

M Ś E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Géczy Gábor

**SMOG-1 MŰHOLD KÖZPONTI ENERGIAELLÁTÓ
RENDSZER ÉS KÍSÉRLETI DOZIMÉTER
TERVEZÉSE**

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

KONZULENS

Dudás Levente

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés.....	4
2 Abstract	5
3 A SMOG-1 műhold felépítése, az alrendserek ismertetése	6
3.1 Küldetés	6
3.2 A műhold felépítése	7
3.3 Megkötött paraméterek a tervezés során	7
3.4 Speciális követelmények	7
3.4.1 Mechanikai igénybevétel	8
3.4.2 Termikus paraméterek	8
3.4.3 DMR (Dual Modular Redundancy).....	8
3.5 A műhold alrendszeri.....	9
3.6 A tervezéshez használható szoftverek	9
4 Az EPS ismertetése	10
4.1 Az EPS feladatai	10
4.2 A megtervezett EPS felépítése	10
4.3 Az EPS működéséhez szükséges diszkrét alkatrészek	13
4.3.1 Energiabusz Kondenzátorok.....	13
4.3.2 Power Schottky Dióda	14
4.4 Az SDC alrendszer	15
4.4.1 Az SDC működési elve.....	16
4.4.2 A nem ideális SDC alkatrészek veszteségei	17
4.4.3 Megkötések a SMOG-1 SDC áramkörének megtervezése során.....	17
4.4.4 A feladathoz kiválasztott integrált áramkörök.....	18
4.4.5 A feladathoz szükséges diszkrét áramköri elemek kiválasztása.....	20
4.4.6 SDC V3.0.....	22
4.5 Árammérő híd.....	25
4.6 Limiter Kapcsoló (LSW/B)	27
4.7 Limiter Kapcsoló (LSW/T)	33
4.8 Akkumulátor védelmi kapcsoló (LSW/A).....	36
4.9 Az EPS vezérlése: A Power Control Unit	40
4.9.1 A Vezérlőrendszer energiaellátása	40
4.9.2 Vezérlőrendszer (PCU)	41

4.10 Az EPS hordozótervezése.....	45
4.10.1 EPS Panel-1	46
4.10.2 EPS Panel-2	47
5 SMOG-1 Payload áramkörök.....	48
5.1 Az RTCC egység	48
5.1.1 RTCC áramkör	49
5.1.2 Az RTCC áramkör energiaellátása	50
5.2 Doziméter áramkör	53
6 SMOG-1 Tesztelő áramkörök	58
6.1 Műterhelő RC hálózat.....	58
6.2 SPI Payload Tester.....	59
7 Összefoglalás és kitekintés	61

1 Bevezetés

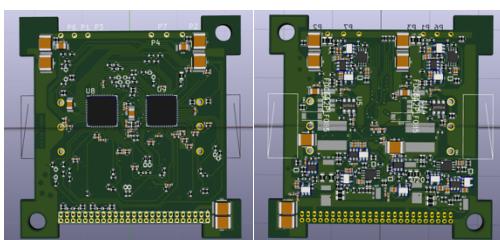
Dolgozatom témája a SMOG-1 nevű műhold központi energiaellátó rendszerének és a fedélzeti elektronikát érő teljes ionizációs sugárzási dózist mérő kísérleti rendszerének megtervezése és megépítése.

Műholdunk küldetése az emberiség történetében először a világűrbe kijutó földfelszíni forrású elektromágneses sugárzás vizsgálata a televízióadások frekvenciasávjában (430 – 860 MHz). Előzetes magasléggöri ballonos kísérleteink alapján ebben a sávban jelentős feltérképezetlen sugárzás hagyja el bolygónkat, amely az űrbe kijutva elektroszmogot képez.[1] Mérési eredményeinket az antennatervezésben felhasználva minimalizálható ez a kisugárzott teljesítmény.

A SMOG-1 egy PocketQube szabvány méretű ($50 \times 50 \times 50$ mm) kisműhold, amelynek megtervezését és megépítését a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatói, oktatói és külsős kutatók végzik hasonlóan a MASAT-1 építéséhez. Egy PocketQube osztályú műhold új rekordot jelent az emberiség számára, először mondhatnánk, hogy alkottunk egy olyan aktív ūreszközt, amely elfér akár egy kabátzsebben.

Az ūreszközök energiaellátó rendszere (EPS - Electrical Power System) kulcsfontosságú szerepet tölt be életükben, hiszen energiaforrásuk (kevés saját forrású ūreszköz kivételével) a Napból érkező fény energiájára korlátozódik. Ebből az energiából kell fedezni a fedélzeten működtetett összes eszköz, műszer és vezérlő áramkör fogyasztását, ezért az egyes alrendszerek fogyasztásának minimalizálása és az energiaellátó rendszerek hatásfokának maximalizálása kulcsfontosságú kérdés.

Új műholdunk fedélzetén helyet foglal az elsődleges mérőrendszeren kívül egy további műszer, amely az alacsony műholdpályán (LEO - Low Earth Orbit) keringő ūreszközöket érő nagyenergiájú részecskék teljes ionizációs sugárzási dózisának monitorozását teszi lehetővé. Dolgozatomban a központi energiaellátó rendszer megtervezésének bemutatása mellett kitérek a doziméter egység ismertetésére is.



1.1. ábra: A központi energiaellátó rendszer áramkörének látványtervei

2 Abstract

Design and construction of the central electrical power system and dosimeter of the SMOG-1 satellite

The topic of my paper is the design and construction of the central electrical power system and experimental dosimeter of the SMOG-1 PocketQube class satellite.

For the first time in human history the objective of our satellite is to examine the terrestrial electromagnetic radiation in the frequency band of television broadcasting (430 – 860 MHz). According to our preliminary high-altitude balloon experiments a significant amount of uncharted radiation was leaving our planet which contributes to the so-called “electrosmog” in space.[1] Our results will be able to be utilized in the future to minimize this wasted power in antenna designs.

SMOG-1 is a PocketQube class ($50 \times 50 \times 50$ mm) experimental small satellite which is being designed and built by the students and lecturers of the Budapest University of Technology and Economics and experts, similarly to how MASAT-1 was conceived and constructed. A PocketQube class satellite means a new record for humanity, in the sense that for the first time we could say that we have created an active device operating in space that actually fits a jacket pocket.

The electrical power systems (EPS) of satellites have a crucial role in their lives, since their power source (except for a very few spacecrafts) is restricted to the energy of incoming sunlight. This limited power must be used to cover the energy requirements of all on-board components, instruments and control circuits, so it is essential to maximize the efficiency of all power systems.

Aside from the primary sensors there is going to be an additional instrument on board our new satellite, which will be able to enable the monitoring of the dose of background ionizing radiation that hits spacecrafts. In this paper I'm also going to go into the details of the dosimeter besides the electrical power system.

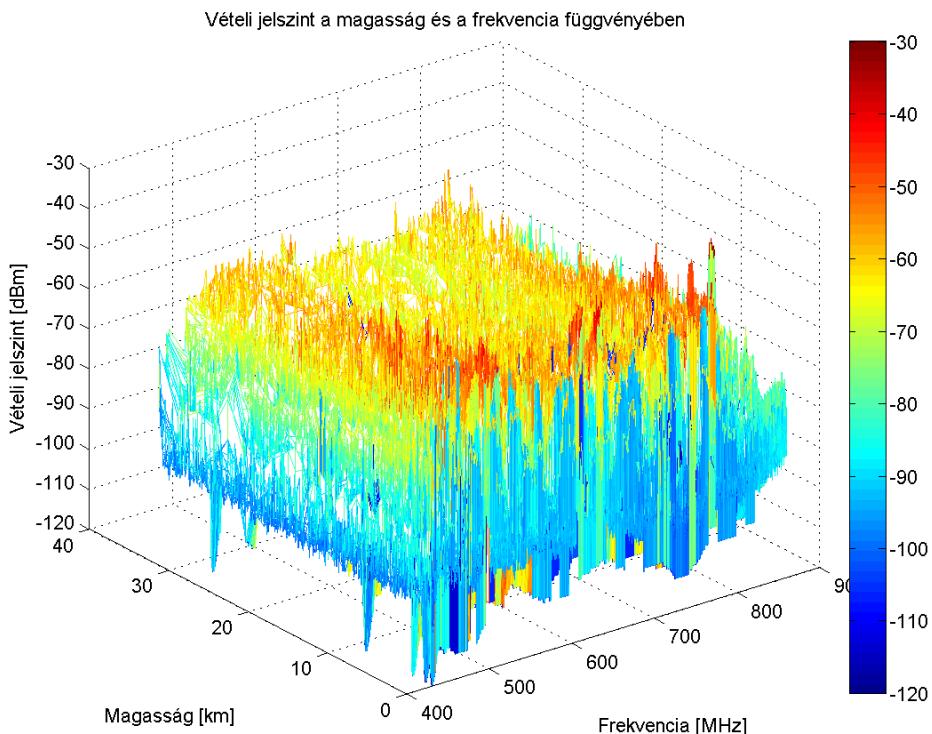
3 A SMOG-1 műhold felépítése, az alrendszerök ismertetése

3.1 Küldetés

Műholdunk fő küldetése a fedélzeten elhelyezett UHF (Ultra-High Frequency) (430-860 MHz) sávban működő spektrum analizátorral méréseket végezni, amellyel a digitális földfelszíni TV adók jelének szintjét fogjuk monitorozni a Föld körüli pályán való keringés során. A mérési adatok segítségével RF (rádiófrekvenciás) szennyezettségi térképet szeretnénk készíteni a Föld körüli térségről (innen ered a műhold neve: RF smog -> SMOG-1)[1].

Ebben az UHF sávban az elektromágneses hullámok terjedése a fényéhez hasonló és a jelek áthatolnak az ionoszférán. Korábbi magaslékgöri ballonos kísérletekkel igazoltuk, hogy ezen adók jelentős teljesítmény szintet juttatnak a világűrbe, ez a teljesítmény nem jut el a TV nézőig, nem hasznosul a vevőkészülékükben, vagyis RF szennyezettséget okoz (3.1. ábra) [1].

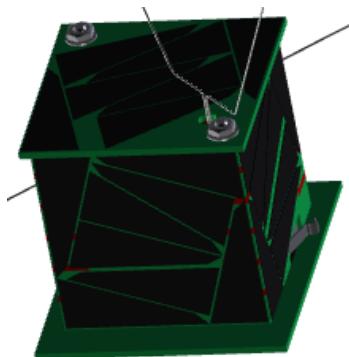
Mérési eredményeinket az antennatervezésben felhasználva minimalizálható ez a kisugárzott teljesítmény. A fő mérőrendszer mellett műholdunk fedélzetén további szenzorok és mérőrendszerek gyűjtenek hasznos mérési adatokat, amelyek a jövőben tudományos kutatásokhoz és technológiai fejlesztésekhez használhatóak fel.



3.1. ábra: A magaslékgöri ballonos kísérletek által mért RF teljesítményszintek[3]

3.2 A műhold felépítése

SMOG-1 egy 5 cm-es kocka alakú műhold (un. PocketQube), amely maximálisan 175 gramm össztömeggel rendelkezhet. A műhold mechanikai felépítése egy nagyon pontosan összeillesztett FR4 lapkákból álló kocka, amelyet két menetes szár tart össze (3.2. ábra). Ennek a szerkezeti felépítésnek a nagy előnye, hogy jól szerelhető, a későbbi mérések, tesztek során könnyen kalibrálható, elemei könnyen és gyorsan cserélhetőek.[2][5]



3.2. ábra: Az aktuális mechanikai felépítés modellje

3.3 Megkötött paraméterek a tervezés során

A műhold kis tömegéből és méretéből adódóan, a napsugárzásból kb. 300 mW felhasználható teljesítmény áll rendelkezésre a műhold fedélzetén. Az űrben a Föld körül a napsugárzás teljesítménysűrűsége 1360 W/m^2 . A napelemek mérete a műhold oldalán $40 \times 40 \text{ mm}$, ebből adódóan az elméleti maximálisan felvehető teljesítmény $2,17 \text{ W}$. A napelemeink hatásfoka 28 % körüli, így 600 mW teljesítményt kapunk. A műhold a tervezett pályájának 60 %-át tölti napfénnnyel megvilágított szakaszon, 40 %-át sötét szakaszon, így átlagosan 360 mW körönkénti teljesítmény átlaggal számolhatunk. Az MPPT áramkörök elért hatásfoka 85 %, így a felhasználható teljesítmény átlag 300 mW, amely eltárolható az akkumulátorban.[3] Ez egy átlagos LED televízió standby fogyasztásának a huszad része.

Az előző alfejezetben ismertetett kis tömeg-, térfogat- és energia korlátok mellett szeretnénk megvalósítani a fedélzeti rendszerek üzemeltetését, így ezen paraméterek minimalizálására törekedni kell minden áramkör tervezése során.

3.4 Speciális követelmények

Az ūreszközökbe tervezett elektronikus eszközök esetén több speciális paramétert is figyelembe kell venni a tervezés során, amelyeket földi körülmények között nem biztos, hogy

teljesen természetesnek gondolnánk. Ezeket a speciális követelményeket ismertetem a következőkben.

3.4.1 Mechanikai igénybevétel

A fellövés során az ūreszközöket a hordozórakétákban akár a Földi gravitációs gyorsulás több százszorosa is érheti, törekedni kell olyan alkatrészek használatára, melyek minél biztonságosabban rögzíthetők az áramköri hordozókhöz, nem engedhető meg nagy alkatrészek használata.[4]

3.4.2 Termikus paraméterek

Az ūrben vákuum veszi körül az áramköreinket, aminek hatására a teljesítményt disszipáló elektronikus eszközök sokkal nehezebben tudnak lehűlni, mivel csak sugárzás és hővezetés segítségével lehetséges elvonni az eszközökről a keletkezett hőt, nincs jelen az áramló levegő hűtő hatása. Erre különösen figyelni kell az energiaellátó rendszer tervezése során, hiszen itt a fogyasztóktól függően esetenként nagy energia áramolhat keresztül.

Az ūrben az eszköröknek rendkívül egyenlőtlen a hőterhelése, így az áramköröket úgy kell tervezni, hogy azok a lehető legszélesebb hőmérséklet tartományban nyújtsanak megbízható működést. Figyelembe kell venni a túlzott lehűlés lehetőségét is, általános követelmény a -40 és $+80$ °C közötti tartományban az üzemcszerű működés.[4]

3.4.3 DMR (Dual Modular Redundancy)

A műhold élettartamát alapvetően befolyásolja az, hogy milyen pályára állítják, de ez az időtartam akár több év is lehet. Annak érdekében, hogy zavartalanul tudja végezni a küldetését ez idő alatt, már a tervezési fázisban végig kell gondolni az összes meghibásodási lehetőséget ami fennállhat a műhold élete során. Egy jó kiindulási pont ennek a tervezési paraméternek a figyelembe vétele során ha egy pont meghibásodásra tervezük az ūreszközt, vagyis ha úgy tervezünk, hogy bármelyik alkatrész rendellenes meghibásodása esetén a műhold működése és funkcionálitása nem kerül veszélybe .

A legtöbb modul által szolgáltatott funkció megvédhető, ha a létfontosságú alrendszerkből a fedélzetre 2db egységet telepítünk, így az egyik alrendszer meghibásodása esetén a hibás egység leválasztása után a tartalék alrendszer veszi át annak feladatait. Ez a DMR (Dual Modular Redundancy) lényege.[4]

Az ūreszközökön nem minden alrendszer esetén engedhető meg 2 különböző egység telepítése, ezért ezeknél a kritikus eszközöknél a lehető legtöbb meghibásodási lehetőséget úgy kell

figyelembe venni, hogy azok esetleges bekövetkezése során se váljon használhatatlanná az egész eszköz. Esetünkben ilyen kritikus részegység például az akkumulátor, amelyből a súly-, és méretkorlát miatt csak 1db fér fel a fedélzetre.

A fedélzeten az egyetlen speciális energiaellátást igénylő eszköz a rendszer RTCC (Real Time Clock and Calendar, Valós idejű óra és naptár) egysége, melynek megtervezése ugyancsak feladatom része.

3.5 A műhold alrendszeri

A műhold főbb alrendszeri az energiaellátó rendszer (EPS - Electrical Power System), a fedélzeti számítógép (OBC – On Board Computer), a kommunikációs rendszer (COM – Communications) és a fő mérőrendszer (SP – Spectrum).

Az EPS végzi az összes áramkör és elektronikus fogyasztó elektromos energiával való zavartalan ellátását.

Az OBC végzi a fő vezérlési és adatgyűjtési feladatokat, kommunikál a műhold alrendszerivel és irányítja azokat.

A COM végzi a földi állomással való kommunikációt, a mérési adatok elküldését és a parancsok fogadását.

Az SP alrendszer tartalmazza a fő mérőrendszert, amellyel a spektrumanalizátoros méréseket végezzük.

3.6 A tervezéshez használható szoftverek

SMOG-1 egy oktatási célú műhold, melynek elektronikai tervezéséhez fejlesztő csapatunk az ingyenesen hozzáférhető KiCad nevű open source programot választotta [7]. Az áramköri és hordozó tervezéseket ezzel a szoftverrel végeztem, a bemutatott kapcsolási rajzok és hordozótervek a KiCad kimenetei.

A mikrokontrollereket vezérlő programkódokat a Microchip MPLABX nevű szofverével készítettem el [8].

A digitális vezérlőegységek működésének szimulációjához a Logisim nevű open source programot használtam [9].

4 Az EPS ismertetése

Ebben a fejezetben mutatom be a SMOG-1 energiaellátó rendszerének (EPS – Electrical Power System) felépítését, az általam tervezett részegységeit és azok mérési eredményeit.

4.1 Az EPS feladatai

Az EPS alapvető feladata, hogy az elektromos energia előállításáról, tárolásáról, szétosztásáról, szabályozásáról és monitorozásáról gondoskodjon.

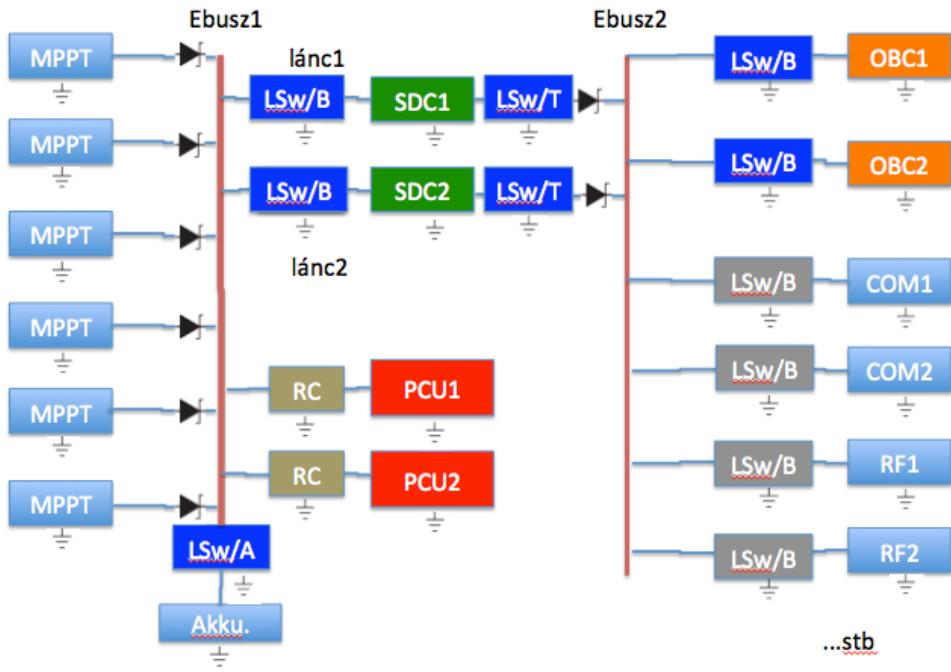
Az oldallapotról beérkező energia az első számú tárolóegységbe, az akkumulátorba kerül. Az akkumulátor feszültsége tág határok (2,4 – 4,2 V) között változhat töltöttségtől függően, ami nem használható fel közvetlenül a fedélzeti elektronikus eszközök táplálására, mert ezek az eszközök jellemzően nem kapcsolhatóak 3,6 V fölötti DC feszültségre. Szükség van egy átalakító eszközre, amely stabilizálja a fogyasztó eszközök számára szükséges tápellátás feszültségét a működés szempontjából biztonságos tartományba. Ezt a feladatot két redundánsan felépített SDC (Step Down Converter) alegység látja el.

Az EPS további feladata, hogy biztosítsa az energiabuszok sértetlenségét bármelyik arra tápláló, vagy arról fogyasztó eszköz meghibásodása esetén. Ilyen feladat például az akkumulátor esetleges rövidzár állapotba kerülése esetén a meghibásodott akkumulátor érzékelése és eltávolítása az energiabuszról, vagy az elsődleges tápegység meghibásodása esetén a hiba érzékelése, és a tartalék rendszerre való átállás zökkenőmentes megvalósítása.

A felsorolt feladatokon kívül az EPS vezérlő alrendszere, a PCU (Power Control Unit) monitorozza az energiarendszerre vonatkozó telemetria adatokat is, mint például az akkumulátor töltöttsége, az SDC áramkörök aktuális hatásfoka, vagy az energiabuszok leterheltsége. Ezeket az adatokat a PCU egységek dolgozzák fel, majd küldik tovább a központi fedélzeti számítógép vagy On Board Computer (OBC) számára.

4.2 A megtervezett EPS felépítése

A korábbiakban említett szempontok alapján redundánsan megtervezett EPS rendszerszintű blokkdiagramja látható az alábbi ábrán (4.1. ábra).



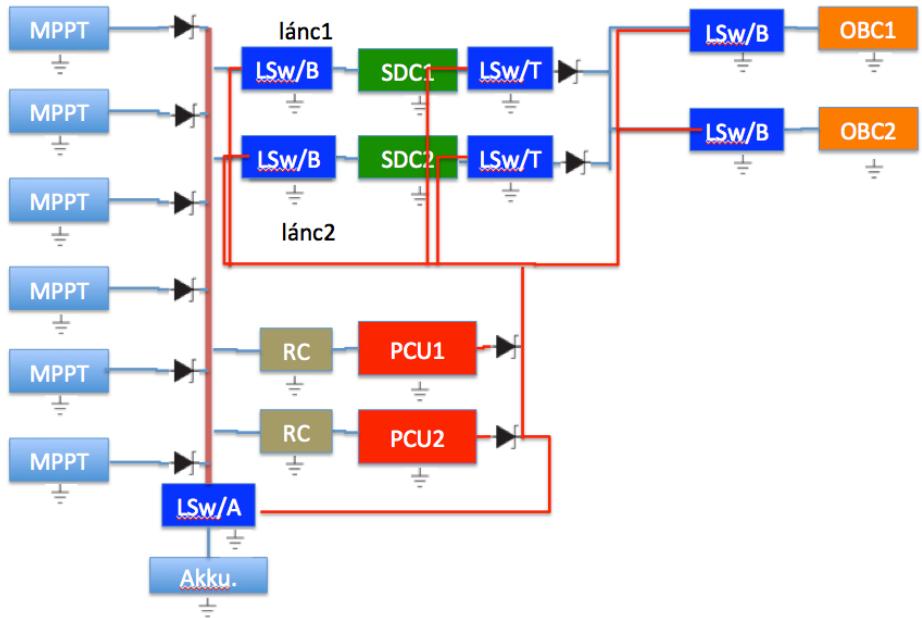
4.1. ábra: A megtervezett EPS blokkvázlatos felépítése

A napelemek felől beérkező energia az első számú energiabuszra (Ebusz1) kerül, ahol az akkumulátorban és a kapacitásbankban eltárolásra kerül.

6db redundáns MPPT (Maximum Power Point Tracking) algoritmussal ellátott napelem oldal egységei végzik a napelemekból kivehető maximális teljesítmény felvételét, ezek az áramkörök az elsődleges energiabusznál kerülnek összegzsre védő Schottky diódák segítségével. Így legrosszabb esetben ha a napelem oldalon valami meghibásodik és zárlatossá teszi a töltő kimenetet a dióda megvédi az elsődleges energiabuszt és az tölthető marad az 5 működőképes oldal segítségével. Az MPPT áramköröket és a perifériális mérőrendszert Herman Tibor építette meg a SMOG-1 elsődleges energiaellátó rendszereként, az elért átalakítási hatásfok átlagosan 85 % körüli.[6] Feladataim az EPS rendszer központi részének felépítése a további szükséges egységek megtervezésével.

Az EPS vezérlését és monitorozását a PCU egységek bonyolítják le, amelyek megfelelő védelemmel ellátva közvetlenül a szabályozatlan buszra csatlakoznak. Ezek az egységek adják ki az EPS automatikus védelmi áramkörei (LSW – Limiter Switch) számára a vezérlésére szolgáló jeleket, továbbá folyamatosan felügyelik az energiaellátás helyes működését (4.2. ábra).

Vezérlőjel nélkül minden kapcsoló szétkapcsolt állapotban van, azaz szakadásnak tekinthető a bemenete és kimenete között.



4.2. ábra: Az EPS vezérlési terve

Az első számú energiabusz feszültsége tág határok között mozog az akkumulátor töltöttségétől függően (2,4 – 4,2 V). Az LSW/A jelzésű aktív kapcsoló védi az akkumulátort a túltöltéstől, mélykisütéstől, zárlatoktól, és csatlakoztatja azt a szabályozatlan buszra. Az akkumulátor egy kis méretű egy cellás 650 mAh kapacitású Li-ion akkumulátor.

Az LSW/B jelzésű kapcsolók látják el az alapvető áramkorlátozást. Túláram esetén az adott egység automatikusan szétkapcsol, ezzel megvédi a bemenetére kapcsolódó energiabuszt és izolálja a kimenetén jelentkező zárlatot. Ilyen kapcsolókon keresztül csatlakozik a szabályozatlan buszra a két független kapcsoló üzemű tápegység (SDC), amelyek kimenetei újabb kapcsolók (LSW/T) bemenetére kapcsolódnak.

Az LSW/T kapcsolók túlfeszültség védelmi funkciót valósítanak meg. Az adott egység csak akkor kapcsol össze, hogyha nincsen a szabályozott buszra kapcsolódó eszközökkel veszélyeztető túlfeszültség a bemenetén. Ezek a kapcsolók folyamatosan ellenőrzik a tápegységek helyes működését.

Az ismertetett kapcsolók és az SDC áramkör segítségével egy láncot lehet felépíteni, amely a szabályozatlan buszfeszültséget átalakítja a szabályozott buszfeszültség szintjére, valamint felügyeli az átalakítást és izolálja az esetleges hibákat. A lánc egy LSW/B kapcsolóval kezdődik, amely monitorozza és szabályozza a szabályozatlan buszról felvett áramot, ennek a kimenetéről kapja a betáplálást az SDC áramkör és az LSW/T kapcsoló. Az SDC áramkör a kimenetén üzemeltet 3,47 Voltos feszültséget állít elő. Az LSW/T kapcsoló méri a lánc kimenetén az áramerősséget így a buszfeszültségek és az LSW/B kapcsolón átfolyó áramerősség ismeretében monitorozható az átalakítás aktuális hatásfoka.

A redundancia érdekében 2 teljesen független lánc biztosítja a SMOG-1 fedélzetén a szabályozott buszfeszültséget. Ezek a láncok a szabályozott busz előtt összegzsre kerülnek a kimenetükön elhelyezett Schottky diódák segítségével. Erre a célról a mérési eredmények alapján a DFLS120L típusú diódát választottam (4.3.2), amely beiktatásával a szabályozott buszfeszültség a terheléstől függően 3,27 és 3,225 V közötti.

A szabályozott buszról kapja a tápfeszültséget a műholdban az összes további áramkör. A fedélzeti számítógép (OBC – On Board Computer), a rádiós integrált áramkörök és az egyéb nagyobb fogyasztású áramkörök LSW/B típusú kapcsolókon keresztül csatlakoznak a szabályozott energiabuszra, ezáltal ezen eszközök aktív túláram védelemmel vannak ellátva és a működéshez felvett áramuk monitorozható.

A kevésbé kritikus kis fogyasztású eszközök áramkorlátozása soros sönt ellenállások beépítésével történik. Ezek az eszközök ha meghibásodnak és zárlatossá válnak, akkor is csak a sönt ellenállás méretével beállított kis mértékű szivárgóáram folyik el az energiabuszokról.

A redundánsan kiépített 2 OBC egység energiaellátásához tartozó LSW/B kapcsolókat is a PCU vezérli. Az elsődleges fedélzeti számítógép meghibásodása esetén az aktív PCU feladata detektálni a hibás működést és bekapsolni a tartalék OBC egységet.

Az összes többi nagyobb fogyasztású áramkör számára beiktatott LSW/B kapcsolót az OBC vezérli és monitorozza autonóm módon.

4.3 Az EPS működéséhez szükséges diszkrét alkatrészek

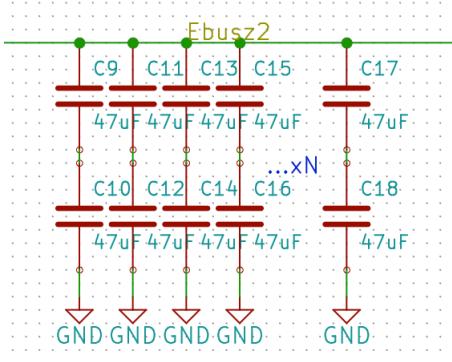
4.3.1 Energiabusz Kondenzátorok

Az energiabuszok pufferelésére kiválasztott alkatrész a japán Murata vállalat GRM32ER71A476KE15L típusú kondenzátora (4.3. ábra). Ez a kerámia alapú kondenzátor kis veszteségű X7R dielektrikummal és ideális kapacitás/méret aránnyal rendelkezik. Kapacitása $47 \mu\text{F}$ szabvány SMD 1210-es méret mellett 10 V maximális feszültségre méretezve.



4.3. ábra: A kiválasztott kondenzátor

Az energiabuszok esetén a pufferelést $N \times 2$ db sorosan kapcsolt kondenzátorral kell megvalósítani az egy pont meghibásodásra tervezésből adódóan. Így a két sorosan kapcsolt kondenzátor kapacitása a felére csökken ($23,5 \mu\text{F}$), azonban akkor is biztosított az energiabuszok védelme, ha valamelyik kondenzátor zárlatossá válik (4.4. ábra).



4.4. ábra: Az energiabuszok pufferelése

A tervek szerint a szabályozott energiabusz kapacitásbankja elosztva lesz elhelyezve a belső hordozólemezek szélén a rendszerbuszhoz közel, így minden egyik hordozólemezen függetlenül megvalósítható az eszközök pufferelése és a tápfeszültség szűrése. A mechanikai igénybevétel szempontjából ez az elrendezés ideális, a hordozó szélén éri a viszonylag nagy méretű kapacitásokat a legkisebb kihajlás a rázkódásból adódóan.

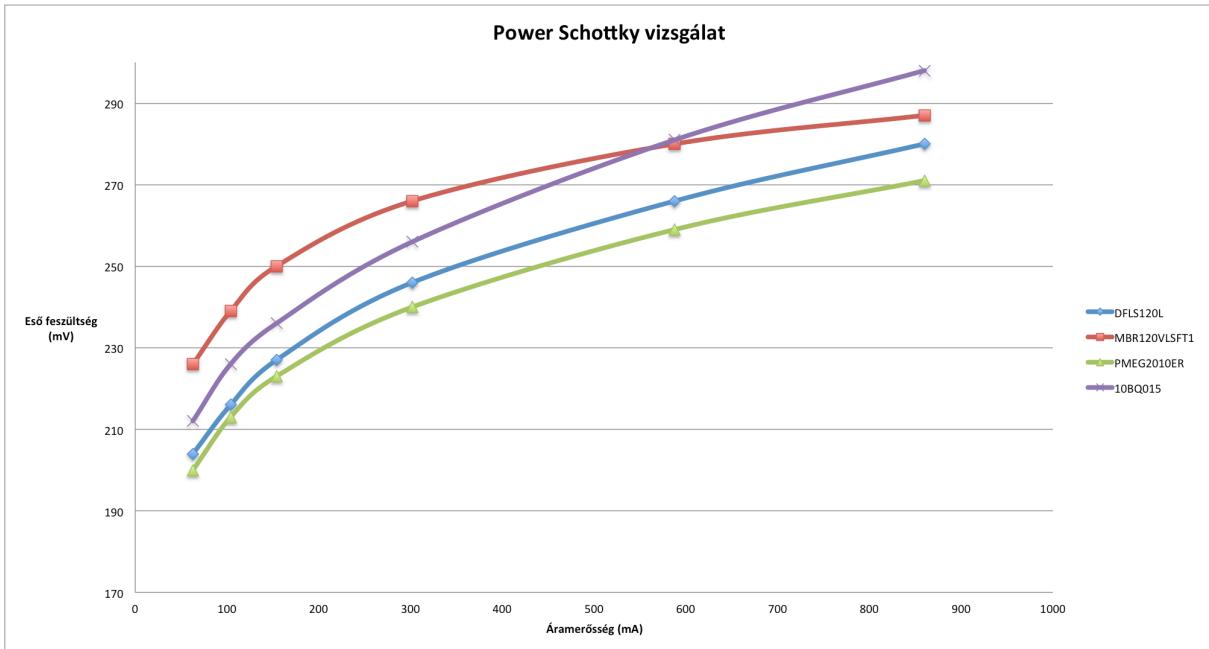
4.3.2 Power Schottky Dióda

A láncok összegzésére használt sorosan beiktatott diódákon a szabályozott buszról felvett összes áram átfolyik, ezért ezen diódák helyes megválasztása kulcsfontosságú és alapos körültekintést igényel. A megfelelő tartalék érdekében ezeknél a diódáknál elvárás az 1 Amper erősségű áram elviselése. A dióda vesztesége arányos a rajta sorosan eső feszültséggel, ezért erre a célra kizárolag a kis veszteségű Schottky diódák alkalmasak.

A fejlesztés során több kísérlet is volt aktív „ideális diódák” alkalmazására a feladat megoldásához, azonban a piacon megtalálható áramkörök nem tűntek a meghibásodás lehetősége miatt alkalmazhatónak, ezért ezeket a fejlesztőcsapat elvetette.

A megfelelő védő dióda kiválasztásánál több lehetséges alkatrészt is teszteltem. A különböző diódákon azonos áramot átfolyatva a diódákon eső feszültség mérésével összehasonlítható a diódák vesztesége.

A tesztek alapján 2 alkatrész megfelelő a feladat megoldására, a DFSL120L és a PMEG2010ER típusú Schottky diódák, ezek közül a kisebb záró irányú szivárgó áram miatt a DFSL120L típust választottam (4.5. ábra).



4.5. ábra: Power Schottky Vizsgálat

4.4 Az SDC alrendszer

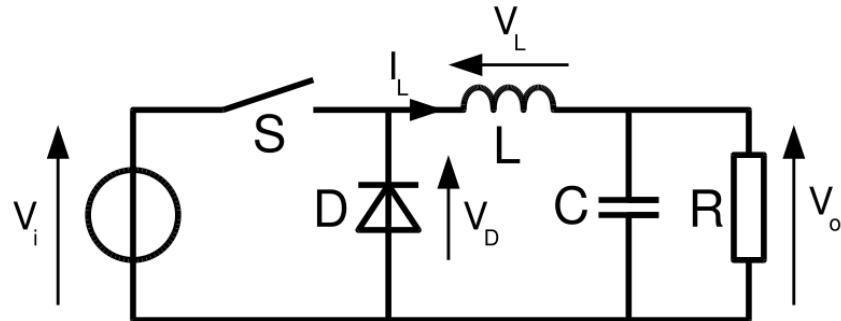
Az EPS bevezetésénél ismertetett paraméterek alapján belátható, hogy a szabályozatlan és a szabályozott energiabusz közé szükséges beiktatni egy tápegységet, amely az elsődleges energiabusz szabályozatlan feszültségét az eszközök táplálásához megfelelően stabilizálja a szabályozott energiabuszon.

Erre a feladatra földfelszíni körülmények között a legegyszerűbb megoldást a széles körben alkalmazott Lineáris Regulátor áramkörök jelentenék (lsl. 78xx termékcsalád), azonban ezek az áramkörök nagyon veszteségesek, mert működési elvükön adódóan az összes többlet energiát eldisszipálják. Ezek a feszültség szabályozók tehát az üreszközöknél nem használhatóak, mert a rendelkezésre álló energia nagyon korlátozott és törekedni kell a lehető legjobb hatásfokú DC-DC konverziókra.

Az SDC (Step Down Converter) avagy másik ismert nevén Buck Converter egy kapcsoló üzemű tápegység, amely működési elve alapján az áramkör elméleti hatásfoka közel 100%. [10]

4.4.1 Az SDC működési elve

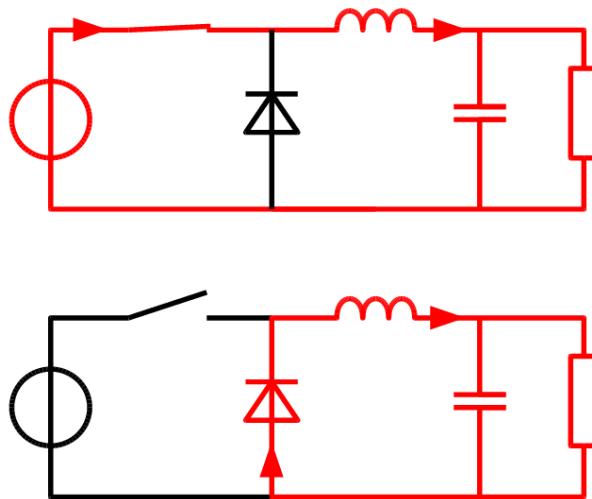
Az alábbi ábrán látható az SDC elméleti alapkapcsolás, amit szokás Buck topológiának is nevezni (4.6. ábra). Az alap áramkör két energiatároló elemből és két kapcsoló elemből felépíthető.



4.6. ábra: A "Buck topológia" felépítése

A Buck átalakító működése a tekercsben tárolt áram szabályozásán alapul, amit két kapcsoló elem, a legalapvetőbb esetben egy tranzisztor és egy dióda segítségével lehet megvalósítani. Ideális alkatrészeket feltételezve a ki és bemeneti feszültség állandó és nincs veszteség sem a diódán sem a tranzisztoron, továbbá a tekercs is tökéletesen tárolja és adja le az energiát. A konverter a nagyobb bemeneti feszültségből egy stabil kimeneti feszültséget állít elő.

A Buck konverter működését két fázisra különíthetjük el, ez a két különböző állapotot látható az alábbi ábrán (4.7. ábra).



4.7. ábra: Az SDC áramkör két működési fázisa

A kezdeti állapotban a tároló elemekben nincsen tárolt energia, az első bekapesolás során a tekercsen keresztül folyó áram elkezd növekedni, a diódán nem folyik áram. Az áram növekedésekor az önindukciós feszültség az áramirányjal ellentétes, az önindukció az áramot fékezi és késleleti annak növekedését és a mágneses tér felépülését. A tekercs feszültsége tehát

kivonódik a forrás feszültségéből, és ez a különbségi feszültség fog jelentkezni a kimenetre kapcsolt fogyasztón.

A tekercs töltődése után már a rajta eső önindukciós feszültség csökken, ezáltal nő a fogyasztón mérhető feszültség. Ha a tekercs töltődése során a kapcsoló segítségével megszüntetjük a forrás felől folyó áramot, akkor a tekercsen átfolyó áram elkezd csökkenni, aminek hatására az eddigivel ellentétes önindukciós feszültség áll elő, a dióda elkezd vezetni. Ekkor elkezdődik a tekercsben eddig felépített mágneses tér leépülése, és a fogyasztó táplálását a tekercs végzi. A kapcsoló zárásával a folyamat előlről kezdődik. A kimeneti feszültség (V_o) adott bemeneti feszültség (V_i) esetén a kapcsolás kitöltési tényezőjével (D) állítható a (4.1) egyenlet alapján. [10]

$$V_o = V_i \frac{t_{be}}{T} = V_i D \quad (4.1)$$

A Buck konverteknek két üzemmódját különböztetjük meg az alapján, hogy a folyamatban a tekercs árama nullára csökken-e (szaggatott üzem, vagy Discontinuous mode), vagy sem (folytonos üzem, vagy Continous mode). [11]

4.4.2 A nem ideális SDC alkatrészek veszteségei

A fizikailag realizálható Buck áramkörök az ideálistól eltérő alkatrészkből épülnek fel, ezért a megépített konvertek hatásfoka sohasem éri el a 100 %-ot, csak jól közelíti azt a helyes alkatrészek megválasztása esetén.

Az elméleti alaptól eltérően a valóságban veszteséggel üzemel a kapcsoló, a dióda és a tekercs sem ideális, valamint minden alkatrészen jelentkezik Ohmikus veszteség.

4.4.3 Megkötések a SMOG-1 SDC áramkörének megtervezése során

A SMOG-1 kisműhold SDC áramkörének tervezése során figyelembe kellett venni néhány egyedi tervezési specifikációt. Az elsődleges tervezési szempont a minél nagyobb hatásfok elérése, hiszen a műhold összes fedélzeti áramköre az SDC egység kimenetére kötött energiabuszról veszi fel a működéshez szükséges energiát, ami egyben azt is jelenti, hogy a felhasznált energia átáramlik az SDC áramkörön.

A műhold méretéből adódóan a megtervezett áramkör méretének minimalizálására kell törekedni, így nem engedhető meg nagy energiatároló alkatrészek használata, amelyek a vibrációs terhelésekkel adódóan egyébként is veszélyt jelentenek a megbízhatóság szempontjából.

Az elsődleges energiabusz feszültsége tág határok között változhat az akkumulátor töltöttségtől függően. Az áramkört úgy kell megtervezni, hogy az akkumulátor a lehető legnagyobb tartományban kihasználható legyen, azaz mindenkor lemerült állapotban (2,4 V)

mind a feltöltött állapotban (4,2 V) megoldható legyen az eszközök üzemeltetése. A szabályozott buszra kapcsolt áramkörök nem kapcsolhatóak 3,6 V DC feszültségnél nagyobb tápfeszültségre, ezért a szabályozott energiabusz maximális feszültségét az SDC áramkörnek 3,3 V körüli DC feszültségre kell leszabályoznia a működés során, ugyanakkor az eszközök még megfelelően működnek a lemerült akkumulátor 2,4 V körüli feszültségéről is, ezért célszerűen ha az akkumulátor merülése miatt a szabályozásra nincs szükség, akkor a tápegység egy áthidalást képez a szabályozatlan és a szabályozott energiabusz között, ami lényegében egy 100 %-os kitöltési tényezőjű működésnek fogható fel.

A műholdba tervezett berendezések fogyasztásáról még jelenleg csak előzetes becslések vannak, de az SDC áramkörnek vákuumban üzemi szinten jó hatásfokkal kell üzemelnie akár 400-450 mA folyamatos fogyasztóoldali áramfelvétel esetén is. A buck áramkörök hatásfoka jellemzően romlik a fogyasztó oldalon felvett áram csökkenésével, ami a SMOG-1 esetén ugyancsak egy kritikus kérdés, hiszen a fedélzetre tervezett kis fogyasztású eszközök üzemelése során felléphet akár 40 mA értéknél kisebb terhelő áramerősség is, ezáltal az áramkörnek tág terhelési tartományok között kell a lehető legjobb hatásfokkal működnie.

4.4.4 A feladathoz kiválasztott integrált áramkörök

Az SDC áramkörök működéséhez szükséges kapcsoló funkció ellátására sok félvezetőgyártó kínál integrált áramköri megoldásokat, azonban ezek az integrált áramköri kapcsolások jellemzően csak nagyobb áramfelvétel (1-2 A) esetén működnek jó hatásfokkal, ezért a SMOG-1 esetén a legtöbb ilyen chip nem jöhettet szóba.

A piacon minden össze páros olyan integrált áramköri SDC kapcsoló megoldás található, amely hatásosan működik kis fogyasztóoldali áramfelvétel esetén is. Ilyen áramkörök a Linear Technologies LTC1622-es típusú integrált áramköre, valamint a Texas Instruments által gyártott TPS6420x chipek.

Az LTC1622-es áramkörrel megépített kapcsolás, bár a kezdetben bíztató eredményeket produkált, a fejlesztés során nem hozta az elvárt eredményeket. A kis áramoknál elérhető maximálisan 80% körüli hatásfok, valamint a szükséges diszkrét alkatrészek száma és nagy mérete miatt a Texas Instruments integrált áramkörei tüntek optimálisabb választásnak a feladat kivitelezése során, ezért a következőkben csak a fejlesztés ezen sikerágát ismertetem.

A Texas Instruments TPS6420x jelzésű kontrollerei jó megoldásnak tüntek a kapcsoló vezérlésének megvalósításához, ezek a kontrollerek nagy hatásfokú megoldást kínálnak széles áramfelvételi viszonyok között is.

4.4.4.1 TPS64200

A tervezendő SDC áramkör esetén a bemeneten előforduló legnagyobb DC feszültséghez (~4,2 V) a kimeneten megkövetelt feszültség (3,3 V) közel áll, ezért érdemes „minimum off-time”, azaz minimális kikapcsolási időre optimalizált vezérlő áramkört választani (1. táblázat).

INPUT TO OUTPUT VOLTAGE RATIO	SWITCHING FREQUENCY DETERMINED BY	PROPOSED DEVICE FOR HIGH SWITCHING FREQUENCY	PROPOSED DEVICE FOR LOW SWITCHING FREQUENCY
$V_I \gg V_O$ (e.g. $V_I = 5\text{ V}$ $V_O = 1.5\text{ V}$)	Minimum on-time	TPS64203	TPS64200, TPS64201
$V_I \approx V_O$ (e.g. $V_I = 3.8\text{ V}$ $V_O = 3.3\text{ V}$)	Minimum off-time	TPS64202	TPS64200, TPS64201

1.táblázat: A TPS6420x áramkörök optimalizáltsága kapcsolódó alapján

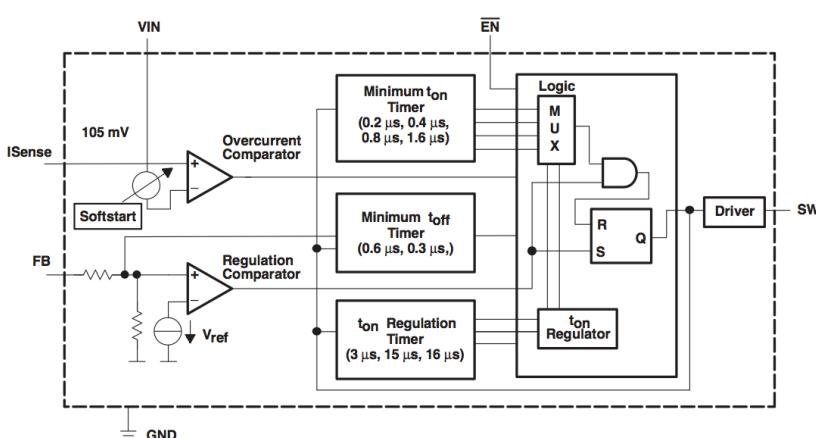
A TPS6420x áramkörök további fontos paraméterei olvashatók a 2. táblázatban.

	TPS64200	TPS64201	TPS64202	TPS64203
V_{in} (Min) (V)	1.8	1.8	1.8	1.8
V_{in} (Max) (V)	6.5	6.5	6.5	6.5
V_{out} (Min) (V)	1.2	1.2	1.2	1.2
V_{out} (Max) (V)	6.5	6.5	6.5	6.5
I_{out} (Max) (A)	3	3	3	3
Switching Frequency (Min) (kHz)	350	450	550	800
Switching Frequency (Max) (kHz)	350	450	550	800
I_q (Typ) (mA)	0.02	0.02	0.02	0.02
Duty Cycle (Max) (%)	100	100	100	100
Regulated Outputs (#)	1	1	1	1

2.táblázat: A TPS6420x áramkörök működési paraméterei

A választás a TPS64200-as áramkörre esett, mivel a kontrollercsaládból ennek a típusnak a legkisebb a kapcsoló frekvenciája (350 kHz). Az előző fejezetekben ismertetett tulajdonságok alapján a kapcsoló frekvenciával arányos az áramkör vesztesége, aminek a minimalizálása a kitűzött feladatok közé tartozik.

A TPS64200 funkcionális blokkdiagramja látható az alábbi ábrán (4.8. ábra).



4.8. ábra: A TPS64200 funkcionális blokkdiagramja

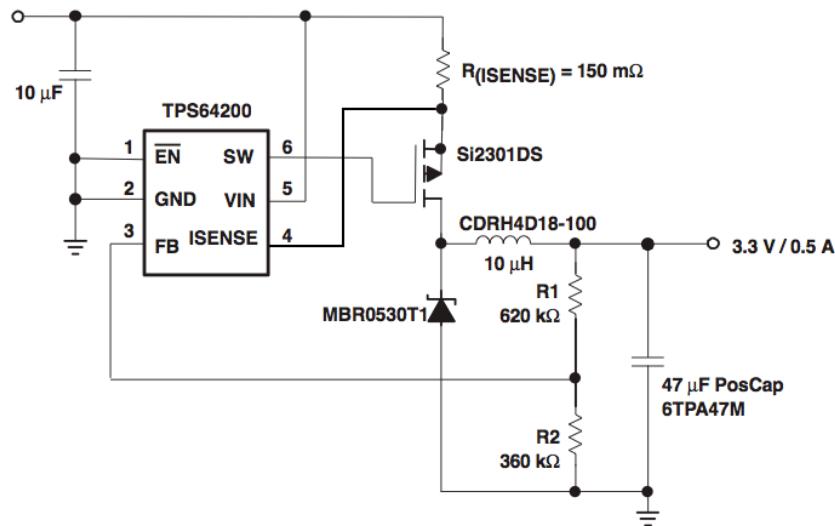
Az áramkör működése során az SW (Switch) kimenetére küldött jelekkel vezérli egy külső P csatornás MOSFET gate elektródáját úgy, hogy a FB (FeedBack) bemenetén mérhető feszültség lehetőleg nulla legyen. Ekkor helyesen szabályozott a kimenet, és a beállított értéknek megfelelő feszültségszinten tartja az áramkör a kimenetet.

4.4.5 A feladathoz szükséges diszkrét áramkori elemek kiválasztása

Az SDC egység megtervezése során a TPS64200 chipre építkeztem, ez az áramkör csak a kapcsolójel impulzus szélesség modulációját (PWM – Pulse-Width Modulation) vezérli, a buck topológia felépítéséhez további diszkrét áramkori alkatrészek szükségesek.

A tápegység megépítése során egy „nulladik” verzió került megépítésre Texas Instruments javaslatai alapján[12], majd ez az áramkör lett áttervezve a továbbiakban úgy, hogy az átépített verziók minden elvárásnak megfeleljenek a műhold fedélzetén, ugyanakkor lehetőleg ne legyen hatásfok szempontjából jelentős negatív irányú eltérésük.

A megépített nulladik verziójú SDC áramkör kapcsolási rajza látható az alábbi ábrán (4.9. ábra).



4.9. ábra: A prototípus áramkör kapcsolási rajza

A buck topológiában nem szerepel az $R_{(Isense)}$ ellenállás, amelyet a vezérlő a túláram érzékelésére használ, az áramkör bemeneti $10 \mu F$ kapacitású puffer kondenzátora, valamint a kimeneti feszültséget meghatározó visszacsatoló ág feszültségesosztó ellenállásai (R_1, R_2).

A feszültségesosztóhoz szükséges ellenállás értékek kiszámolhatóak a (4.2.) egyenlet alapján, a vezérlő belső feszültség referenciája (V_{fb}) 1213 mV .

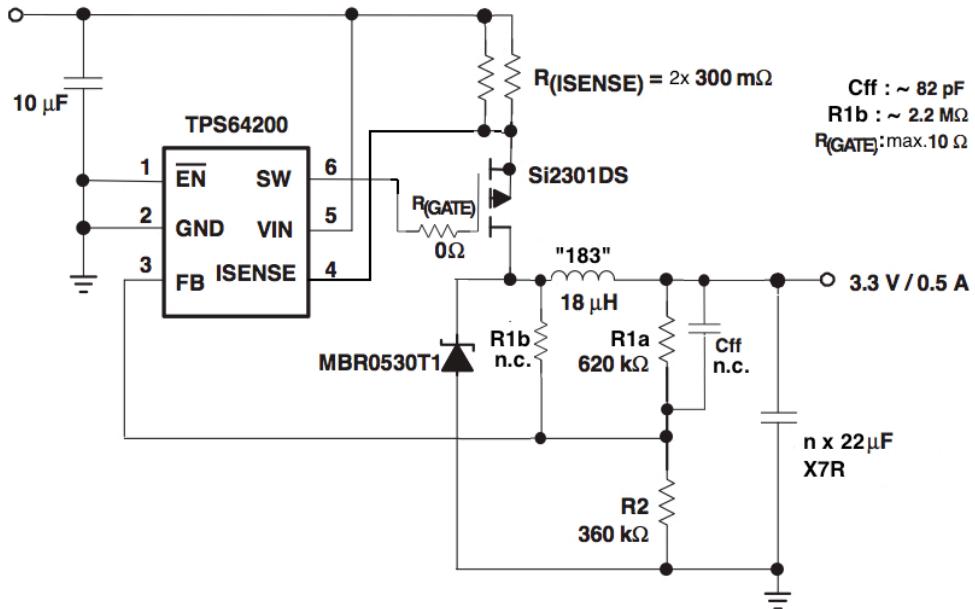
$$V_o = V_{fb} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.2.)$$

A R1 értékét az előbbi szempontok figyelembe vételével $620\text{ k}\Omega$, az R2 értékét $360\text{ k}\Omega$ értékűnek választottam a kapcsolás megépítése során. Az itt elfolytatott vezérlőáram ($\sim 4\text{ }\mu\text{A}$) nem jelent nagy veszteséget, de a stabilitás szempontjából megfelelő.

Ezen a verzióon több átalakítást is kellett végezni, hogy akár az ūben is használható legyen, például a kimeneti elektrolit kondenzátor az ūben nem használható, ezért azt le kellett cserálni.

A TPS64200 használható a kimenetén elhelyezett kerámia kondenzátorokkal is, viszont az áramkör csak megfelelően kis ESR (Equivalent Series Resistance) értékkel rendelkező kondenzátorokkal működik megfelelően[12], ezért jó minőségű X7R dielektrikummal ellátott kondenzátorokkal építettem meg a kapcsolás első, akár ūben is alkalmazható verzióját.

Az második összeállítás kapcsolási rajza látható az alábbi ábrán (4.10. ábra). Látható, hogy a kapcsolásban helyet foglal még további 3 alkatrész, amelyek beültetése nem szükséges, de a későbbi beültetés lehetőségét meghagytam a hordozótervezés során is.



4.10. ábra: A következő SDC verzió kapcsolási rajza

Ezek az alkatrészek a Cff kondenzátor és az $R_{(\text{Gate})}$ valamint R1b jelzésű ellenállások. Az $R_{(\text{Gate})}$ helyére beültethető max. $10\text{ }\Omega$ értékű ellenállással a kapcsoló FET tranzisztoreiből származó zavarokat lehet csökkenteni, azonban beépítése hatásfok veszteséggel jár. Ha a kapcsolási tranziszterek bármelyik eszközön kártékony hatással jelentkeznek később az ellenállás elhelyezhető. Az R1b és Cff alkatrészek beültetésére a kimeneti elektrolit kondenzátor kerámiakondenzátorral való helyettesítése miatt lehet szükség, ha az áramkör visszacsatlása a mérések alapján nem megfelelően stabil. A Cff kondenzátor felgyorsítja a visszacsatoló ágat, az R1b ellenállás pedig még a tekercs előtti jelből ad hozzá visszacsatolást az eredeti visszacsatoló ághoz.[12] Ezeket az

alkatrészeket nem ültettem be az átalakított kapcsolásba, de a későbbi beültetésre lehetőséget hagytam a megtervezett hordozókon elhelyezett footprintjeik által.

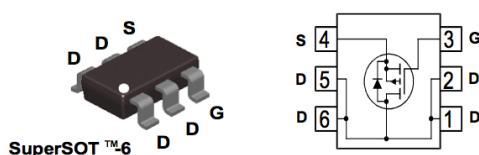
Ezzel a felépítéssel sikerült elérni a 97 %-os konverziós hatásfokot stabil működés mellett. Az elkészült áramkör tervet használtam fel a következő verzió alapjául, amelyben célom a veszteségek és a méret további minimalizálása és a megbízhatóság növelése.

4.4.6 SDC V3.0

A TPS64200 vezérlő működése során úgy méri az átfolyó áramerősséget, hogy a kapcsoló FET bekapcsolása után párszor 10 ns elteltével mintavételezi a Vin és Isense bemenetek között mérhető feszültséget.[12] Ez lehetőséget ad az áramkör átalakítására úgy, hogy az eddig használt árammérő ellenállások helyett a kapcsoló FET csatorna ellenállását használja a PWM kontroller az áram mérésére. Ezzel az átalakítással kiiktatható a mérő ellenállások által okozott soros veszteség, valamint további méretesökkenés érhető el. A kapcsoló MOSFET csatorna ellenállása mindenkorban jelen van az áramkörben, de így ez az ellenállás a túláram érzékelésére hasznosan felhasználható.

A MOSFET csatorna ellenállása függ a Gate-Source feszültségétől, ezáltal változik a különböző szabályozatlan buszfeszültségeknek megfelelően és így pontos áramkorlátozásra nem alkalmas. Ezt a feladatot azonban az SDC előre kapcsolt limiter kapcsoló (LSW/B) ellátja, így ha a kapcsoló FET legrosszabb helyzetben mérhető (maximális) csatornaellenállása nagyobb áramerősség esetén jelent korlátozást, akkor ez az elrendezés előnyösen használható, és továbbra is használatban marad a PWM kontroller minden funkciója.

A Fairchild FDC642P_F085 típusú Power MOSFET ideális kapcsolóelem lehet erre a feladatra, hiszen maximális csatorna ellenállása legrosszabb esetben, is kisebb, mint $100\text{ m}\Omega$, amely 900 mA áramkorlátozást jelent az SDC működését tekintve (4.11. ábra). A TPS64200 túláram védelme így használható a zárlati áramok esetén az alkatrészek védelmére. A LSW/T kapcsolóba nem került beépítésre túláram védelem, mivel az SDC áramkör a visszacsatoló feszültség rendellenes (0 V-hoz közel) értéke esetén automatikusan korlátozza az áramot. Az FDC642P_F085 teljes gate töltése tipikusan 6,9 nC, amely egy megfelelően alacsony érték a jó átalakítási hatásfok érdekében.



4.11. ábra: Az FDC642P_F085 kapcsoló MOSFET

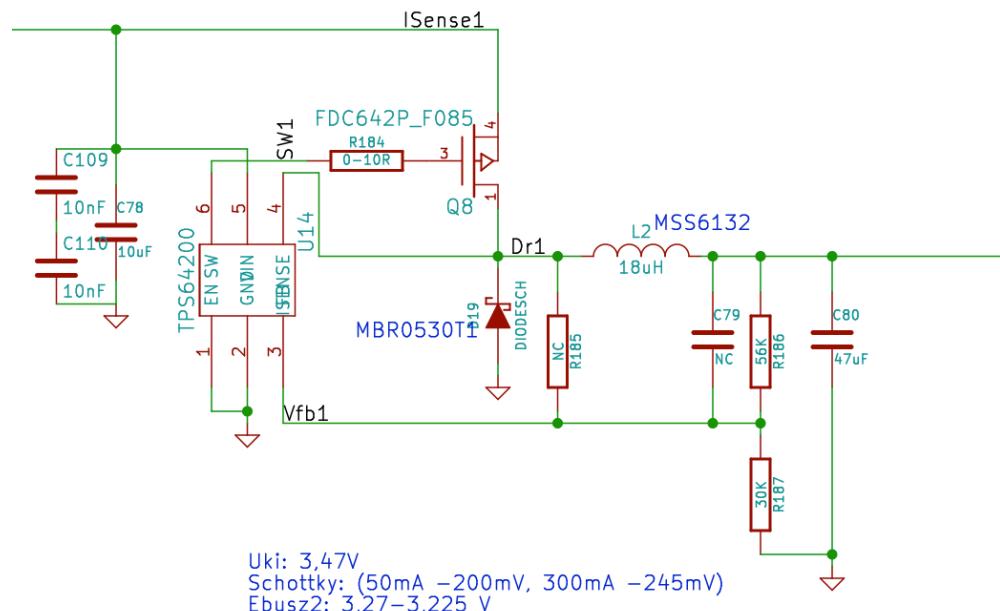
Az első verzióhoz képest a visszacsatoló ág áttervezésre került. Az áramkör nagyobb feszültséget kell előállítson a védő Schottky diódán eső feszültség miatt, valamint javasolt az eddigi verziókhöz képest nagyobb vezérlőáram elfolytatása a visszacsatoló ágon a stabilabb működés miatt. Az új kiválasztott értékek: $R_1 = 56 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$. Így a szabályozott kimenet feszültsége 3,47 V, amely a védő Schottky dióda után 3,27 és 3,225 V közötti szabályozott buszfeszültséget jelent az áramfelvételtől függően.

A nagy áramerősségek elviselése érdekében a kiválasztott ferritmagos teljesítmény induktivitás a Coilcraft MSS6132-183ML (4.12. ábra). Ez az induktivitás viszonylag kis méretű (6,1x6,1x3,2 mm) kis tömegű (~0,35 g) soros ellenállása maximum 118 mΩ, 10%-os szaturációs árama 1,08 A. Felszíni körülmények között a mag 1,55 A RMS áramerősség hatására melegszik fel 25 °C-ról 45 °C-ra.

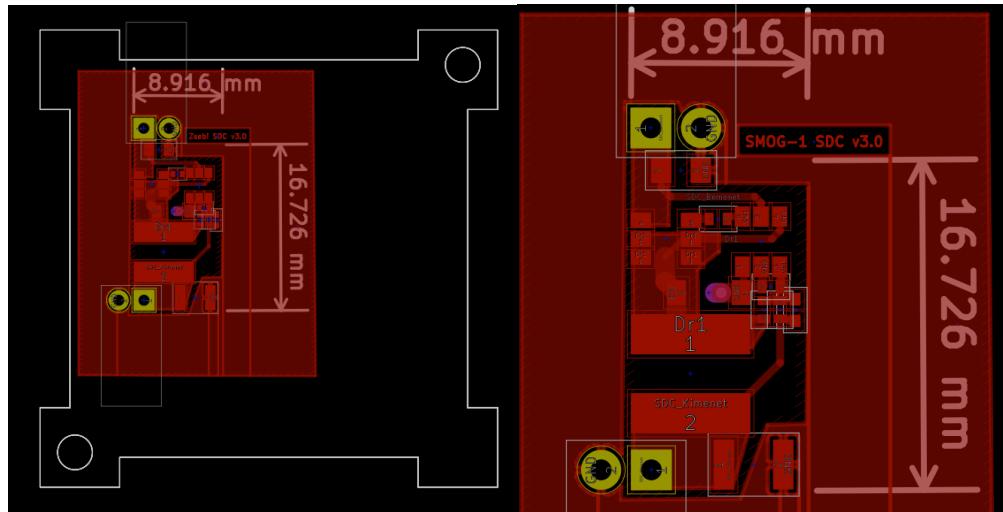


4.12. ábra: Az MSS6132 Induktivitások

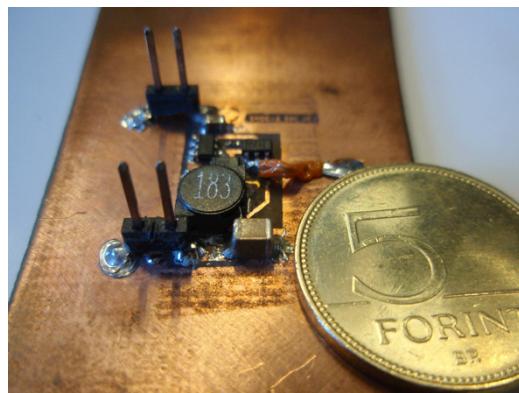
Az így újratervezett SDC minden összes hordozó felületet foglal el (4.14. ábra), robusztusabb, és a konverziós hatásfok is jelentősen megnövekedett az előző verziókhöz képest.



4.13. ábra: Az SDC 3.0 kapcsolási rajza

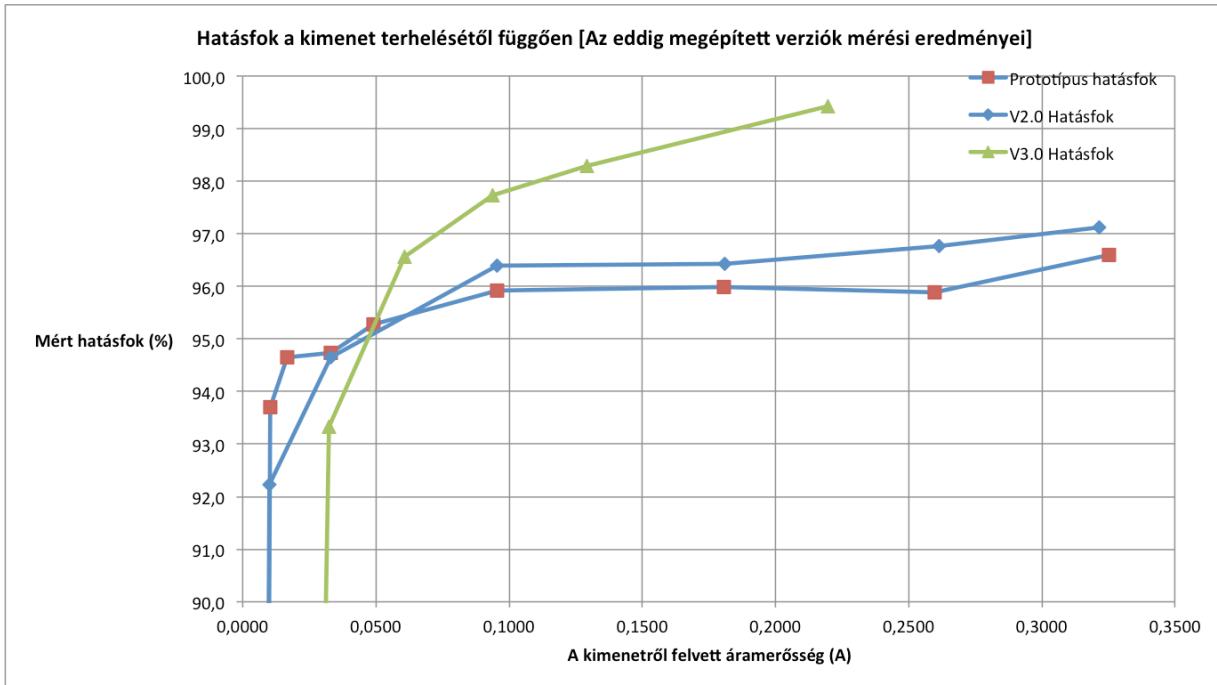


4.14. ábra: Az SDC 3.0 hordozóterve



4.15. ábra: Az elkészült SDC áramkör

Az elkészült SCD áramköröket a Műterhelő RC hálózattal(6.1) teszteltem (4.15. ábra). A mérések során megvizsgáltam a helyes működést és az elérte konverziós hatásfokot. A 3.0 verzióval az átlagos mérési eredmények alapján az áttervezés sikeres volt, a tervezett áramfelvétel tartományban az áramkör 95 és 99,4 % közötti konverziós hatásfokkal üzemel (4.16. ábra).



4.16. ábra: Az SDC áramkörök hatásfokának mérési eredményei

4.5 Árammérő híd

Az EPS rendszerben a fontos feszültség- és áram értékeket a PCU alrendszer monitorozza és továbbítja telemetriaként az OBC számára. A feszültségek a PCU mikrokontrollerekkel közvetlenül digitalizálhatóak, míg a szükséges áramok mérése sönt ellenállásokon ejtett feszültség alapján kivitelezhető egyszerűen. A sönt ellenállások beiktatása soros veszteséget jelent, ezért célszerű minél kisebb ellenállás használata. A kis ellenállás azonban azt jelenti, hogy a rajta adott áramerősség által keltett feszültségek különbség is kicsi, a digitalizálás előtt további erősítésre szorul.

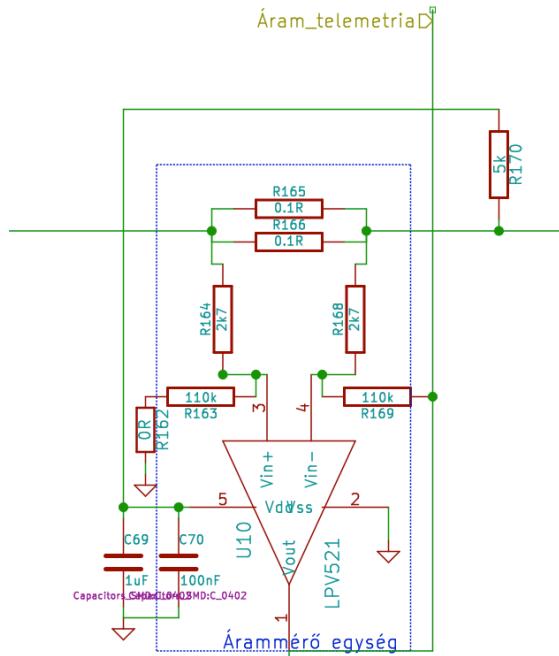
A piacon több integrált áramkör is található, amelyeket minimális számú diszkrét alkatrésszel kiegészítve könnyedén megvalósítható az árammérés. Ilyen áramkörök az oldallapokon is használt INA214, vagy az INA216.

Az INA214 minimális működési feszültsége 2,7 V, ami az oldallapokon nem jelent problémát, viszont kizárá ok az energiaellátó rendszer további területein, amelyeknek akár 1,8 V-os feszültség esetén is működnie kell üzemszerűen.

Az INA216 áramkör 1,8 V és 5,5 V feszültségszintek között működőképes, amely már alkalmASNak bizonyult az árammérő funkció megvalósításához, azonban ennek az áramkörnek nincs külön Vdd bemenete, hanem a működéshez szükséges energiát a mérendő tápvonalról nyeri (In+ pin). A későbbi tesztek során előjött az a probléma, hogy a chip nem izolálható megfelelően a mérendő tápvonaltól, és mivel nem biztosítható, hogy az integrált áramkör nem hibásodik meg oly

módon, hogy a mérő bemenete zárlatossá válik, ezért ez az áramkör sem használható a fedélzeti árammérésre. A tesztek során az áramkör IN+ és a tápvonal közé elhelyezett 2 k Ω nagyságú izoláló ellenállás esetén sem működött megfelelően.

Mivel hosszas kutatómunka után sem találtam az árammérés egyszerű megvalósításához megfelelő integrált áramkört, ezért szükségessé vált egy árammérő híd megépítése diszkrét alkatrészek és műveleti erősítő segítségével (4.17. ábra).



4.17. ábra: Az árammérő híd kapcsolása

Az áramméréshez a WSLP0603 sorozat árammérő 100 m Ω -os ellenállásait választottam ki. Ezek precíziós 1 % tűrésű árammérő ellenállások, amelyek szabvány 0603-as méretűek, azonban maximálisan akár 400 mW disszipálódó teljesítményt is elviselnek. A két párhuzamosan kapcsolt mérő ellenálláson a disszipálódó teljesítmény eloszlik, a kapcsolásban használt söt ellenállás így összesen 50 m Ω .

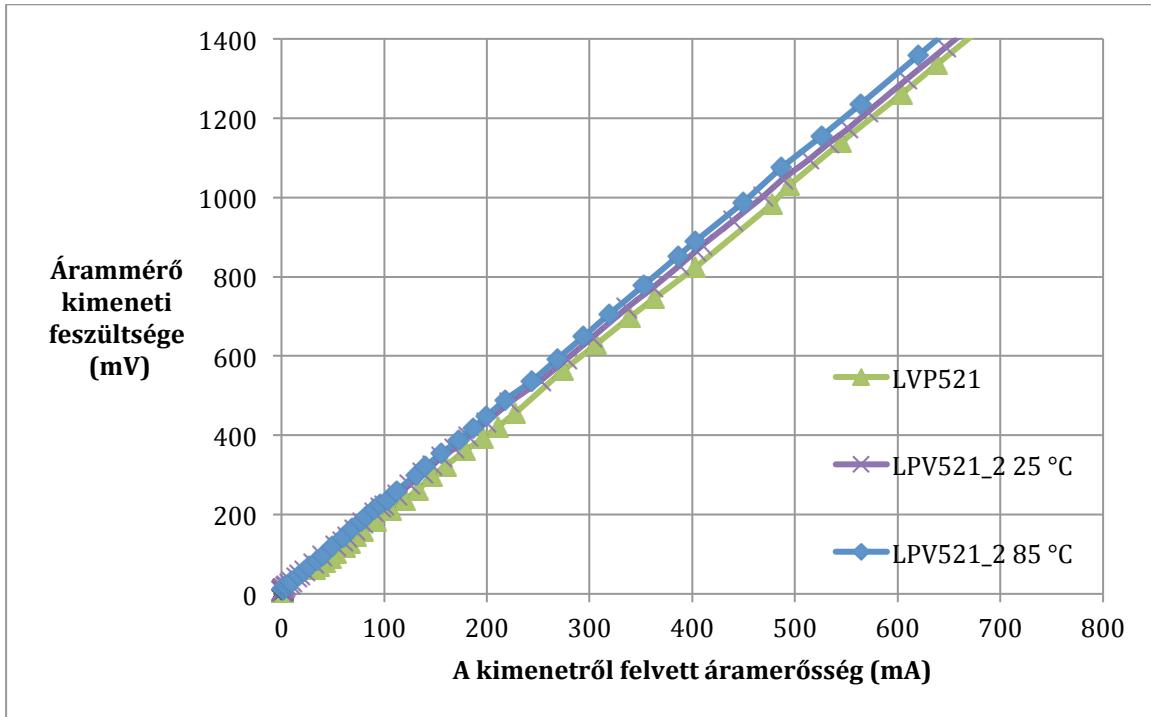
A híd felépítéséhez kiválasztott műveleti erősítő az LPV 521, amely 1,8 V-os tápfeszültségről is működőképes, de 5 V toleráns, kis (SC-70) tokozású és fogyasztása elhanyagolható. Az áramkör jól kompenzálja a bemeneten fellépő közös módusú feszültségeket, ezért ideális a fenti kapcsolás megvalósítására.[13]

A felépített mérőhíd nagy előnye a fix erősítésű integrált árammérőkkal szemben, hogy erősítése a passzív elemek segítségével szabadon állítható a (4.3) képlet szerint. A megtervezett kapcsolásban a referencia feszültség (V_{REF}) 0 V.

$$V_{out} = (R_S I) \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + V_{REF} \quad (4.3)$$

Így az adott áramerősség által keltett feszültség a mérőhíd kimenetén szabadon állítható, amely nagy segítséget jelent a limiter kapcsolók különböző áramkorlátainak beállításakor.

A mérési eredmények igazolták a helyes működést, szélsőséges hőmérsékleti viszonyok között sem mér jelentős eltéréssel az áramkör (4.18. ábra).

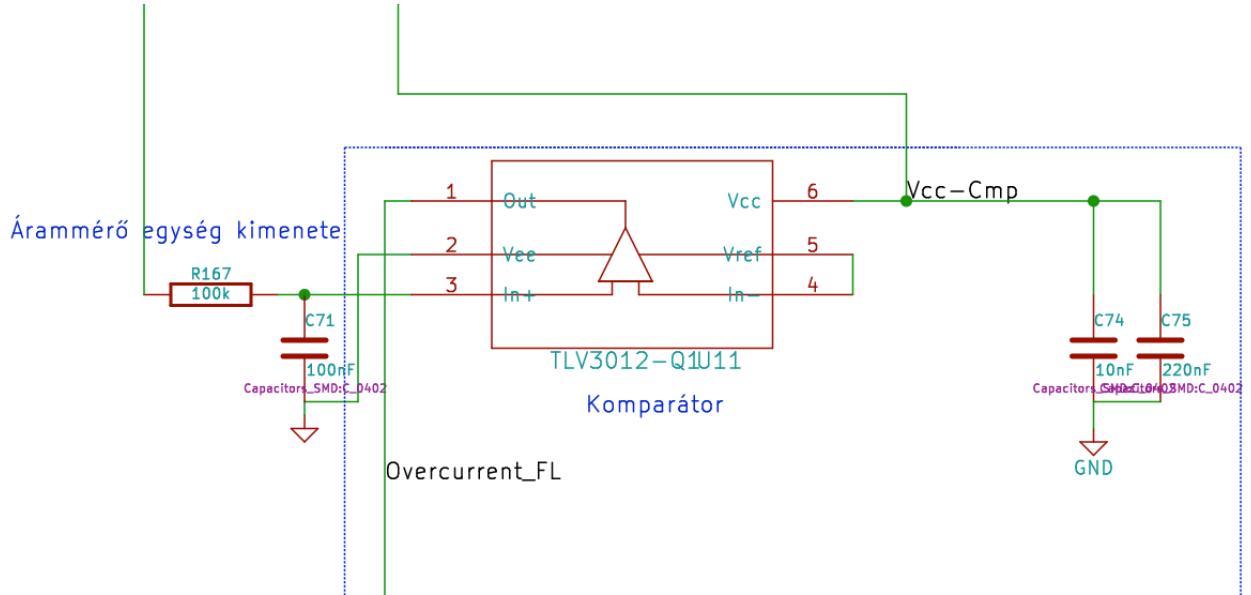


4.18. ábra: Az árammérő híd kimenete különböző hőmérsékletek és felépítések esetén

4.6 Limiter Kapcsoló (LSW/B)

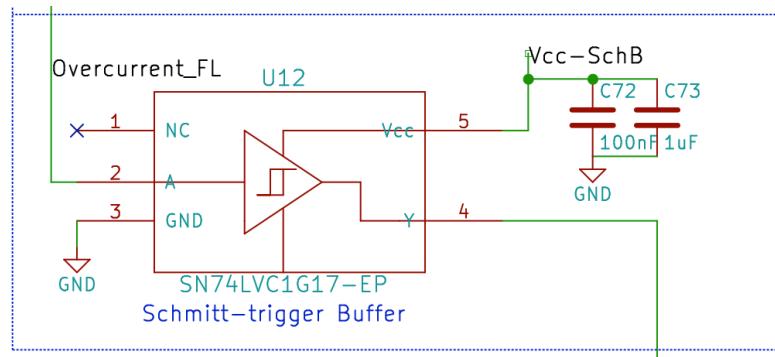
A limiter kapcsoló elsődleges funkciója az aktív túláram védelem megvalósítása, a zárlatok izolációja és az átfolyó áram mérése. Emellett a visszakapcsolhatóság, és a túláram jelzése is követelmény. A védelem aktív áramköreinek a szabályozatlan energiabusz nagy feszültségeit is el kell tűrnie, így ennek az áramkörnek is követelménye az 5 V tolerancia.

A kapcsoló az előzőekben bemutatott árammérő híddal kezdődik, ez az egység az átfolyó árammal arányos feszültséget hoz létre a kimenetén, amely digitalizálható a PCU segítségével. Ezt a kimenetet egy RC tag követi, amelynek az időállandója segítségével beállítható a védelem időzítése. Egy komparátor bemenete van az RC tag kimenetére kapcsolva, amely egy integrált 1,242 V-os feszültség referenciával hasonlítja össze a mérőhíd kimenétét. Amennyiben a kimeneten elhelyezett kondenzátor feszültsége a túláramból kifolyólag eléri az áramkör referencia feszültségét a komparátor a kimenetén jelzi a túláramot (OverCurrent Flag) (4.19. ábra).



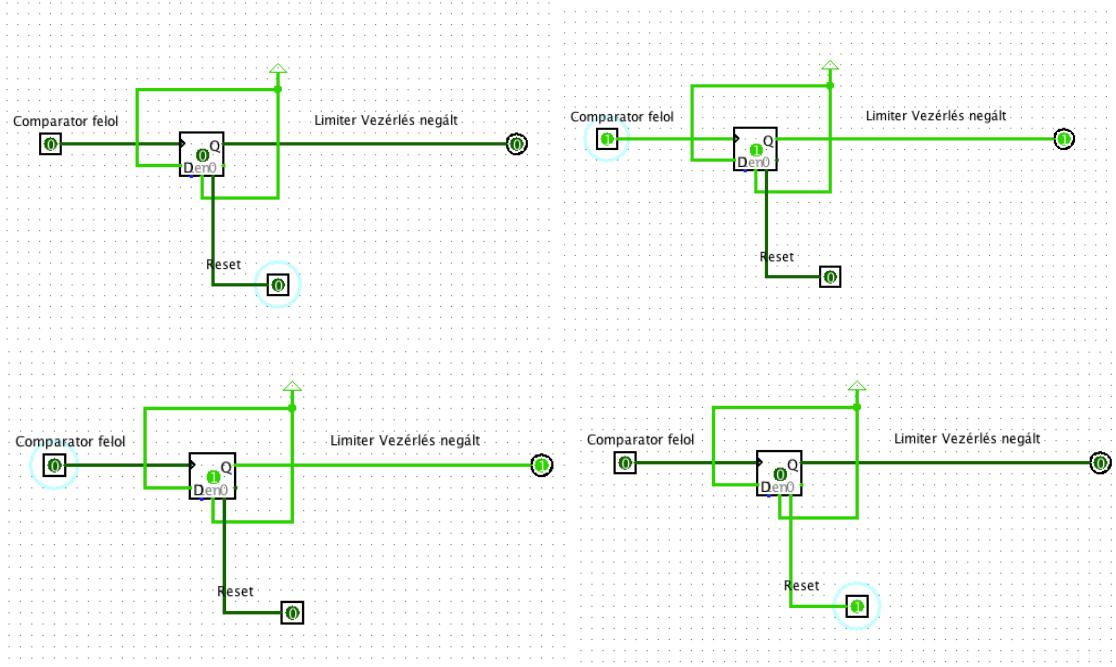
4.19. ábra: Az LSW/B kapcsoló komparátor egysége

A limiter digitális vezérlőegységét egy D tároló segítségével valósítottam meg, amely a CLK bemenetén észleli a komparátor túláram jelzését. A mérési eredmények kimutatták, hogy a komparátor által előidézett túláram jel felfutó él meredeksége nem elegendő, hogy a kiválasztott D flipflop követelményeit teljesítse, ezért a jelútba egy Schmitt-trigger Buffer áramkört iktattam be (4.20. ábra).

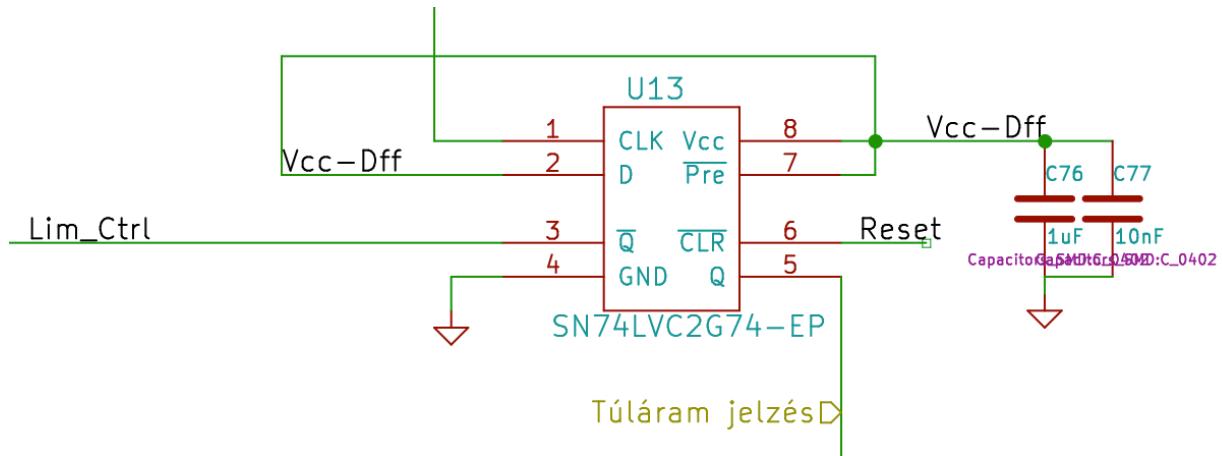


4.20. ábra: A jelútba beiktatott Schmitt-trigger Buffer

A vezérlés kialakítása a Logisim nevű szoftver segítségével történt (4.21. ábra). A D tároló D, és Preset negált, bemenetét tápfeszültségre kapcsolva, a CLK bemeneten fellépő OverCurrent Flag-re a flipflop kimenetet vált, és a kapcsoló reseteléséig szétkapcsolt állapotban tartja a limitert. A Q negált kimenettel vezérelhető a kapcsoló, a Q kimenet pedig a túláram digitális jelzésére alkalmas (4.22. ábra).



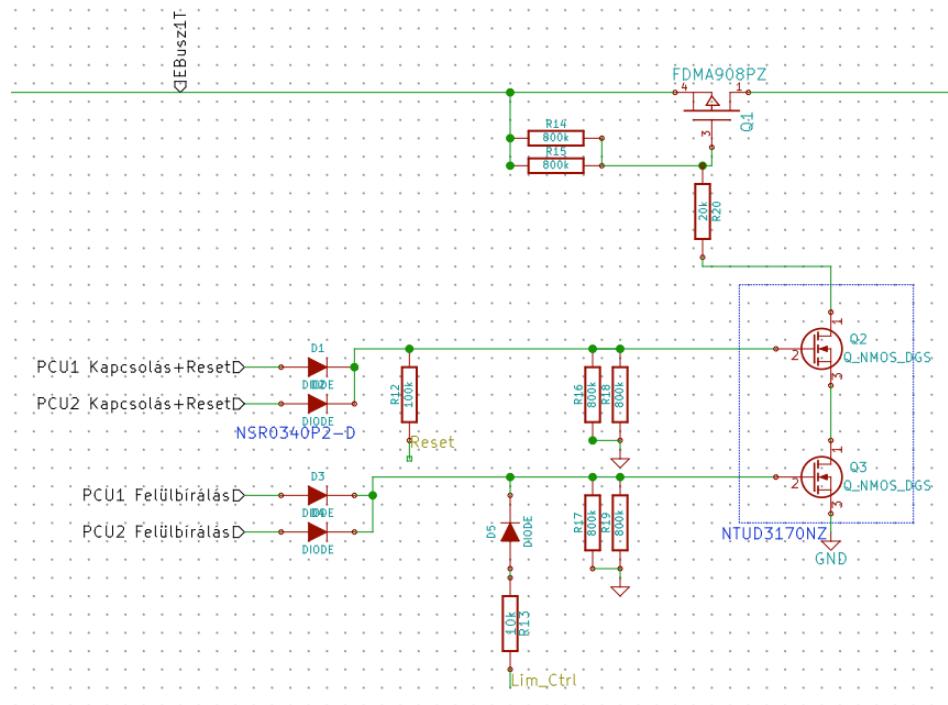
4.21. ábra: A Logisim szoftver segítségével kialakított digitális vezérlés állapotai



4.22. ábra: Az LSW/B kapcsoló vezérlő egysége

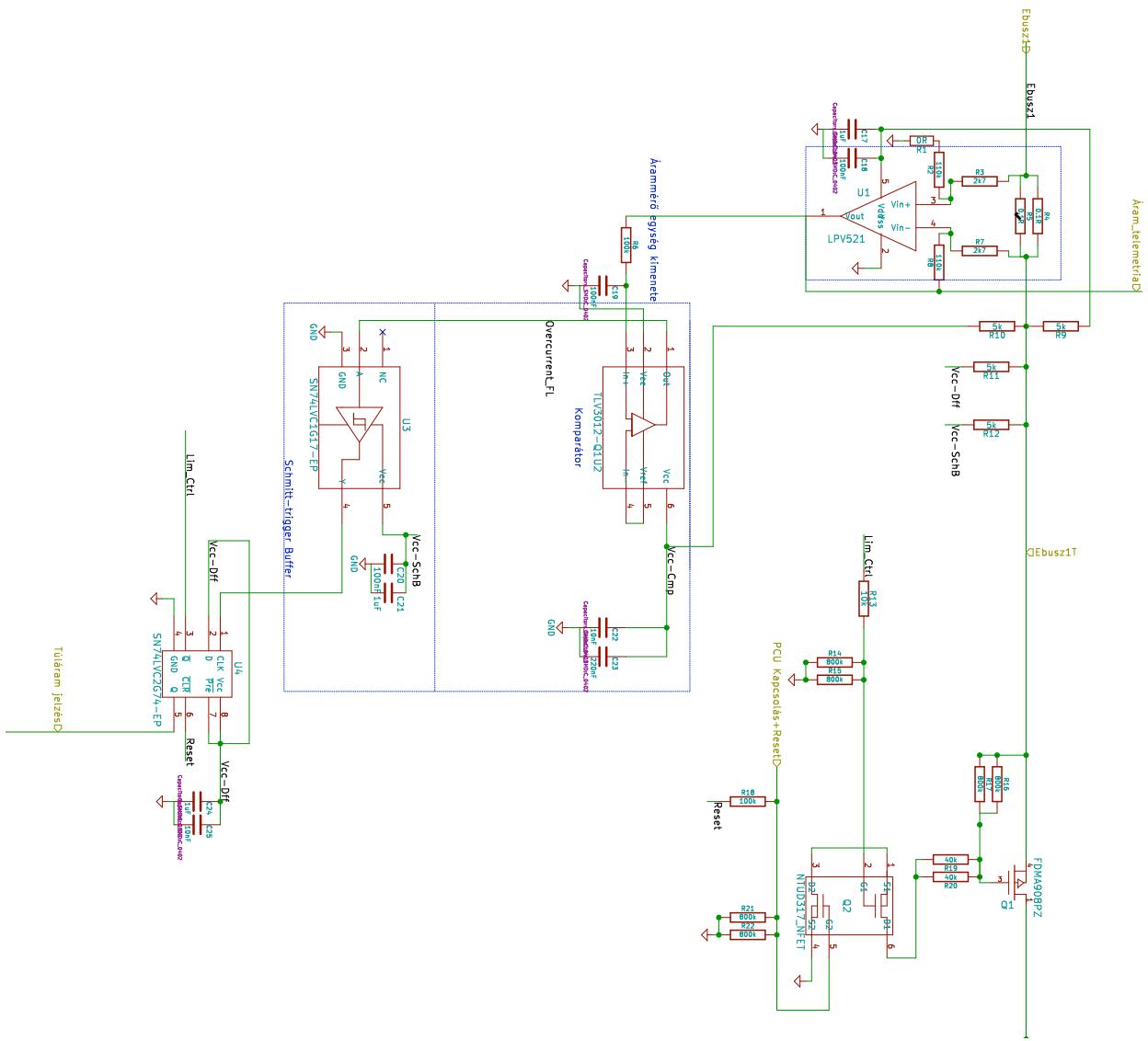
A D flipflop egy kis (maximum 28 mΩ) csatorna ellenállású FDMA908PZ típusú P csatornás Power MOSFET kapcsolását végzi egy közbeiktatott NTUD3170NZ típusú N csatornás vezérlő MOSFET segítségével.

A Power MOSFET vezérlése úgy lett kialakítva, hogy a vezérlő PCU meghibásodás esetén felül tudja bírni a védelmi áramköröket. A D flipflop resetelése a PCU vezérlésével együtt történik, így biztosítható az egyértelmű bekapsolási állapot, valamint a vezérlő áramköröknek is csak minimális számú csatornáját szükséges felhasználni a limiter kapcsoló vezérléséhez, hiszen a vezérlőjel kikapsolásával a tároló is resetelődik (4.23. ábra).

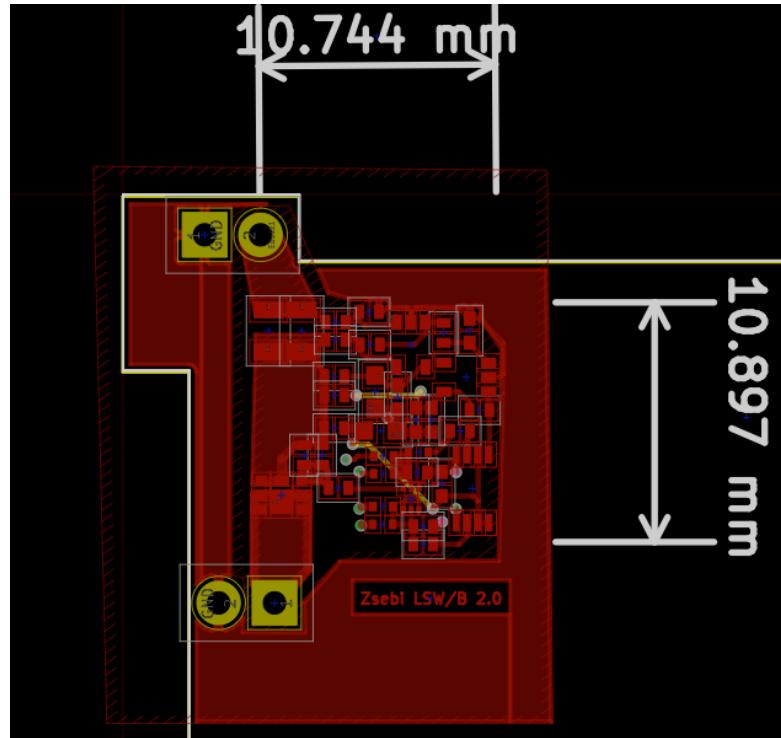


4.23. ábra: Az LSW/B kapcsoló vezérléstechnikája

A LSW/B kapcsoló aktuális verziójának kapcsolási rajza (4.24. ábra), és a legfrissebb hordozó terv (4.25. ábra) látható az alábbi ábrákon, az áramkör minden összes 1 cm² hordozófelületet foglal el.



4.24. ábra: Az LSW/B kapcsoló kapcsolási rajza



4.25. ábra: A kapcsoló aktív verziójának elkészült hordozóterve

A limiter kapcsolók helyes működését oszcilloszkópos mérésekkel alaposan megvizsgáltam. A teszt kapcsolásban a késleltető tag $R = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$ értékei mellett vizsgáltam az áramkör vezérlő jelfolyamatát és a szétkapcsolás sebességét. Az alábbi ábrán látható a legfrissebb LSW/B áramkör kapcsolási folyamata egy zárlat esetén (4.26. ábra). A sárga jel az áramkör kimenetén mérhető tápfeszültség, a zöld az árammérő kimeneti feszültsége (áramerősség), a kék a komparátor kimenet, a lila a vezérlő D flipflop CLK bemenete. A késleltetés eltelte után (kb. 10 ms ezzel az RC taggal) a komparátor átvált és a limiter szétkapcsol kb. 2 ms alatt. A mérési eredmények alapján az áramkör tökéletesen működik, és minden követelményt kielégít.



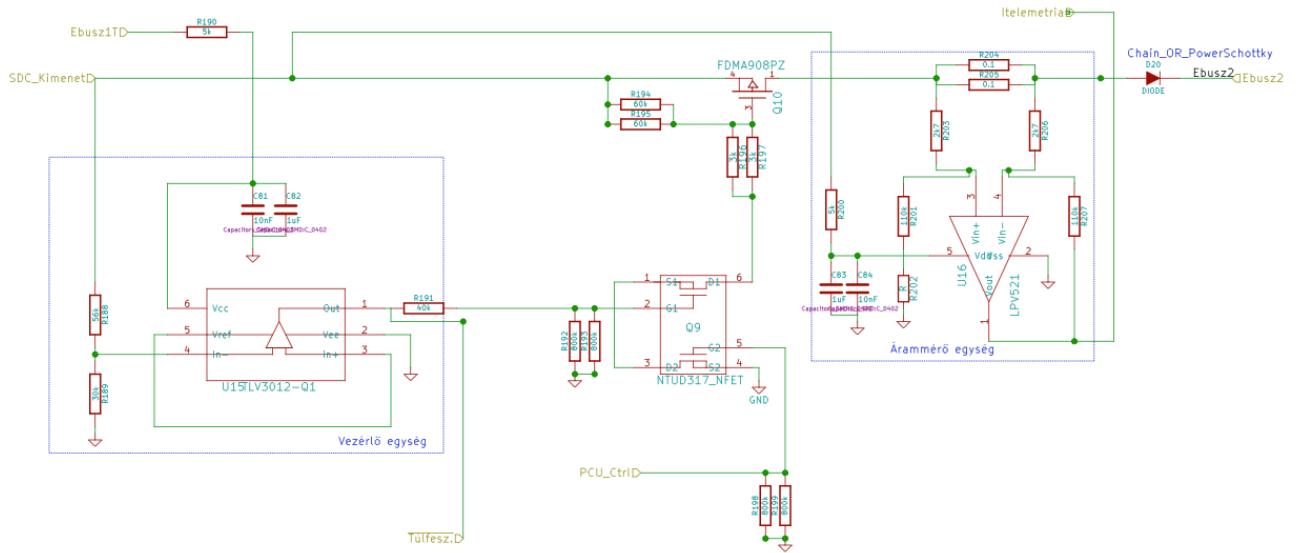
4.26. ábra: A LSW/B kapcsoló áramkör vezérlő jelfolyama oszcilloszkópon

4.7 Limiter Kapcsoló (LSW/T)

Az LSW/T jelzésű limiter kapcsoló az EPS rendszer túlfeszültség védelmét látja el elsődleges feladatként. Ezek a kapcsolók folyamatosan felügyelik az SDC áramkörök működését. A kapcsoló szétkapcsol, amennyiben a szabályozott buszfeszültség a megengedett maximális értékét eléri, és jelzi a meghibásodást.

A túlfeszültség védelmi kapcsoló vezérlését egy komparátor végzi, amely a bemenetére kapcsolt feszültség leosztott értékét hasonlítja össze az integrált feszültség referenciájával.

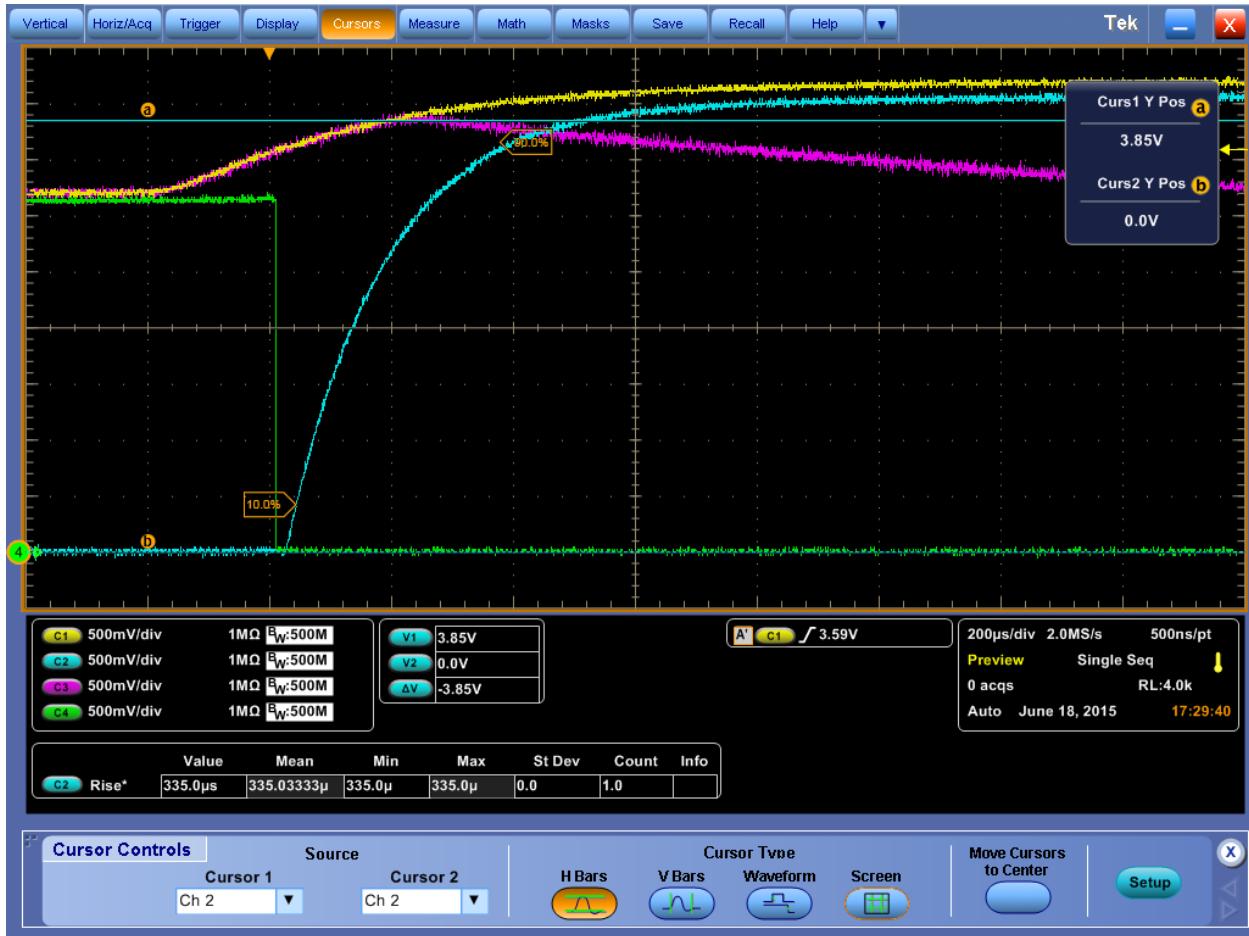
Ez a vezérlő egység egy, az ismertetett FDMA908PZ típusú Power MOSFET vezérlését végzi az LSW/B kapcsolóhoz hasonló módon (4.27. ábra).



4.27. ábra: A LSW/T áramkör kapcsolási rajza

A kapcsoló tartalmaz a kimenetén egy árammérő hidat, amely a védő Schottky dióda előtt méri a lánc kimenetéről felvett áramerősséget. A lánc elején és végén elhelyezett mérőhidak segítségével az SDC konverziós hatásfokának mérésére adódik lehetőség, és mérjük az aktív védelmi áramkörök fogyasztását is.

Az LSW/T kapcsolónak kritikus paramétere a kapcsolási sebesség. Úgy kell megépíteni az áramkört, hogy a lehető legrövidebb idő alatt szétkapcsoljon rendellenes túlfeszültség esetén. A kapcsolási sebességet mérési eredményeim alapján a kialakításban a kapcsoló power MOSFET gate kapacitásának feltöltése korlátozta a legjobban. A felhúzó ellenállások csökkentésével kisebb kapcsolási sebesség érhető el, viszont az egység fogyasztása megnő. A túlfeszültség korlát a feszültségesztő értékeivel szabadon állítható, ezt a szükséges tartalék ráhagyásával 3,56 V értékűnek választottam meg. A fejlesztés során oszcilloszkóp segítségével vizsgáltam meg az áramkör működését (4.28. ábra).



4.28. ábra: Az LSW/T kapcsoló vizsgálata oszcilloszkóppal

A mérési eredményen a műterhelő hálózat bemenetére kapcsolt túlfeszültség (sárga jel) és a kimenetre kapcsolt fogyasztón megjelenő feszültség (lila jel) látható 10 mA nagyságú áramfelvétel esetén. A maximális kimeneti feszültség 3,85 V, amelyből az összegző Schottky dióda után a szabályozott buszra 3,6 V amplitúdójú maximális feszültségimpulzus kerül. Mint látható a túlfeszültség korlát elérése után a komparátor kimenete (zöld jel) kb. 10 μs után állapotot vált, és elkezdődik a power MOSFET gate elektródájának feltöltése (kék jel), amely a kapcsolási idő jelentős részét kiteszi. A túlfeszültség impulzus időtartama kb. 400 μs, ezt a szabályozott energiabusz puffer kondenzátorai megfelelően elsimítják.

A mérési eredmények alapján a tervezett kapcsoló az elvárásoknak megfelelően működik, az áramkör mindössze kb. 1,5 cm² hordozófelületet foglal el (4.29. ábra).



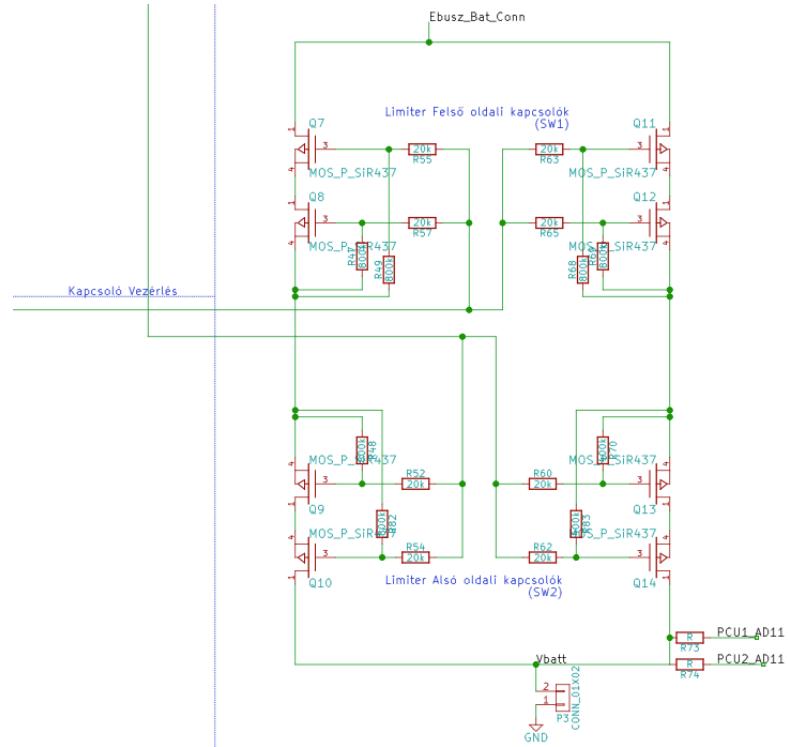
4.29. ábra: Az LSW/T áramkör hordozóterve

4.8 Akkumulátor védelmi kapcsoló (LSW/A)

Az akkumulátor a műhold elsődleges energia tároló egysége, amelynek védelmére különösen nagy figyelmet kell fordítani. Gondoskodni kell az esetleges belső rövidzárási állapot, vagy egyéb monitorozott rendellenes viselkedés esetén az elsődleges energiabuszról történő leválasztásról. Az akkumulátor eltávolítása esetén a műhold még működőképes marad, mert a pálya megvilágított oldalán az elsődleges energiabusz táplálását a napelem oldali áramkörök továbbra is ellátják.

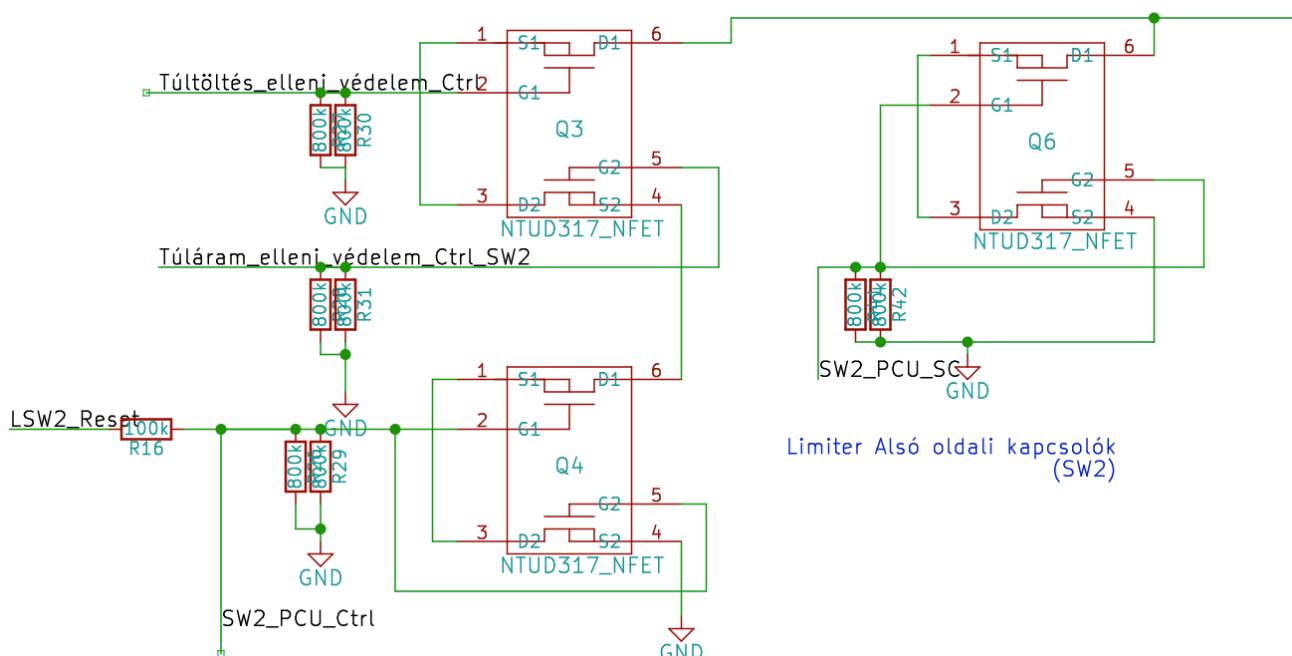
Az LSW/A kapcsoló a műhold legbonyolultabb kapcsolója, az LSW/B és LSW/T kapcsolóknál ismertetett kapcsolások részeiből épül fel további kiegészítésekkel. A kapcsoló automatikusan leválasztja az akkumulátort ha a töltő, vagy merítő áram rendellenes értéket vesz fel, továbbá leválasztja a töltő ágat, ha az akkumulátor teljesen fel van töltve, és lekapcsolja a merítő ágat, ha túlságosan le van merülve. Ezáltal védjük az akkumulátort a túltöltés és túlmerítés, valamint a túláramok ellen.

A kapcsoló vezérlését 2 vezérlőkörre bontottam, az egyik vezérlőkör engedélyezi az akkumulátor töltését, a másik a merítést. A redundancia érdekében 2 teljesen független töltésre és merítésre is alkalmas kapcsolóágat alakítottam ki, 4 darab egymással szembe fordított p csatornás MOSFET segítségével (4.30. ábra). Így bármelyik tranzisztor rövidzárása vagy szakadása esetén is biztosított a kapcsoló helyes működése, vezérlőjel nélkül egyik irányba sem tud folyni az áram.



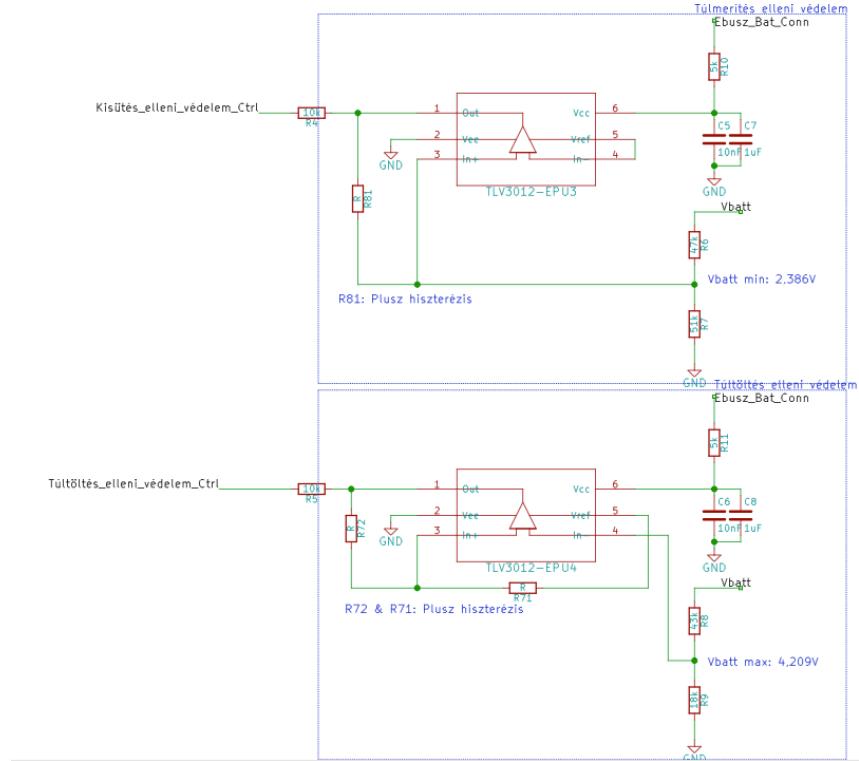
4.30. ábra: Az LSW/A kapcsoló teljesítmény tranzisztorainak bekötése

Az LSW/A kapcsolót vezérlő áramkörkhöz egyenként tartozik egy n csatornás vezérlő FET, amelyeket sorba kapcsolva megvalósítható a helyes működéshez szükséges huzalozott „és” kapcsolat, amely vezérli a kapcsolóág tranzisztorait (4.31. ábra). Az akkumulátor töltése például csak akkor lehetséges, ha a PCU megadja az engedélyező jelet, és emellett sem a túltöltés elleni védelem sem a túláram védelem nem ad hibajelet, azaz az összes n csatornás vezérlő FET vezet.



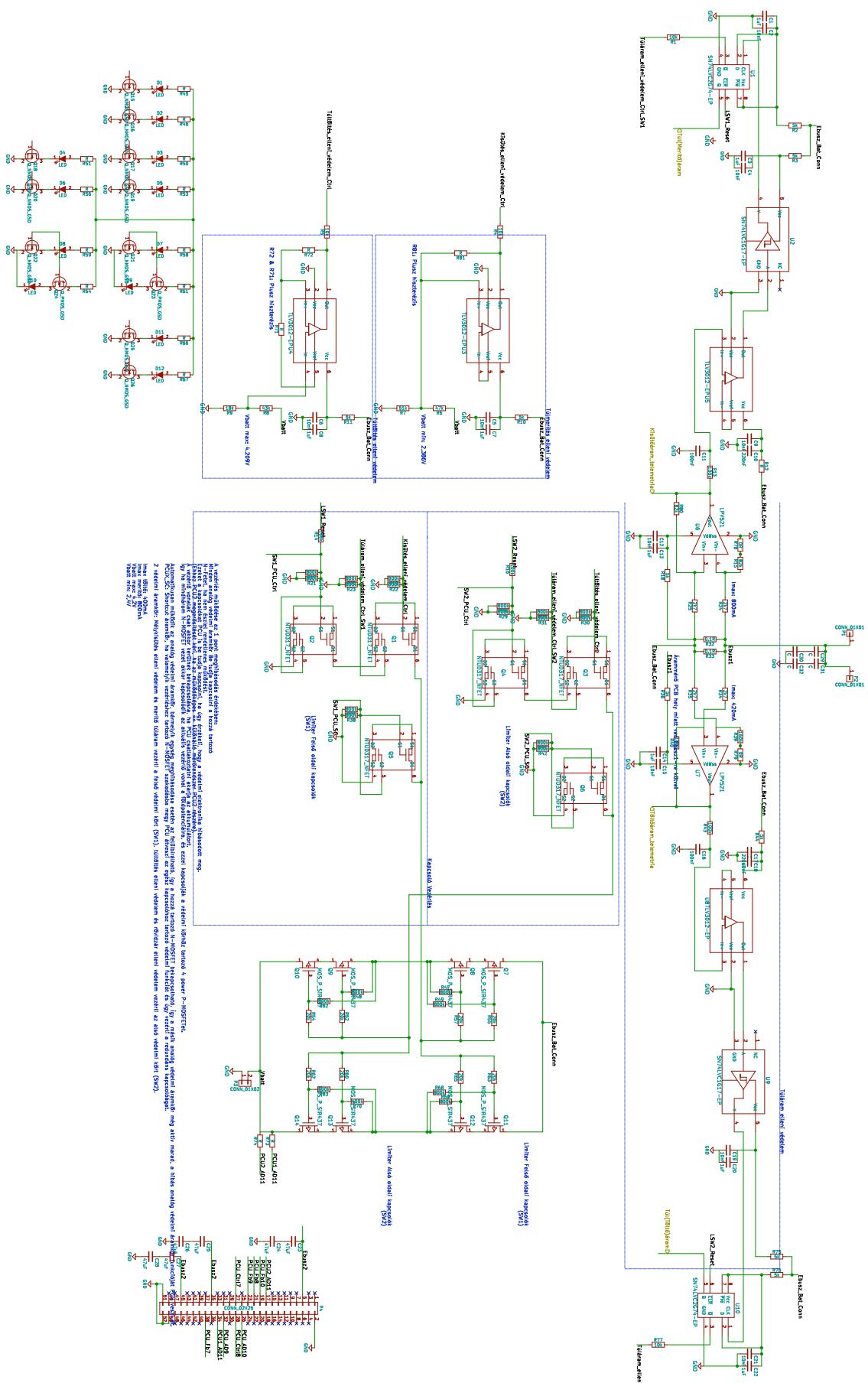
4.31. ábra: Az egyik vezérlőkör tranzisztorainak kapcsolása

A vezérlést az LSW/B és LSW/T áramkörökönél ismertetett modulok végzik, azzal a különbséggel, hogy a túltöltés- és mélykisütés elleni védelem komparátorai a megfelelő hiszterézissel lettek ellátva a stabil működés érdekében (4.32. ábra). Az akkumulátor merítése 2,4 V feszültség alatt nincs engedélyezve, 2,6 V feletti feszültségre töltve meríthető ismét. A töltés 4,2 V feszültség fölött nincs engedélyezve, az akkumulátor 4 V feszültség alatt tölthető ismételten.



4.32. ábra: A kapcsolót vezérlő komparátor áramkörök kapcsolásai

Az áram korlátozás az LSW/B kapcsolónál ismertetett módon működik, azonban a két irányú korlátozás érdekében az árammérők bekötése fordított. Így épül fel az LSW/A áramkör teljes kapcsolási rajza (4.33. ábra). A kapcsoló prototípusa elkészült, a mérési eredmények visszaigazolták a helyes működést. Az egység hordozójának tervezéséről külön alfejezetben számolok be (4.10.2).



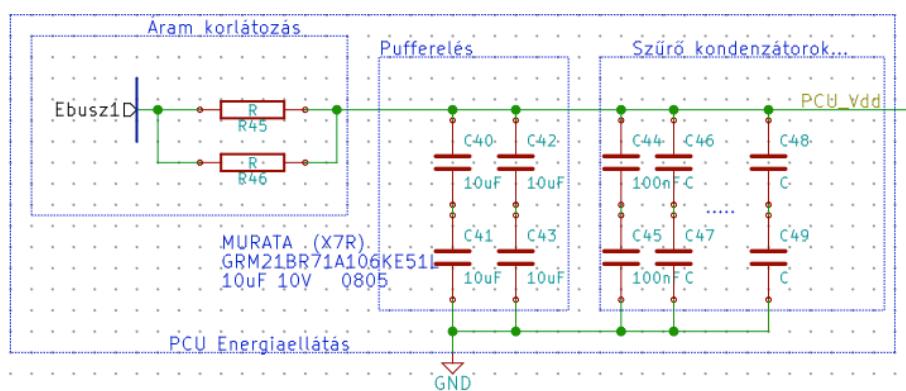
4.9 Az EPS vezérlése: A Power Control Unit

Ebben a fejezetben mutatom be a megtervezett PCU (Power Control Unit) áramkör felépítését amely egy kis fogyasztású mikrokontrollerekből redundánsan egy pont meghibásodásra tervezett alrendszer. A PCU feladata, hogy vezérlege és felügyelje az EPS működését, izolálja a hibás alrendszereket és biztosítsa a zavartalan energiaellátást.

4.9.1 A Vezérlőrendszer energiaellátása

A PCU mikrokontrollerek meleg tartalékolt (Hot Redundancy) módon üzemelnek, ami azt jelenti, hogy folyamatosan felügyelik az EPS, és egymás helyes működését. Hierarchia alapján a PCU1 egység vezérli meghibásodásáig autonóm módon az EPS rendszert, azonban a PCU2 számára teljesen függetlenül kialakított mérőrendszerből kikérheti a mért értékeket logikai döntések meghozatalához.

A kis fogyasztású mikrokontrollerek és a Hot Redundancy indokolja azt a lehetőséget, hogy a vezérlő áramkörököt minden össze egy RC tag segítségével kapcsoljuk a szabályozatlan energiabuszra. A PCU előre kapcsolt aktív védelem használata esetén további intelligens döntőegységek beépítésére volna szükség, amely fölöslegesen rontaná a rendszer megbízhatóságát. A PCU áramkörök számára méretezett energiaellátó kapcsolás látható az alábbi ábrán (4.34. ábra).

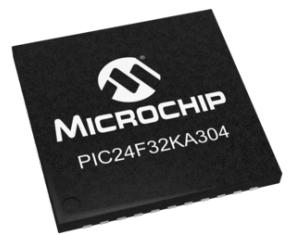


4.34. ábra: A PCU áramkörök energiaellátása

Mindkét mikrovezérlő áramkör áramát 2db párhuzamosan kapcsolt sönt ellenállással korlátozzuk, zárat esetén csak minimális áram folyik el az energiabuszról, és a tartalék áramkör átveszi az irányítást. Az ellenállások méretezése a vezérlők által maximálisan felvett üzemszerű áramerősség alapján történik. A párhuzamosan kapcsolt ellenállások közül egynek is elegendően kicsinek kell lennie ahhoz, hogy a maximális áram felvétele esetén is tudjon üzemelni a PCU áramkör.

4.9.2 Vezérlőrendszer (PCU)

A PCU alrendszer megépítéséhez a Microchip PIC24FV32KA304 típusú mikrokontrollerét vettet alapul (4.35. ábra). Ez a vezérlő kifejezetten kis fogyasztású akkumulátorról történő üzemre lett kifejlesztve, 2,0 és 5,5 V között működőképes, a vezérlőmag energiaellátása beépített lineáris regulátor segítségével történik, így jól illeszthető a szabályozatlan energiabuszra.[14] A chip UQFN48 tokozású, amely kis mérete (6x6x1 mm) előnyös az elhelyezés során. 16 csatorna áll rendelkezésre az analóg feszültségek digitalizálásához, a feldolgozott mérési adatokat a PCU egy OneWire kommunikációs porton továbbítja az OBC számára.



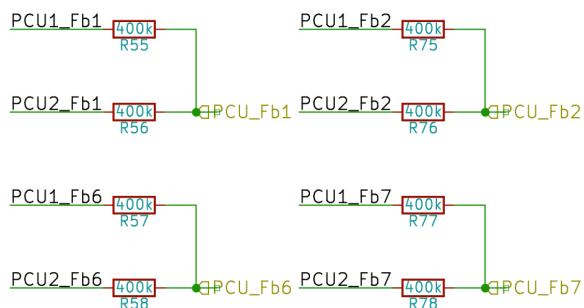
4.35. ábra: A kiválasztott mikrokontroller

A következő alfejezetekben azokat a kapcsolásokat mutatom be, amelyeket a mikrokontrollerekhez terveztem a PCU teljes felépítéséhez.

4.9.2.1 I/O Vezérlés

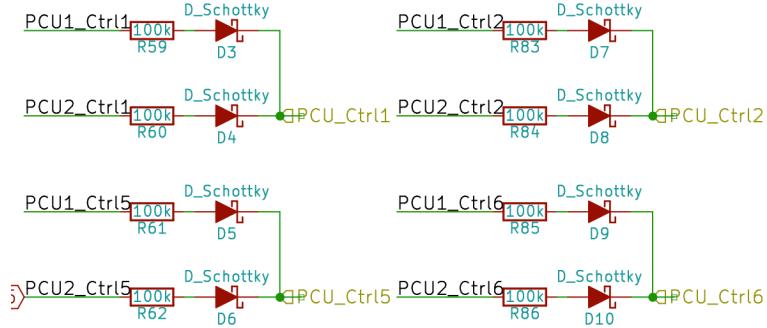
A digitális visszajelző jelek érzékelését és a vezérlő jelek előállítását a mikrokontroller I/O portjai segítségével lehet kivitelezni.

A EPS digitális visszajelző vonalait nagy soros ellenállásokkal lehet a mikrokontrollerekre vezetni, így ha valamely kontroller bemenete tápf- vagy földzárlatos lesz a másik PCU segítségével korrekten lehet érzékelni a visszajelző vonal jelzését (4.36. ábra). Ilyen vonalak például a túláram vagy túlfeszültség hibajelek.



4.36. ábra: Soros ellenállásokkal megvédett visszajelző vonalak

A vezérlő feszültségek összegzéséhez kis méretű NSR0340P2 típusú Schottky diódákat használtam, a kontrollerekből kifolyó vezérlőáram erősséget soros ellenállásokkal korlátoztam. Ha valamelyik vezérlő kimenete földzárlatos lesz a redundáns kontroller képes a vezérlő vonal meghajtására (4.37. ábra).



4.37. ábra: A vezérlő kimenetek összegzése Schottky diódák segítségével

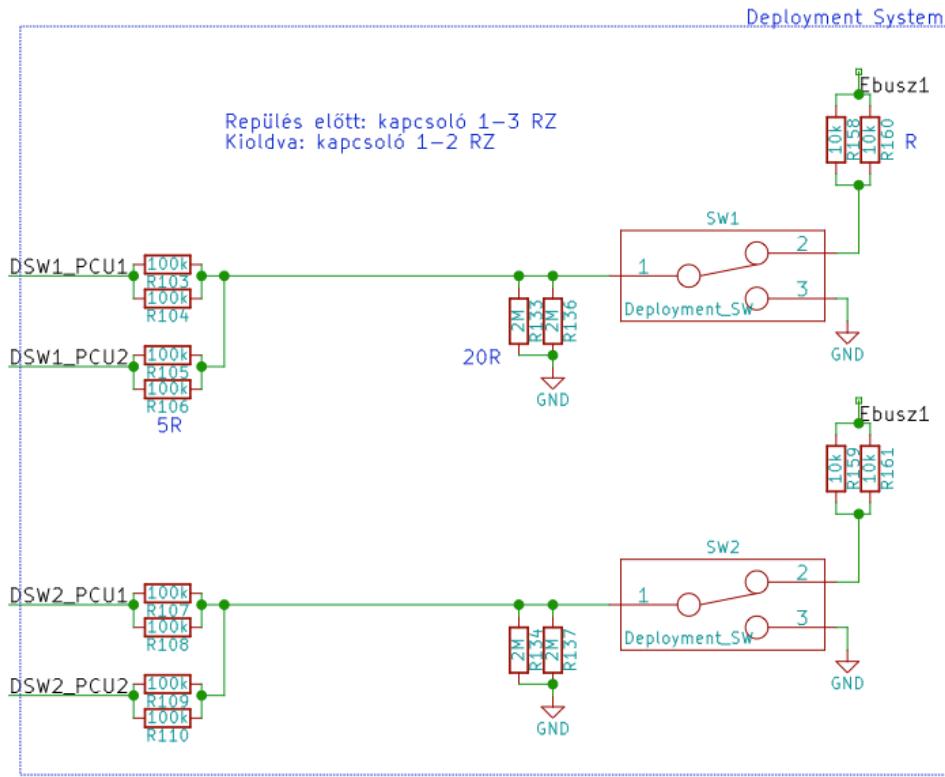
4.9.2.2 Aktiváló rendszer

A PCU feladata a műhold pályára állítása során a DSW-k (Deployment Switch-ek), avagy kibocsátás érzékelő kapcsolók kezelése is. A pályára állítás során a PCU érzékeli a DSW kapcsolók segítségével, hogy a műhold elhagyta-e már a tároló egységet, majd az érzékelt kibocsátás esetén a beállított, kb. 30 perces biztonsági késleltetés után feléleszti az EPS rendszert és a fedélzeti számítógépet.

A rendszer felépítéséhez a „D2F-L3-A” és ellenoldali páját a „D2F-L3-A1” típusú mikrokapsolót használtam a gépész kollégák ajánlása alapján (4.38. ábra), az aktiváló rendszer kapcsolási rajza az alábbi ábrán látható (4.39. ábra).



4.38. ábra: A kiválasztott mikrokapsoló



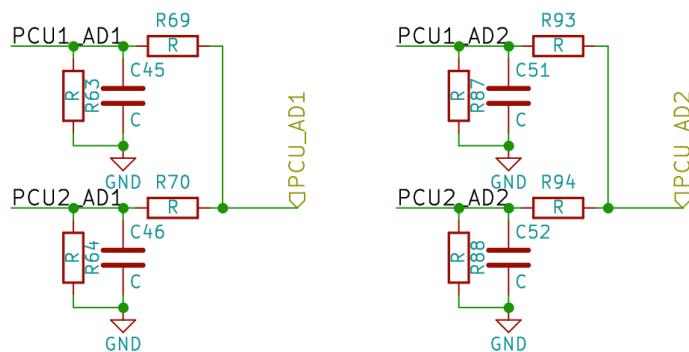
4.39. ábra: Az aktiváló rendszer kapcsolási rajza

A tárolóban a kapcsolók zárt állapotban vannak, azaz a kapcsoló 1-es és 3-mas lába között van rövidzár. A műhold pályára állítása után a kapcsoló nyitásakor az 1-es és 2-es lába között lesz rövidzár. A rendszerben a kapcsolók 1-es számú lábának a feszültségét érzékelik a PCU áramkörök. A lehúzó ellenállások a kapcsoló „félrekapcsolása” esetén (abban az esetben ha a kapcsoló 1-es lába lebegne) földpotenciálon tartják a vezérlő lábat, így az aktuális kapcsoló olyan, mintha nem nyílt volna ki. Zárt állapotban valamelyik mikrokontroller meghibásodása esetén ha az érzékelő I/O láb tápzárlatos lesz a másik kontroller korrekten érzékeli az aktuális kapcsoló állapotát, mivel az 1-es kapcsoló láb kis ellenálláson keresztül közvetlenül kapcsolódik a földhöz.

Nyitott állapotban valamelyik mikrokontroller meghibásodása esetén ha az érzékelő I/O láb földzárlatos lesz a másik kontroller korrekten érzékeli az aktuális kapcsoló nyitott állapotát, mivel az $R - 5R$ feszültségesztővel is a kapcsoló 1-es vezérlő lába tápfeszültséghez közel feszültségre kerül. Bármelyik kapcsoló nyitott állása esetén a PCU elindítja a felélesztési folyamatot, kezdi a tápegység elindítását és bekapcsolja az OBC-t. Az OBC az antenna nyitása előtt a beállított várakozási idő (~30 perc) után a napszenzorok segítségével meggyőződik arról, hogy a műhold valóban elhagyta-e a tárolót, ezzel kizárátható annak a lehetősége, hogy az egyik DSW hibásan jelezte a nyitott állapotot, és a műhold még mindig a tárolóban van.

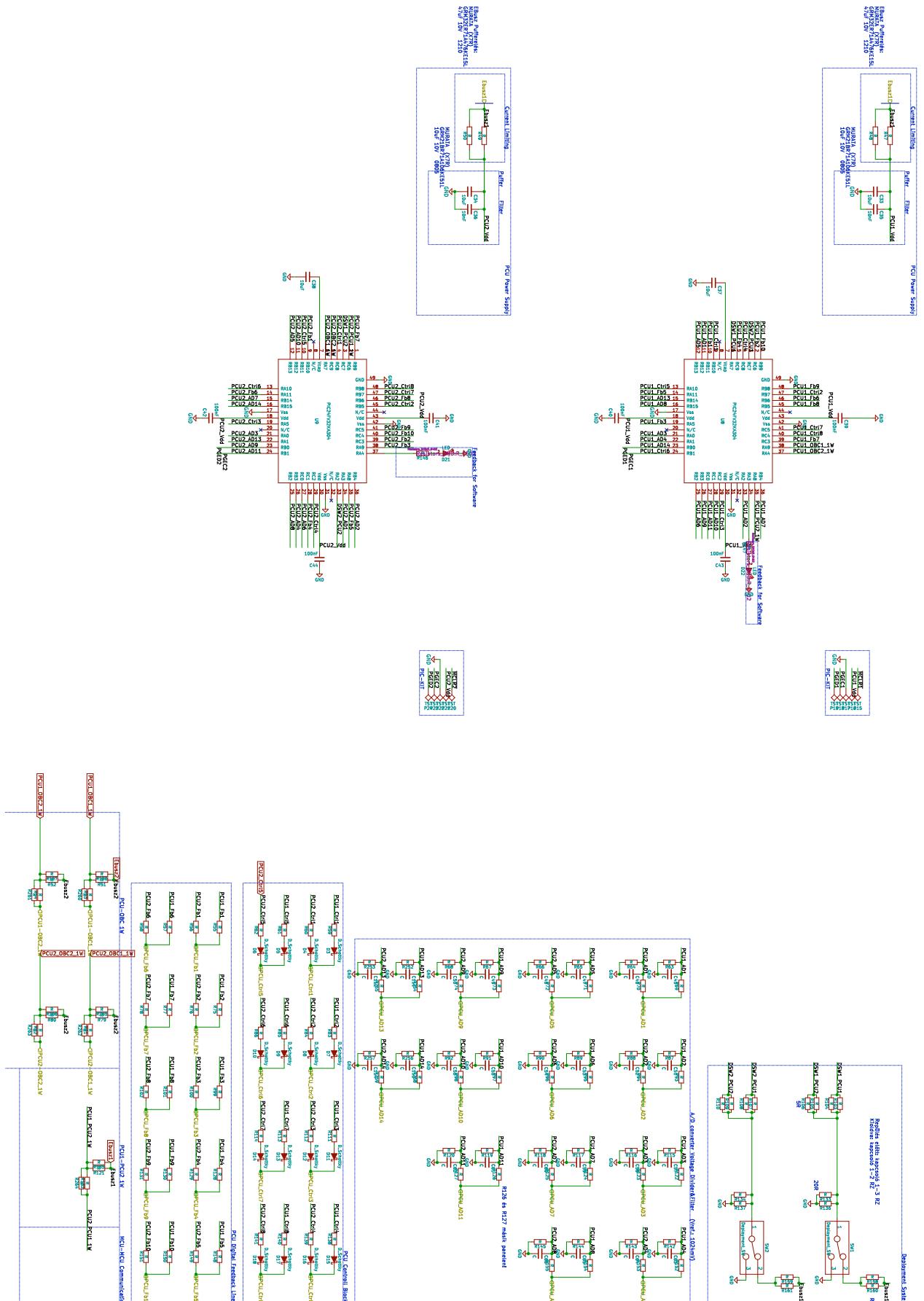
4.9.2.3 Feszültségek mérése, A/D konverzió

Az EPS vezérléséhez szükséges az aktuális feszültségszintek folyamatos mérése, ami a PCU vezérlők 12 bites felbontású analóg-digitális átalakítóival kivitelezhető egyszerűen. Az átalakítók a beépített 1024 mV referencia feszültséget felhasználva digitalizálják a mérendő feszültségeket, ami azt jelenti, hogy feszültségesztővel szükséges 1024 mV alá leosztani az ennél nagyobb feszültségű csatornákat.[14] A mérendő jeleket független alul áteresztő szűrőkön keresztül kapcsoltam a mikrokontrollerek A/D csatornához, így nagy ellenálláson keresztül mérik szűrten a nagy feszültségű jeleket is (4.40. ábra).



4.40. ábra: Az A/D csatornák kapcsolása

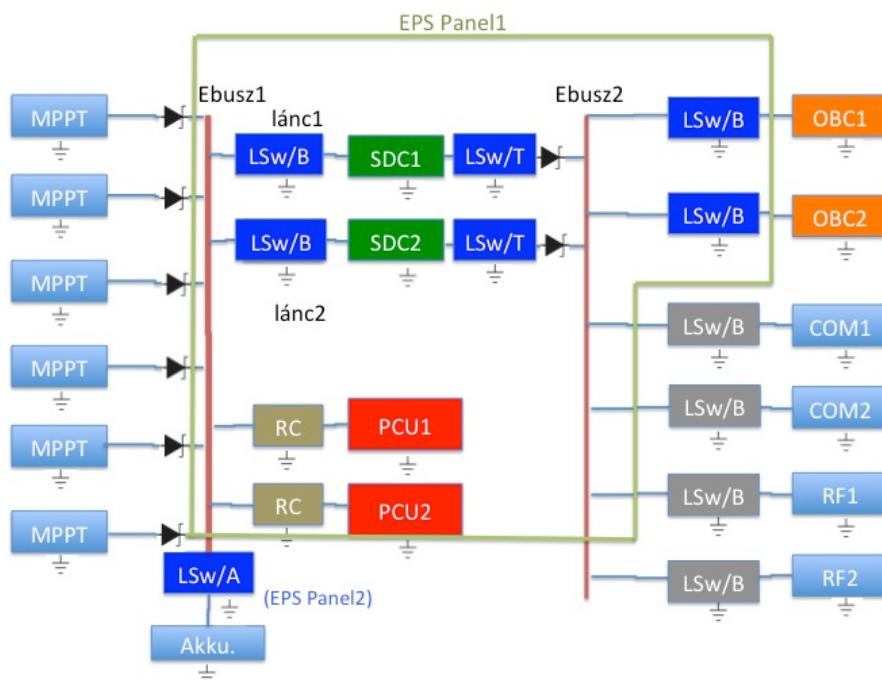
A fenti kapcsolásokkal és a mikrovezérlőkkel elkészítettem a PCU alrendszer teljes kapcsolási rajzát (4.41. ábra).



4.41. ábra: A teljes PCU alrendszer kapcsolási rajza

4.10 Az EPS hordozótervezése

Összeállt az energiaellátó rendszer minden részegységének kapcsolási rajza, a következő lépés az egész rendszert tartalmazó belső fedélzeti hordozólemez összeállítása. A műhold fedélzeti áramköreit a belső 46×46 mm-es „teknősbéka” alakú FR4 alapanyagú hordozókra kell elhelyezni. A cél az volt, hogy az akkumuláltot csatlakoztató LSw/A jelzésű limiter kapcsolón kívül az energiaellátó rendszer összes részegysége lehetőleg egy hordozóra kerüljön. Ez 4db áram korlátozó, 2db túlfeszültség védő limiter kapcsoló, 2db kapcsoló üzemű tápegység, és az energia ellátó rendszert vezérlő redundáns PCU egységek elhelyezését jelenti (4.42. ábra). Ez a panel a tervek szerint a legalsó belső hordozópanelre fog kerülni, amely tartalmazza az aktiváló rendszer mikrokapsolóit is. Az akkumuláltot a szabályozatlan buszra csatlakoztatott kapcsoló (LSw/A) jelentős mérete miatt már nem férne el az első panelra, ezért ez az egység egy másik belső hordozón fog helyet foglalni.

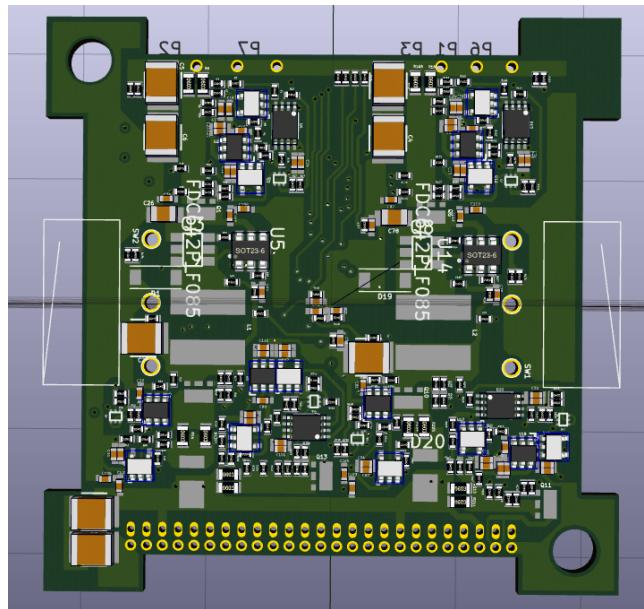


4.42. ábra: Az EPS egységek elhelyezkedése a hordozókon

Az elrendezés nagy előnye, hogy minimális számú csatlakozási pontot foglal el a belső paneleket csatlakoztató rendszerbuszon, továbbá az energiaellátó rendszer két szomszédos panelja közötti összeköttetéseket megvalósító csatlakozási pontok a felsőbb panelek között újra felhasználhatóak, hogyha az akkumulátor mellett ezeket a vonalakat nem vezetjük tovább. Így a rendszerbuszon a felsőbb panelek felé csak a szabályozott busfeszültség, a PCU-OBC kommunikációs vonalak, az OBC tápvonalak és a földvonalak továbbvezetése szükséges, az összes többi elfoglalt csatlakozási pont felszabadítható.

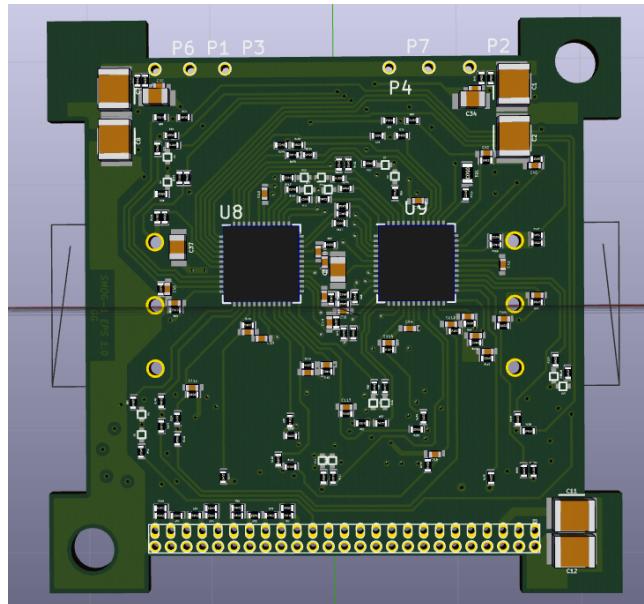
4.10.1 EPS Panel-1

Az első panel úgy lett kialakítva, hogy a teljesítményelektronika teljes egészében a hordozó egyik oldalát foglalja el, a vezérlő elektronika pedig a másik oldalról felügyeli a működést. A kialakítás előnye az, hogy nagy áramerősség csak a teljesítményelektronikának kialakított rajzolati rétegen alakulhat ki, a buszfeszültségek innen egyik rétegre sincsenek átvezetve. A teljesítményelektronikát tartalmazó alkatrész oldal látképe látható az alábbi ábrán (4.43. ábra).



4.43. ábra: Az első hordozó látképe a teljesítményelektronika alkatrészeivel

A hordozó másik oldalán a vezérlő PCU alrendszer áramköreit tartalmazó alkatrész oldal látképe látható az alábbi ábrán (4.44. ábra).

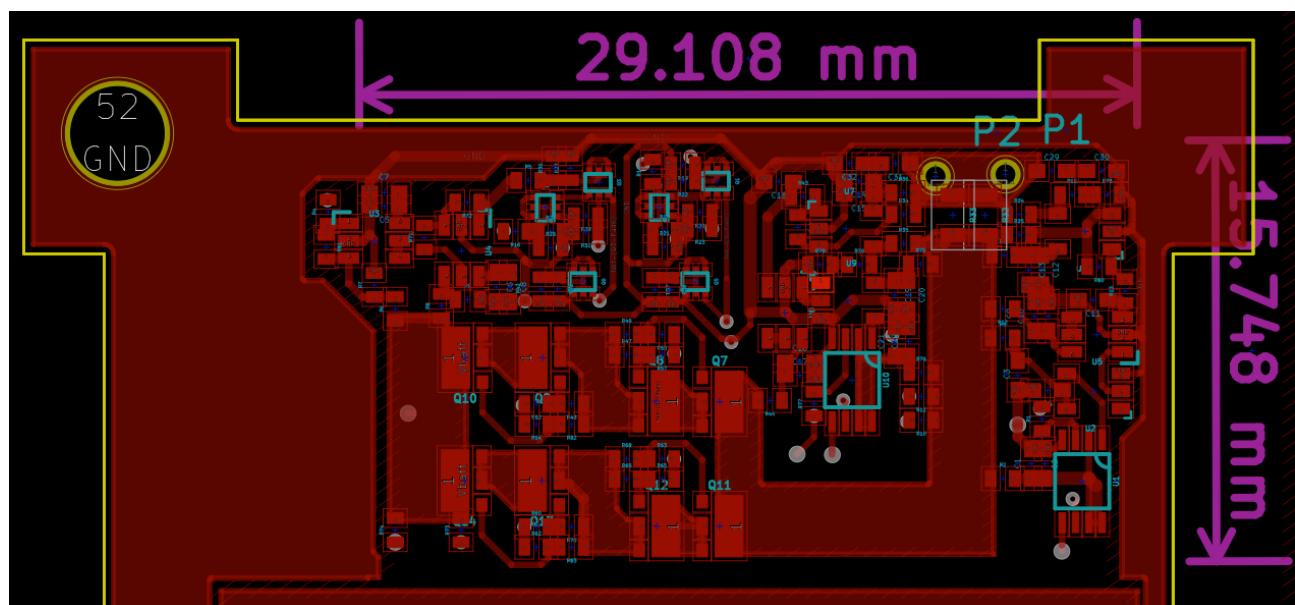


4.44. ábra: A vezérlő elektronikai alkatrészeket tartalmazó oldal

A panel 455 darab alkatrész összeköttetését valósítja meg 6 rajzolati rétegen, amelyből az első réteg a vezérlő elektronikákat tartalmazó réteg, majd 2 belső jelvezető réteg a buszcsatlakozóhoz való csatlakozás és az áthidalások megvalósításához, majd 2 teljes földréteg, amely valamelyest árnyékolja a tápegységek által generált elektronikus zavarjeleket is, végül az alsó teljesítményelektronikát tartalmazó réteg.

4.10.2 EPS Panel-2

Az akkumulátort a szabályozatlan buszra csatlakoztató kapcsoló (LSw/A) mérete miatt már nem férne el az első panelra annak telítettsége miatt, ezért ez az egység egy másik belső hordozón fog helyet foglalni. Ennek a panelnak a tervezése során egyedi követelmény volt az, hogy alkatrészek csak az egyik oldalon lehetnek, mivel a panel másik oldalán az akkumulátor elhelyezése miatt szükség van a hordozó felületére. A NYÁK (Nyomtatott ÁramKör) terv elkészült, az LSW/A kapcsoló mérete 16x30 mm, amely így a teljes hordozó kb. 1/6-át foglalja el (4.45. ábra).



4.45. ábra: Az LSW/A kapcsoló áramkör hordozóterve

5 SMOG-1 Payload áramkörök

Ebben a fejezetben bemutatom azokat az általam tervezett áramköröket, amelyek nem az EPS részét képezik, de a SMOG-1 műhold fedélzeti elektronikához tartoznak.

5.1 Az RTCC egység

A műholdon a pontos pozíció meghatározására használható szenzor sajnos nem kaphat helyet, mert a kereskedelmi forgalomban kapható GPS áramköröket biztonsági okokból úgy korlátozzák, hogy bizonyos magasság (altitude) felett „levágják” a mért értékeket és nem szolgálnak pontos adatokkal.[3]

Ez a probléma azért jelentős, mert hiába állnak rendelkezésre a pontos mérési eredmények a műhold mérőrendszereiből, ha nem tudjuk semmilyen módon megállapítani, hogy a méréseket hol végeztük.

Erre ad megoldást az a megközelítés, hogy ha az egyes méréseket pontos időbelyeggel látjuk el, akkor a Földön a műhold pályájának kiszámolásával és a pontos idő figyelembevételével meg tudjuk állapítani, hogy melyik mérést hol végezte a műhold, valamint a fedélzeti események pontosan mikor (és ezáltal hol) következtek be. Ezt a célt szolgálja az RTCC (Real Time Clock and Calendar, Valós idejű óra és naptár) áramkör.

Felmerülhet a kérdés, hogy miért nem használtuk valamely mikrokontrollerbe épített RTCC megoldást. Ennek oka az, hogy ezek a megoldások korántsem elég precízek, használatuk esetén a kontrollert nem lehet alvó módban üzemeltetni, valamint redundancia okokból ilyenkor a fedélzeti számítógép minden redundáns egységének egyszerre kellene működnie, hogy egyikük meghibásodása esetén se veszítsük el a fedélzeten a pontos időt.

Az előzőekben leírtak alapján belátható, hogy a műhold vezérlése szempontjából kritikus, hogy az RTCC áramkör folyamatosan üzemeljen. A tervezés során figyelembe kell venni, hogy ha az akkumulátor meghibásodik és leválasztjuk az energiabuszról, akkor az RTCC részére kell egy tartalék energiaellátás, amely ebben az esetben is működteti az áramkört arra az időre, amíg a pályából adódó Föld árnyék miatt nincs beérkező energia a napelemek felől. Ez az időtartam kb. 40 perc lesz a pályától függően. Ha az RTCC folyamatosan üzemel, akkor a Föld árnyékból kiérve a műhold folytathatja az előre beprogramozott feladatok teljesítését.

A szükséges tartalék energiaellátás miatt bár az RTCC az OBC alrendszer részét képezi, tervezése és megépítése a feladatom része volt.

5.1.1 RTCC áramkör

Az RTCC egység megépítéséhez a svájci Microcrystal cég RV-3049-C3 típusú kis fogyasztású integrált áramkörét használtam (5.1. ábra), amely minden szempontból a legoptimálisabb választás.

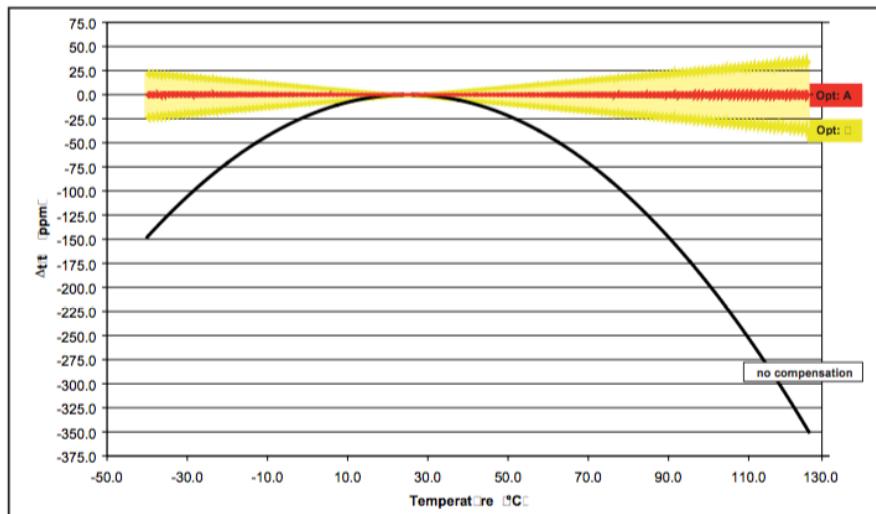
Az chip tartalmaz egy integrált 32,768 kHz frekvenciájú DTCXO (Digital Temperature Compensation Crystal Oscillator) egységet, amely egy vezérlő elektronika segítségével folyamatosan kompenzálja a kristály hőmérsékletből adódó pontatlanságát, és így széles hőmérsékleti tartományok között is rendkívül pontos időzítést lehet megvalósítani (5.2. ábra , 5.3. ábra).[15] Erre nagy szükségünk van, mivel a műhold hőtehetetlensége a tömegéből adódóan kicsi és nagy hőingadozások várhatóak.



5.1. ábra: Az RV-3049-C3 integrált áramkör

Option A:	Calibrated	
Temperature	Time Deviation	
@ +25°C	± 0.26 s/day	± 3ppm
0°C to +50°C	± 0.35 s/day	± 4ppm
-10°C to +60°C	± 0.44 s/day	± 5ppm
-40°C to +85°C	± 0.52 s/day	± 6ppm
-40°C to +125°C	± 0.70 s/day	± 8ppm

5.2. ábra: Az RTCC áramkörre vonatkozó pontossági adatok különböző hőmérsékleti tartományokban[15]



5.3. ábra: A DTCXO pontossága a kompenzálatlan külső kristályos megoldásokhoz képest[15]

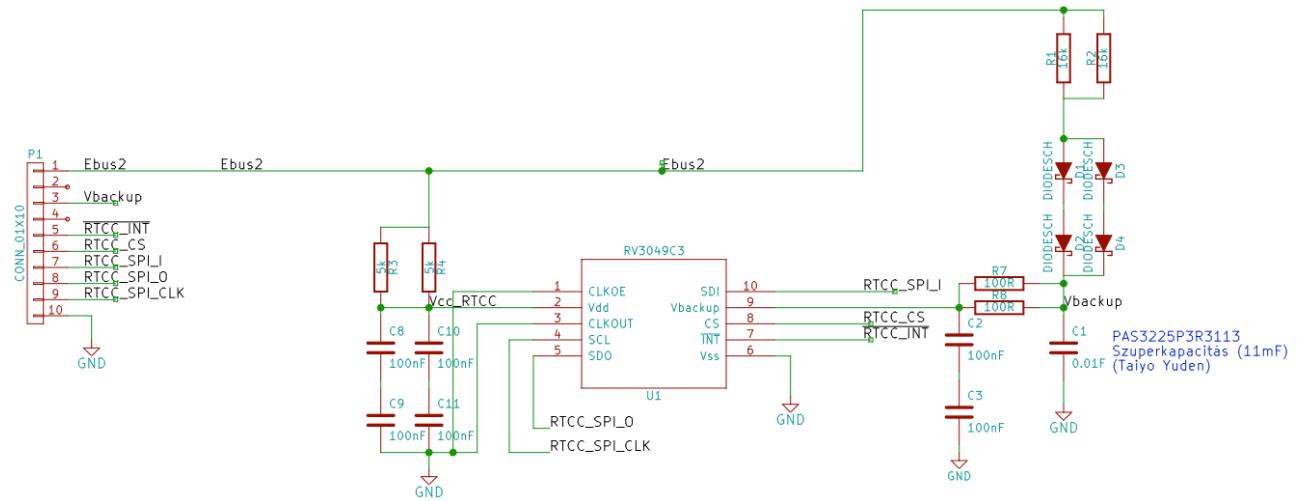
Az egységből a pontos fedélzeti idő, a pontos hőmérséklet és a felhasználói EEPROM adatai a beépített SPI interfészen keresztül olvashatóak ki a fedélzeti számítógép számára. Az áramkör a regiszterek értékét befagyasztja kiolvasás közben, ezzel véd a hibás kiolvasások ellen.[15] A 2 Byte EEPROM memória alkalmass lehet például a redundáns RTCC áramkörök egyedi azonosítójának eltárolására, amely segítségével megkülönböztethető a két áramkör.

5.1.2 Az RTCC áramkör energiaellátása

Az RV-3049-C3 rendelkezik egy Vbackup bemenettel amelyre az áramkör automatikusan átkapcsol, ha az ott mérhető feszültség nagyobb, mint a szabályozott busz feszültsége. Ehhez a bemenethez csatlakoztatható a tartalék energiaellátás, amelyet a japán Taiyo Yuden PAS3225P3R3113 típusú új generációs 11 mF kapacitású kerámia alapú szuperkapacitásával (5.4. ábra) és minimális kiegészítő hálózattal valósítottam meg (5.5. ábra). Az RV-3049-C3 működéshez szükséges áramfelvételle maximum 1 μ A, amelyet a 4 μ Ah névleges kapacitású szuperkapacitás bőségesen fedez a szükséges ideig.[15][16]



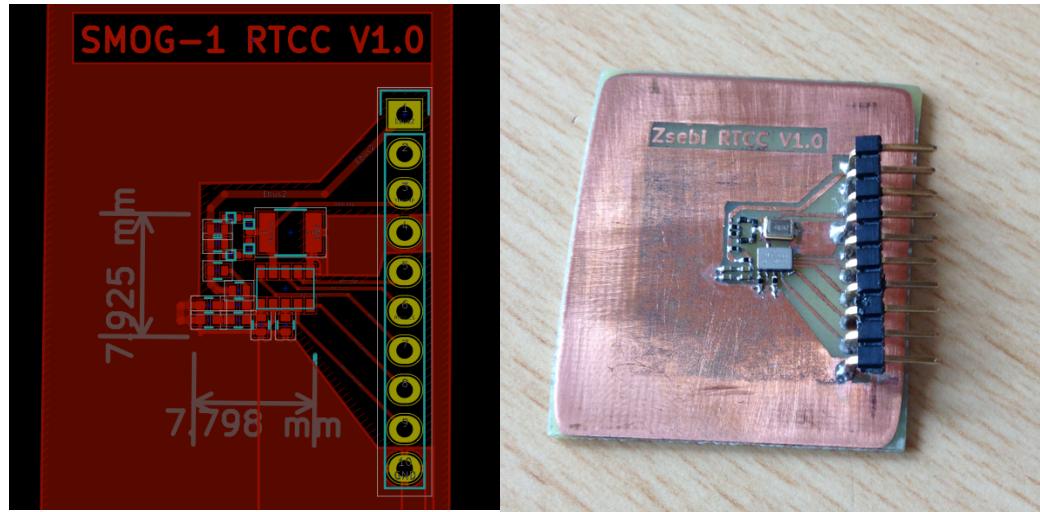
5.4. ábra: PAS3225P3 szuperkapacitás



5.5. ábra: Az RTCC áramkör kapcsolási rajza

A szuperkapacitás közvetlenül a szabályozott buszra csatlakozik, töltőáramát soros ellenállások segítségével korlátozzuk. Így a szuperkapacitás izolálható ha esetleg zárlatossá válik, valamint a Föld árnyékból kikerülve sem jelent jelentős tranzisztors terhelést a feltöltése. A Schottky diódákra azért van szükség, hogy a szuperkapacitás csak az RTCC áramkört táplálja, ne folyjon vissza áram az energiabusz irányába. A chip és a szuperkapacitás közé beiktatott soros ellenállások a Vbackup bemenet földzárlata esetén védi meg a szuperkapacitást.

A tartalék energiaellátással megtervezett áramkör rendkívül kis helyen is elfér, az egész modul minden összes 8×8mm hordozófelületet foglal el (5.6. ábra).



5.6. ábra: Az RTCC teszt áramkör hordozóterve és az elkészült áramkör

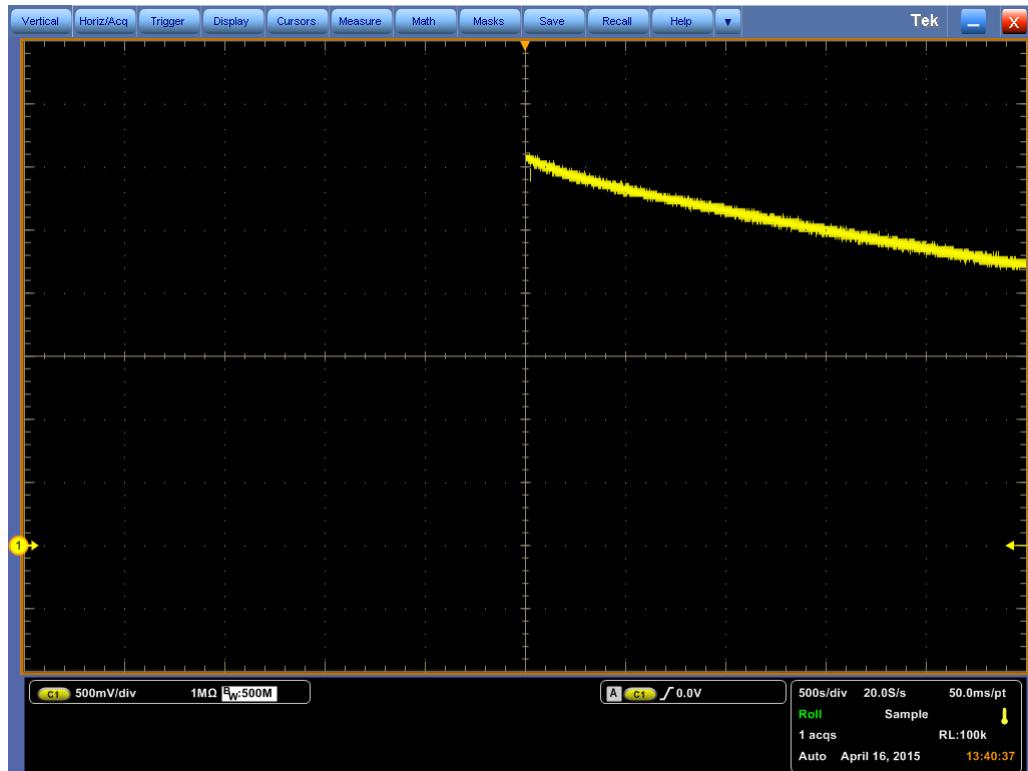
A mérések során különböző buszfeszültségek esetén vizsgáltam azt, hogy az áramkör mennyi idő alatt éli fel a tartalék rendszerben eltárolt energiát. Az RTCC 1,3 V fölötti feszültség esetén garantálja a pontos idő eltárolását, ha a szuperkapacitás feszültsége 1,3 V alá süllyed, akkor nem garantálható az áramkör korrekt működése.[15]

Az alábbi ábrán látható a szuperkapacitás töltődési folyamata szabályozott 3,3 V feszültségű energiabuszról töltve (5.7. ábra). Az időegység 100 s/osztás. Leolvasható, hogy a szuperkapacitás feltöltése a kapacitás 63 %-ára kb. 100 másodpercig tart, a teljes töltődés kb. 500 másodperc alatt zajlik le. A felvételek oszcilloszkóp segítségével készültek.



5.7. ábra: A szuperkapacitás töltődési folyamata

Az alábbi ábrán követhető a szuperkapacitás merülése (5.8. ábra). Az időegység 500 s/osztás. Leolvasható, hogy a 3 V feszültségre töltött kapacitás 2500 másodperc (~41 perc) alatt merül le 2,25 V feszültségre, amely még bőségesen elegendő az RTCC modul működtetéséhez.

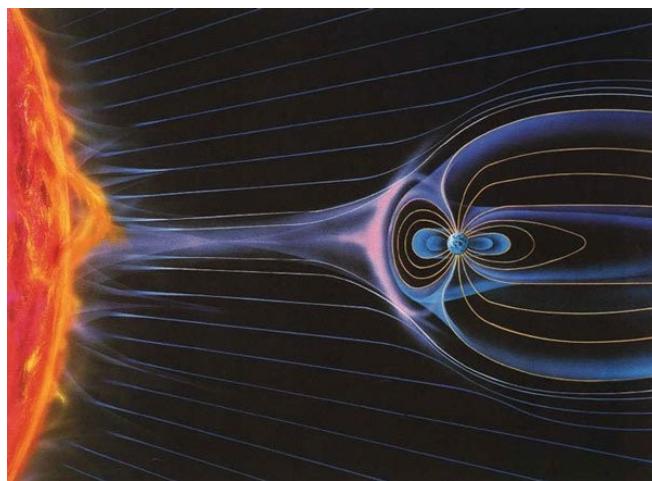


5.8. ábra: A szuperkapacitás merülési folyamata

Az RTCC egységet az SPI Payload Tester áramkörrel teszteltem (6.2). Az elkészült tesztelő program segítségével ellenőriztem az áramkör funkcionális működését és a tartalék energiaellátó rendszer megfelelőségét. A vizsgálatok során a pontos időt sikeresen visszaadta az áramkör szélsőséges hőmérsékleti viszonyok között még 2 órás energia kimeradás esetén is.

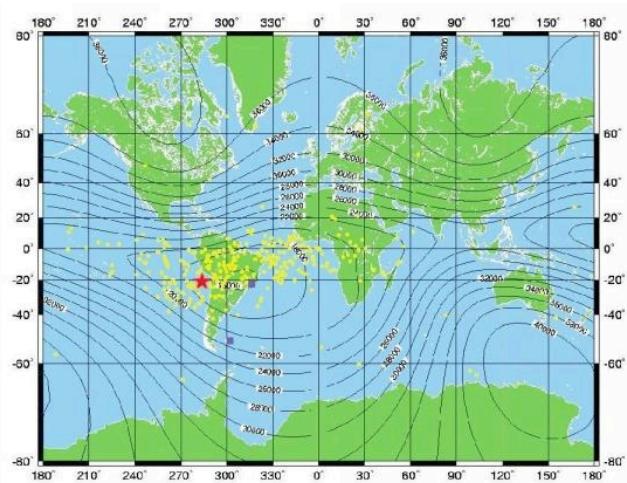
5.2 Doziméter áramkör

A világűrben a Föld felszínéhez képest közel két nagyságrenddel erősebb intenzitású ionizáló sugárzás van jelen, amely alapvetően a Nap által kibocsátott proton részecskékből és a galaktikus kozmikus sugárzásból tevődik össze. A sugárzás legnagyobb részét proton- és α (He^{2+}) sugárzás teszi ki, de tartalmaz elektron-, gamma-, röntgen- és neutronsugárzást is. Ezen sugárzások ellen az élővilágot a földi atmoszféra és a bolygó mágneses tere védi (5.9. ábra), az ūreszközök azonban a felszíntől távol jelentős sugárterhelésnek vannak kitéve, különösen a Van Allen sugárzási övekben.[17]



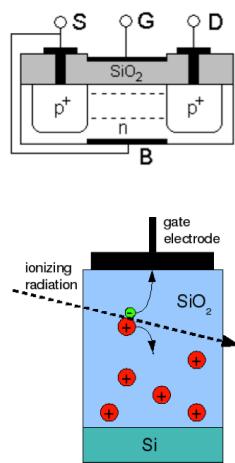
5.9. ábra: Napszél és a Föld mágneses tere

Bár a sugárzás nagy részét a LEO pályákon a mágneses tér még hatékonyan árnyékolja, SMOG-1 tervezett pályáján is jelentős sugárzás mérhető a Dél–Atlanti Anomália területén, ahol a mágneses tér lokálisan gyengébb az átlagnál, és ezért a Van Allen övek hatása már jóval kisebb magasságokban is jelentkezik.[18][19] A dózis az a mérőszám, amely megadja, hogy egy adott tömegű tárgynak mekkora energiát adott le az ionizáló sugárzás. Mértékegysége: Gray_(Si) [J/kg].



5.10. ábra: A Dél–Atlanti Anomália környékén észlelt műhold meghibásodások[18]

A fedélzetén elhelyezett doziméter segítségével jól követhető, hogy a megtett pálya során hol milyen mértékű sugárzás érte az elektronikus eszközöket, megvizsgálható a Van Allen övek többlet sugárterhelése valamint a misszió során esetlegesen bekövetkező napkitörések hatása. A mágneses szenzorok segítségével további összehangolt mérések is kivitelezhetők.

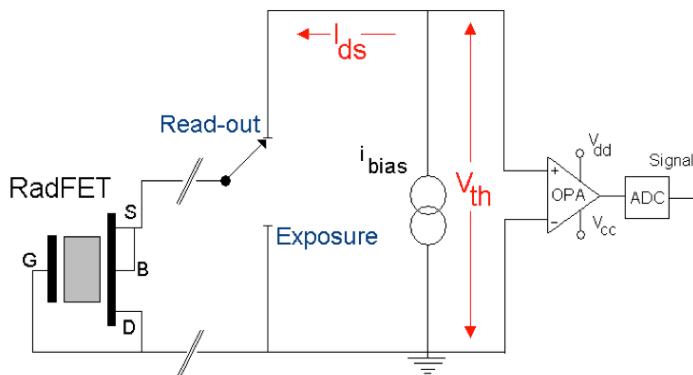


5.11. ábra: A RadFET

A sugárzás káros hatással van az elektronikus eszközök működésére, az ionizáció során az elektronok, protonok, az α , röntgen- és gamma-sugárzás elektron/lyuk párokat generálnak a szigetelő anyagokban, melynek hatása az idővel egyre növekszik (kumulatív).[17] Ezt a hatást használják ki a teljes dózis mérésére az erre a célra kialakított RadFET (Radiation Field Effect Transistor) szenzorok, amelyek speciális tipikusan 100 – 1600 nm vastag gate SiO_2 szigetelő rétege úgy van kialakítva, hogy a becsapódó részecske által generált elektron/lyuk párból az elektron a gate elektródán keresztül elvezethető, azonban a keletkező lyuk kötötten marad, „csapdába esik” a rétegen (5.11. ábra). [21][22]

szerkezeti felépítése

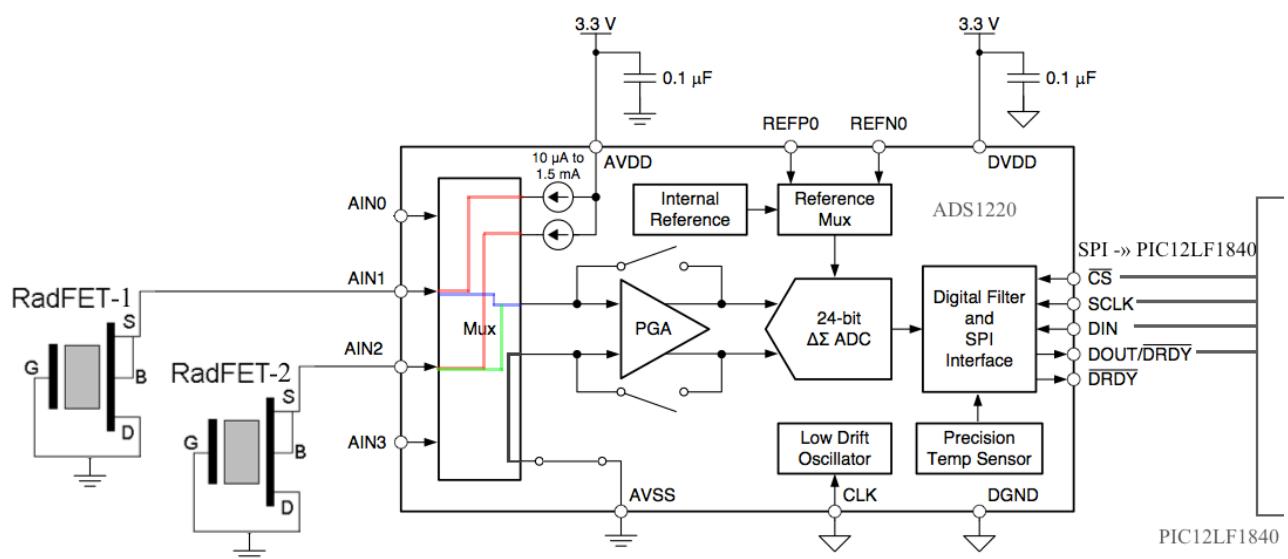
A mérési elrendezésben a szenzorként használt p típusú RadFET Drain és Gate elektródáját földpotenciálra kapcsoljuk, áramgenerátorosan meghajtjuk a Source elektródát, majd a Source–Drain kapcsok között létrejött egyenfeszültséget a megfelelő szűrés és erősítés után egy Analóg/Digitális átalakító segítségével pontosan mérjük (5.12. ábra). Az ionizáló sugárzás hatására a gate oxidban létrejött lyukak a Source–Drain csatorna fokozatos elzáródását okozzák, amely azonos előfeszítő áramerősséggel esetén a dózissal arányosan megnövekedő küszöbfeszültséget eredményez. [21]



5.12. ábra: A doziméter mérési elrendezése

Az ūrben jelen lévő sugárzás legnagyobb része ionizáló sugárzás így ezzel a módszerrel pontosan mérhető a teljes elnyelt sugárdózis.[22] A neutronsugárzás méréséhez konverter anyaggal kell kiegészíteni a szenzort, amely a becsapódó neutronokat ionizáló, pl. alfa-sugárzássá alakítja.

A tervezési irányelvek alapján a doziméter megépítéséhez az ADS1220 típusú chipre építkeztem, amely egy kis fogyasztású 24 bites precíziós Analóg/Digitális átalakító. Az áramkör tartalmaz egy pontos $10 \mu\text{A}$ és $1500 \mu\text{A}$ között állítható áramerősséggű áramgenerátort, amely alkalmas a legtöbb RadFET meghajtására, így nem igényel további alkatrészeket az áramgenerátoros előfeszítés létrehozása.[20] A szenzorokat olyan áramerősséggel kell előfeszíteni, amelynél azok hőmérsékletfüggése minimális, ez típusonként különböző de általában $100 \mu\text{A}$ körüli.[21] 4 független csatorna áll rendelkezésre a szenzorok olvasásához, így akár 4 különböző érzékenységű RadFET is csatlakoztatható a doziméterhez (5.13. ábra).



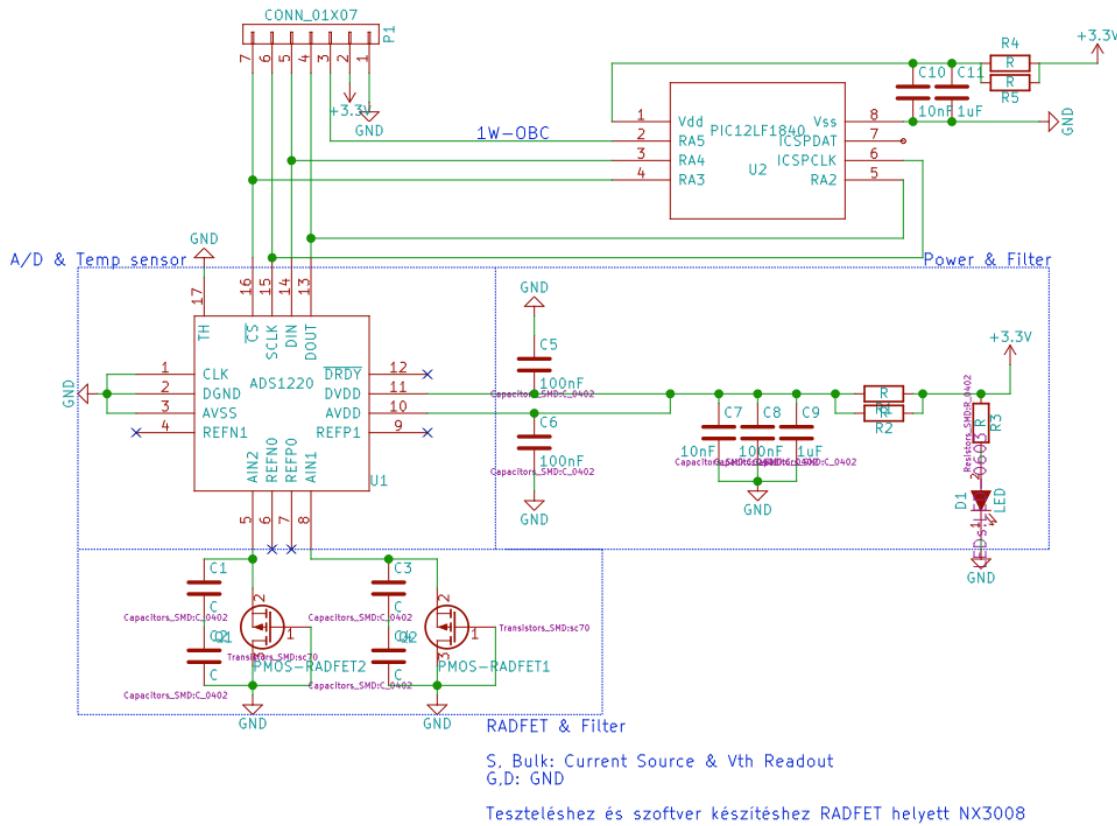
5.13. ábra: A megtervezett doziméter funkcionális felépítése

A „Duty-Cycle” mód hasznos az energiafelhasználás szempontjából, mivel folyamatos kiolvasásra nincs szükség, ezért egy rövid kiolvasás után rögtön „PowerDown” üzemmódba helyezhető az átalakító, amelyben lekapcsolja az áramgenerátorokat és így az áramfelvétel $1\mu\text{A}$ alatt.[20]

Mivel a tranzisztorok (és így a RadFET-ek) küszöbfeszültsége erősen hőmérsékletfüggő, ezért a pontos méréshez folyamatos kompenzációra van szükség. Az ADS1220 tartalmaz egy beépített ($0,03125^\circ\text{C}$ felbontású) precíziós hőmérőt, amely 14 bites digitális értékként szolgáltatja a chip aktuális hőmérsékletét.[20] Mivel a RadFET-ek közvetlenül az átalakító mellett helyezkednek el, ezért jó közelítéssel azok hőmérséklete megegyezik az átalakító által mért hőmérséklettel, amely a vezérlőben egyből felhasználható kompenzálás céljából.

Az ADS1220 egy SPI porton keresztül szolgáltatja a mérési adatokat egy PIC12LF1840 típusú mikrovezérlő számára, amelyet kis mérete és energiatakarékosága miatt választottam ki. Ez a vezérlő adja ki az átalakító számára a parancsokat majd olvassa vissza a mérési eredményeket,

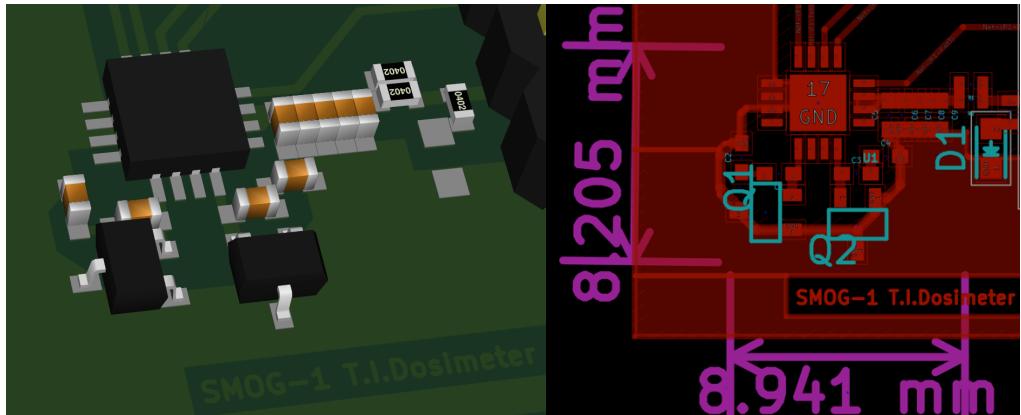
amelyekből az adatfeldolgozás és a kompenzáció után továbbítja a kész adatstruktúrát a fedélzetű számítógép számára egy OneWire porton keresztül (5.14. ábra).



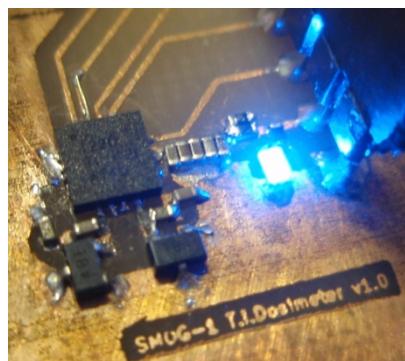
5.14. ábra: A doziméter áramkör teljes kapcsolási rajza

A redundancia miatt 2 doziméter áramkör fog üzemelni a műhold fedélzetén, amelyekre egyenként 2 darab (egy nagy érzékenységű és egy kevésbé érzékeny) szenzor lesz rákapcsolva. Így műholdunk összesen 4 RadFET segítségével fogja vizsgálni a sugárzást.

A doziméter prototípusa elkészült, amelyet a drága és nehezen beszerezhető RadFET-ek helyett egyszerű P-csatornás MOSFET-ekkel építettem meg (5.16. ábra). A mikrovezérlőhöz készítettem egy tesztelő programot, amellyel a doziméter minden szükséges funkciója tesztelhető. Az áramkör az elvárásoknak megfelelően működik, a tesztelő tranzisztorokkal együtt a doziméter mindössze 1cm² hordozófelületet foglal el (5.15. ábra).



5.15. ábra: A doziméter 3 dimenziós látképe és a hordozó terv



5.16. ábra: Az elkészült doziméter prototípus

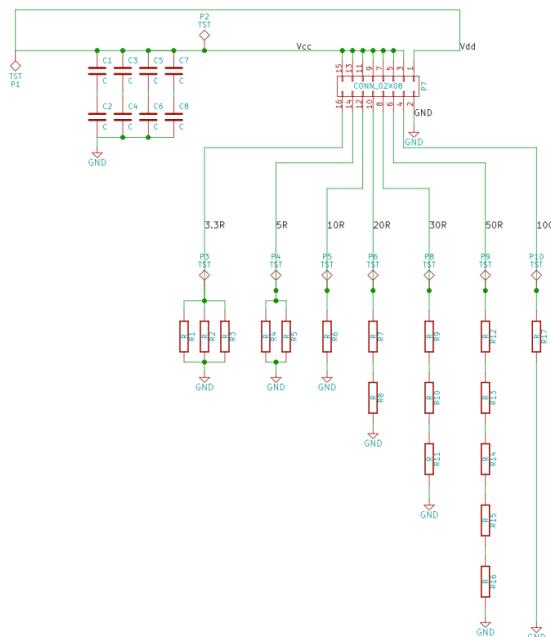
A tervezett LEO pályán a várható sugárterhelés kb. 5-50 Gray/év. A műhold élettartamát figyelembe véve olyan érzékeny RadFET volna ideális a fedélzetre, amelynek a besugározatlan küszöbfeszültsége a minimális hőmérsékleti függésű áramgenerátoros meghajtás esetén a lehető legalacsonyabb. A doziméter felbontása akkor használható ki a legjobban, ha ez a feszültség a küldetés során kapott összes sugárterhelés hatására éri el az áramkör belső 2048 mV-os referenciafeszültségét. Ilyen RadFET-ek elkészítésével az R.E.M., a LAAS-CNRS, és a TYNDALL cégek foglalkoznak, amelyekkel fejlesztő csapatunk felvette a kapcsolatot.[21]

6 SMOG-1 Tesztelő áramkörök

Ebben a fejezetben azokat az áramköröket mutatom be, amelyeket a fedélzeti elektronika fejlesztéséhez és teszteléséhez készítettem.

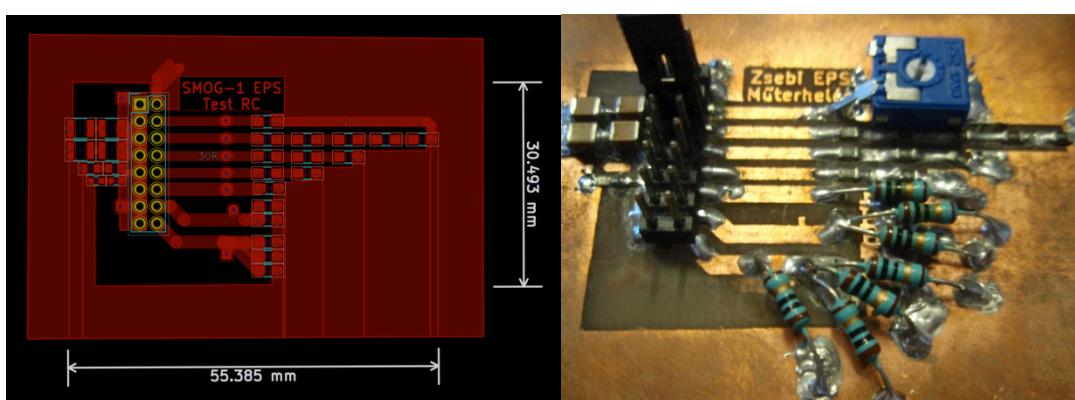
6.1 Műterhelő RC hálózat

Az EPS rendszerben fellépő terhelések vizsgálatára kialakított műterhelő RC hálózat kapcsolási rajza látható az alábbi ábrán (6.1. ábra).



6.1. ábra: A megtervezett műterhelő hálózat kapcsolása

Az elkészített hordozó terv és a megépített hárító az alábbi ábrán látható (6.2. ábra).



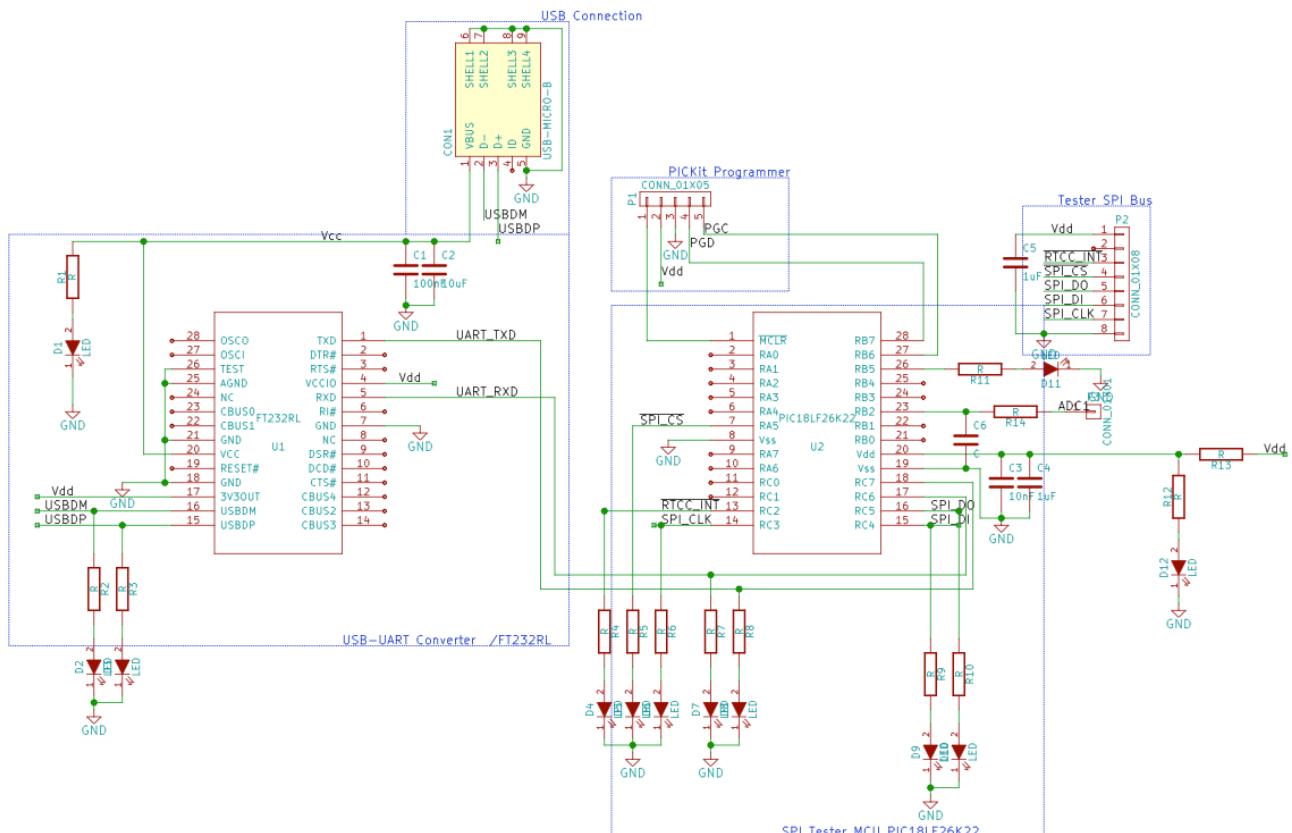
6.2. ábra: A műterhelő hálózat hordozóterve és az elkészült hálózat

Egy egyszerű jumper segítségével állítható be a terhelő ellenállás, a kapcsolásba beépített pufferelő kapacitások segítségével tesztelhetőek a töltődési és kapcsolási jelenségek az EPS rendszerben. Ezzel a hálózattal modelleztem a műhold fogyasztót a Limiter kapcsolók és az SDC áramkör fejlesztése során.

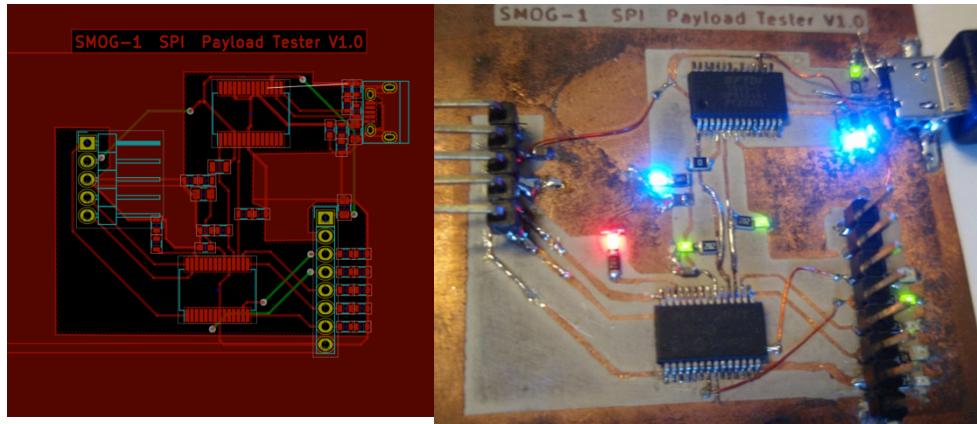
6.2 SPI Payload Tester

Az általam tervezett SPI Payload Tester segítségével az SPI porton keresztül kommunikáló szenzorok és egyéb eszközök tesztelhetőek a fedélzeti számítógéptől függetlenül. Az áramkör tartalmaz egy FT232 típusú USB-UART átalakító áramkört, amely segítségével USB portról is olvashatóak számítógép segítségével a tesztelendő egységek értékei, valamint egy PIC18LF26K22 típusú mikrovezérlő áramkört, amely kommunikál SPI porton keresztül a tesztelendő áramkörrel és UART porton az FT232-vel. A mikrovezérlő architektúrája különböző a tervezett fedélzeti számítógép architektúrájától, ami előnyös a tesztelések során.

A kommunikáció vizuális ellenőrzése érdekében a jelvezetékek visszajelző LEDekkel lettek ellátva, valamint a mikrovezérlő egy digitalizáló csatornája is felhasználható a feszültségek digitalizálására (6.3. ábra).



6.3. ábra: Az SPI Payload Tester kapcsolási rajza



6.4. ábra: Az SPI Payload Tester hordozóterve, és az elkészült áramkör

Ezt az áramkört használtam a fedélzeti RTCC és Doziméter modulok teszteléséhez és fejlesztéséhez.

7 Összefoglalás és kitekintés

A meghibásodási lehetőségeket figyelembe véve elkészítettem a SMOG-1 műhold központi energiaellátó rendszerének egy pont meghibásodásra méretezett rendszerszintű tervét, amely minden követelménynek eleget tesz. Kiválasztottam a rendszer felépítéséhez szükséges passzív áramköri elemeket, amelyek alkalmasságát mérési eredményekkel is alátámasztottam.

Egyenként megterveztem azokat az alegységeket, amelyekből felépíthető az egész központi energiaellátó rendszer. A műhold tápegységét sikerült rendkívül kis méretben megtervezni, csúcsterhelés esetén az áramkör 99 % fölötti konverziós hatásfokkal üzemel. Az automatikus védelmi áramkörök kis méretűek és jól paraméterezhetőek, megfelelő védelmet nyújtanak a fedélzeti eszközök számára. minden áramkör teljesíti a rendkívül szigorú fogyasztás és méretbeli követelményeket, a helyes működést mérési eredményekkel igazoltam.

Kiválasztottam a PCU vezérlő egységet megvalósító mikrokontrollereket, amelyek segítségével elkészítettem az egy pont meghibásodásra méretezett vezérlőrendszer tervét.

Az elkészült áramköri tervek alapján elkészítettem a központi energiaellátó rendszer hordozónak tervét, amelyek már összekapcsolva tartalmazzák az összes teljesítményelektronikát és a vezérlő alrendszer a végleges méretben.

Megtervezésre és megépítésre került a műhold fedélzeti RTCC egység, amely már tartalmazza az RTCC áramkört, és a hozzá tartozó tartalék energiaellátó rendszert. Az egység helyes működését mérések és az általam írt tesztprogram segítségével igazoltam.

Elkészült a saját tervezésű műhold fedélzeti doziméter, amelyet sikerült rendkívül kis méretben megépíteni. Az áramkör funkcióinak helyes működését az erre a célra készített tesztprogram segítségével igazoltam.

Elkészült egy műterhelő hálózat, valamint egy tesztelő áramkör, amelyekkel az SPI protokollon kommunikáló szenzorok és egyéb eszközök tesztelhetőek a fedélzeti számítógéptől függetlenül.

A projekt folytatásának további fázisaiban elsőként az egész központi energiaellátó rendszert fogom felépíteni a megtervezett hordozóra, majd az összeillesztett alrendszeret fogom együttesen vizsgálni és optimalizálni a mérési eredmények alapján. Ezek után a PCU mikrovezérlőinek programozását és a doziméter áramkör továbbfejlesztését szeretném párhuzamosan végezni.

Irodalomjegyzék

- [1] The Spectrum Monitoring System of Smog-1 Satellite – Dudás Levente, 2015
- [2] PocketQube műhold numerikus hőtani szimulációja – Jáger Dávid, Török Péter, 2014
- [3] A SMOG-1 kisműhold spektrummonitorozó rendszere – Dudás Levente, Szűcs László, Gschwindt András, 2015
- [4] Small Spacecraft Technology State of the Art – NASA/TP–2014–216648/REV1, July 2014
- [5] PocketQube 1.0, NASA Ames Research Center, Mountain View, CA, April 2014
- [6] SMOG-1 Elsődleges energiaellátó rendszere Diplomaterv – Herman Tibor, May 2015
- [7] [KiCad](#) – A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite
- [8] [MPLAB® X](#) – Integrated Development Environment
- [9] [Logisim](#) – Educational tool for designing and simulating digital logic circuits
- [10] Analog Dialogue 45-06 Back Burner, June 2011
- [11] Jim Williams). Diode Turn-On Time Induced Failures in Switching Regulators, January 2009
- [12] Texas Instruments - TPS64200 , August 2003
- [13] Texas Instruments – LPV521 , December 2014
- [14] Microchip – PIC24FV32KA304, March 2013
- [15] Micro Crystal – RV 3049 App Manual V2.1 , January 2013
- [16] Taiyo Yuden – Ceramic Type Polyacene Capacitor PAS3225P3R3113 Spec Sheet, March, 2015
- [17] A. Holmes-Siedle and L. Adams, – Handbook of Radiation Effects, 2nd Edition 2002
- [18] Heirtzler, J. R., “The Future of the South Atlantic Anomaly and implications for radiation damage in space”. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, pp.1701-1708. 2002.
- [19] Southern Regional Space Research Center – IAA-CU-13-04-07
- [20] Texas Instruments – ADS1220 , February 2015
- [21] European Organisation For Nuclear Research – CERN Sensor Catalogue, May 2005
- [22] REM Data Sheet – RFTDAT-CC10 – Rev W, September 2010