleit, valamint az oldallapok és disszipáló chippek hőmérsékletét. A feladat a hardver megtervezésétől a szoftveres feldolgozásig, archiválásig és a validálásig terjed. A projektben csak nyílt forráskódú vagy szabadon elérhető szoftvereket használunk, ezzel is demonstrálva, hogy nem szükséges nagy, vagy drága apparátus az oktatási műholdfejlesztéshez.

A dolgozat első fejezete a műhold megismerésével foglalkozik, az eddig elkészült önálló laboratórium beszámolók, tudományos diákköri konferenciára készült dolgozatok és diplo-

matervek feldolgozása után egy kerek, egész képet igyekszik adni a Smog-1 projekt céljáról, a munka jelenlegi állásáról és a tervezett végkifejletről. A második fejezet részletesen bemutatja a tervezés lépésein, az egyes részegységek kapcsolási rajzától kezdve a nyomtatott áramköri rajzolaton át az elkészült áramkör beméréséig. A harmadik fejezet pedig már a mérőrendszerrel végzett mérések dokumentálásának ad helyet.

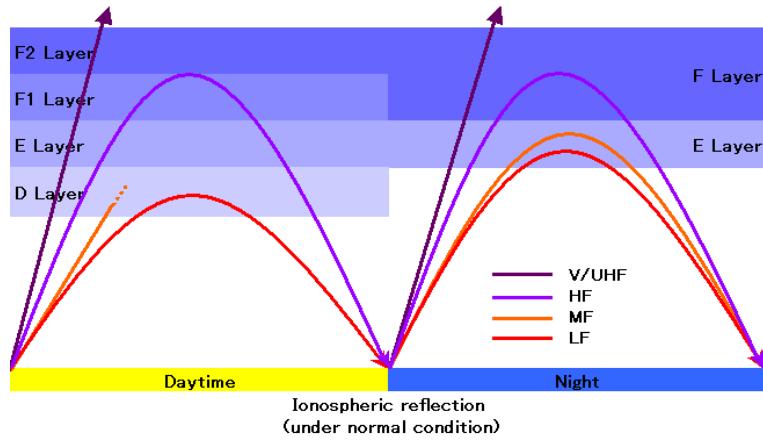
1. fejezet

Smog-1 műhold

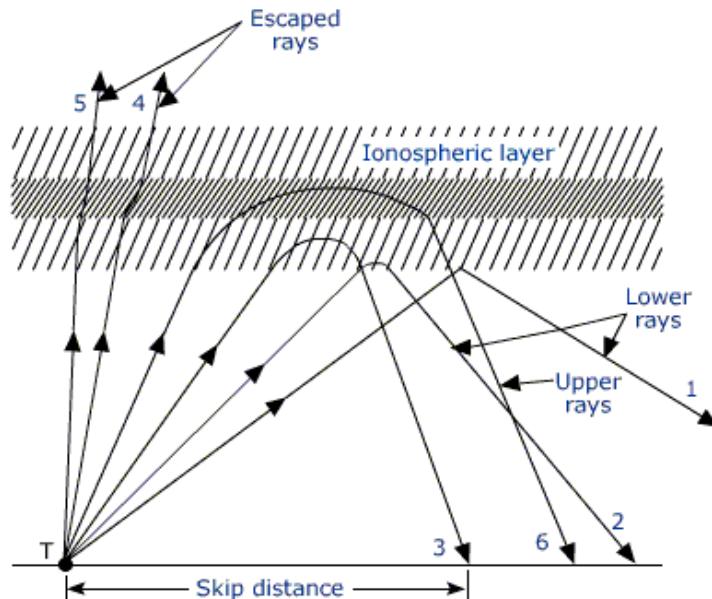
1.1. A műhold megismerése

Mint a bevezetőben is említésre került, a Smog-1 műhold projekt célja kettős. Első és legfontosabb az oktatási vonal, amely az ESA-hoz (Európai Śrugynökség) való csatlakozás miatt még nagyobb szerephez jut. A műhold fejlesztése során szerzett kompetenciák és tapasztalatok a későbbi ūreszközök fejlesztését és végső soron a magyar ūripar gyarapodását is szolgálják. A másik szempont egy olyan, eddig nem vizsgált problémára adott számszerű válasz, hogy milyen mértékben "fűtjük" a világegyetemet az általunk kisugárzott rádiófrekvenciás teljesítménnyel. Ennek a vizsgálatnak az eszköze egy olyan pikoműhold lenne, amiből jelen pillanatban nincs kifogástalanul működőképes példány a világűrben.

A választás azért a 430-860 MHz-es tartományra esett, mivel itt található a 70 cm-es ISM rádióamatőr sáv és itt sugároznak a földfelszíni digitális tévéadók (DVB-T), és nem ritkák az 50-100 kW-os adóteljesítmények sem.[3] Egy másik érv az UHF sáv ezen tartománya mellett, hogy a használt antennák irányítottsága enyhén horizont fölé van beállítva. Ezzel az elrendezéssel a földfelszíni terjedés mellett az ionoszféríkus terjedés jelensége is kihasználható (1.1. ábra). Ennek a lényege, hogy megfelelő szögben indított hullámfrontok esetén az ionoszféra töltött részecskéi miatt reflexiót és refrakciót szorved a hullám, egy része visszaverődik a Föld felé, egy része elnyelődik és egy része minden irányba szóródik, így jutva ki a világűrbe (1.2. ábra). Természetesen a jelenség erőteljesen hullámhosszfüggő és sokkal számottevőbb a hosszúhullámok felé. Ezen felül még függ az említett indítási szögtől valamint a napszaktól is. Ezek ismeretében viszont meghatározható egy adott magasságban adott kúpszög alatt a 430 MHz széles spektrum abszolút nagysága, ezzel egy időfüggő elektroszmog térképet alkotva Földünköről.



1.1. ábra. Az ionoszféríkus terjedés frekvencia- és napszakfüggése[4]



1.2. ábra. Az ionoszféríkus terjedés szögfüggése[5]

Az 1.2. ábrán látható a felbocsátási szögtől való függés, hosszúhullámú kommunikáció esetén a *skip distance* jelenti a maximálisan áthidalható távolságot, míg esetünkben a kiszökő sugarak (*escaped rays*) az érdekesek.

A műhold tömege a pocketqube szabvány szerint maximálisan 180 g, de a G.A.U.S.S.-al kötött szerződés engedékenyebb és 250 g-os határt szab. A felbocsátás során kettős start lesz, ami azt jelenti, hogy először Föld körüli pályára áll a UNISAT-7, majd ezt egy meghatározott időtartamot követően kerülnek a szállított pikoműholdak kidobásra.

A fejlesztés során külön hangsúlyt fektetünk az egyszerű és költséghatékony megvalósíthatóságra, példának okáért a felhasznált szoftverek ingyenesen elérhetőek és/vagy nyílt forráskódúak (pl.: KiCAD, Simplicity Studio, MPLAB, Octave, QT).

A műholdfejlesztési terminológiában 3 jól elkülöníthető mintafázis található. Ezek az alábbiak[11]:

- *mérnöki példány*: Olyan példány, mely már az összes elengedhetetlen elemet tartalmazza.

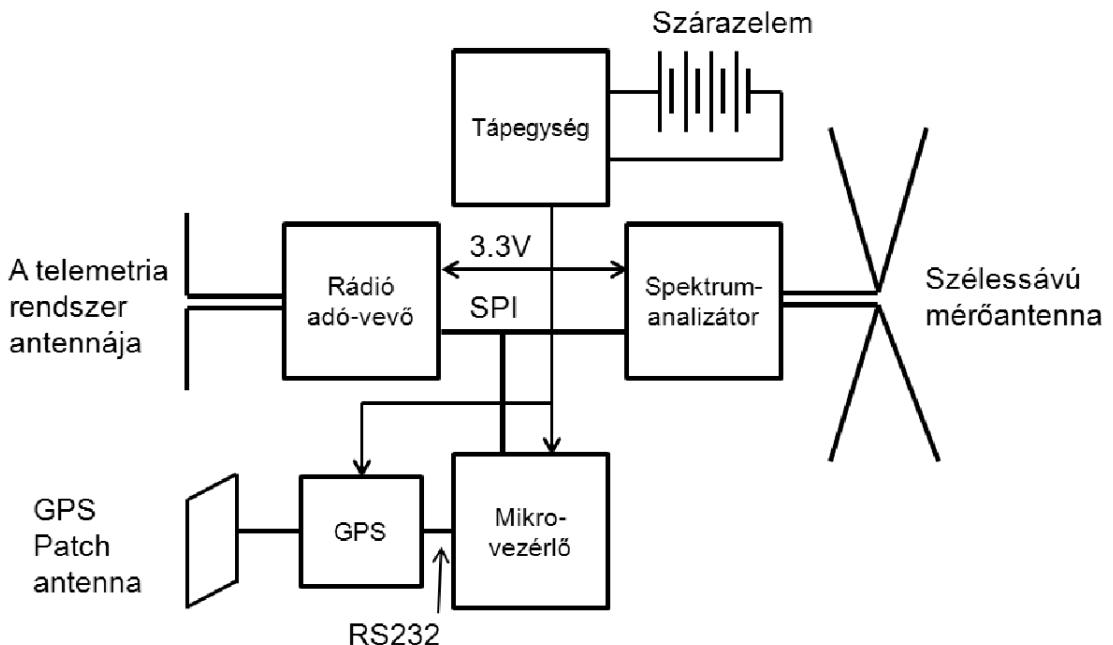
mazza, amit a végleges példány is (pl.: fedélzeti számítógép, adó/vevő chip, napelemek esetén az MPPT (Maximal Power Point Tracker) áramkör). Ennek a működését szobahőmérsékleten laborkörülmények között részegységenként lehet tesztelni, és értékelni, hogy eléri-e a kitűzött célt, vagy esetleg módosításra szorul. A gyakorlatban ez egy iterációs folyamat, ezért számos mérnöki példány készül.

- *kvalifikációs példány*: Ez a példány már a fellövésre szánt példánnyal egyezik meg és ezen kell elvégezni az összes környezeti tesztet (rázás, vákuum, termo-vákuum). A tesztek során túltesztelés miatt a példány tönkre is tehető. Amennyiben valamilyen kritikus hiba lépne fel a tesztek során, a tesztelést újra a mérnöki példánytól kell újrakezdeni.
- *repülő példány*: Teljes egészében meg kell, hogy egyezzen a kvalifikációs példánnyal, de azzal ellentétben csak maximálisan 20%-ig tesztelhető (kivéve a vákuum esetét).

1.2. Meteorológiai ballonos mérések

A Smog-1 projekt természetesen nem indulhatott útjára megfelelő alapozó mérések nélkül. A koncepció az, hogy az emberiség mérhető mennyiségekű rádiófrekvenciás szennyezést juttat a világűrbe, ennek bizonyítása érdekében több meteorológiai ballonos tesztmérés is készült. A tesztek célja frekvencia-magasság-amplitúdó térkép készítése, ami bizonyítja, hogy van létjogosultsága a projektnek.

A mérőrendszer egyszerűsített verziója a kommunikációs rendszernek, ennek blokkdiagramja 1.3. ábrán látható.



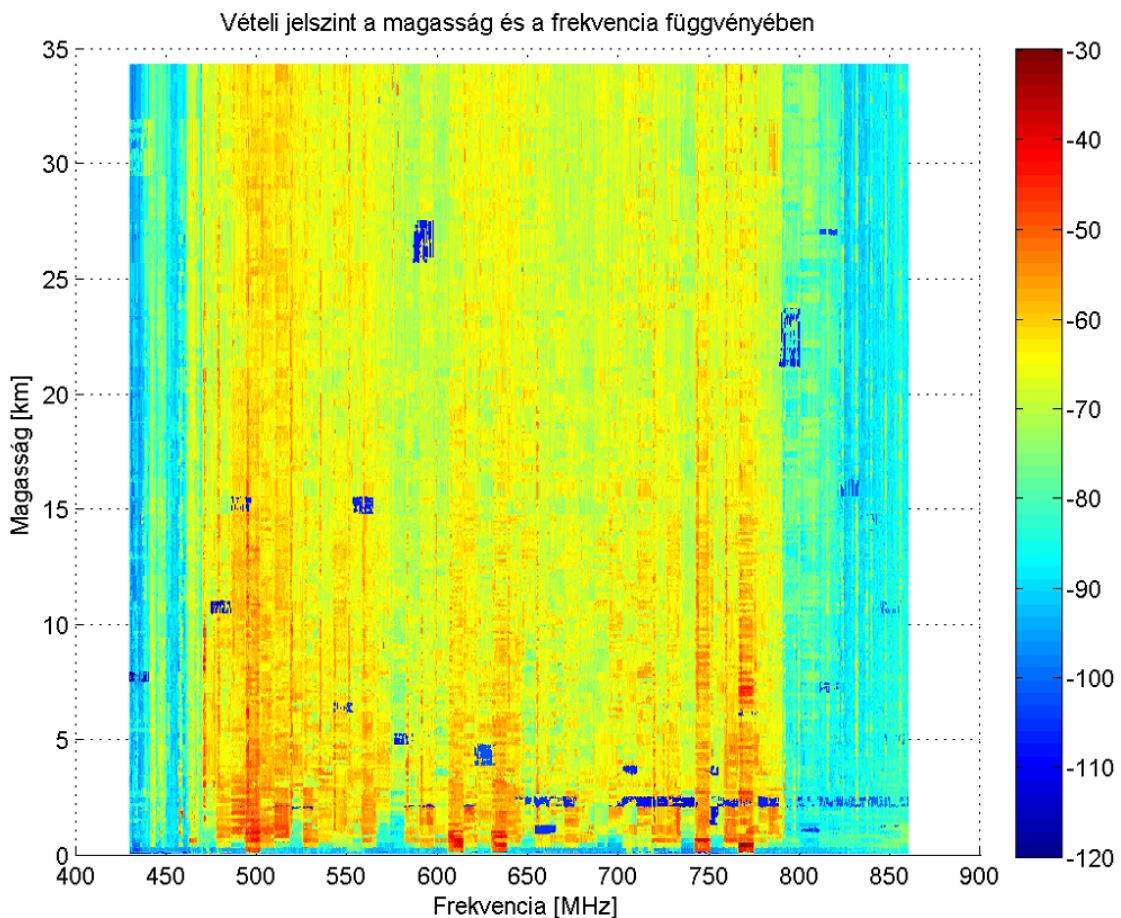
1.3. ábra. A ballonos mérőrendszer blokkdiagramja[11]

A rendszer magja egy Silicon Labs által gyártott SI1062 rádiós mikrokontroller (ez funk-

cionál spektrumanalizátorként) valamint egy SI4464 adó-vevő IC. A mikrokontroller rádiós kimenetén található egy kalibrált szélessávú dipólantenna, a kommunikációs chip ki/bemenetén pedig egy kis irányítottságú, de alacsony nyereség-fluktuációjú hajlított dipólus.

A ballonos repülés önmagában egy környezeti teszt a -60 °C-os hőmérséklet és alacsony nyomás miatt, melyet a rendszer minden gond nélkül kiállt.

A ballonos mérés eredményeként kapott spektrumterképet ábrázolja a 1.4. ábra. Ezen jól láthatóak földfelszíni magasságokon a DVB-T adók spektruma (498, 610, 746 MHz - Budapest/Szécsényi-hegy, 674 MHz - Kab-hegy, 610 MHz - Budapest/Száva utca és Hármashatár-hegy[3])). Ahogy kiterjed a rádiós horizont és a vevő egyre nagyobb kúpszögben látja a Földet, úgy töltődik fel a spektrum a környező országok adásaival. A mérés bebizonyítja a sejtést, miszerint jelentős energia távozik az űr felé, elég megnézni nagyjából 525 MHz-nél, 35 km magasságban a vett jelszint -50 dBm.



1.4. ábra. A ballonos mérés spektruma[11]

- 1.3. Felépítés**
- 1.4. Alrendszer**
 - 1.4.1. Elsődleges energiaellátó-rendszer**
 - 1.4.2. Másodlagos energiaellátó-rendszer**
 - 1.4.3. Fedélzeti számítógép**
 - 1.4.4. Spektrummonitorozó és kommunikációs rendszer**
 - 1.4.5. Automatizált műholdvezérlő földi állomás**

2. fejezet

Környezeti tesztek

A világűrbe jutó eszközöknek különböző szabványokban specifikált követelményeknek kell eleget tenniük. A felbocsátási szerződés aláírásával a benne foglalt előírások betartása kötelező a starthoz. Ilyen előírás például a műhold kipárolgásának mértéke, azaz a műhold súlyához képest maximálisan 1-%nyi változás lehet vákuumban a földi atmoszférához képest. Egy másik sarkalatos pont a rázás teszt. A fellövéshez használt rakéta egy orosz gyártmányú Dnyepr hordozó, melynek rázás spektruma ismert. A műholdnak ki kell bírnia a felbocsátás során fellépő extrém G értékeket (a földi 1 G-tól kezdve akár 2000 G-ig is), anélkül, hogy bármilyen áramköri elem meglazulna vagy elmozdulna. Szintén igaz ez a mechanikai kötésekre, amik összetartják az egész eszközt. A rázás káros hatásainak pedig az egyik legjobban kitett alkatrész pont a napelem, ami az energiaellátást biztosítja.

A fentebb említett károsító hatásokkal szembeni ellenállás vizsgálatára szükséges a lehető legtöbb környezeti tesztet elvégezni. A tesztek során az apróbb részegységektől haladunk a kétoldalas panelokon keresztül fokozatosan a több panelból álló alegységekig, míg végül a teljes mérnöki példányhoz jutunk. A főbb tesztelési formák az alábbiak:

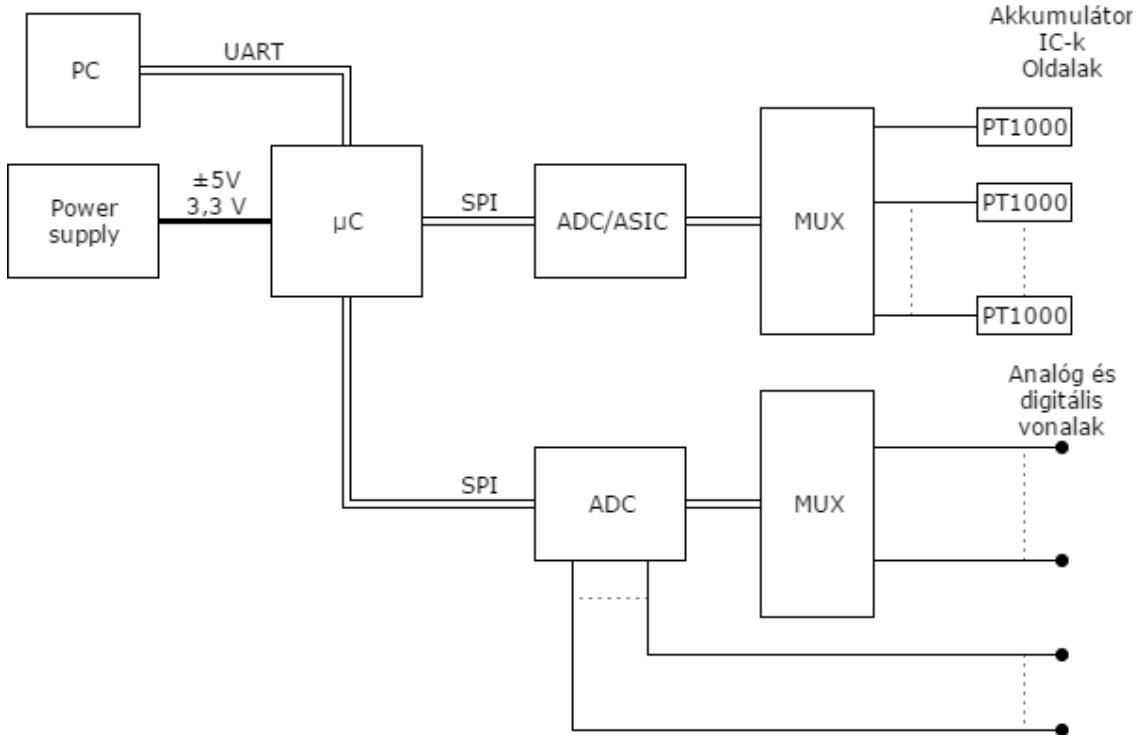
- *hőkamra*: az alrendszerk elvárt működésének vizsgálata a feltételezett hőmérséklet-fluktuáció belül [-40...+80 °C],
- *vákuumkamra*: az alrendszerk elvárt működésének vizsgálata az ūrbéli vákuummal egyező nyomáson,
- *hő- és vákuumkamra/termo-vákuum*: az előbbi két teszt egyidejű elvégzése, a cél továbbra is annak megállapítása, hogy a műhold megfelelően működik-e (nem melegszik túl, vagy fagy le), de már "éles" ūrbeli környezetet szimulálva,
- *rázópad*: a rázópados mérések során egy hangszóróra hasonlító rázógépbe kerül az eszköz, mely képes a 0,1 Hz - 20 kHz tartományon rezgéseket előállítani. Első körben a teljes tartományt végigpásztázva megállapíthatóak a műhold sajátfrekvenciái, melyek a geometriai méretékből adódnak. Nagy kiemelés esetén ez akár szabad szemmel is érzékelhető valamint hallható, de az oldalszenzorok jeleiből digitális jelanalízással a kisebb rezonanciák is kimutathatók. Ha a sajátfrekvenciák bármelyike egybeesik a rakéta rázás spektrumában található rezonáns frekvenciákkal, akkor jó eséllyel alakul

ki olyan káros rezgés, mely tönkretheti a műholdat (például megrepedhetnek vagy rosszabb esetben akár le is pattoghatnak a napelemcellák).

- *terepi teszt*: ez a teszt egyfajta gyűjtőnév minden olyan elvégzett mérésre, ami nem sorolható be az előbbiek valamelyikébe. Ilyen lehet például az antennák iránykarakterisztikáinak felvétele (árnyékolt mérőszobában vagy nyílt terepen) vagy a főbb alegységek szeparált működésének vizsgálata. A kommunikációs és a spektrummonitorozó rendszerek tesztjeiből áll leginkább ez a fajta mérés(sorozat).

Alapvetően minden alegységen külön redundáns intelligencia található mikrokontrollerek formájában. Ezek vezérlését, felügyeletét és az adatlekérést végzi az OBC. minden alrendszer monitorozza a saját specifikus áramköreinek feszültségeit, áramait és hőmérsékleteit, amiket fontosságuktól függően továbbítanak az OBC-nek telemetria adatként, hogy aztán közvetíthető legyen a földi állomás felé, vagy csak belsőleg használják ellenőrzési céllal. Jelen diplomaterv célja egy olyan *független* adatgyűjtőrendszer elkészítése, amely a fejlesztők által fontosnak ítélt analóg és digitális vonalak jeleit monitorozza valamint specifikus IC-k (pl.: kommunikációs chip, OBC chip), az akkumulátor és az oldallapok (külső, belső) hőmérsékletét figyeli. A függetlenség kifejezetten fontos, mert ez biztosítja az összehasonlítási alapot a beépített szenzorokkal valamint, ha a tesztek során nem várt jelenség tapasztalható, akkor az esetleges hiba miatt a logolás nem szűnik meg, így a hiba helye könnyebben lokalizálható.

2.1. Az adatgyűjtő rendszer általánosan



2.1. ábra. A rendszer blokkdiagramja

A 2.1. ábrán látható a rendszer tervezett blokkdiagramja. Az egység központja egy 8051-es architektúrájú 32 lábú Silicon Labs EFM8SB2 mikrokontroller. Több szempont alapján került kiválasztásra az adott mikrovezérlő, ezek egyike, hogy a Silicon Labs szponzora a Smog-1 projektnek. Szakmaibb szempont, hogy két párhuzamosan használható SPI (Serial Peripheral Interface) interfésszel rendelkezik, ami például teljesítmény-idő függvény esetén lehet hasznos (ahol szinkron feszültség- és árammérésre van szükség). A mérni kívánt paraméterek a projekt előrehaladtával alakulnak ki, ezért a tervezés során nem lehet pontosan tudni, hogy később mire lehet szükség, ezért célszerű ilyen lehetőségeket nyitva hagyni. A tervezés kezdeti fazisában egy kevésbé fontos szempont, de ezek a típusú vezérlők lábai (majdnem) tetszőlegesen konfigurálhatók, a gyártó terminológiájával élve: lehetőség van Crossbarra (ez az opción a dedikált UART (Universal asynchronous receiver/transmitter), SPI lábak konfigurálásánál és a későbbi nyomtatott huzalozás tervezésénél játszik szerepet).

A mérőrendszerrel egy számítógép tartja a kapcsolatot egy UART-USB átalakító segítségével (első körben egy FTDI chip alapú USB stick), a későbbiekben, ha igény adódik rá, akkor integrálható az átalakító az áramkörbe. A mikrovezérlő a mért adatokat soros porton továbbítja a számítógép felé, amin egy alkalmas feldolgozószoftver végzi a bejövő nyers információk feldolgozását, megjelenítését és végül archiválását. Mivel a mért adatok kizárolagosan időfüggvények (áram, feszültség, hőmérséklet, teljesítmény) ezért sem a kontroller, sem a PC oldalon nem szükséges nagy számítási kapacitás.

Az egész rendszert egy moduláris táp látja el, mely hálózati feszültségből állítja elő az eszközök számára szükséges feszültségszinteket. A felhasznált aktív áramköri elemek nagy része képes a 3-5 V tartományon belüli feszültségről üzemelni, de a tapasztalatok alapján a fejlesztés során nem egyszer kellhet IC-t cserálni különböző okokból kifolyólag, ezért a széleskörű használhatóság miatt három különböző feszültségszint előállítása mellett döntöttünk: ± 5 és 3,3 V. Az ábrán jelölttől eltérően természetesen a tápfeszültséget minden aktív komponens megkapja, de az átláthatóság érdekében csak a mikrokontrollerrel való kapcsolat került feltüntetésre.

Minden mérés tulajdonképpen feszültségek mérésére vezethető vissza, ezért további aktív komponensekként szerepelnek az analóg-digitális átalakítók. Mivel viszont a mérések jellege más ezért a két használt ADC nem azonos.

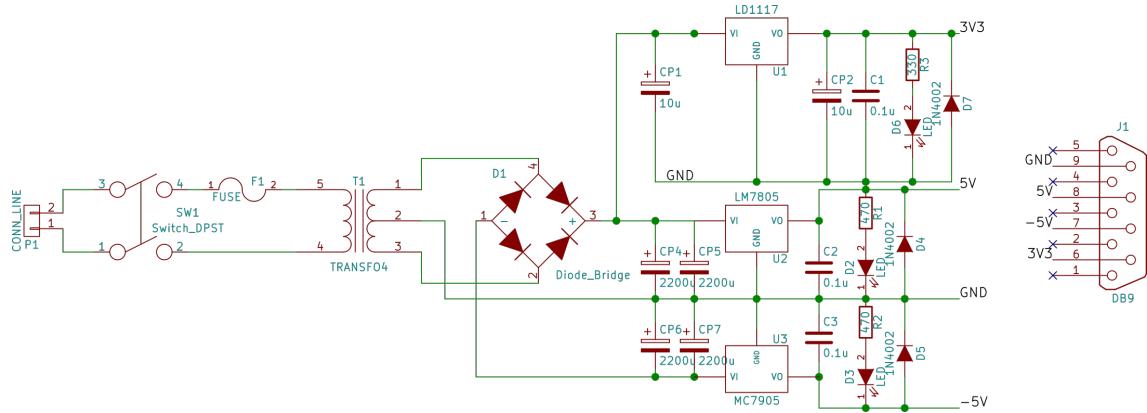
A felső ágban található ADC egy alkalmazás specifikus átalakító, ami kifejezetten a hőellenállással történő hőmérséklet méréshez került kiválasztásra. Ennek a bemenetére kerülnek a mérendő hőmérsékletek, melyeket egy multiplexer áramkör kapcsol. A multiplexert szintén SPI interfészen keresztül az MCU (Microcontroller Unit) vezérli, ennek bemenetein vannak a mérendő hőmérséklettel arányos feszültségszintek. A hőmérséklet feszültséggkonverziót egy PT1000-es hőellenállás végzi. A hőellenállások száma és helye még nem végleges, de legalább a kocka oldalaira, az adó-vevő chipre és az akkumulátoron helyet kapnak.

Az alsó ág hasonló a felsőhöz, annyi eltéréssel, hogy kijelölt vonalak feszültségszintjeit monitorozzuk, egyszerűen teflon borítású sodrott érpárral a megfelelő ponthoz forrasztott kötéssel.

2.2. A tápegység

A tápegység biztosítja a környezeti tesztek során a rendszer működéséhez szükséges különböző táp- és referenciafeszültség szinteket. A könnyebb hordozhatóság és kisebb méret miatt a moduláris felépítésre esett a választás, elkülönülten a mérőrendszertől.

2.2.1. Kapcsolási rajz



2.2. ábra. A tápegység kapcsolási rajza

A 2.2. ábrán látható a tápegység funkcionális kapcsolási rajza, mely tartalmazza a beépítésre kerülő összes alkatrészt. Mivel szükség van negatív feszültség szintre is valamint hálózatról szeretnénk a táplálást megoldani, ezért szükséges egy transzformátor, mely a hálózati 230 V-ot letranszformálja 9 V-ra. Természetesen minden hálózati feszültségről üzemelő eszközkhöz szükséges olvadó biztosító nem maradhat ki. Ennek értéke a későbbi mérések során került meghatározásra.

A 9 V amplitúdójú szinuszos feszültséget egy kétutas Grätz-hidas egyenirányító majd pufferkondenzátorok alakítják egyenfeszültséggé. A ± 9 V-ot lineáris feszültségstabilizátorok konvertálják ± 5 és 3,3 V-ra. Mivel a lineáris stabilizátorok feszültséggenerátorának tekinthetők, melyek változtatható feszültségosztókkal viselkednek, ezért a feszültségek különbség hő formájában eldisszipálódik a $P = UI = \frac{U^2}{R}$ ismert egyenlőség szerint. A hőfejlődés miatt a megfelelő hűtőborda és hővezető paszta alkalmazása elengedhetetlen.

A +9 V-ból egy LM7805 és egy LD1117 állít elő 5 valamint 3,3 V-ot, míg a -9 V-ból egy MC7905 állít elő -5 V-ot. Az adatlapok utasításai szerint a szabályozók bemenetén 0,33 μ F-os pufferkondenzátor, míg a kimeneten pedig egy 100 nF-os hidegítőkondenzátor ajánlott. Mivel a hálózati frekvencia 50 Hz, a bemeneti pufferkapacitást ajánlott minél nagyobbra választani a feszültséghullámosság csökkentése érdekében [6]. A kimeneteken a különböző színű LED-ek csak visszajelzési célt szolgálnak, ezen felül minden kimenetre került egy visszáram dióda az áramkör védelme érdekében. A kapcsolási rajzban található "PWR_FLAG" csatlakozások a tervező szoftver számára jelzik, hogy az adott pin jele külső forrásból származik, így a DRC (Digital Rules Check) ellenőrző nem jelez hibát.

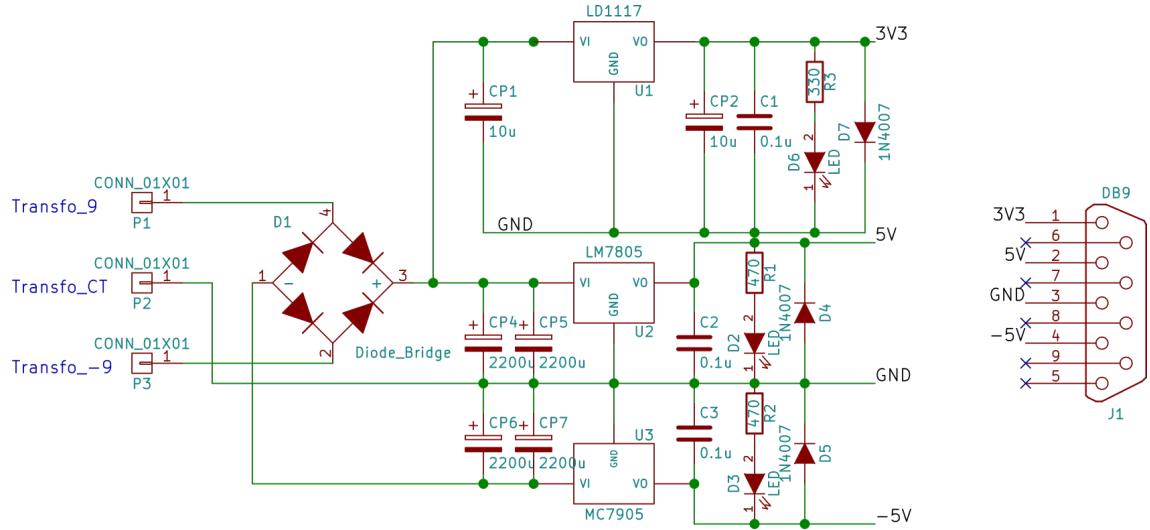
Az egyes regulátorok maximális áram terhelhetősége:

- LM7805: 1,5 A

- LD1117: 0,8 A
- MC7905: 1 A

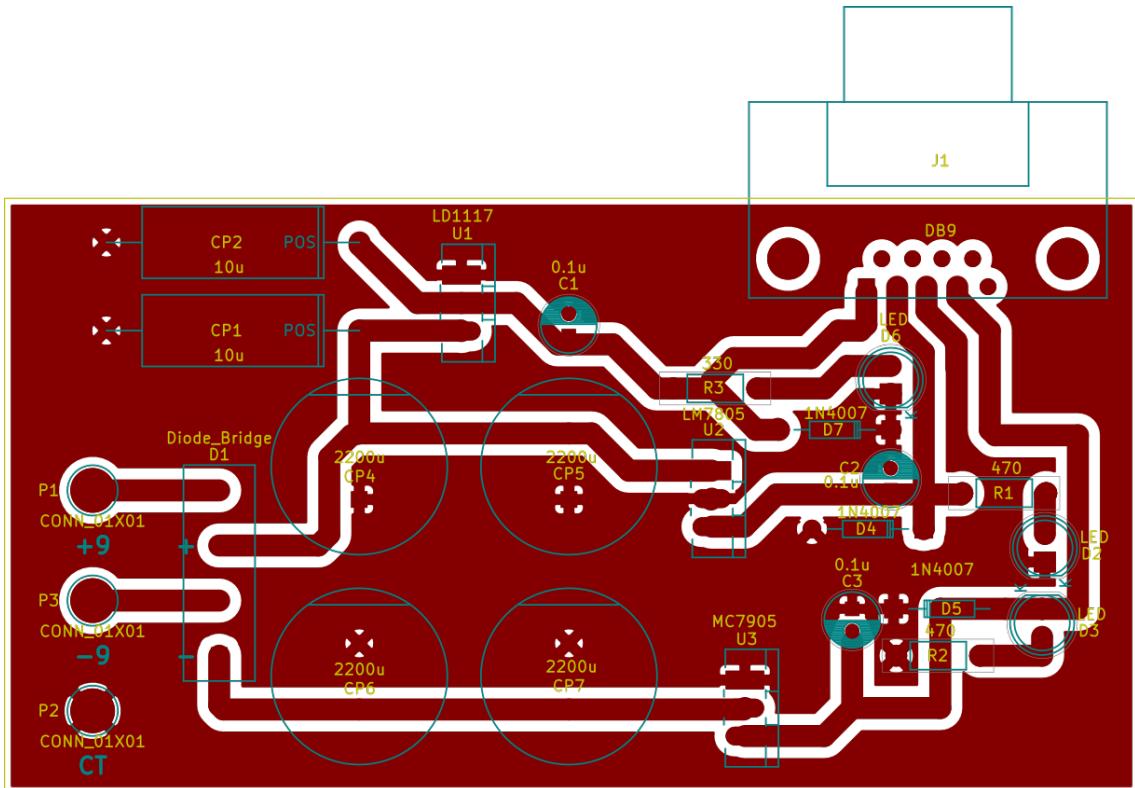
A könnyű csatlakoztathatóság érdekében a hálózat felé egy szabványos IEC C14 aljzat kerül beépítésre, míg a mérőrendszer felé DE9 csatlakozó.

A 2.3. ábra már csak a nyomtatott huzalozású lemezen megvalósításra kerülő alkatrészeket tartalmazza.



2.3. ábra. A tápegység tömörebb kapcsolási rajza

2.2.2. Nyomtatott áramköri terv



2.4. ábra. A tápegység (hibás) nyomtatott áramköri tervé

A 2.4. ábrán látható a tápegység nyomtatott áramköri tervé. A megtervezett áramkör először prototípusként a laboratóriumban kézzel készül el, mert tipikusan az első, de sokszor a második, sőt harmadik verziójú terven is olyan hibák jönnek elő, melyek felesleges költséggé tennék a lemez legyártatását. Ez a terv kellően jól illusztrálja ezt a tendenciát, mivel a huzalozás az alkatrész oldalon került megvalósításra annak túloldala helyett, ezért az alkatrészeket tükrözve kell beültetni. Másik hiba, hogy a 2.2. ábrán a Grätz-hídkapcsolás lábkiosztásának számozása nem egyezett az alkatrész footprintjének számozásával, ezért az elkészült lemezen két lábat fel kell cserélni. A javított verziót a 2.7. ábra szemlélteti.

Korábban említésre került, hogy az 5 V-os szabályzó maximális terhelhetősége 1,5 A. A tervezés során figyelembe kell venni a vezetékezés véges keresztmetszetéből adódó áramsűrűség korlátot. Az IPC-2221A szabvány a megengedett legnagyobb áramra a következő összefüggést ajánlja[7]:

$$I = k\Delta T^{0,44} A^{0,725} = k\Delta T^{0,44} (W H)^{0,725} \quad (2.1)$$

Ahol:

- I : A megengedett legnagyobb áramerősség [A],
- k : Arányosítási tényező, melynek értéke 0,048 külső, 0,024 belső réteg esetén,

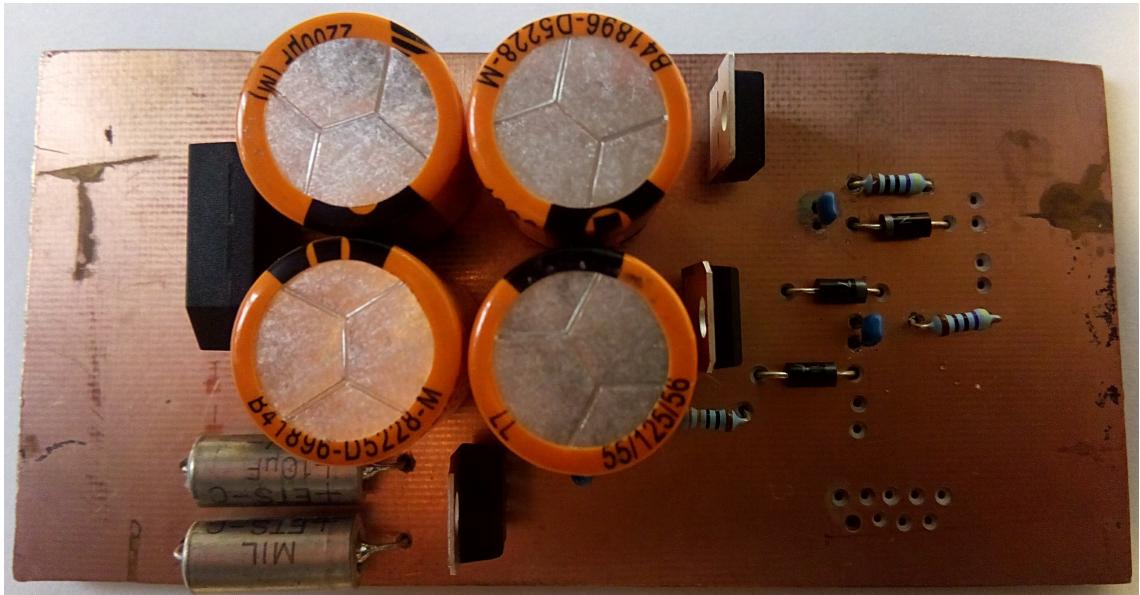
- ΔT : A megengedett legnagyobb hőmérséklet-változás [$^{\circ}C$],
- A : A vezető keresztmetszete [mm^2],
- W : A vezető magassága [mm],
- H : A vezető szélessége [mm].

Az alkalmazott FR-4-es üvegszál erősítésű lemez és vezetőszélességek esetén:

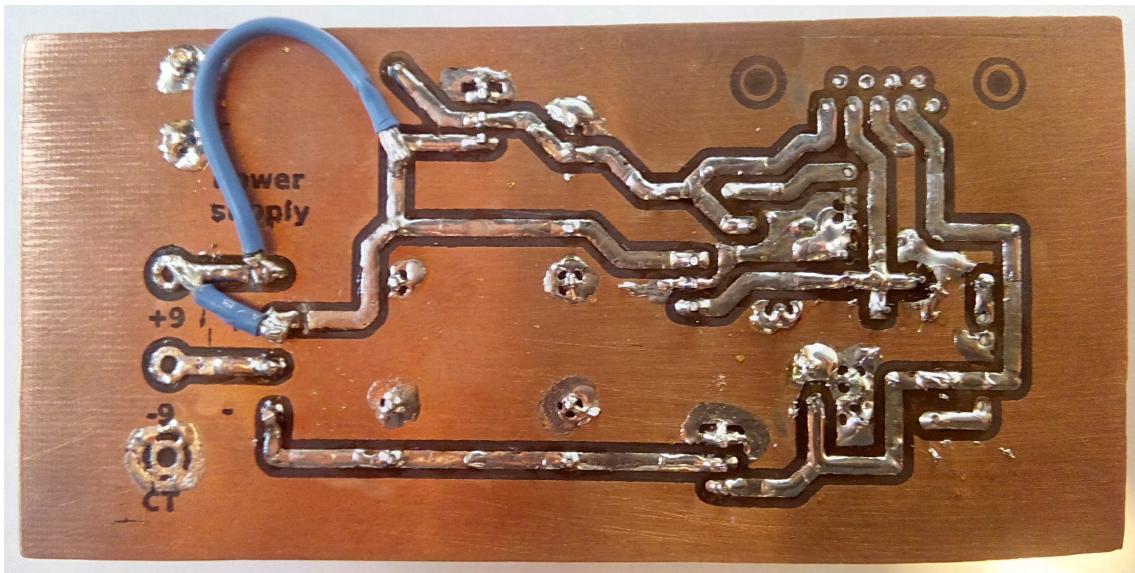
2.1. táblázat. *A megengedett legnagyobb áramerősség különböző paraméterérők esetén.*

ΔT [$^{\circ}C$]	H [mm]	W [mm]	I [A]
1	0,035	2	1,44
10	0,035	2	3,95
1	0,035	1	0,87
10	0,035	1	2,39
1	1	1	9,87
1	1	2	16,31

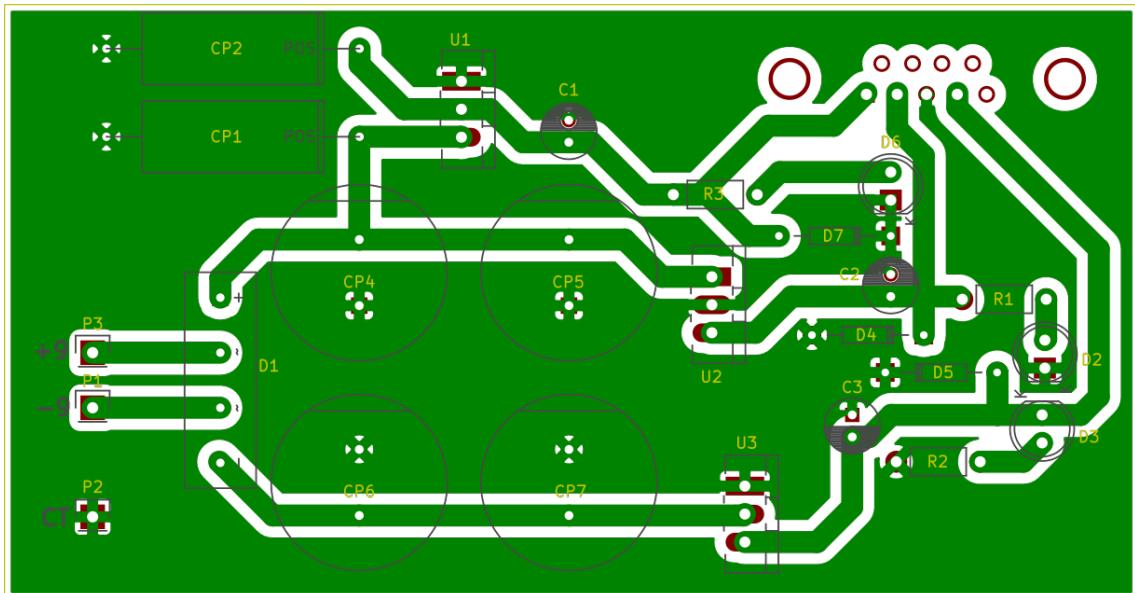
A megvalósított áramkörön a vezetők szélessége 2 mm, mellyel minimális hőmérséklet emelkedéssel számolva, már közel a maximális áram gond nélkül átfolyatható (1,44 A). Azonban a biztonság kedvéért a földréteg kivételével az összes huzalozás ónozásra került, ezzel bőven biztosítva a megfelelő keresztmetszetet (16,31 A).



2.5. ábra. *A tápegyeség elkészült nyomtatott áramköre (top oldal)*



2.6. ábra. A tápegység elkészült nyomtatott áramköre (bottom oldal)



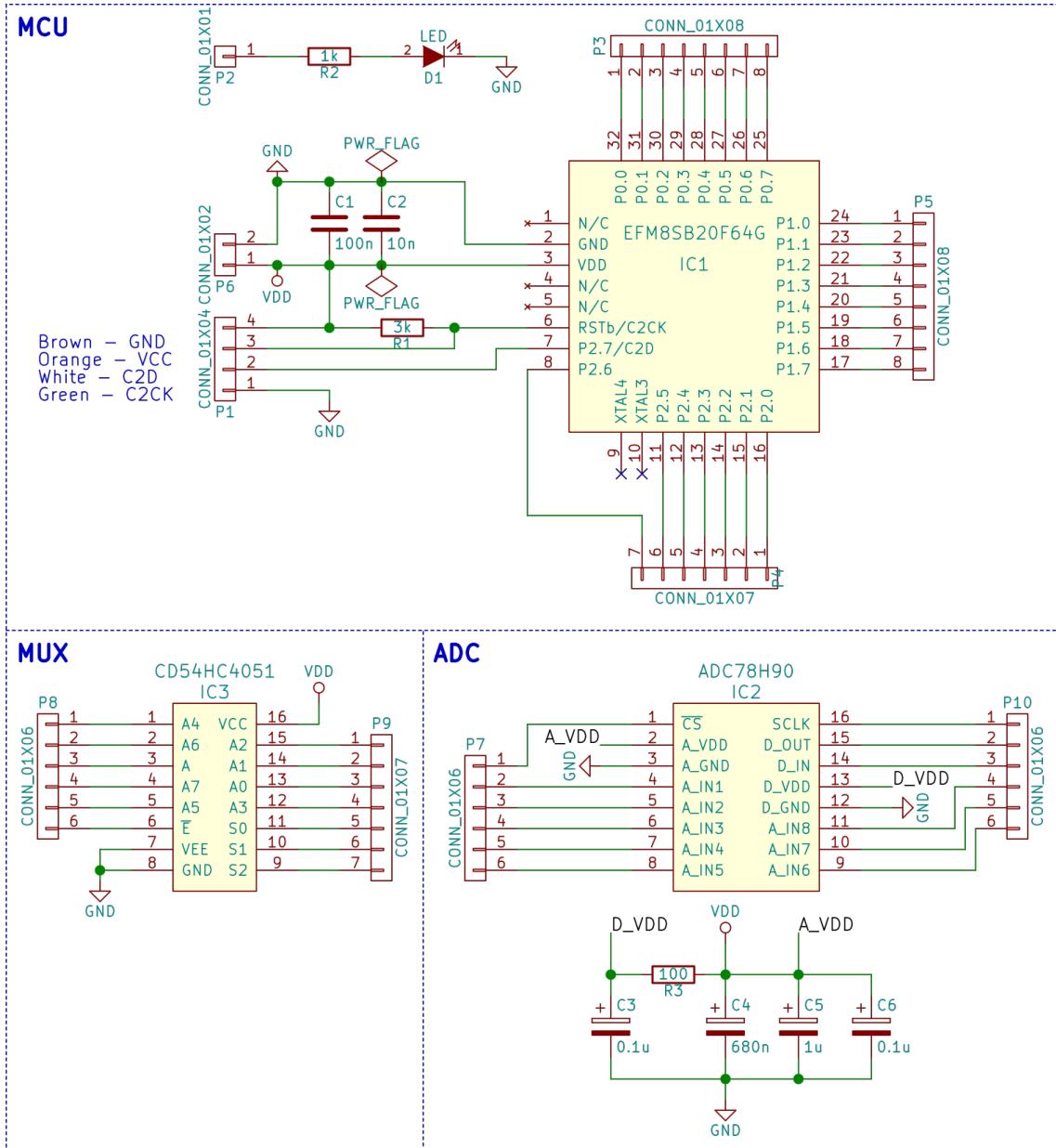
2.7. ábra. A tápegység javított nyomtatott áramköri terve

2.2.3. Mérési eredmények

2.3. Mikrokontroller panel

Alapesetben a mikrokontroller szerves részét alkotná a mérőáramkörnek, fizikailag egy nyomtatott huzalozású lemezen kapnának helyet. A félév során viszont még csak a prototípus tervezés készülne el, ezért a későbbi könnyebb módosíthatóság érdekében az MCU, az általános célú ADC és a multiplexer egy *breakout board*-on kapnak helyet. A kapcsolatot forrpontok/tüskesor biztosítja a többi áramkör felé.

2.3.1. Kapcsolási rajz

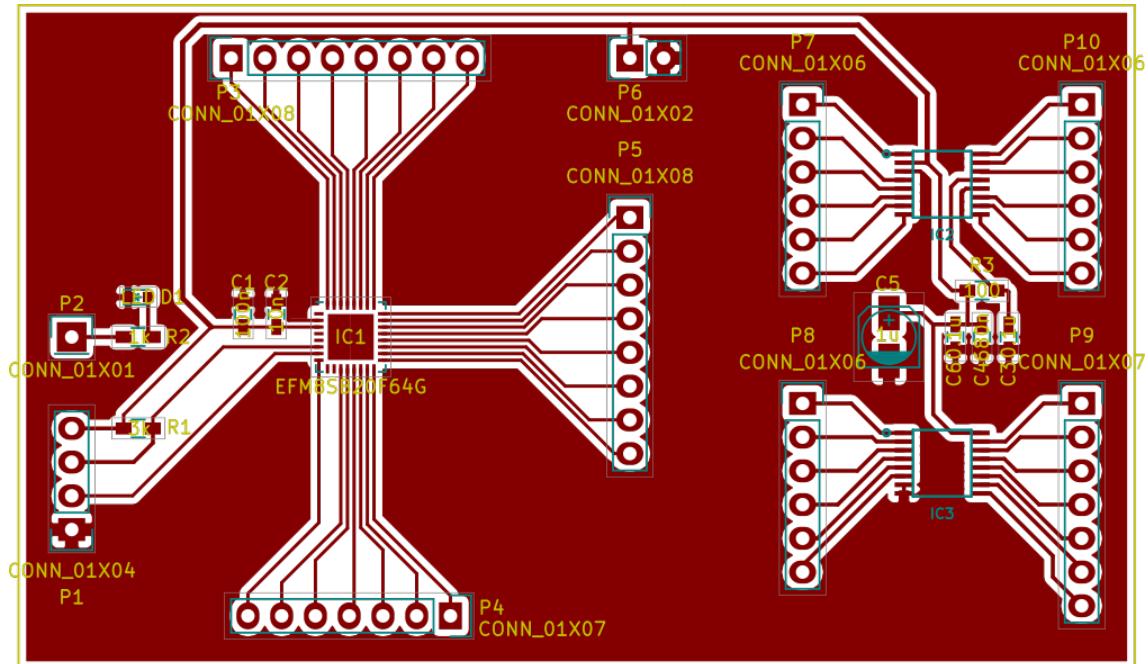


2.8. ábra. A breakout board kapcsolási rajza

A 2.8. ábrán látható a kapcsolási rajz, mely tulajdonképpen egy kifejtőhálózat, az MCU GPIO (General Purpose Input Output) lábait, a MUX (Multiplexer) és ADC (Analog to Digital Converter) csatornáit valamint SPI interfész lábait fejti ki forrpontokra/tüskesorra. A kapcsolás minimális kiegészítő elemeket tartalmaz, melyek a mikrokontrollernél a tápfeszültség szűrését és a programozó stickhez való csatlakoztatást hivatottak megoldani. Az analóg-digitális átalakító szintén igényel szűrést a referenciafeszültség hullámosságának csökkentése érdekében és mivel az adatlap kikötí, hogy a digitális táplábnak a feszültsége mindenkorban legyen kisebb, mint az analógé, ezért szükséges egy 100Ω értékű elválasztó ellenállást beiktatni a lábak közé. Ezekben felül található még egy LED a hozzá tartozó áramkorlátozó ellenállással a későbbi élesztés és szoftverfejlesztés elősegítésére.[8]

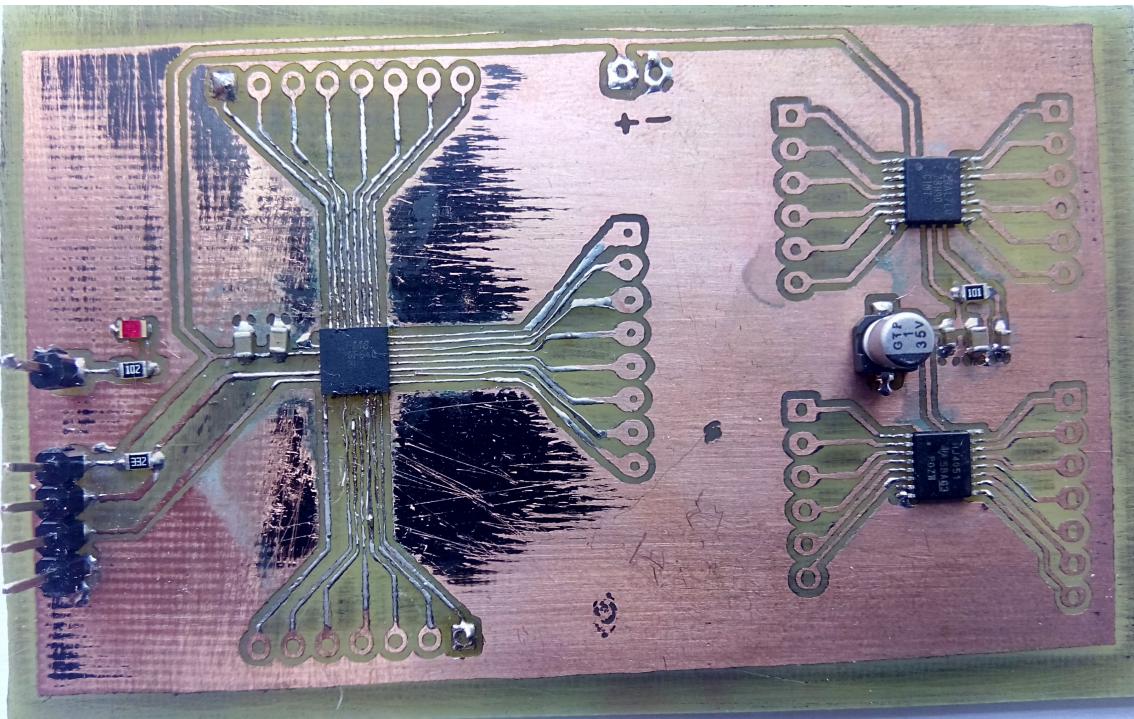
A kifejtőhálózat többek közt kiválóan alkalmas a fejlesztés későbbi fázisaiban szükséges funkciók megvalósítására és a forráskódok tesztelésére, úgymint: az SPI buszon a többi eszköz vezérlése és adatok lekérése, az UART kommunikáció a számítógép felé, vagy a multiplexerek és analóg-digitális átalakítók kapcsolása. Ezek külön-külön megírhatók, ki-próbálhatók és később az összetettebb rendszerben alkalmazhatók.

2.3.2. Nyomtatott áramköri terv



2.9. ábra. A breakot board nyomtatott áramköri rajza

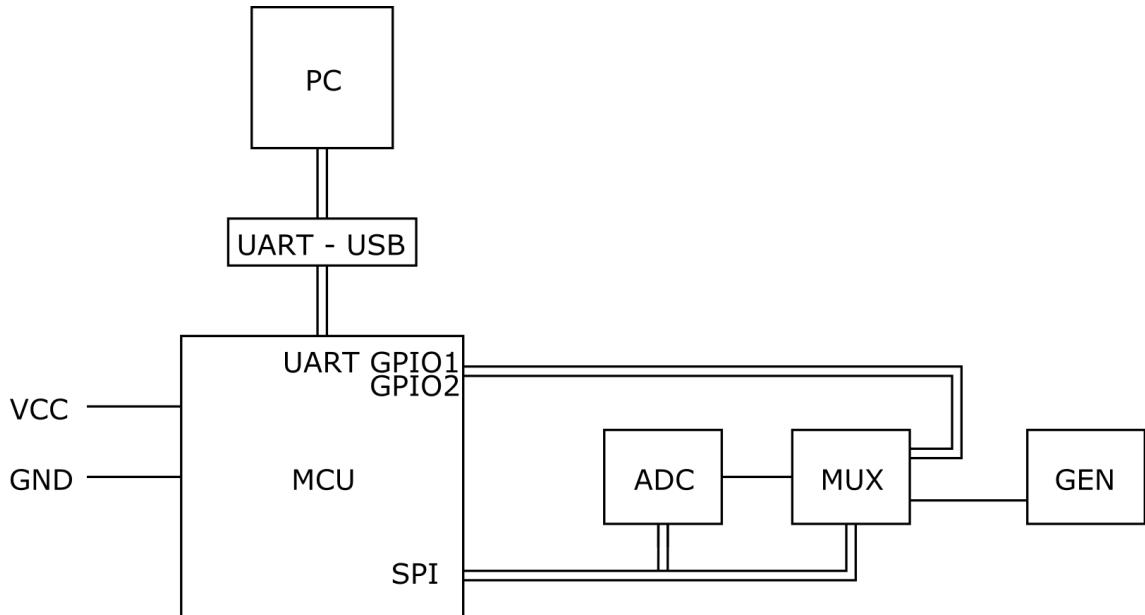
A 2.9. ábrán látható a kifejtőáramkör nyomtatott huzalozási terve. A mikrovezérlő egy 32 lábú, QFN tokozású chip, melynek vonalszélessége 0,25 mm, ami a kézzel gyárthatóság határán van. Az elkészült prototípuson is a különböző GPIO lábak túl hosszan futnak egymást mellett és az elkészítés során a maszkoláshoz használt tinta nem megfelelő fedése és a gyorsmarató okozta alámaródás miatt a huzalozás nem egyenletes, van ahol nem is folytonos. Ezt a párhuzamos vezetékezés sokkal korábbi szétfelválasztásával és esetleg szélesebb fémezés használatával el lehet kerülni a későbbiekben. Mivel ez a kifejtő ilyen formában nem képezi részét a továbbiakban használni kívánt áramkörnek, csak fejlesztési célt szolgál, ezért a nem megfelelő tervezésből és a kézi gyártásból adódó hibák kijavítása, a rajzolat áttervezése nem szükséges.



2.10. ábra. A kifejtőhálózat elkészült nyomtatott áramköre

2.3.3. Mérési eredmények

Az elkészült kifejtő hálózatot a legegyszerűbb módon, csak a mikrokontroller egyik lábának billegetésével lehet tesztelni, amit a beépített LED világítása nyugtáz. A szükséges összes funkció teszteléséhez például egy jól használható összeállítás a 2.11. ábrán látható.



2.11. ábra. A kifejtő tesztelése

Az összeállítás lényege, hogy minden funkció kipróbálásra kerüljön, amit a végleges verzióban használni tervezünk. A főbb megírandó és tesztelendő kódok a mikrokontrolleren a

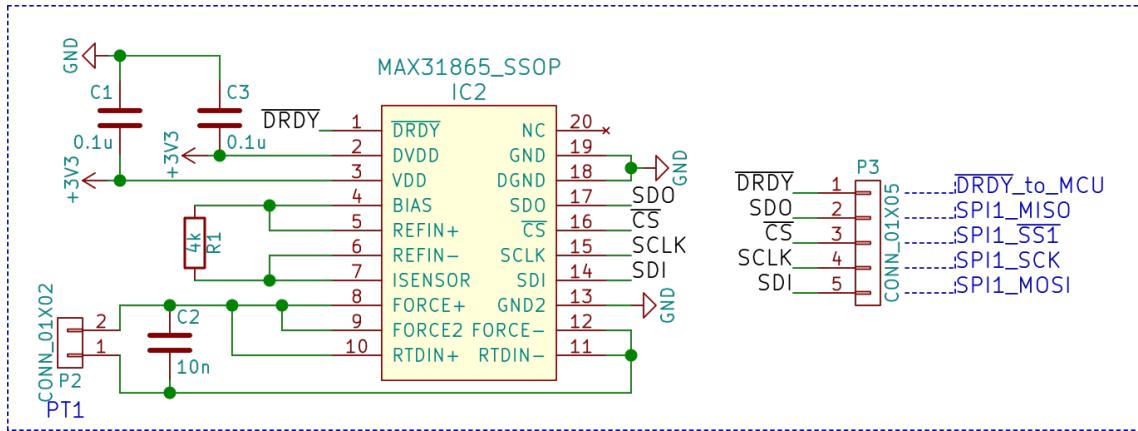
következőre vonatkoznak: a kommunikáció a számítógép felé UART-on valamint az ADC és MUX felé SPI-on, a MUX kapcsolásának vezérlése (valamilyen mintavételi frekvenciával kapcsolja az összes lábat az ADC bemenetére), végül az ADC konverziójának ütemezése a megfelelő időzítések betartásával. A fenti összeállításban például az MCU egyik GPIO lába kiad egy tetszőleges jelet (praktikusan négyszöget, a könnyű előállíthatóság miatt), ami azután visszakötésre kerül a multiplexer egyik csatornájára, a többi csatornára kerülhet akár másik tesztláb vagy függvénygenerátor jele is. A multiplexer kimenete pedig az analóg-digitális konverter bemenete, amiről a digitalizált jelet már a soros interfészen kapja meg a mikrovezérlő.

2.4. Hőmérőpanel

A hőmérséklet méréséhez egy platina alapú ellenálláshőmérőt (Resistance Temperature Sensor, RTD) használunk. A legtöbb esetben ez egy kerámia hordozóra meanderezett vagy tekercselt, speciális ötvözettel készült huzal, melynek ellenállása a hőmérséklet függvényében változik. A változást a hőmérsékleti együttható adja meg, azaz egységnyi hőmérséklet-válto zás hatására mennyi a fizikai változás, esetünkben ellenállás. Ez lehet pozitív és negatív (növekvő hőmérséklet esetén csökken vagy nő az ellenállás). Az alkalmazott szenzor egy ipari PT1000, mely pozitív hőmérsékleti együtthatóval rendelkezik és a használhatósági tartományán belül (-50...+500 °C) lineáris az ellenállásmenete. Névleges ellenállása jégpontron 1000 Ω, 100 °C-on pedig 1385 Ω. Ebből az általunk mérni kívánt -40...+80 °C tartomány leképezhető a 846-1308 Ω tartományra.

2.4.1. Dediált RTD chip felhasználásával megvalósított mérés

A Maxim Integrated által gyártott MAX31865 típusú IC kifejezetten PT100 és PT1000 szenzorokhoz készült. Lehetőség van a hőmérőszenzor két-, három- vagy négyvezetékes mérésére, attól függően, hogy a mérőkábelek impedanciái elhanyagolhatók-e vagy sem. Esetünkben viszonylag rövid (1-2 m) kábelek használatosak, melyek ellenállása ~10 Ω nagyságrendű, elhanyagolható a kΩ-hoz képest. Az áramkör integráltan tartalmaz egy áramgenerátort, egy 15 bites $\Sigma\Delta$ analóg-digitális átalakítót valamint digitális logikát SPI interfésszel kiegészítve. [12]

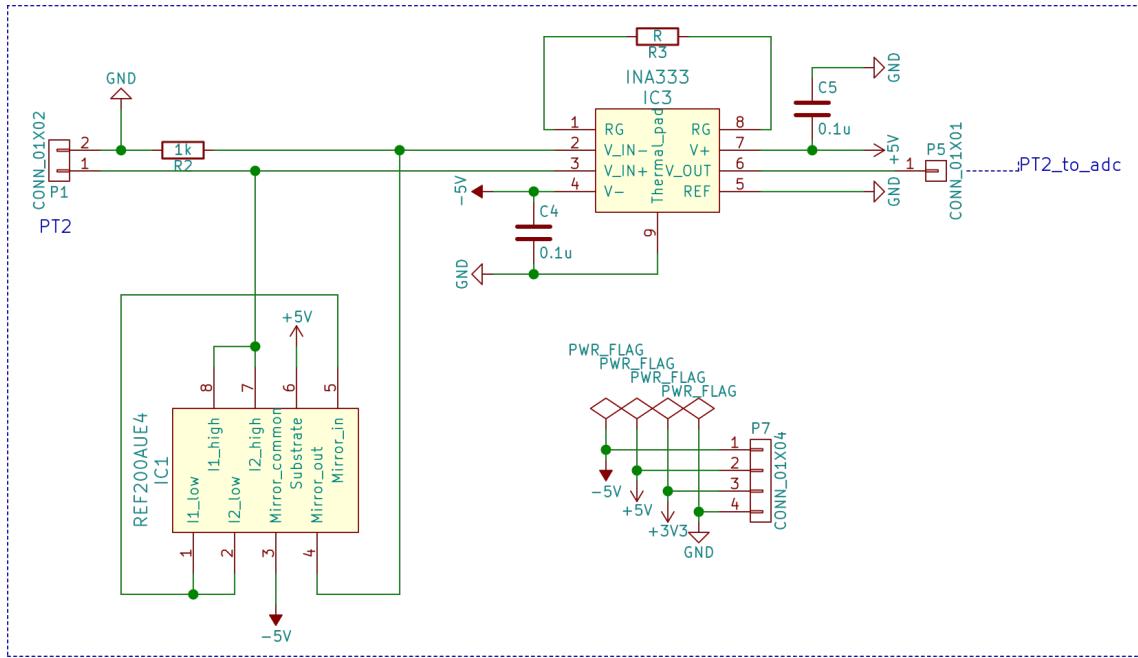


2.12. ábra. A MAX31865 integrált áramkörrel történő hőmérsékletmérés

A 2.12. ábra az áramkör adatlapja alapján javasolt 3-vezetékes mérés kapcsolási rajzát mutatja. Ennek alapján szükséges a 4 k Ω -os ellenállást a referencia lábak közé tenni, mert a rajta eső feszültség szolgáltatja a ADC referencia feszültségét. Ezen kívül szükséges még a táplábak nagyfrekvenciás hidegítése 100 nF-os kondenzátorokkal.

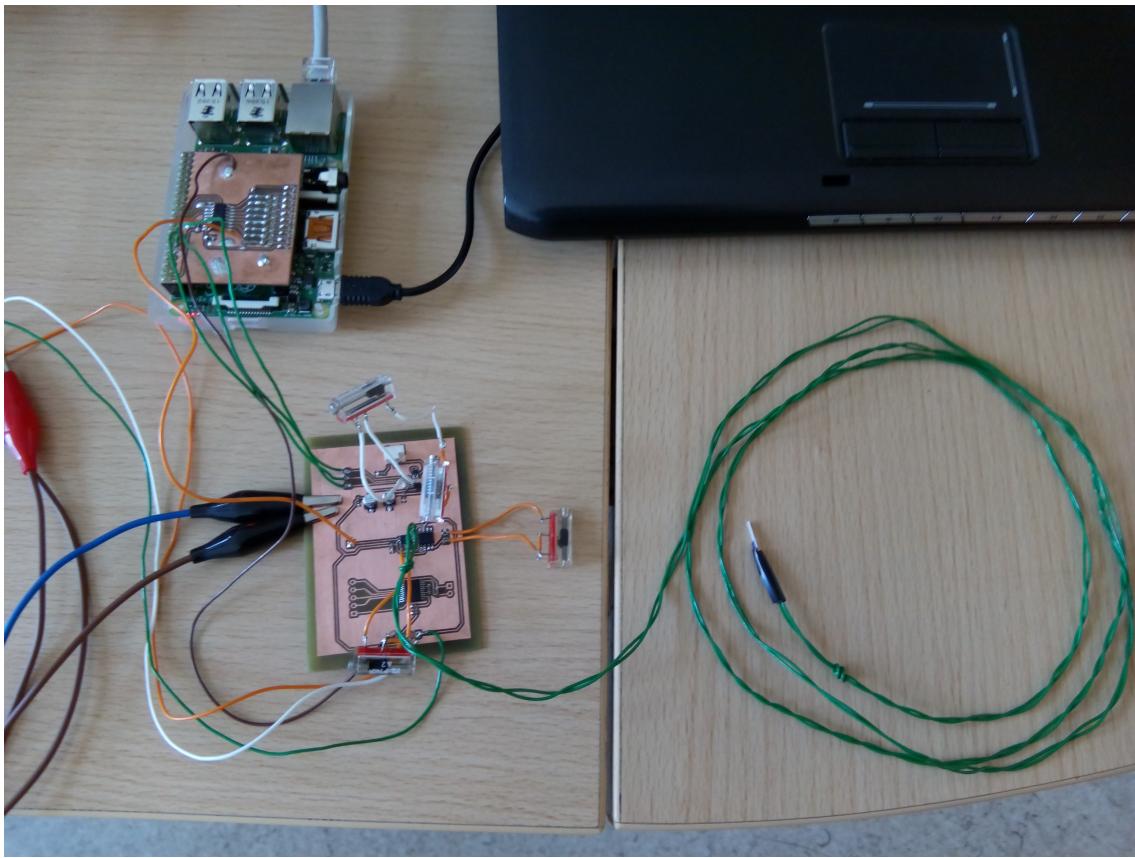
2.4.2. Precíziós áramforrás felhasználásával megvalósított mérés

Az összes hőellenállással történő mérés ugyanarra az elvre vezethető vissza, miszerint egy ismert áramot rákényszerítve Ohm-törvénye szerint feszültség esik az ellenálláson, és ez a feszültség digitalizálható és feldolgozható. A 2.13. ábra elrendezése alapján adott egy precíziós áramforrás a REF200 chippel, melyben két 100 μ A-es áramgenerátor található. Ezeket párhuzamosítva egy 200 μ A-es áramforrás kapható. Az ellenálláson eső feszültséget erősíteni kell a feldolgozás előtt, hogy az ADC feszültségtartományát minél jobban ki lehessen használni. Az alkalmazott erősítő egy szimmetrikus rail-to-rail INA333 típusú műszererősítő, melynek erősítése egyetlen külső ellenállással szabályozható 1 és 10000 között. A cél, hogy -40...+80 °C által kijelölt ellenállástartományon eső feszültség vezérelje ki teljesen az erősítőt. Tehát a -40 °C - 846 Ω pároshoz zérus, míg a +80 °C - 1308 Ω pároshoz a 3,3 V tartozzon. Első körben a PT1000 helyett egy trimmer potenciométerrel beállítható a mérési tartomány aljának megfelelő 846 Ω , ezután az R2 (ofszetkompenzáló) és R3 (erősítés beállító) ellenállások értéke szintén potenciométerekkel meghatározható. Az így előálló feszültségszint a 10 bites átalakító miatt 1024 lépcsőben kvantálható. Ez az 1024 lépcső skálázódik át a -40...+80 °C tartományra, legfeljebb 0,11 °C-os fokos felbontást eredményezve (nem pontosság!).[13]

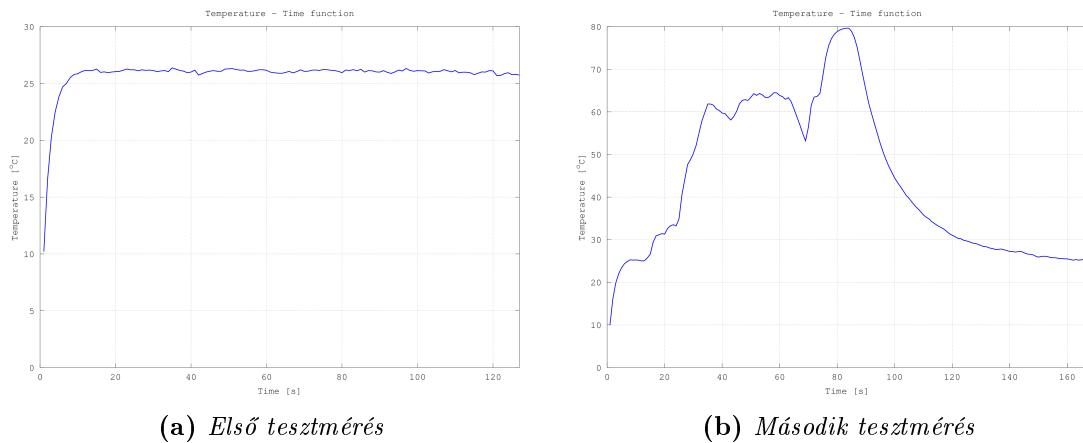


2.13. ábra. A REF200 precíziós áramforrással történő hőmérsékletmérés

A 2.14. ábrán látható az alkalmazott mérési elrendezés. Idő hiányában a a soros porti kommunikációt megvalósító és SPI buszt vezérlő mikrokontroller feladatát egy Raspberry Pi 2 vette át, az ADC pedig egy általános célú 10 bites chip (nem a későbbiekben felhasználásra kerülő). A feldolgozószoftver a Raspberry-n futó Linux, mely parancssorba írja ki és fájlba menti a beolvasott értékeket. A feldolgozó program egy egyszerű 16-os átlagolást és szoftveres simítást tartalmaz a feszültségfluktuációból adódó ingadozást csökkentésére. Ezen felül szükséges volt a PT1000 két lába közé egy 10 nF-os kondenzátor beiktatására hasonló célból.



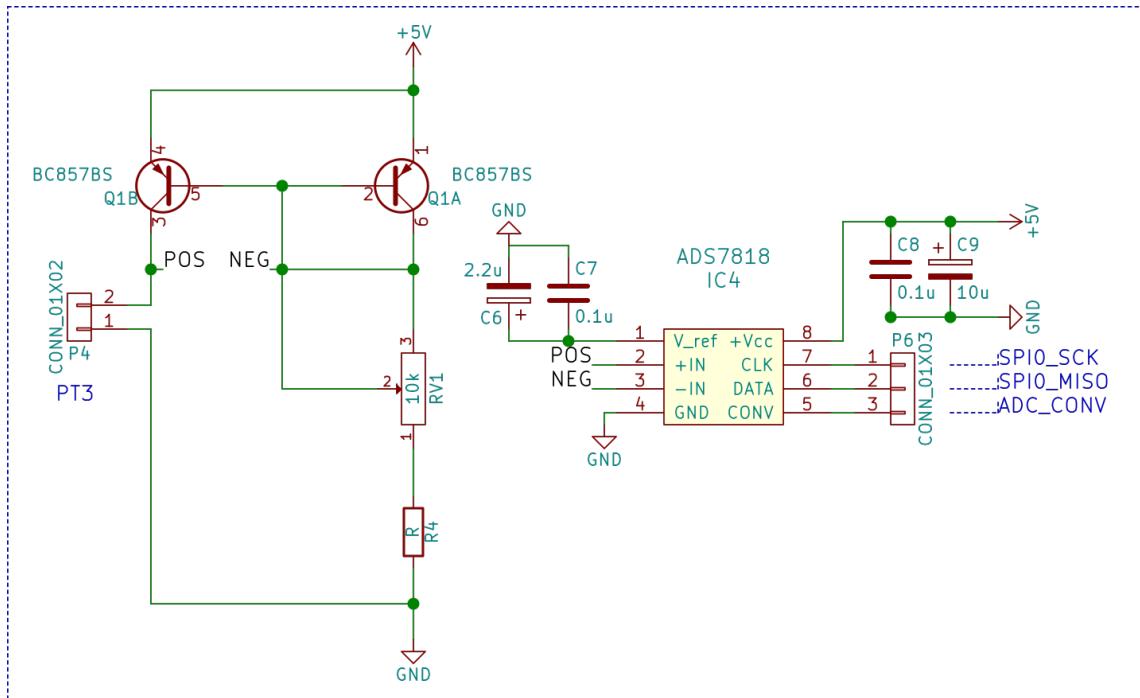
2.14. ábra. A mérési elrendezés



2.15. ábra. A hőmérő első tesztjei

A 2.15. ábrán látható kétféle mérés által kapott görbe. Az első görbe annak megállapítására szolgál, hogy mennyi idő alatt áll be az állandósult állapot és mennyit ingadozik a mért érték. Látható, hogy a szoftveres RC-tag miatt (simítás) a beállás nem azonnali, hanem exponenciális és kb. 10 minta után áll be a végleges értékre (a mérés során a mintavételi időköz 1 másodperc). A 2.15b. ábrán pedig egy 90 °C-os hőlégfúvó melegítésének hatása által kirajzolt görbe látható.

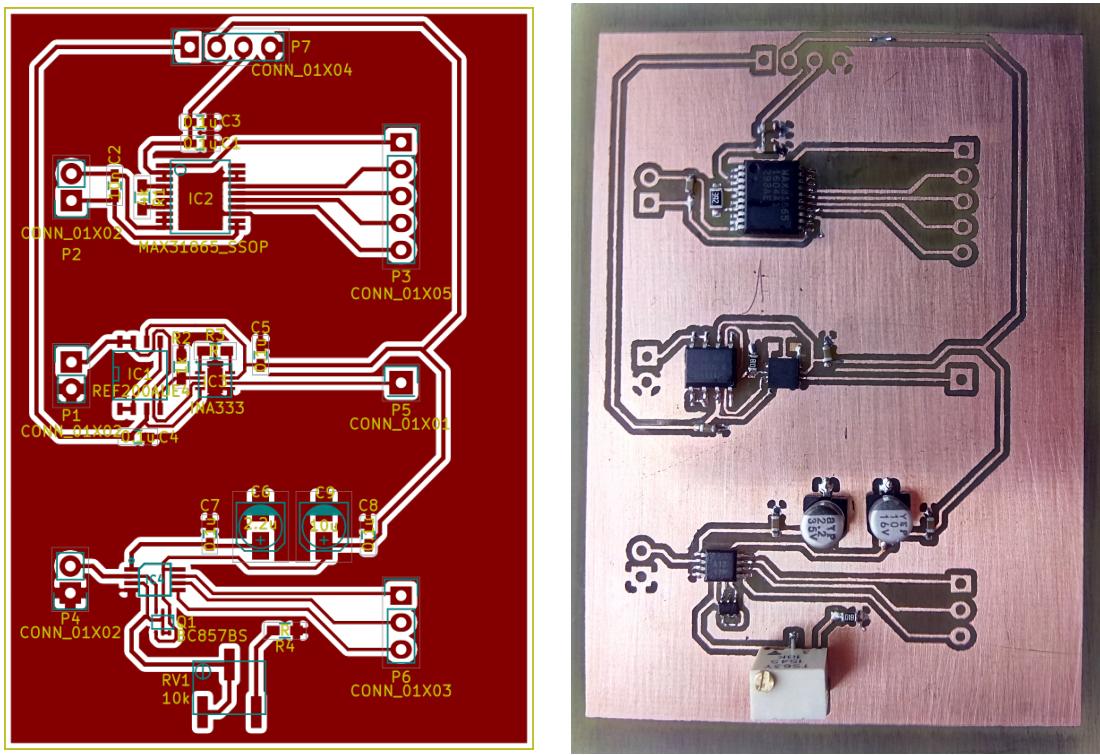
2.4.3. Áramtükör felhasználásával megvalósított mérés



2.16. ábra. A tranzisztoros áramtükörrel történő hőmérsékletmérés

Az áramtükrös megoldás célja is ugyanaz, mint a precíziós áramforrásé, csak itt lehetőség szerint el akarjuk kerülni az erősítő használatát. Az áramtükör potenciométerrel ellátott ágán a változtatható ellenállással beállítható az áramtükör árama, amit átkényszerít a másik ágban található PT1000-en. Ezt a feszültséget digitalizálja egy differenciális bemenetű analóg-digitális átalakító, melynek kimenete SPI buszra fűzhető. A mérések során felmerült probléma, miszerint a használt trimmer potenciométer mind az ofszetet, mind a terhelőáramot állítja, így viszont értékes kivezérlési tartományt vesztünk. Az ADC effektív bitszáma 12, amely 4096 kvantálási lépcsőt eredményezne és így $0,03^{\circ}\text{C}$ -os felbontást, de a mérések eddigi állása szerint nagyjából 1440 osztás okoz teljes kivezérlést, ami csekély javulás a korábbi megoldáshoz képest.

2.4.4. Összesített áramköri terv



2.17. ábra. A hőmérő kifejtőhálózata

A 2.17a. ábra a megtervezett, míg a 2.17b. ábra az elkészített nyomtatott áramköri tervet mutatja be. Egyediüli megkötés a tervezés során, hogy mindegyik egységnél, ami tápvagy referenciafeszültség hidegítést igényel, ott a megfelelő kondenzátorok minél közelebb kerüljenek beültetésre az adott pinhez.

Irodalomjegyzék

- [1] BME-GND, *SMOG-1 felbocsátás*, <http://gnd.bme.hu/news.php?id=55>
- [2] UNISAT-7, <http://www.gaussteam.com/satellites/unisat-7/>
- [3] DVB-T műsorszóró adóhálózat Magyarország (HNG), <http://www.frekvencia.hu/dvb-t-hng.htm>
- [4] Ionospheric reflection day and night, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ionospheric_reflectionDay_and_Night.PNG
- [5] Terms Used in the Study of Sky Wave Propagation, <http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iv/communication-systems/sky-wave-propagation.php>
- [6] STMicroelectronics, *L78xx - Positive voltage regulators*, www2.st.com/resource/en/datasheet/CD00000444.pdf
- [7] Association Connecting Electronics Industries, *IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design*, 40. o. 6.2, http://sisko.colorado.edu/CRIA/FILES/REFS/Electronics/IPC_2221A.pdf
- [8] Texas Instruments Incorporated, *ADC78H90 8-Channel, 500 kSPS, 12-Bit A/D Converter*, 14. o., <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc78h90.pdf>
- [9] AMSAT-UK, <https://amsat-uk.org/tag/wren/>
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/PocketQube>
- [11] Dudás Levente, *SMOG-1 mérnöki példányának fejlesztése*, 5-19. o.
- [12] Maxim Integrated, *MAX31865 RTD-to-Digital Converter*, <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>
- [13] Texas Instruments, *REF200 Dual Current Source and Current Sink*, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref200.pdf>