



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

**A SMOG-1 POCKETQUBE MÁSODLAGOS
ENERGIAELLÁTÓ RENDSZERE**

KONZULENS

Dudás Levente

BUDAPEST, 2016

Tartalomjegyzék

Rövidítések jegyzéke	5
1 Bevezetés	6
2 Abstract.....	7
3 A SMOG-1 műhold felépítése, az alrendszerök ismertetése	8
3.1 Küldetés	8
3.2 A műhold felépítése	9
3.3 Megkötött paraméterek a tervezés során.....	9
3.4 Speciális követelmények.....	10
3.4.1 Mechanikai igénybevétel	10
3.4.2 Termikus paraméterek	10
3.4.3 DMR (Dual Modular Redundancy)	10
3.5 A műhold alrendszeri	11
3.6 A tervezéshez használt szoftverek	12
4 Az EPS ismertetése.....	13
4.1 Az EPS feladatai	13
4.2 A megtervezett EPS felépítése	13
4.3 Az EPS működéséhez szükséges diszkrét alkatrészek.....	17
4.3.1 Energiabusz kondenzátorok	17
4.3.2 Power Schottky dióda	17
4.4 Az SDC alrendszer.....	18
4.4.1 Az SDC működési elve	19
4.4.2 A nem ideális SDC alkatrészek veszteségei	20
4.4.3 Megkötések a SMOG-1 SDC áramkörének megtervezése során	20
4.4.4 A feladathoz kiválasztott integrált áramkörök	21
4.4.5 A feladathoz szükséges diszkrét áramköri elemek kiválasztása	23
4.4.6 SDC V3.0	25
4.5 Árammérő híd	29
4.6 A túláram védelmi kapcsolók felépítése	31
4.7 A túlfeszültség védelmi kapcsoló felépítése	36
4.8 Akkumulátor védelmi kapcsoló	39
4.9 Az EPS vezérlése: A Power Control Unit.....	44
4.9.1 A Vezérlőrendszer energiaellátása	44

4.9.2 Vezérlőrendszer (PCU).....	45
4.9.3 A PCU vezérlő szoftvere	49
4.10 Az EPS hordozótervezése	51
4.10.1 EPS Panel-1	52
4.10.2 EPS Panel-2	54
5 Mérési eredmények.....	55
5.1 Fogyasztási paraméterek	55
5.2 Tömeg paraméterek.....	56
5.3 Túláram védelem mérési eredményei	56
5.4 Túlfeszültség védelem mérési eredményei	58
5.5 Akkumulátor védelem mérési eredményei	59
5.6 SDC mérési eredményei.....	59
6 SMOG-1 Payload áramkörök	61
6.1 Az RTCC egység	61
6.1.1 RTCC áramkör.....	62
6.1.2 Az RTCC áramkör energiaellátása	63
6.2 Doziméter áramkör	66
7 Összefoglalás és kitekintés.....	71
8 Köszönetnyílvánítás	72

HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

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

Budapest, 2016. május 22.

Géczy Gábor

Rövidítések jegyzéke

A/D – Analog/Digital

DC – Direct Current

DMR – Dual Modular Redundancy

DTCXO – Digital Temperature Compensation Crystal Oscillator

EPS – Electrical Power System

ESR – Equivalent Series Resistance

FET – Field Effect Transistor

GPS – Global Positioning System

GSE – Ground Support Equipment

I/O – Input/Output

LEO – Low Earth Orbit

MCU – Micro Controller Unit

MPPT – Maximum Power Point Tracking

OBC – On Board Computer

PCU – Power Control Unit

PWM – Pulse-Width Modulation

RadFET – Radiation Field Effect Transistor

RF – Radio Frequency

RMS – Root Mean Square

RTCC – Real Time Clock and Calendar

SDC – Step Down Converter

TID – Total Ionising Dosimeter

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

UHF – Ultra High Frequency

1 Bevezetés

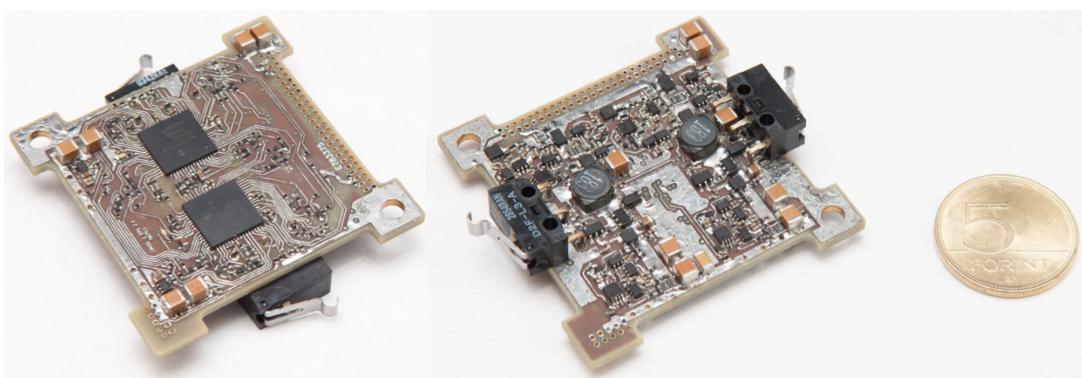
Dolgozatom témája a SMOG-1 nevű műhold központi energiaellátó rendszerének megtervezése és megépítése.

Műholdunk küldetése az emberiség történetében először a világűrbe kijutó földfelszíni forrású elektromágneses sugárzás vizsgálata a televízióadások frekvenciasávjában (430 – 860 MHz). Előzetes magaslégköri 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 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 éró 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 elkészült prototípusa

2 Abstract

The topic of my paper is the design and construction of the central electrical power system 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) tiny experimental 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.

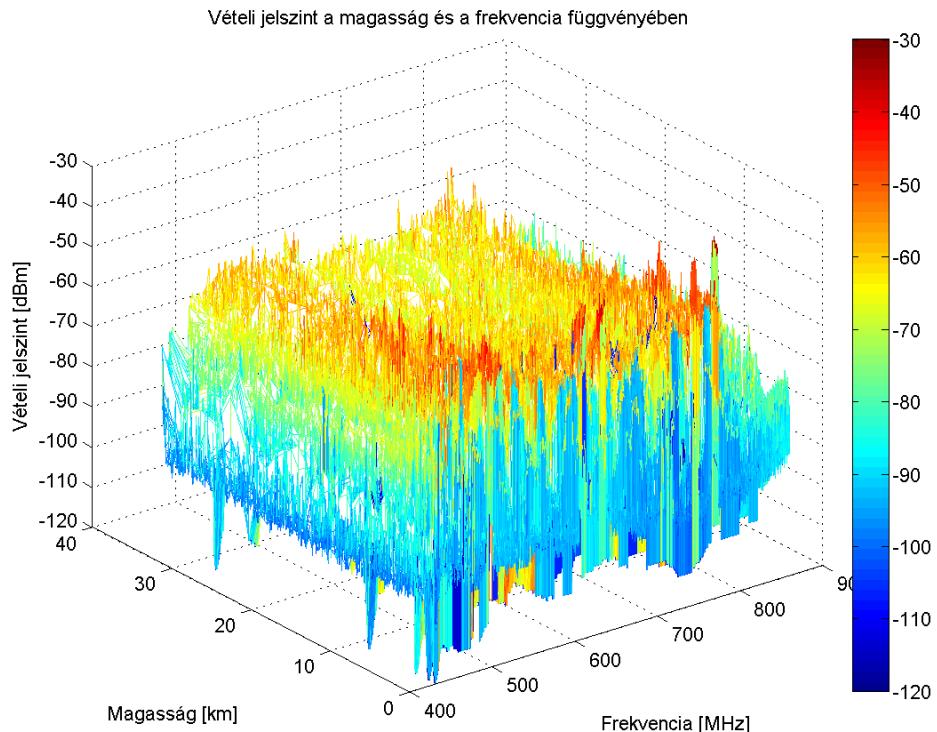
3 A SMOG-1 műhold felépítése, az alrendszerök ismertetése

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].

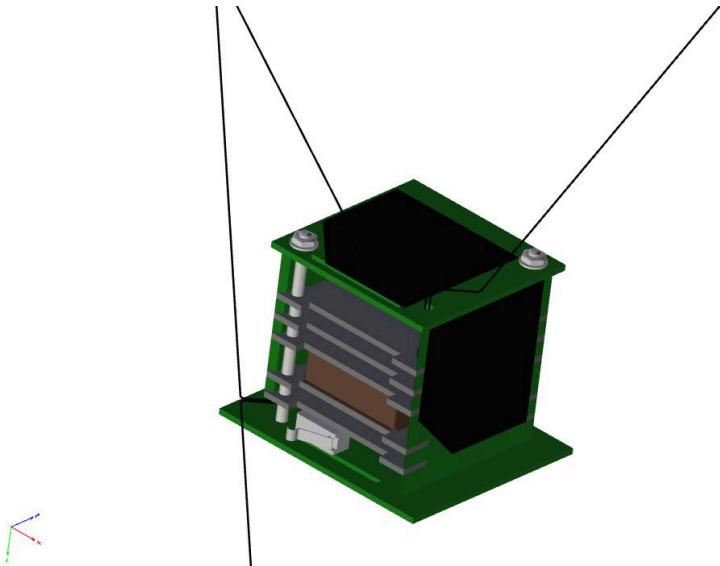
Mérési eredményeinket az antennatervezésben felhasználva minimalizálható ez a kisugárzott teljesítmény. A fő mérőrendszer mellett műholdunk fedélzetén további szenzorok és mérőrendserek gyűjtenek hasznos mérési adatokat, amelyek a jövőben tudományos kutatásokhoz és technológiai fejlesztésekhez használhatóak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



3.1. ábra: A magaslékgöri ballonos kísérleteink 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 Föld nehézségi gyorsulásának 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 $+80^{\circ}\text{C}$ közötti tartományban az üzemszerű 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 tervezzük az ūreszközt, vagyis ha úgy tervezünk, hogy bármelyik alkatrész rendellenes meghibásodása esetén a műhold működése és funkcionálisára nem kerül veszélybe.

A legtöbb modul által szolgáltatott funkció megvédhető, ha a létfontosságú alrendszerből 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 EPS alrendszer két további autonóm függetlenül üzemelő alrendszerre tagolható, a napenergiát hasznosító elsődleges energiaellátó rendszerre, valamint a hozzá kapcsolódó másodlagos energiaellátó rendszerre, melynek célja a stabilizált tápfeszültség előállítása és az akkumulátor kezelése. Dolgozatom az utóbbi rendszer megtervezését és megépítését mutatja be.

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.

További fontos fedélzeti mérőrendszer a doziméter egység (Total Ionising Dosimeter), amely a fő mérőrendszer (SP) mellett további hasznos teherként dozimetriai méréseket fog végezni a műholdunk fedélzetén. Dolgozatomban kitérek a doziméter egység ismertetésére is.

3.6 A tervezéshez használt 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 dolgozatba beillesztett minden nagyobb méretű kapcsolási rajz külön pdf formátumban is megtekinthető a mellékletek között.

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

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

A doziméterek vezérlését végző mikrokontrollerek szoftverét az LPCXpresso nevű fejlesztői környezetben készítettem el.[10]

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.

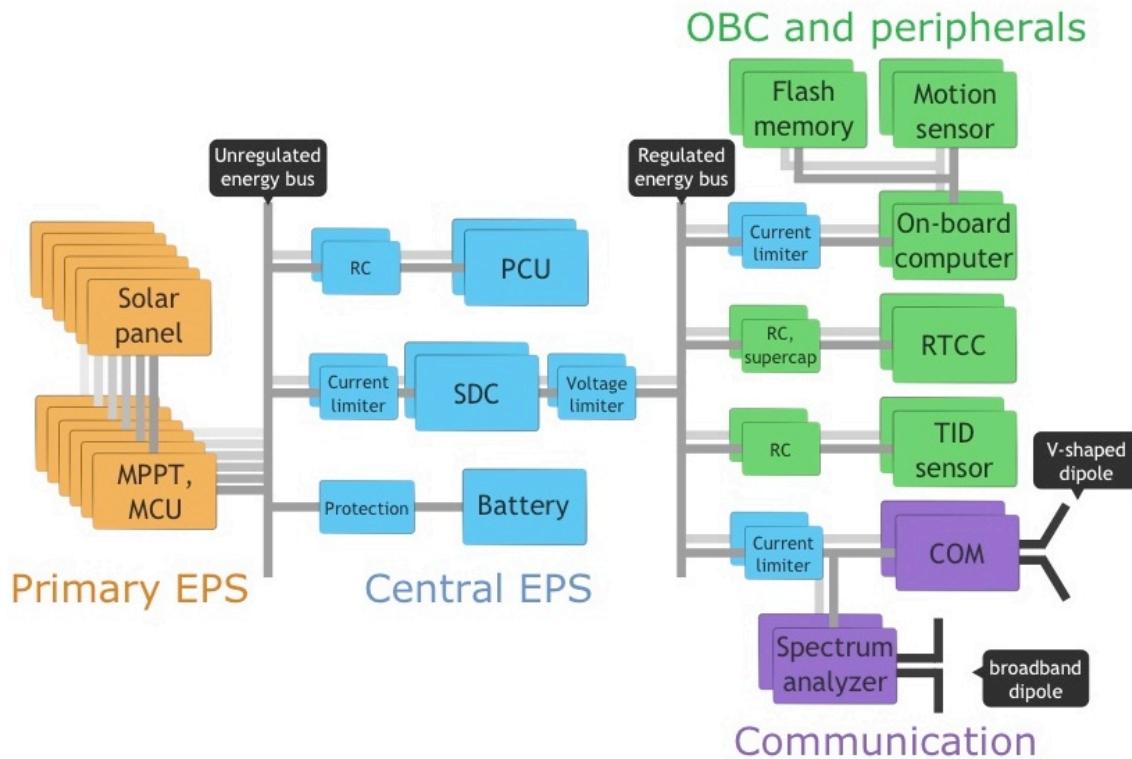
Az oldallapotkról beérkező energia a szabályozatlan energiabuszra kerül, amelyre csatlakozik az első számú energiatároló egység, az akkumulátor. Az akkumulátor feszültsége tág határok (2,7 – 4,2 V) között változhat töltöttségtől függően, ami nem használható fel közvetlenül a fedélzeti elektronikus eszközök 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) tápegység látja el.

Az EPS további feladata, hogy biztosítsa az energiabuszok sérzetlenségét bármelyik arra tápláló, vagy arról fogyasztó eszköz meghibásodása esetén. Ilyen feladat például az akkumulátor esetleges zárlata 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 alrendszer, 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 avagy 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).



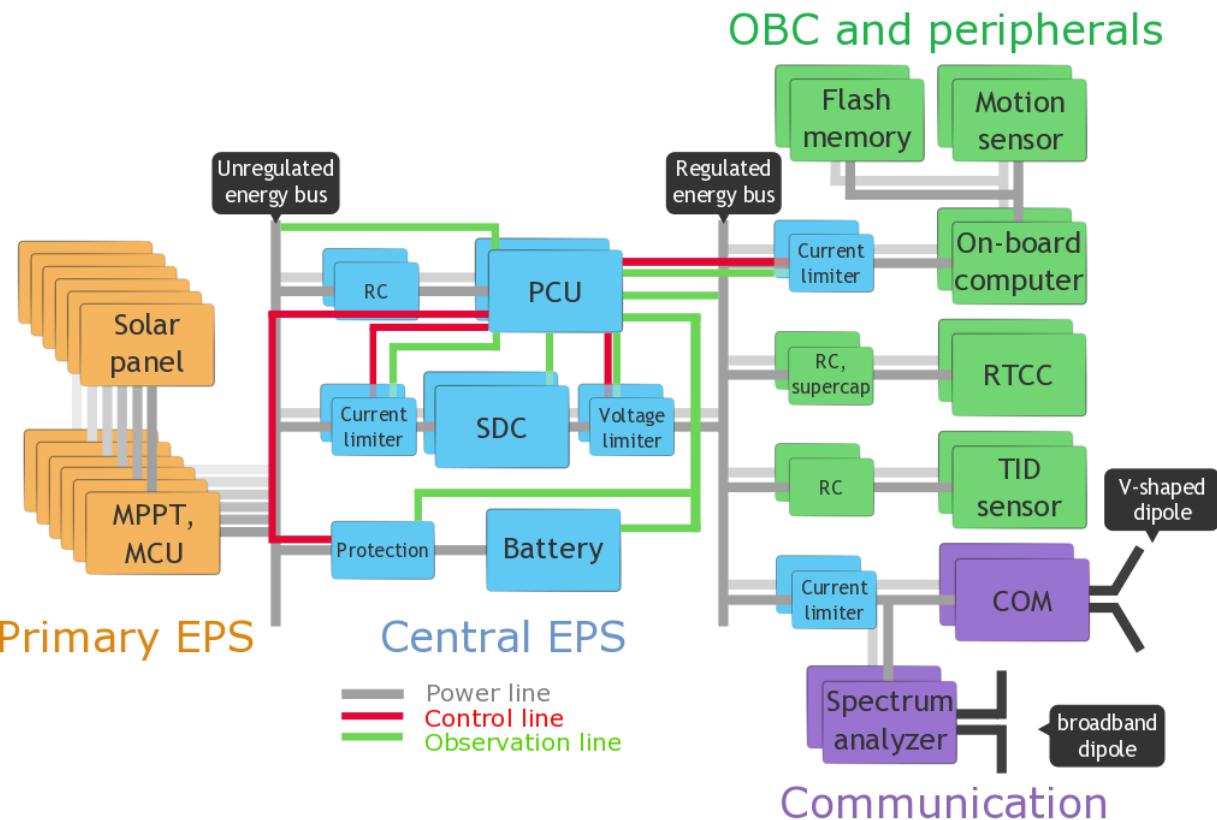
4.1. ábra: A megtervezett energiaellátó rendszer blokkvázlatos felépítése

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

6db redundáns MPPT (Maximum Power Point Tracking) algoritmussal ellátott napelem oldal egységei végzik a napelemekből kivehető maximális teljesítmény felvételét, ezek az áramkörök az elsődleges energiabusznál kerülnek összegzésre 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 elérő átalakítási hatásfok átlagosan 90 % 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 energiaellátó rendszer 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 (2,7 – 4,2 V). Az akkumulátort saját aktív kapcsolója védi a túltöltéstől, mélykisütéstől, zárlatoktól, és csatlakoztatja a szabályozatlan buszra. Az akkumulátor egy kis méretű egy cellás 900 mAh kapacitású BP85A típusú Li-ion akkumulátor, amelyet több lehetséges alternatíva közül a hőkamrás mérési eredmények alapján választott ki csapatunk (4.3. ábra).



4.3. ábra: A fedélzeti energiatárolásra kiválasztott Li-ion akkumulátor

A „Current Limiter” kapcsolók a rendszer túláram-, és zárlatvédelmét valósítják meg. Az áramkorlát elérése 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 függetlenül kialakított kapcsoló üzemű tápegység (SDC), amelyek kimenetei újabb védelmi kapcsolók bemenetére kapcsolódnak.

A „Voltage Limiter” 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 túláram védelmi kapcsolóval kezdődik, amely monitorozza és szabályozza a szabályozatlan buszról felvett áramot, ennek a kimenetéről kapja a betáplálást az SDC áramkör és a túlfeszültség védelmi kapcsoló. Az SDC áramkör a kimenetén üzemsszerűen 3,47 Voltos feszültséget állít elő. A túlfeszültség védelmi kapcsoló is méri a lánc kimenetén az áramerősséget, így a buszfeszültségek és a védelmekben 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 célra a mérési eredmények alapján a DFLS120L típusú diódát választottam (4.3.2 fejezet), amely beiktatásával a szabályozott buszfeszültség a terheléstől függően 3,3 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 rendszerek védelmi 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 túláram védelmi kapcsolókat a PCU vezérli. Az elsődleges fedélzeti számítógép meghibásodása esetén az aktív PCU feladata detektálni a hibás működést és bekapsolni a tartalék OBC egységet.

A kommunikációs rendszer számára beiktatott védelmi kapcsolókat az OBC vezérli és monitorozza autonóm módon.

4.3 Az EPS működéséhez szükséges diszkrét alkatrészek

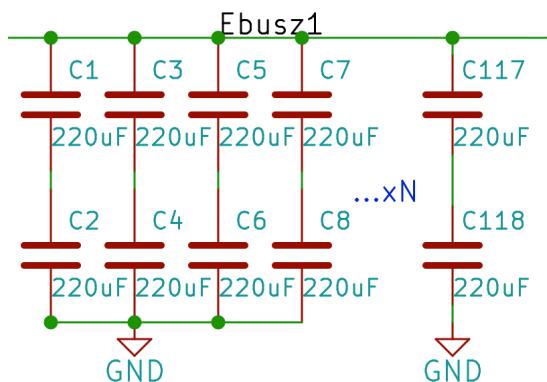
4.3.1 Energiabusz kondenzátorok

Az energiabuszok pufferelésére kiválasztott alkatrész a japán Murata vállalat GRM31CR60J227ME11L típusú kondenzátora (4.4. ábra). Ez a kerámia alapú kondenzátor kis veszteségű X5R dielektrikummal és ideális kapacitás/méret aránnyal rendelkezik. Kapacitása $220 \mu\text{F}$ szabvány SMD 1206-os méret mellett $6,3 \text{ V}$ maximális feszültségre méretezve.



4.4. 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 ($110 \mu\text{F}$), azonban akkor is biztosított az energiabuszok védelme, ha valamelyik kondenzátor zárlatossá válik (4.5. ábra).



4.5. ábra: Az energiabuszok pufferelése

A tervek szerint az energiabuszok kapacitásbankjai elosztva lesznek elhelyezve a belső hordozólemezek szélén a rendszerbuszhoz közel, így mindenek között a hordozólemezen függetlenül megvalósítható az eszközök pufferelése és a tápfeszültség szűrése. A mechanikai igénybevétel szempontjából is ez az elrendezés az ideális, mivel a hordozó szélén éri a viszonylag nagy méretű kondenzátorokat a legkisebb kihajlás a rázkódásból adódóan.

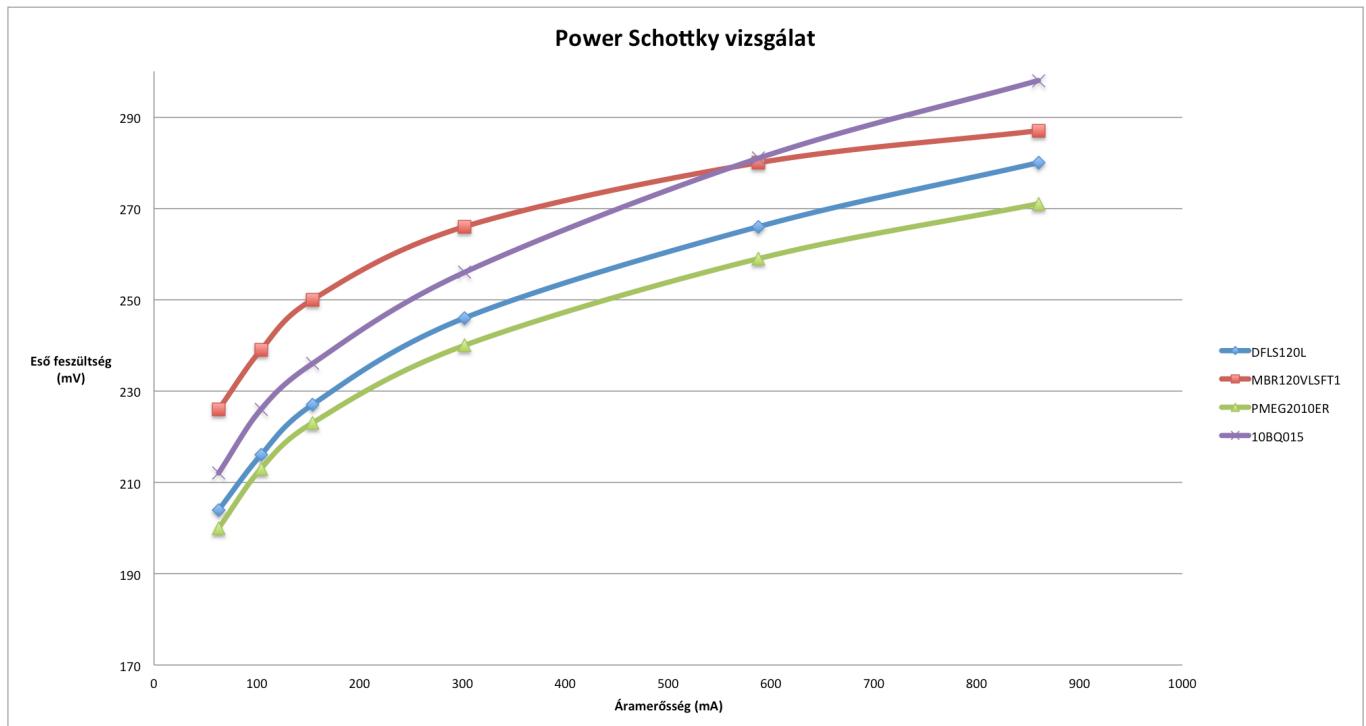
4.3.2 Power Schottky dióda

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 kizárálag a kis veszteségű Schottky diódák alkalmasak.

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

A megfelelő védő dióda kiválasztásához több lehetséges alkatrész is teszteltem. A különböző diódákon azonos áramot átfolytatva a diódákon eső feszültség mérésével összehasonlítható a diódák vesztesége.

A tesztek alapján 2 alkatrész megfelelő a feladat megoldására, a DFLS120L és a PMEG2010ER típusú Schottky diódák, ezek közül a kisebb záró irányú szivárgó áram miatt a DFLS120L típust választottam (4.6. ábra).



4.6. 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.

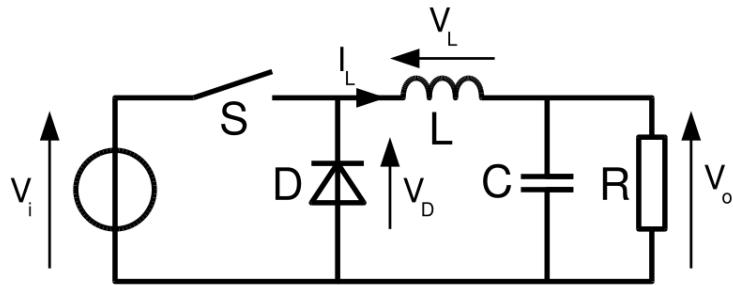
Erre a feladatra földfelszíni körülmények között a legegyszerűbb megoldást a széles körben alkalmazott lineáris regulátor áramkörök jelentenék (lásd. 78xx termékcsalád), azonban ezek az áramkörök nagyon veszteségesek, mert működési elvükön adódóan az összes többlet energiát

eldisszipálják. Ezek a feszültség szabályozók tehát az üreszközökönél 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%. [11]

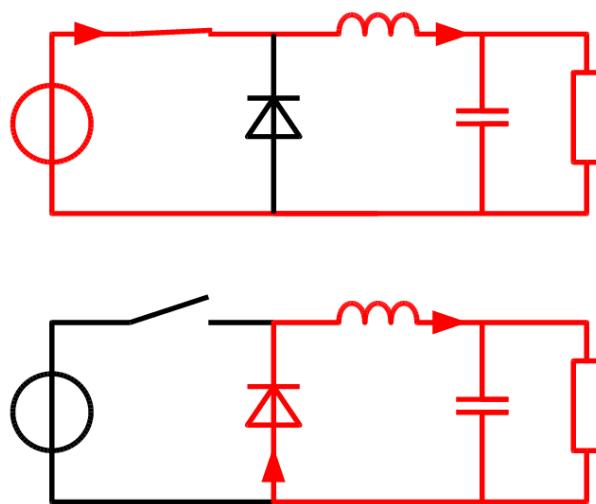
4.4.1 Az SDC működési elve

Az alábbi ábrán látható az SDC elméleti alapkapsolás, amit szokás buck topológiának is nevezni (4.7. ábra). Az alap áramkör két energiatároló elemből és két kapcsoló elemből felépíthető.



4.7. 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 kisebb stabil kimeneti feszültséget állít elő. A buck konverter működését két fázisra különíthetjük el, ez a két különböző állapotot látható az alábbi ábrán (4.8. ábra).



4.8. ábra: Az SDC áramkör két működési fázisa

A kezdeti állapotban a tároló elemekben nincsen tárolt energia, az első bekapcsolás 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 feszültségeből, 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. [11]

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

A buck konvertereknek 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 continuous 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 konverterek 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 tápegységének 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 terhelésekből adódóan egyébként is veszélyt jelentenek a megbízhatóság szempontjából.

Az elsődleges energiabusz feszültsége tág határok között változhat az akkumulátor töltöttségétől függően. Az áramkört úgy kell megtervezni, hogy az akkumulátor a lehető legnagyobb tartományban kihasználható legyen, azaz mindenkor lemerült állapotban (2,7 V) mindenkor 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 2,7 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. Az áramkörnek tehát 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 piacán 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 tűnnek 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. $V_I = 5$ V $V_O = 1.5$ V)	Minimum on-time	TPS64203	TPS64200, TPS64201
$V_I \approx V_O$ (e.g. $V_I = 3.8$ V $V_O = 3.3$ V)	Minimum off-time	TPS64202	TPS64200, TPS64201

1.táblázat: A TPS6420x áramkörök optimalizáltsága kapcsolói alapján

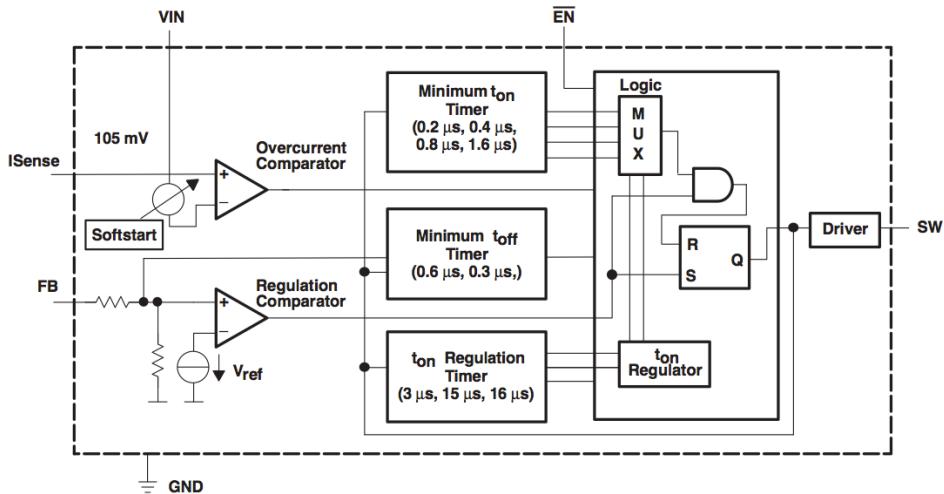
A TPS6420x áramkörök további fontos paraméterei olvashatók a 2. táblázatban.

	TPS64200	TPS64201	TPS64202	TPS64203
Vin (Min) (V)	1.8	1.8	1.8	1.8
Vin (Max) (V)	6.5	6.5	6.5	6.5
Vout (Min) (V)	1.2	1.2	1.2	1.2
Vout (Max) (V)	6.5	6.5	6.5	6.5
Iout (Max) (A)	3	3	3	3
Switching Frequency (Min) (kHz)	350	450	550	800
Switching Frequency (Max) (kHz)	350	450	550	800
Iq (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 (4.9. ábra).



4.9. ábra: A TPS64200 funkcionális blokkdiagramja

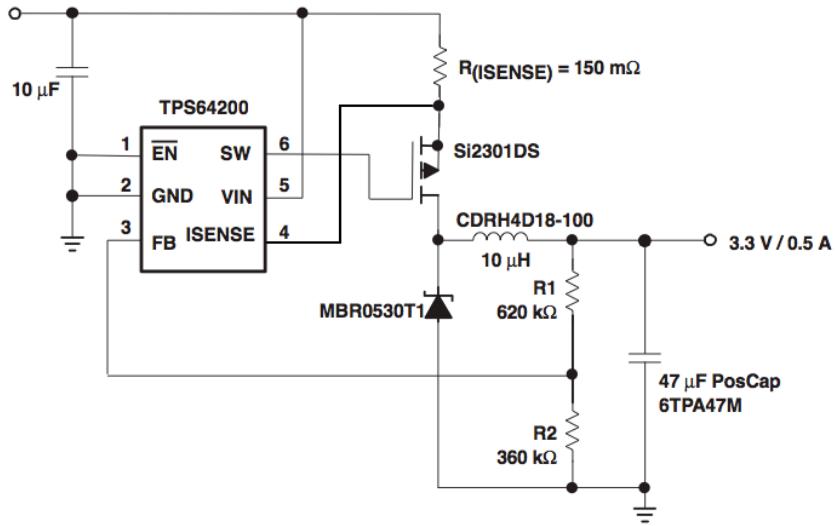
Az áramkör működése során az SW (Switch) kimenetére küldött jelekkel vezérli egy külső P csatornás MOSFET gate elektródáját úgy, hogy a FB (FeedBack) bemenetén mérhető feszültség lehetőleg a belső feszültség referenciával egyezzen meg. Ekkor helyesen szabályozott a kimenet, és a beállított értéknek megfelelő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

4.4.5 A feladathoz szükséges diszkrét áramköri 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 áramköri alkatrészek szükségesek.

A tápegység megépítése során egy „nulladik” verzió került megépítésre Texas Instruments javaslatai alapján[13], 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 (4.10. ábra).



4.10. 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 $10 \mu\text{F}$ 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 .

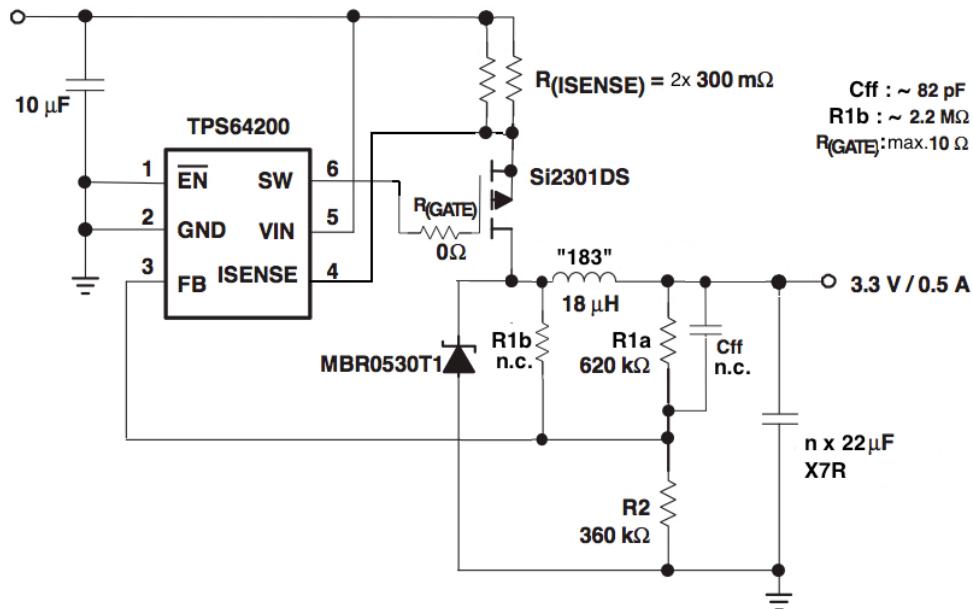
$$V_o = V_{fb} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.2.)$$

A R_1 értékét az előbbi szempontok figyelembe vételével $620 \text{ k}\Omega$, az R_2 értékét $360 \text{ k}\Omega$ értékűnek választottam a kapcsolás megépítése során. Az itt elfolytatott vezérlőáram ($\sim 4 \mu\text{A}$) nem jelent nagy veszteséget, de a stabilitás szempontjából megfelelő.

Ezen a verzión több átalakítást is kellett végezni, hogy akár az ūrben is használható legyen, például a kimeneti elektrolit kondenzátor az ūrben nem használható, ezért azt le kellett cserélni.

A TPS64200 használható a kimenetén elhelyezett kerámia kondenzátorokkal is, viszont az áramkör csak megfelelően kis ESR (Equivalent Series Resistance) értékkal rendelkező kondenzátorokkal működik megfelelően [13], ezért jó minőségű X7R dielektrikummal ellátott kondenzátorokkal építettem meg a kapcsolás első, akár ūrben is alkalmazható verzióját.

Az második összeállítás kapcsolási rajza látható az alábbi ábrán (4.11. 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.



4.11. ábra: A következő SDC verzió kapcsolási rajza

Ezek az alkatrészek a Cff kondenzátor és az $R_{(Gate)}$ valamint R1b jelzésű ellenállások. Az $R_{(Gate)}$ helyére beültethető max. $10\ \Omega$ 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 visszacsatolása 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.[13] 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 áramkori tervet használtam fel a következő verzió alapjául, amelyben célom a veszteségek és a méret további minimalizálása és a megbízhatóság növelése.

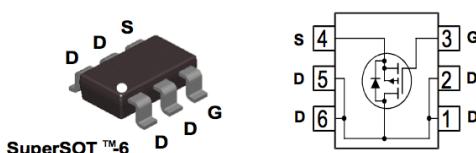
4.4.6 SDC V3.0

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.[13] 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 méretcsökkenés 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 feszültségtől, ezáltal változik a különböző szabályozatlan buszfeszültségeknek megfelelően és így pontos áramkorlátozásra nem alkalmas. Ezt a feladatot azonban az SDC elő kapcsolt limiter kapcsoló ellátja, így ha a kapcsoló FET legrosszabb helyzetben mérhető (maximális) csatornaellenállása nagyobb áramerősséggel 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 (4.12. ábra). A TPS64200 túláram védelme így használható a zárlati áramok esetén az alkatrészek védelmére. A túlfeszültség védelmi kapcsolóba nem szükséges túláram védelem beépítése, mivel a vezérlő a visszacsatoló feszültség rendellenes ($0\text{ V}-\text{hoz}$ közeli) értéke esetén automatikusan korlátozza az áramot. Az FDC642P_F085 teljes gate töltése tipikusan $6,9\text{ nC}$, amely egy megfelelően alacsony érték a jó átalakítási hatásfok érdekében.



4.12. ábra: Az FDC642P_F085 kapcsoló MOSFET

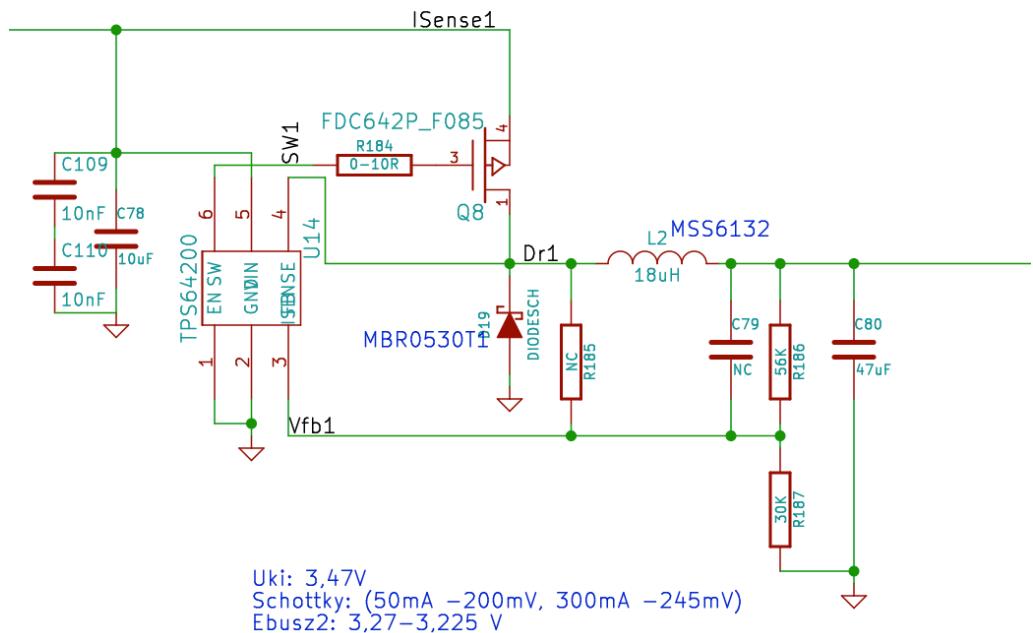
Az első verzióhoz képest a visszacsatoló ág is áttervezésre került. Az áramkör nagyobb feszültséget kell előállítson a védő Schottky diódán eső feszültség miatt, valamint javasolt az eddigi verzióhoz képest nagyobb vezérlőáram elfolytatása a visszacsatoló ágon a stabilabb működés miatt. Az új kiválasztott értékek: $R_1 = 56\text{ k}\Omega$, $R_2 = 30\text{ k}\Omega$. Így a szabályozott kimenet feszültsége $3,47\text{ V}$, amely a védő Schottky dióda után $3,33$ és $3,225\text{ V}$ közötti szabályozott buszfeszültséget jelent az áramfelvételtől függően.

A nagy áramerősségek elviselése érdekében a kiválasztott ferritmagos teljesítmény induktivitás a Coilcraft MSS6132-183ML (4.13. ábra). Ez az induktivitás viszonylag kis méretű ($6,1\times 6,1\times 3,2\text{ mm}$) kis tömegű ($\sim 0,35\text{ g}$) soros ellenállása maximum $118\text{ m}\Omega$, $10\%-os$ szaturációs árama $1,08\text{ A}$. Felszíni körülmények között a mag $1,55\text{ A RMS}$ áramerősség hatására melegszik fel 25°C -ról 45°C -ra.

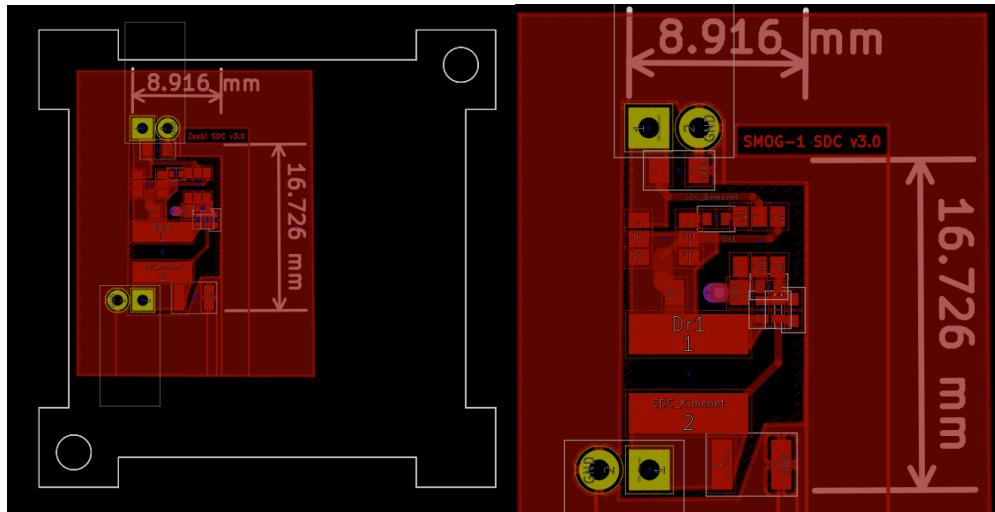


4.13. ábra: Az MSS6132 Induktivitások

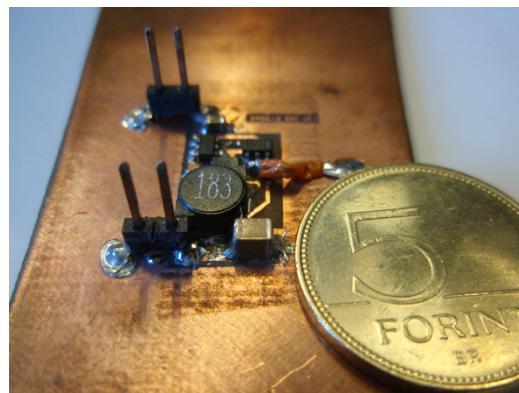
Az így újratervezett SDC mindössze $1,5 \text{ cm}^2$ hordozó felületet foglal el (4.15. ábra), robosztusabb, és a konverziós hatásfok is jelentősen megnövekedett az előző verziókhöz képest (Mellékletek, „SDC.pdf”).



4.14. ábra: Az SDC 3.0 kapcsolási rajza

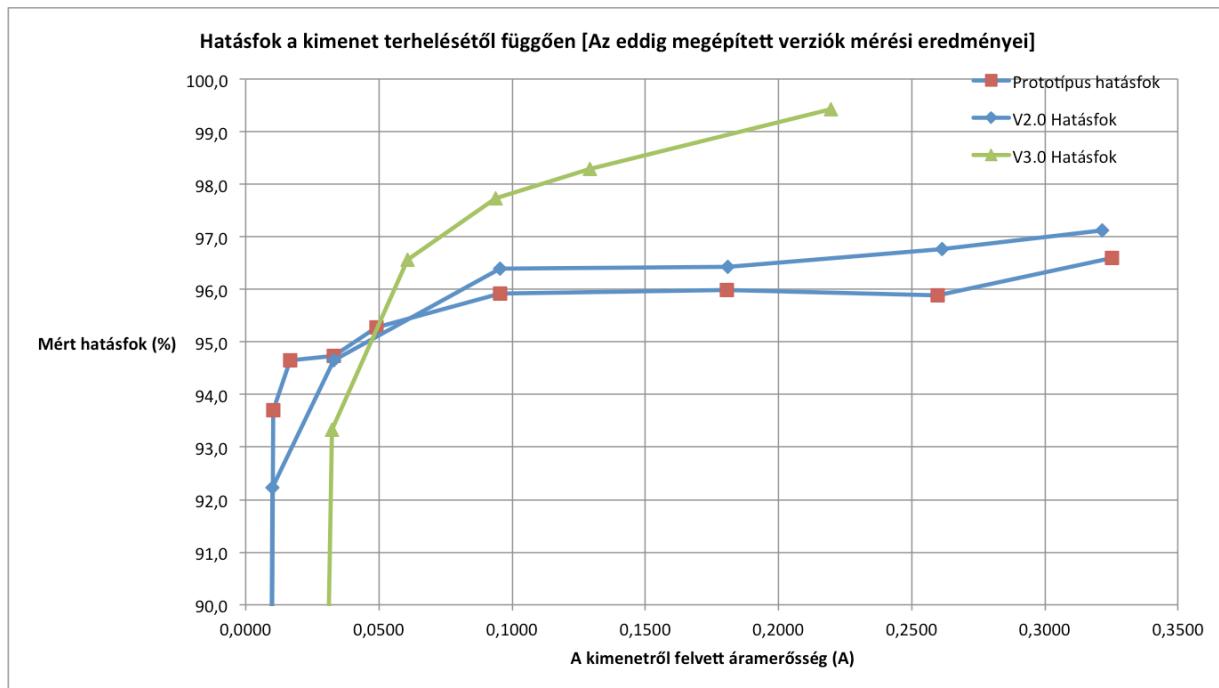


4.15. ábra: Az SDC 3.0 hordozóterve



4.16. ábra: Az elkészült SDC áramkör

Az elkészült tápegységeket műterhelő hálózatokkal teszteltem. A mérések során megvizsgáltam a helyes működést és az elért konverziós hatásfokot. A 3.0 verziótól az átlagolt mérési eredmények alapján az áttervezés sikeres volt, a tervezett áramfelvétel tartományban az áramkör 95 és 99,4 % közötti konverziós hatásfokkal üzemel (4.17. ábra).



4.17. 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 feszültségkülönbség is kicsi, a digitalizálás előtt további erősítésre szorul.

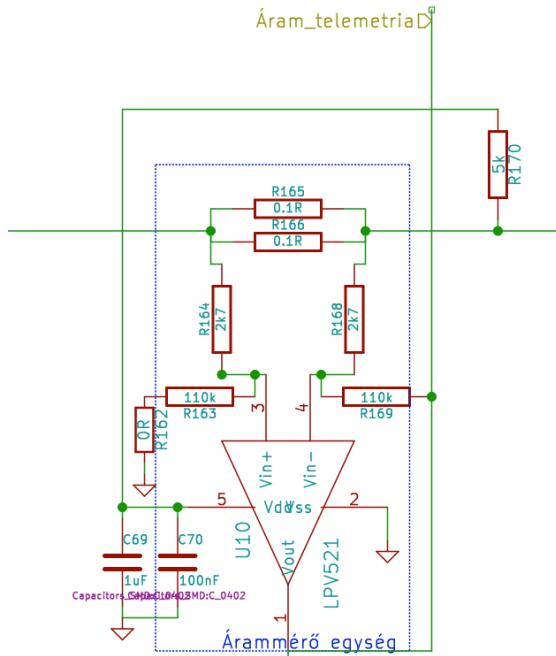
A piacra több integrált áramkör is található, amelyeket minimális számú diszkrét alkatrésszel kiegészítve könnyedén megvalósítható az árammérés. Ilyen áramkörök az oldallapokon is használt INA214, vagy az INA216.

Az INA214 minimális működési feszültsége 2,7 V, ami az oldallapokon nem jelent problémát, viszont kizárt 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 távonról nyeri (In+ pin). A későbbi tesztek során előjött az a probléma, hogy a chip nem izolálható megfelelően a mérendő távonaltól, 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 (4.18. ábra).



4.18. 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 sönt ellenállás így összesen 50 m Ω .

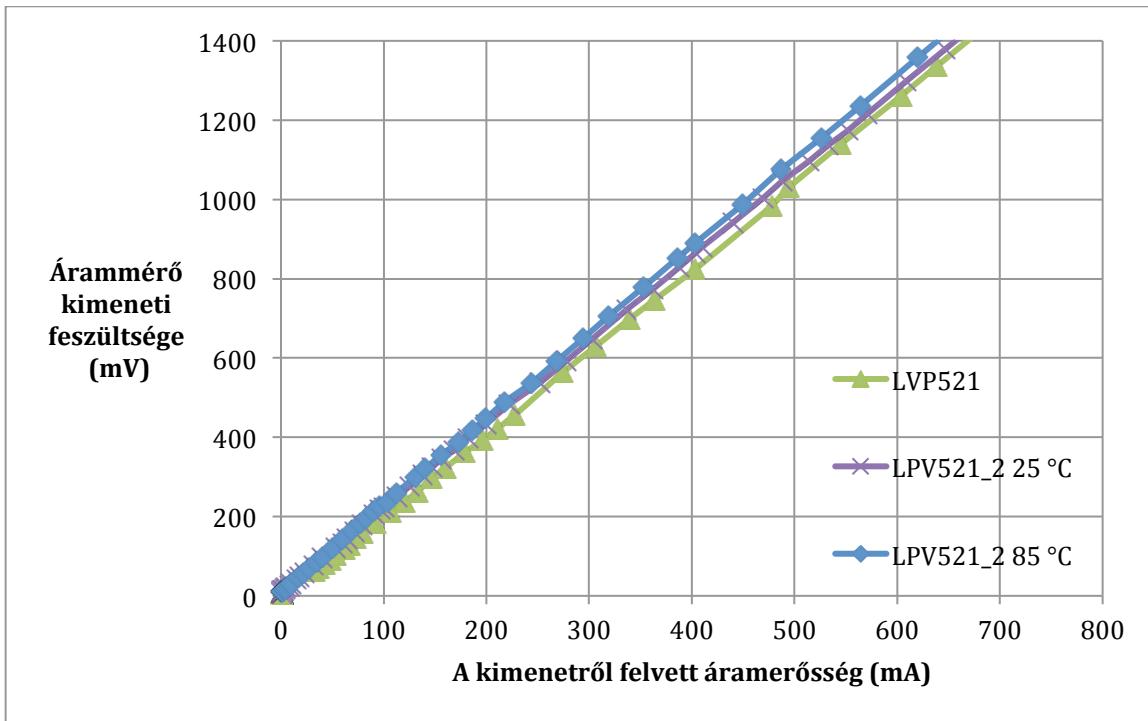
A híd felépítéséhez kiválasztott műveleti erősítő az LPV-521, amely 1,8 V-os tápfeszültségről is működőképes, de 5 V toleráns, kis (SC-70) tokozású és fogyasztása elhanyagolható. Az áramkör jól kompenzálja a bemeneten fellépő közös módusú feszültségeket, ezért ideális a fenti kapcsolás megvalósítására.[14]

A felépített mérőhíd nagy előnye a fix erősítésű integrált árammérőkkel 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 (4.19. ábra).

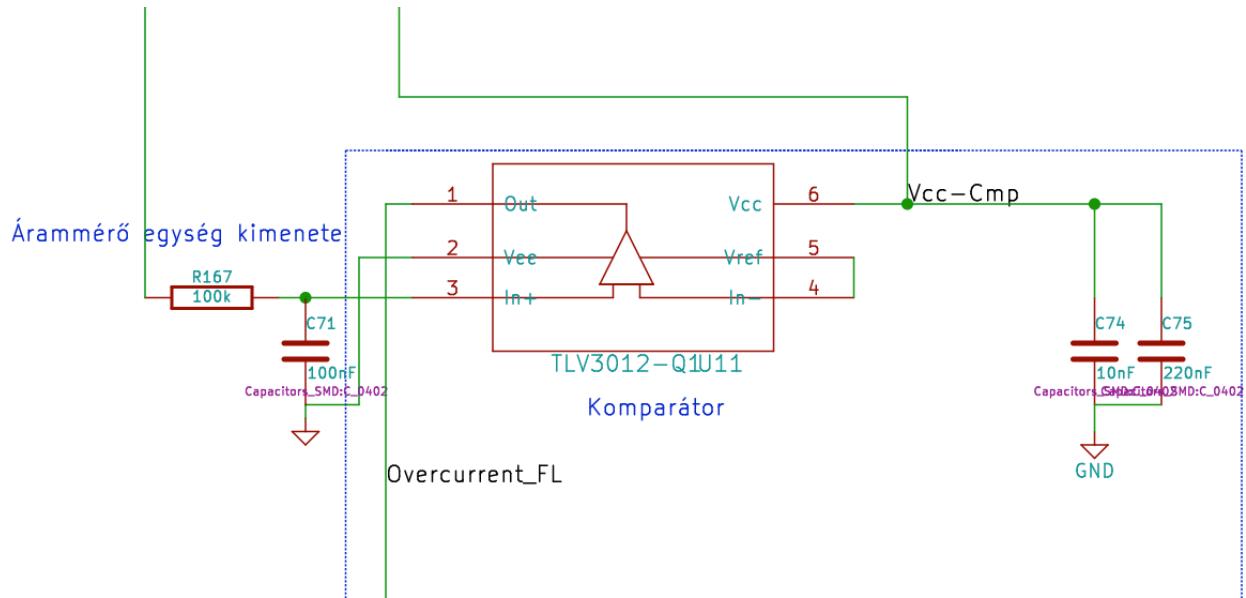


4.19. ábra: Az árammérő híd kimenete különböző hőmérsékletek és felépítések esetén

4.6 A túláram védelmi kapcsolók felépítése

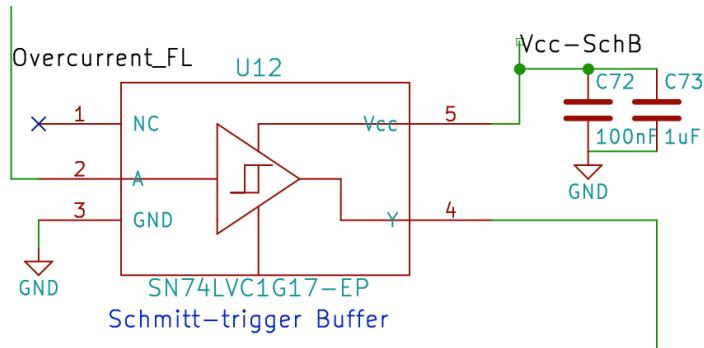
A túláram védelmi kapcsoló elsődleges funkciója az aktív túláram védelem megvalósítása, a zárlatok izolációja és az átfolyó áram mérése („Current Limiter” 4.1. ábra). Emellett a visszakapcsolhatóság, és a túláram jelzése is követelmény. A védelem aktív áramköreinek a szabályozatlan energiabusz nagy feszültségeit 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 árámmal 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 1242 mV-os feszültség referenciával hasonlítja össze a mérőhíd kimenetét. Amennyiben a kimeneten elhelyezett kondenzátor feszültsége a túláramból kifolyólag eléri az áramkör referencia feszültségét a komparátor a kimenetén jelzi a túláramot (OverCurrent Flag) (4.20. ábra).



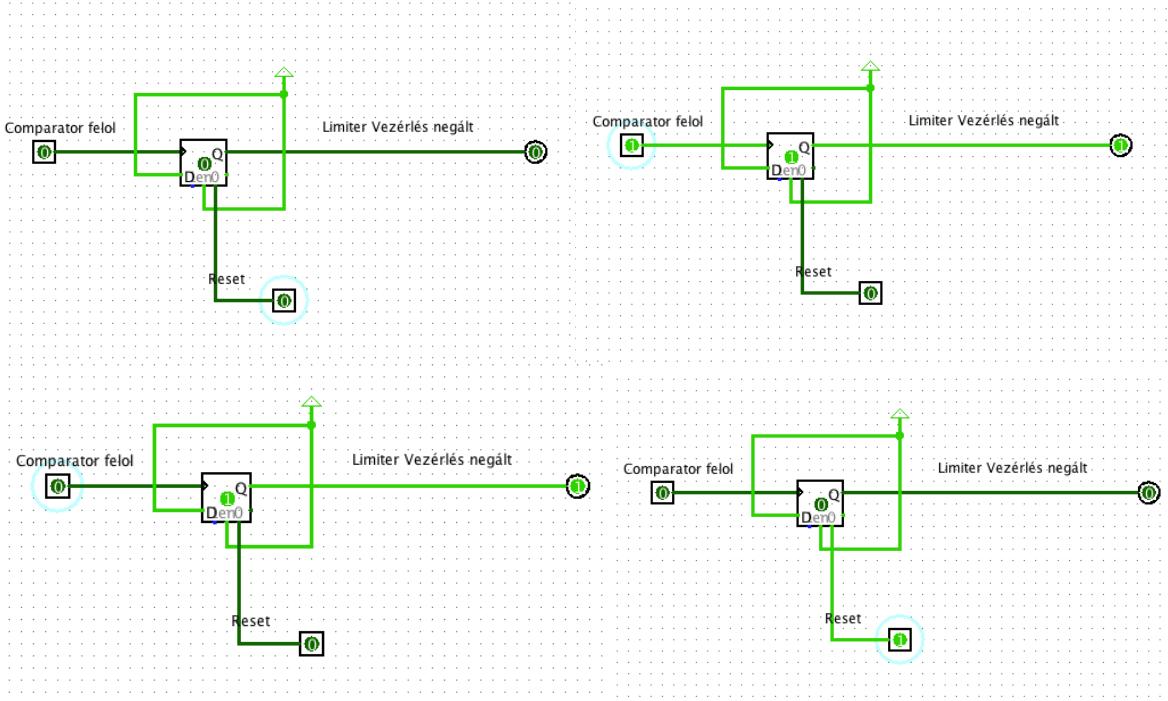
4.20. ábra: A túláram védelmi kapcsoló komparátor egysége

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 (4.21. ábra).

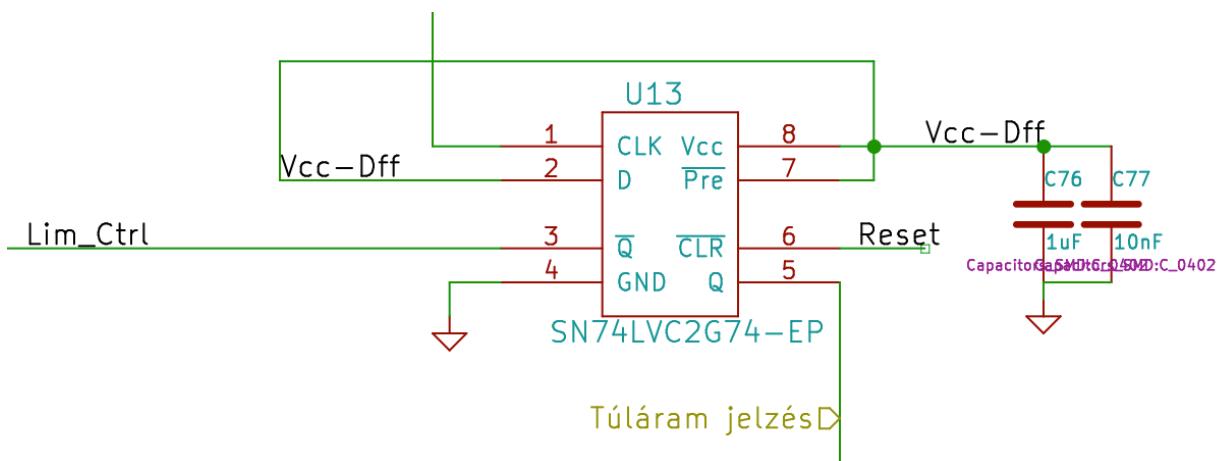


4.21. ábra: A jelútba beiktatott Schmitt-trigger buffer

A vezérlés kialakítása a Logisim nevű szoftver segítségével történt (4.22. 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 (4.23. ábra).



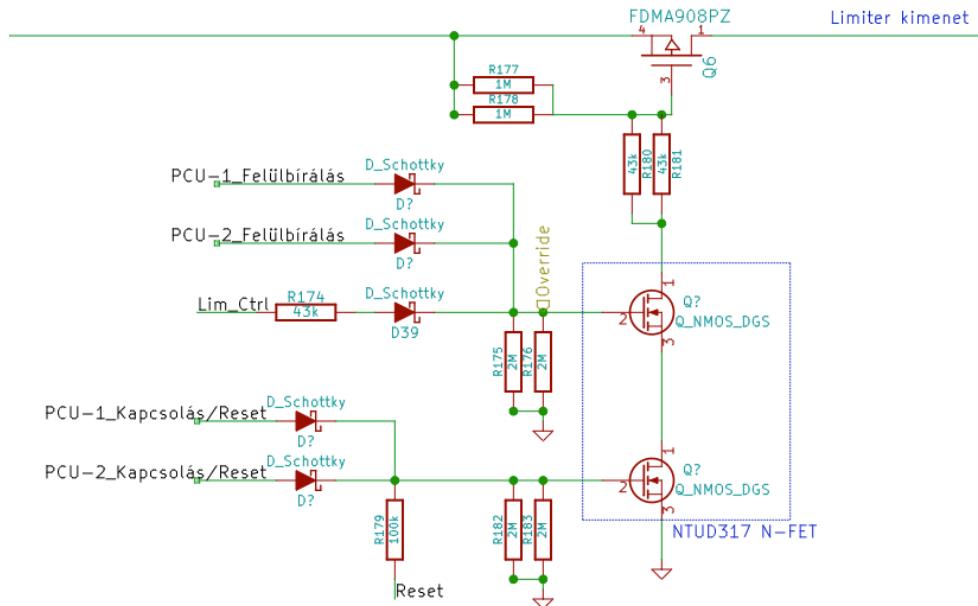
4.22. ábra: A Logisim szoftver segítségével kialakított digitális vezérlés állapotai



4.23. ábra: A kapcsoló vezérlő egysége

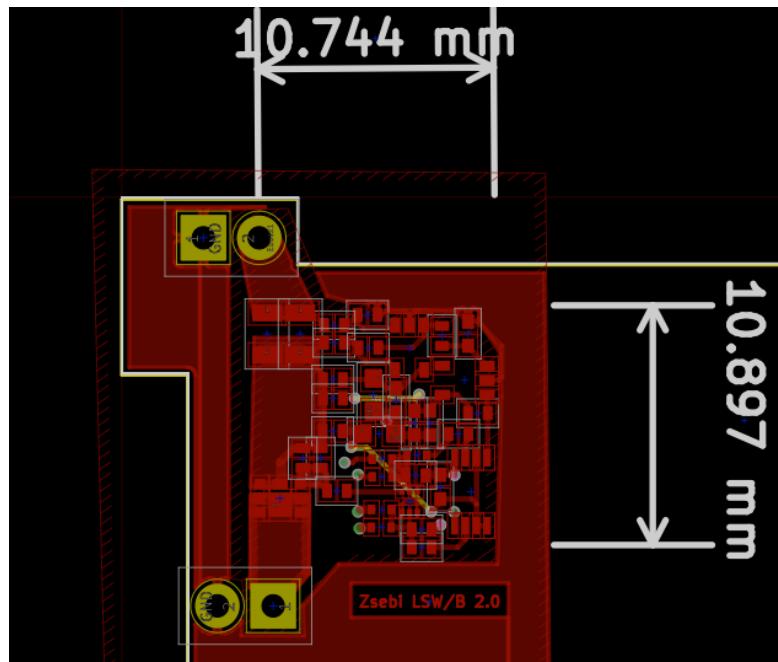
A D flipflop egy kis (maximum 28 mΩ) csatorna ellenállású FDMA908PZ típusú P csatornás Power MOSFET kapcsolását végzi egy közbeiktatott NTUD3170NZ típusú N csatornás vezérlő MOSFET segítségével.

A Power MOSFET vezérlése úgy lett kialakítva, hogy a PCU a limiter meghibásodása 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 (4.24. ábra).

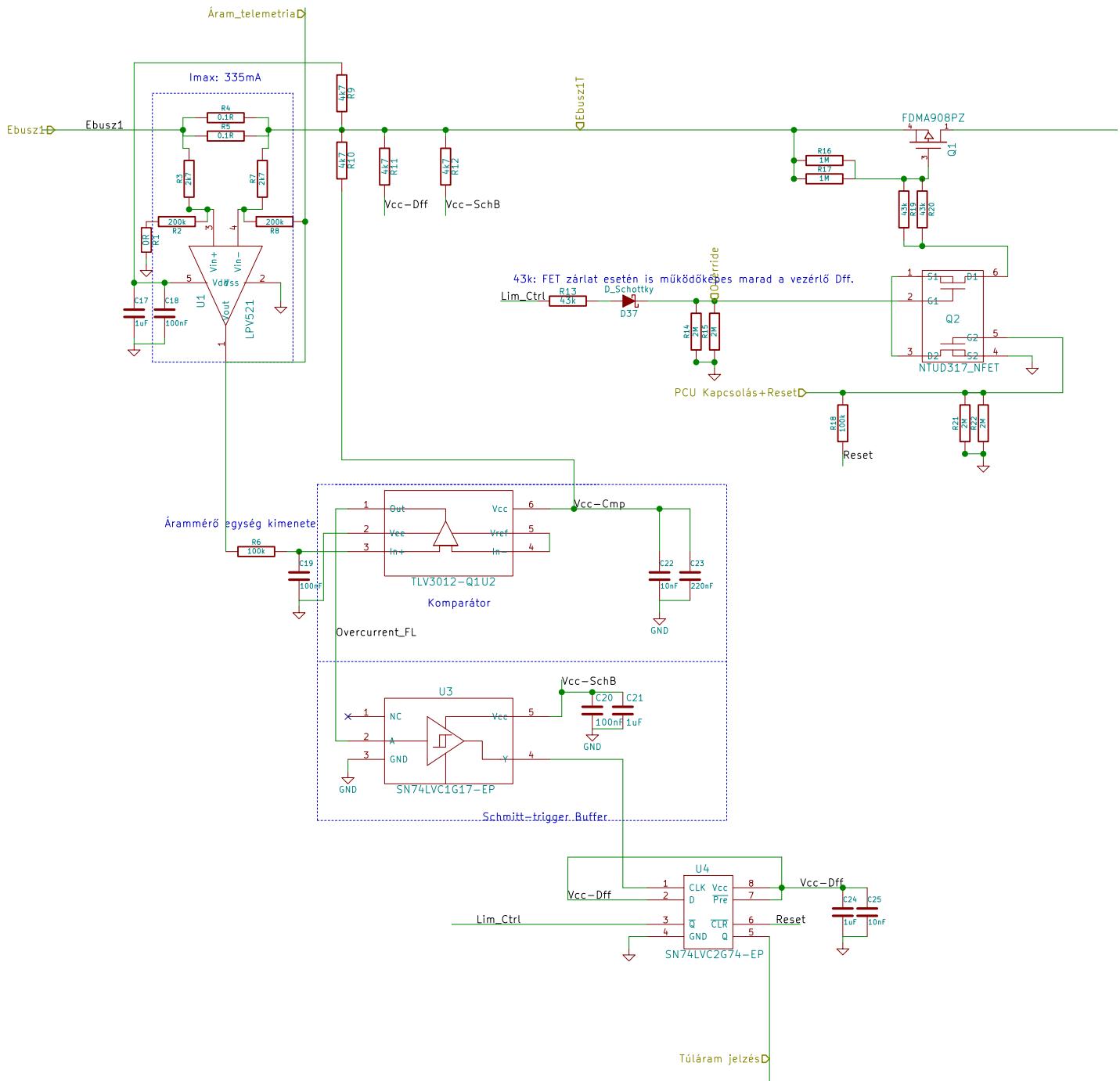


4.24. ábra: A túláram védelmi kapcsoló vezérléstechnikája

A túláram védelmi kapcsoló aktuális verziójának teljes kapcsolási rajza (4.26. ábra) (Mellékletek, „CurrentLimiter.pdf”), és a legfrissebb hordozó terv (4.25. ábra) látható az alábbi ábrákon, az áramkör minden összes 1 cm² hordozófelületet foglal el.



4.25. ábra: A kapcsoló aktív verziójának elkészült hordozóterve



4.26. ábra: A teljes túláram védelmi kapcsoló kapcsolási rajza

A tervezett áramkörök helyes működését oszcilloszkópos mérésekkel alaposan megvizsgáltam. Az oszcilloszkópos mérési eredmények egy Tektronix DPO 7254 típusú 4 csatornás oszcilloszkóppal készültek.

A teszt kapcsolásban a késleltető tag $R = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$ értékei mellett vizsgáltam az áramkör vezérlő jelfolyamát és a szétkapcsolás sebességét. Az alábbi ábrán látható az áramkör kapcsolási folyamata egy túláram esetén akkumulátorról táplált esetben (4.27. ábra). A sárga jel az áramkör kimenetén mérhető feszültség, a zöld az árammérő kimeneti feszültsége (áramerősség), a kék a komparátor kimenet, a lila a vezérlő D flipflop CLK bemenete. A késleltetés eltelte után (ami kb. 10 ms ezzel az RC taggal) a komparátor átvált és a limiter szétkapcsol kb. 1500 μs alatt. A mérési eredmények alapján az áramkör tökéletesen működik, és minden követelményt kielégít.



4.27. ábra: A túláram védelmi kapcsoló áramkör vezérlő jelfolyama túláram esetén oszcilloszkópon

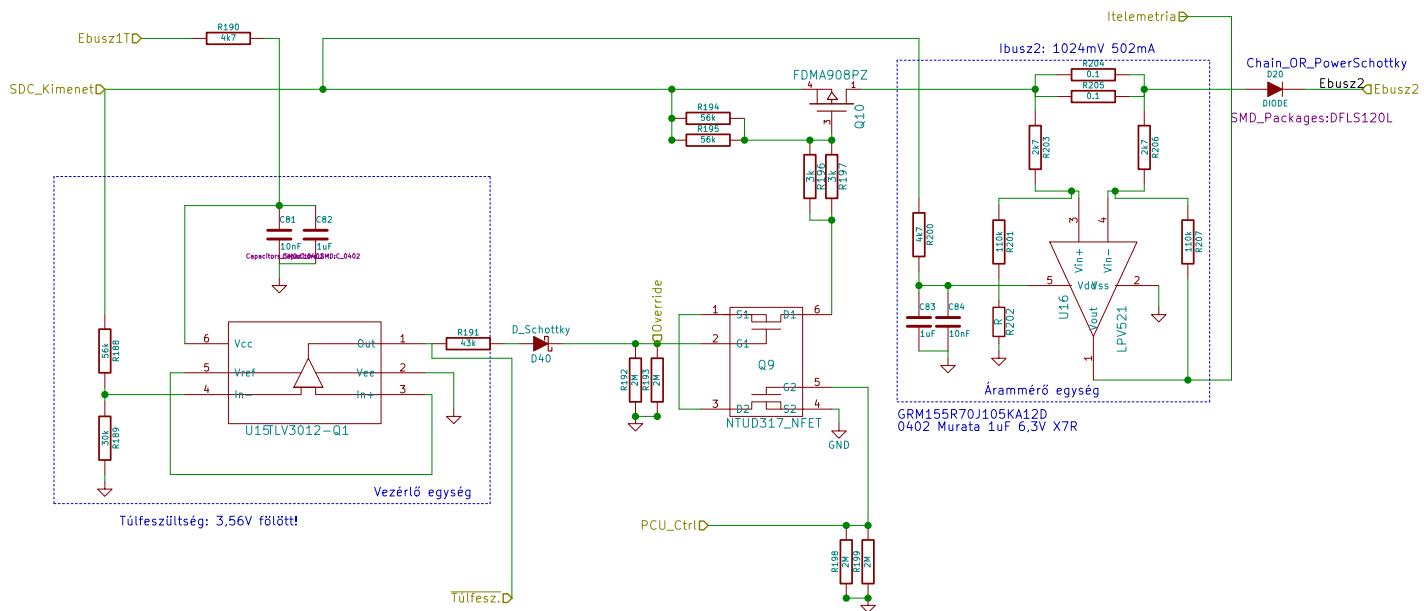
4.7 A túlfeszültség védelmi kapcsoló felépítése

A túlfeszültség védelmi kapcsolók az EPS rendszer túlfeszültség védelemét látják el elsődleges feladatként. Ezek a kapcsolók folyamatosan felügyelik a tápegységek működését. A kapcsoló szétkapcsol, amennyiben az SDC kimeneti feszültsége a megengedett maximális értéket meghaladja,

ezzel megvédi a szabályozott buszra csatlakozó eszközöket és jelzi a meghibásodást („Voltage Limiter” 4.1. ábra).

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 a túláram védelmi kapcsolóhoz hasonló módon (4.28. ábra) (Mellékletek, „VoltageLimiter.pdf”).

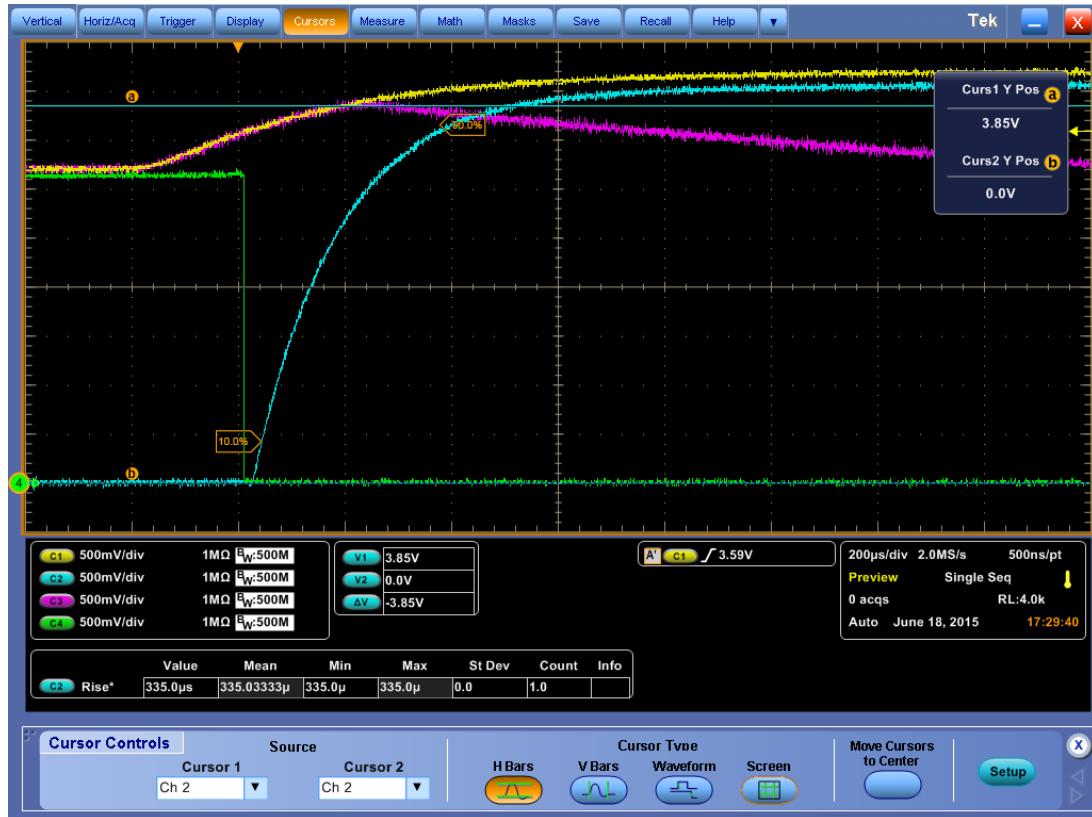


4.28. ábra: A túlfeszültség védelmi áramkör kapcsolási rajza

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 a tápegységek konverziós hatásfokának mérésére adódik lehetőség, és mérjük az aktív védelmi áramkörök fogyasztását is.

A túlfeszültség védelem 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 nagyobb kapcsolási sebesség érhető el, viszont a védelem készzenléti fogyasztása megnő.

A túlfeszültség korlát a feszültségesosztó értékeivel szabadon állítható, ezt a szükséges tartalék ráhagyásával 3,56 V értékűnek választottam meg. A fejlesztés során oszcilloszkóp segítségével vizsgáltam meg az áramkör működését (4.29. ábra).



4.29. ábra: A túlfeszültség védelmi 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. $1,5 \text{ cm}^2$ hordozófelületet foglal el (4.30. ábra).



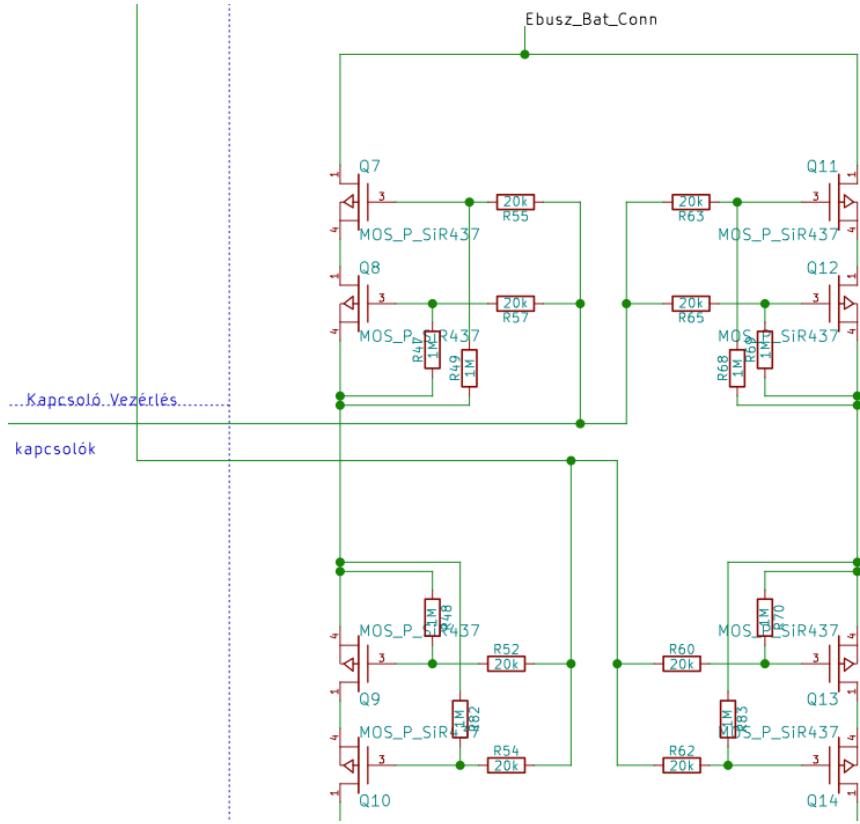
4.30. ábra: A túlfeszültség védelmi áramkör hordozóterve

4.8 Akkumulátor védelmi kapcsoló

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 a szabályozatlan energiabusz táplálását a napelem oldali áramkörök továbbra is ellátják („Protection” 4.1. ábra).

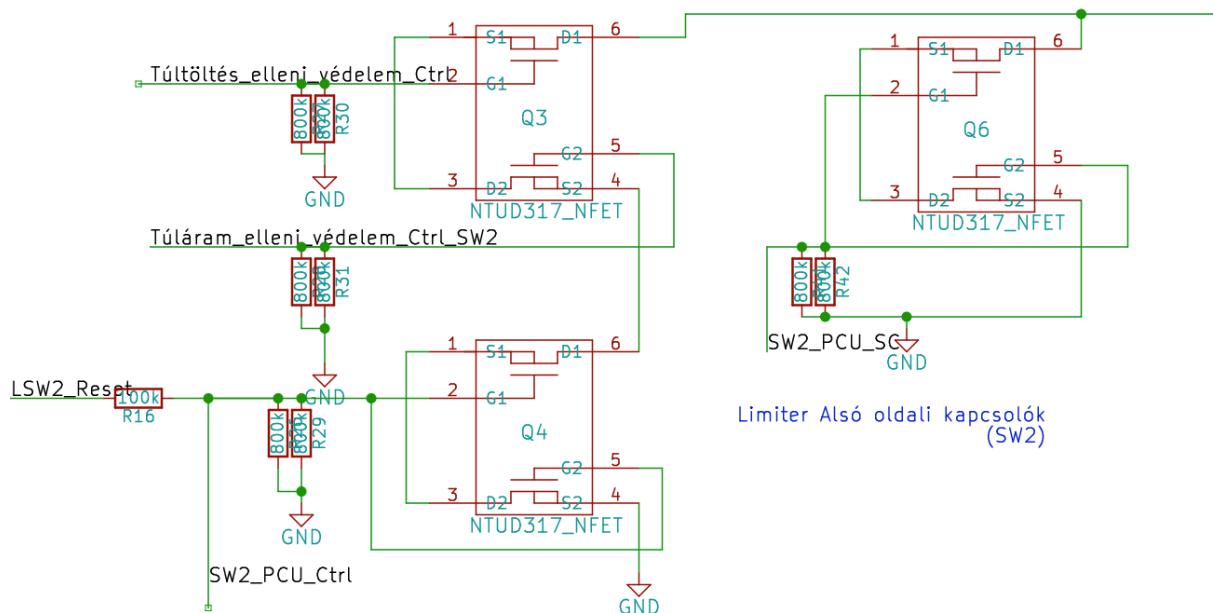
Ez a védelmi kapcsoló a műhold legbonyolultabb kapcsolója, az eddigi védelmek ismertetett kapcsolásairól épül fel további kiegészítésekkel. A kapcsoló automatikusan leválasztja az akkumulátort ha a töltő-, vagy merítő áram rendellenes értéket vesz fel, továbbá leválasztja a töltő ágat, ha az akkumulátor 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, 2×4 darab egymással szembe fordított P csatornás MOSFET segítségével (4.31. ábra). Így bármelyik tranzisztor rövidzárása vagy szakadása esetén is biztosított a kapcsoló helyes működése, vezérlőjel nélkül egyik irányba sem tud folyni az áram.



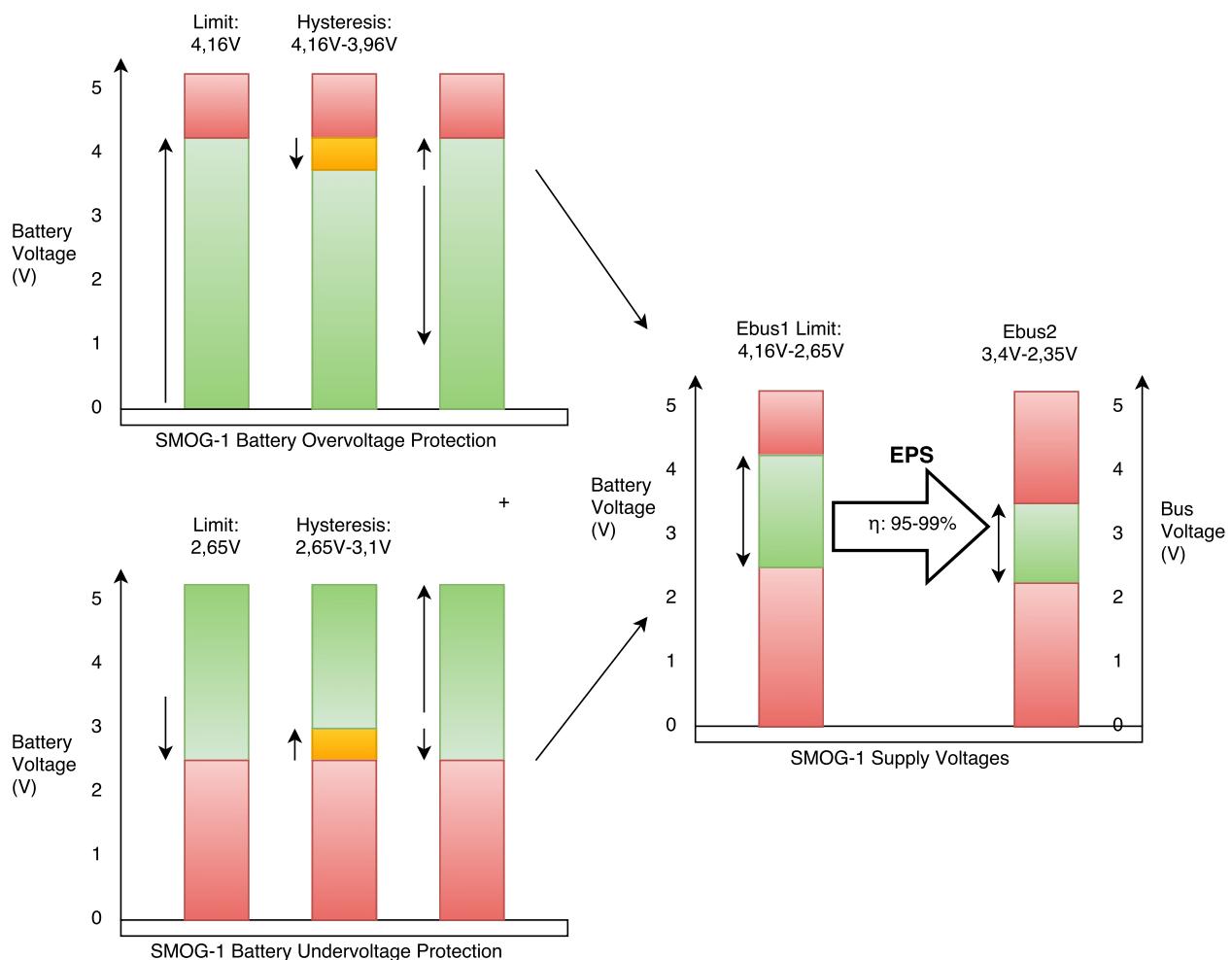
4.31. ábra: Az akkumulátor védelem teljesítmény tranzisztorainak bekötése

A védelmet vezérlő áramkörökhez egyenként tartozik egy N csatornás vezérlő FET, amelyeket sorba kapcsolva megvalósítható a helyes működéshez szükséges huzalozott „és” kapcsolat, amely vezérli a kapcsolóág tranzisztorait (4.32. 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.

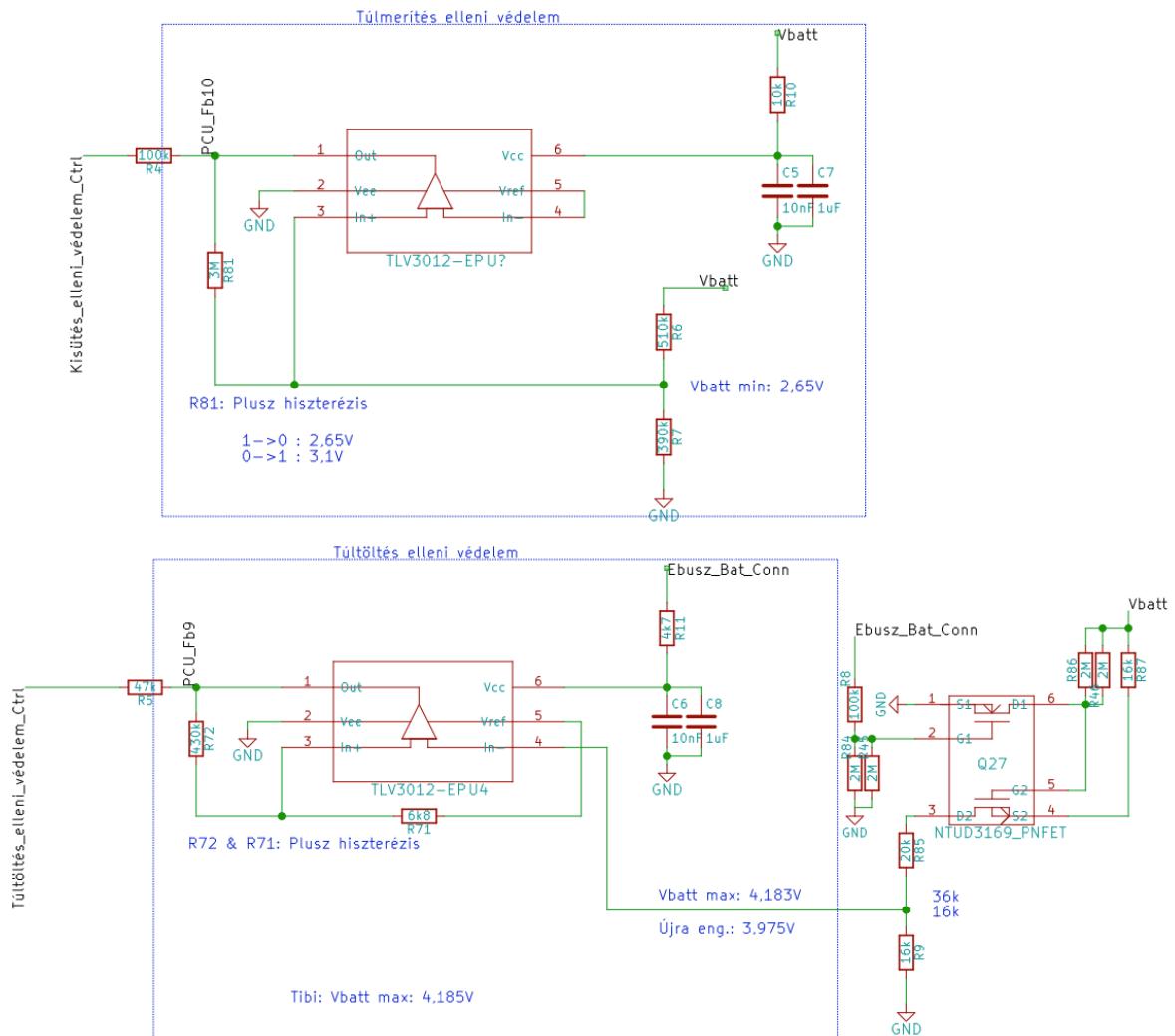


4.32. ábra: Az egyik vezérlőkör tranzisztorainak kapcsolása

A vezérlést az eddigi védelmi áramköröknel ismertetett modulok végzik, azzal a különbséggel, hogy a túltöltés-, és mélykisütés elleni védelem komparátorai a megfelelő hiszterézisekkel lettek ellátva a stabil működés érdekében (4.34. ábra). Az akkumulátor merítése 2,65 V feszültség alatt nincs engedélyezve, 3,1 V feletti feszültségre töltve meríthető ismét. A töltés 4,16 V feszültség fölött nincs engedélyezve, az akkumulátor 3,96 V feszültség alatt tölthető ismételten. Ezzel a kapcsolóval az akkumulátor számára kedvező határok között tartható a szabályozatlan busz feszültsége, és pontosan meghatározhatóak a rendszerben fellépő feszültségszintek (4.33. ábra).



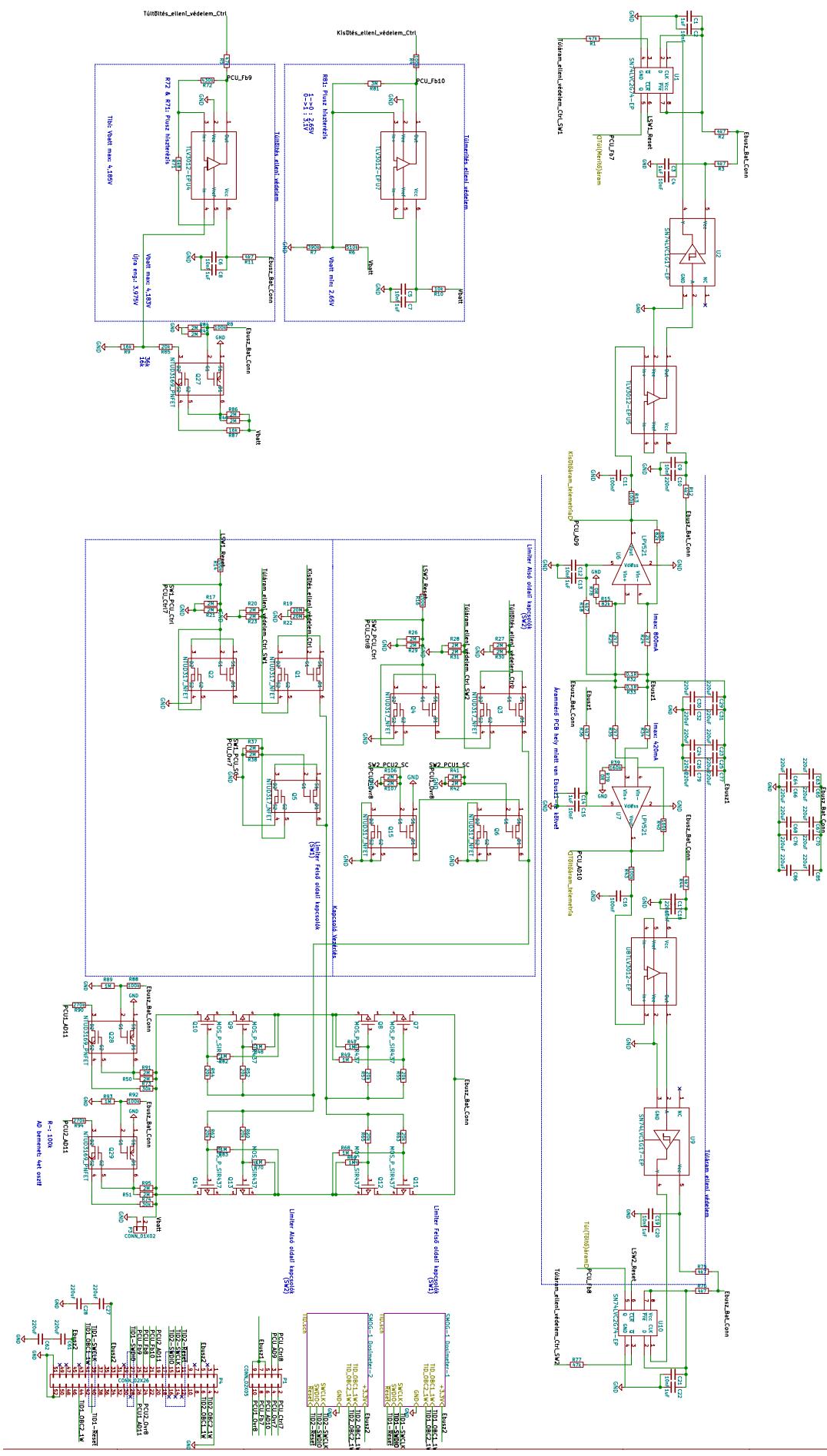
4.33. ábra: Az energiaellátó rendszer engedélyezett feszültségszintjei



4.34. ábra: A kapcsolót vezérlő komparátor áramkörök kapcsolásai

A műhold pályára állítása előtt határozatlan ideig az akkumulátor nem kap töltést, így a hosszú távú túlmerülés elkerülése érdekében beépítettem egy további biztonsági rendszert a kapcsolóba, amellyel a pályára állítás előtti időszakban minimalizálható az energiaellátó rendszer fogyasztása. A felbocsátás előtt az utolsó töltés alkalmával a PCU számára az OBC kiadja a „Bye-bye” parancsot, amelynek hatására a PCU lekapcsol minden alrendszerét az akkumulátorról, csak a túlmerítés védelem marad aktív. Ekkor a rendszer statikus fogyasztása egy minimális állapotba kerül, amelyben mindössze $7 \mu\text{A}$ körüli áramerősséggel „meríti” az akkumulátort, így akár évekig is eltárolható a műhold az akkumulátor lemerülése nélkül, majd a napsugárzás hatására feléledő PCU újra csatlakoztathatja azt a rendszerbuszhoz.

Így épül fel az akkumulátor védelem teljes kapcsolási rajza (4.35. ábra) (Mellékletek, „BatteryProtection.pdf”). A kapcsoló prototípusa elkészült, a mérési eredmények visszaigazolták annak helyes működését. Az egység hordozójának tervezéséről külön alfejezetben számolok be (4.10.2).



4.35. ábra: A megtervezett akkumulátor védelmi áramkör teljes kapcsolási rajza

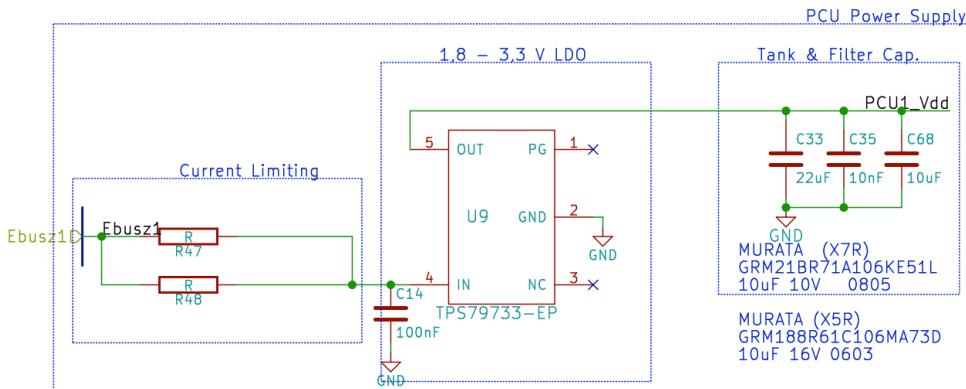
4.9 Az EPS vezérlése: A Power Control Unit

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 vezérelje 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 áramköröket minden össze egy RC tag segítségével kapcsoljuk a szabályozatlan energiabuszra. A PCU elé kapcsolt aktív védelem használata esetén további intelligens döntőegységek beépítésére volna szükség, amely fölöslegesen rontaná a rendszer megbízhatóságát. A mikrokontrollerek számára a megfelelő tápfeszültséget a kis fogyasztású és nagy megbízhatóságú TPS79733-EP típusú feszültség stabilizátorokkal biztosítottam. A PCU áramkörök számára tervezett energiaellátás kapcsolási rajza látható az alábbi ábrán (4.36. ábra).



4.36. 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 áramerősséggel 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 PIC24FJ128GA306 típusú mikrokontrollerét vettetem alapul (4.37. ábra). Ez a vezérlő kifejezetten kis fogyasztású akkumulátorról történő üzemre lett kifejlesztve, és teljesíti az energiaellátó rendszer vezérléséhez szükséges szigorú kritériumokat.[15] A chip QFN64 tokozású, amely kis mérete (9x9x1 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. A következő alfejezetekben azokat a kapcsolásokat mutatom be, amelyeket a mikrokontrollerekhez terveztem a PCU teljes felépítéséhez.

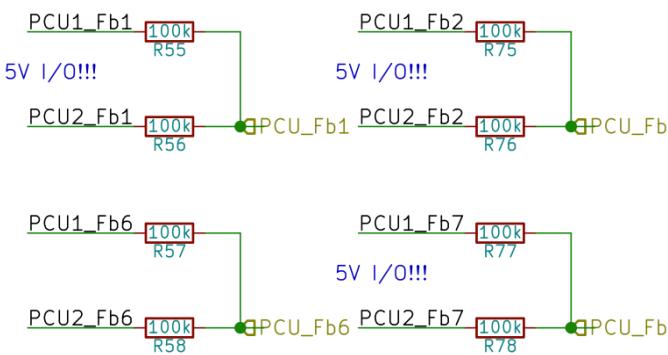


4.37. ábra: A kiválasztott mikrokontroller

4.9.2.1 I/O Vezérlés

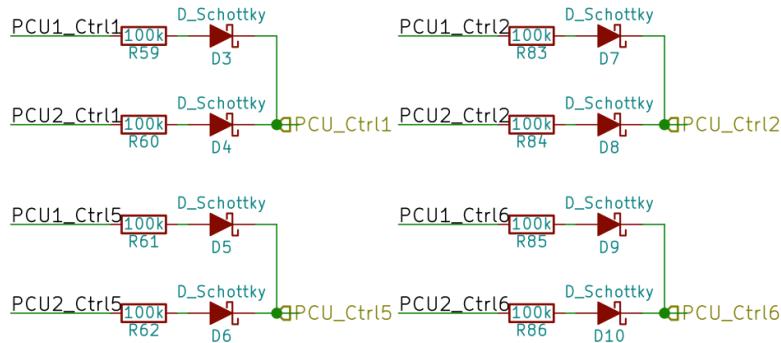
A digitális visszajelző jelek érzékelését és a vezérlő jelek előállítását a mikrokontroller I/O portjai segítségével lehet kivitelezni.

A EPS digitális visszajelző vonalait nagy soros ellenállásokkal lehet a mikrokontrollerekre vezetni, így ha valamely kontroller bemenete táp- vagy földzárlatos lesz a másik PCU segítségével korrekten lehet érzékelni a visszajelző vonal jelzését (4.38. ábra). Ilyen vonalak például a túláram vagy túlfeszültség hibajelek. A szabályozatlan buszról üzemelő védelmek visszajelző vonalainak feszültsége nagyobb is lehet, mint a kontrollerek tápfeszültsége, ezért ezek a vonalak a kontrollerek 5 V toleráns portjaira kerültek.



4.38. 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 (4.39. ábra).



4.39. ábra: A vezérlő kimenetek összegzése Schottky diódák segítségével

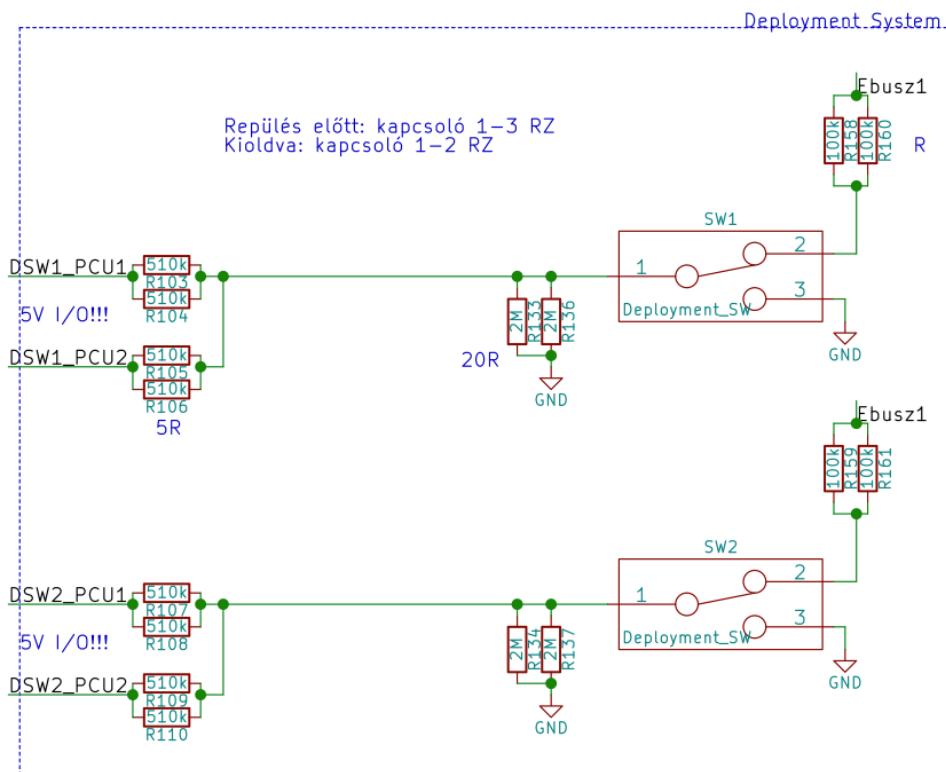
4.9.2.2 Aktiváló rendszer

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 kapcsolók segítségével, hogy a műhold elhagyta-e már a tároló egységet, majd az érzékelte 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”-t és ellenoldali párját a „D2F-L3-A1” típusú mikrokapcsolót használtam a gépész kollégák ajánlása alapján (4.40. ábra), az aktiváló rendszer kapcsolási rajza az alábbi ábrán látható (4.41. ábra).



4.40. ábra: A kiválasztott mikrokapcsoló



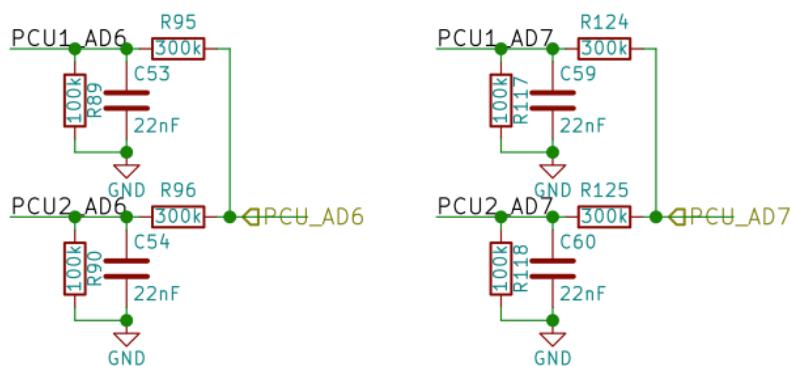
4.41. ábra: Az aktiváló rendszer kapcsolási rajza

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) földpotenciálra 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 közeli feszültségre kerül. Bármelyik kapcsoló nyitott állása esetén a PCU elindítja a felélesztési folyamatot, kezdi a tápegység elindítását és bekapsolja 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 kapcsoló hibásan jelezte a nyitott állapotot, és a műhold még mindig a tárolóban van.

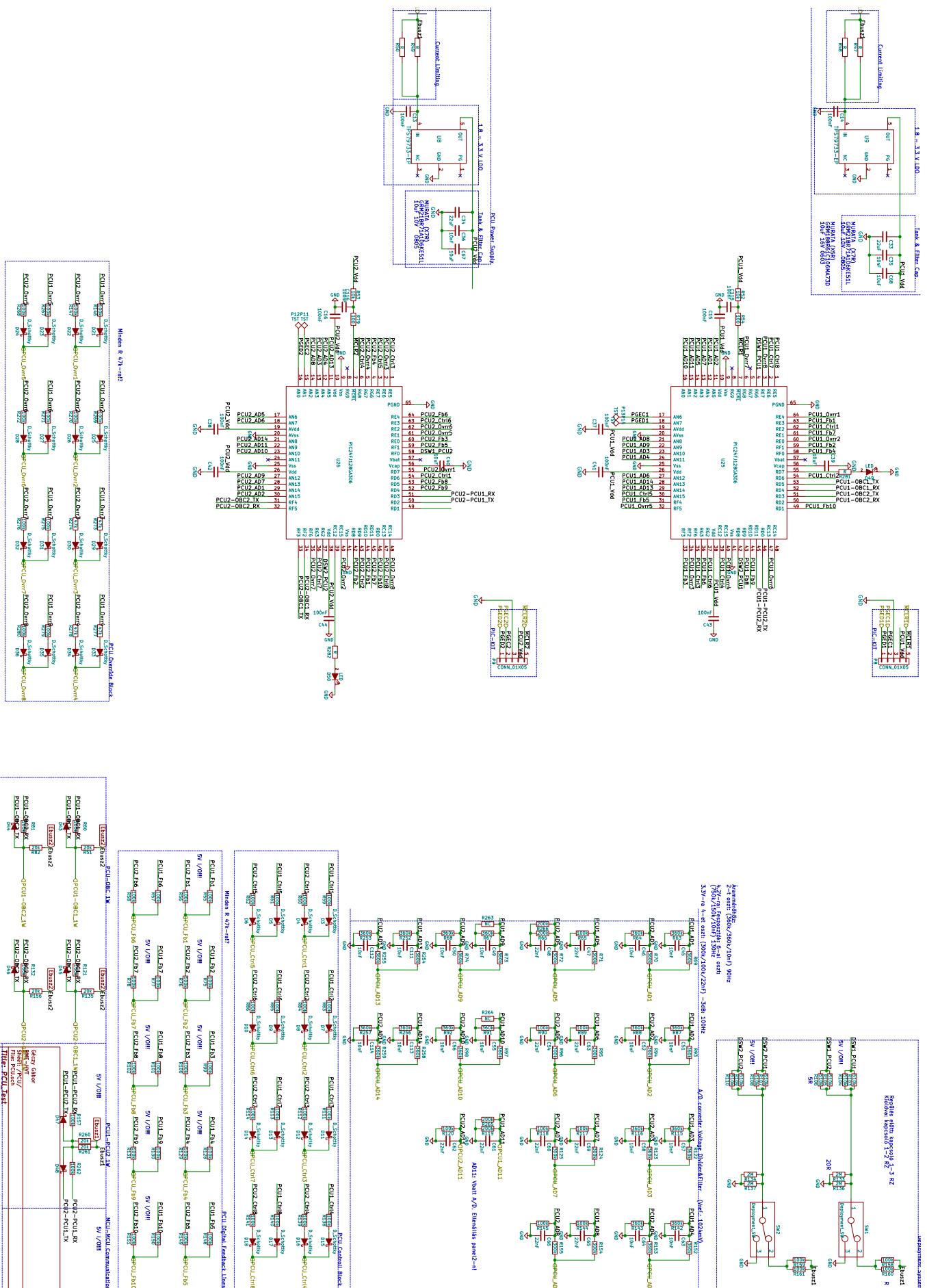
4.9.2.3 Feszültségek mérése, A/D konverzió

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 1250 mV referencia feszültséget felhasználva digitalizálják a mérendő feszültségeket, ami azt jelenti, hogy feszültségesztővel szükséges 1250 mV alá leosztani az ennél nagyobb feszültségű csatornákat.[15] A mérendő jeleket független alul áteresztő szűrőkön keresztül kapcsoltam a mikrokontrollerek A/D csatornáihoz, így nagy ellenálláson keresztül mérik szürten a nagy feszültségű jeleket is (4.42. ábra).



4.42. ábra: Az A/D csatornák kapcsolása

A fenti kapcsolásokkal és a mikrovezérlőkkel elkészítettem a PCU alrendszer teljes kapcsolási rajzát (4.43. ábra) (Mellékletek, „PCU.pdf”).



4.43. ábra: A teljes PCU alrendszer kapcsolási rajza

4.9.3 A PCU vezérlő szoftvere

A mikrovezérlőket működtető szoftvereket az MPLABX fejlesztő környezetben C nyelven készítettem el. A fejlesztés során figyelembe vettet a NASA JPL DOCID D-60411 dokumentumát és egyéb ajánlásokat, amelyek kifejezetten a megbízható kód készítésére irányulnak. [16][17]

A teljes szoftver részletes tárgyalása meghaladná ezen dolgozat kereteit, azonban a teljesség kedvéért vázlatosan ismertem a megtervezett szoftver működését.

A pályára állítás után a műholdat érő napfény hatására az elsődleges energiaellátó rendszer feszültség alá helyezi a szabályozatlan energiabuszt, elkezdenek felbootolni a PCU kontrollerek. A boot szakaszban a szoftver beállítja az oszcillátorokat, watchdog- és wakeup időzítőket, I/O portokat, A/D csatornákat, a többi mikrovezérlővel kommunikációs lehetőséget teremtő UART perifériákat, valamint reseteli az aktív védelmi áramköröket.

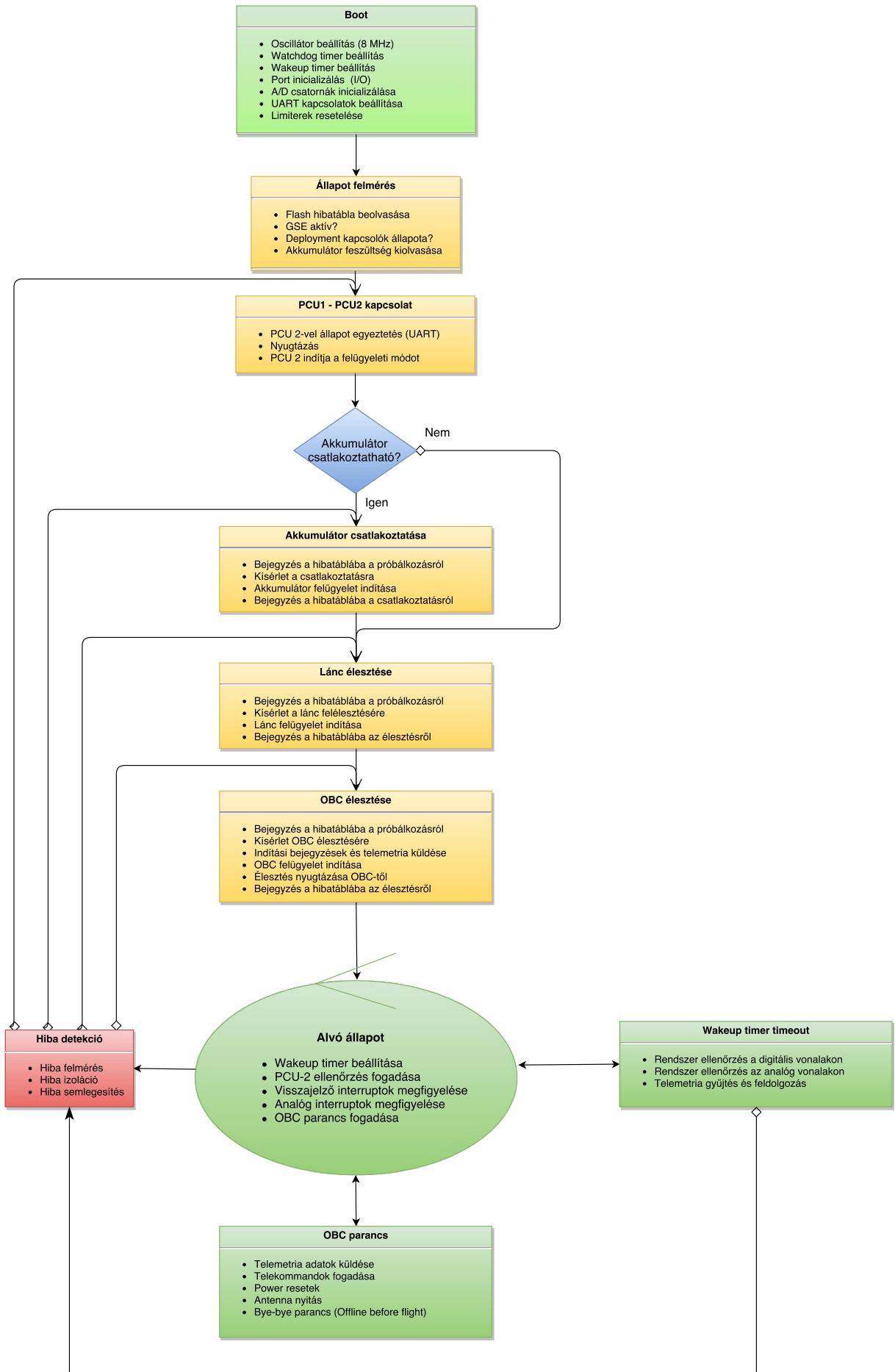
A boot szakasz befejezése után a kontrollerek elkezlik felmérni az energiaellátó rendszer állapotát, beolvassák a saját flash memóriájukból, hogy az eddigi élesztések során melyik rendszerek bizonyultak hibásnak, megvizsgálják az aktiváló kapcsolók állapotát, az akkumulátor feszültségét.

Mikor végeztek a vezérlők az állapot felméréssel megpróbálnak a redundáns párokkel kapcsolatot létesíteni. Hierarchia alapján PCU1 vezérli tovább az energiaellátó rendszert, azonban ha PCU2 ellenőrzésére nem válaszol az elsődleges vezérlő, akkor azt hibásnak tételezi fel a másodlagos rendszer, és a továbbiakban átveszi a vezérlést. PCU2 ettől a szakasztól kezdve időszakosan felébred, ellenőri az elsődleges vezérlőt, majd ha minden rendben talál akkor alacsony fogyasztású alvó állapotba helyezi magát a következő ellenőrzésig.

Az érvényes vezérlő ezek után megkíséri az teljes energiaellátó rendszer felélesztését egészen addig, amíg nem tud kapcsolatot teremteni valamelyik fedélzeti számítógéppel. Ha ez sikerült, átküldi az érvényes fedélzeti számítógép számára az indítási bejegyzéseket és a mért telemetria adatokat.

Innen től a PCU1 is egy alacsony fogyasztású alvó üzemmódba kerül, amelyben folyamatosan felügyeli az aktív védelmi áramkörök digitális visszajelző vonalait és az analóg csatornák feszültségeit. PCU2 ellenőrzésére felébred, állapotellenőrzést tart majd nyugtázza a rendszer állapotát és újra alvó állapotba megy. OBC parancsaira is felébred, elvégzi a kapott parancsot, majd ismét alvó állapotba megy. A saját beállított wakeup időzítőjének lejárata esetén szintén felébred, leellenőri az OBC és az EPS állapotát, majd ismét alvó állapotba kerül.

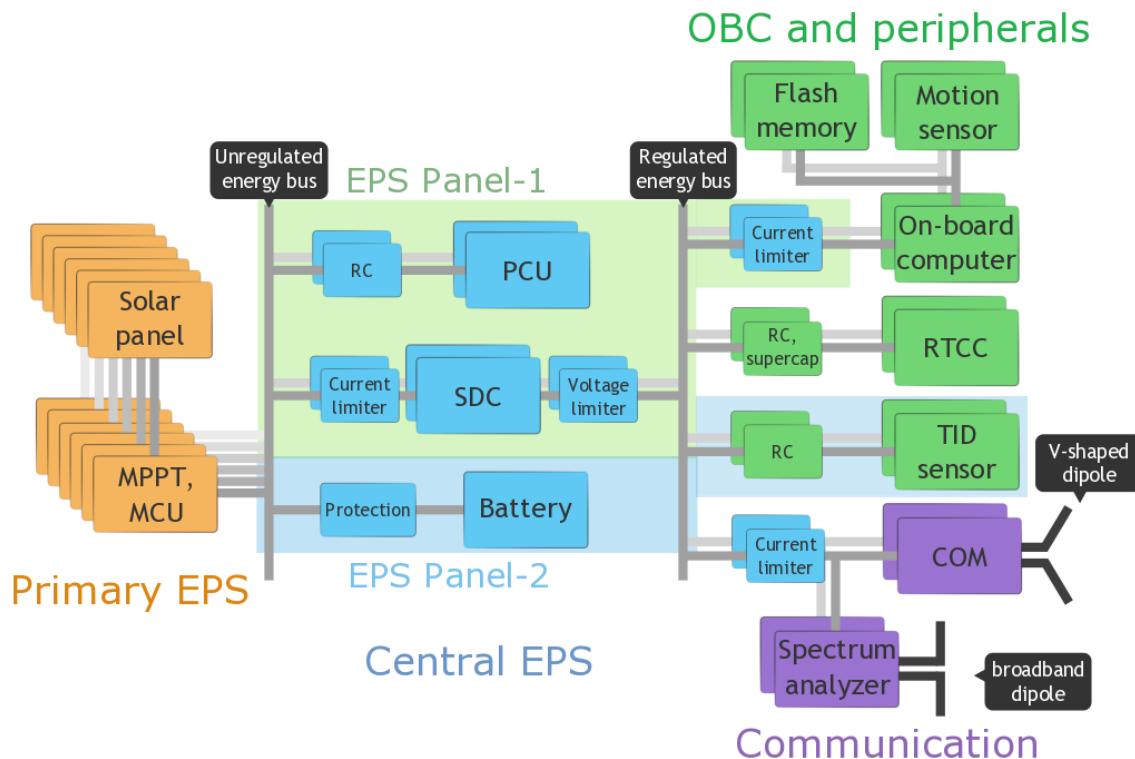
Amennyiben a működés során bármilyen hibát észlel a vezérlő minden elkövet annak érdekében, hogy a hibás alrendszeret izolálja és életben tartsa az energiaellátó rendszert.



4.44. ábra: A PCU vezérlő szofverének sematikus vázlata

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 akkumulátor védelmi kapcsolóján kívül az energiaellátó rendszer összes részegysége lehetőleg egy hordozóra kerüljön. Ez 4 db áram korlátozó-, 2 db túlfeszültség védő limiter kapcsoló, 2 db kapcsoló üzemű tápegység, és az energia ellátó rendszert vezérlő redundáns PCU egységek elhelyezését jelenti. Ez a panel a tervek szerint a legalsó belső hordozópanelre fog kerülni, amely tartalmazza az aktiváló rendszer mikrokapcsolóit is. Az akkumulátort a szabályozatlan buszra csatlakoztató kapcsoló jelentős mérete miatt már nem férne el az első panelra, ezért ez az egység egy másik belső hordozón foglal helyet (4.45. ábra).

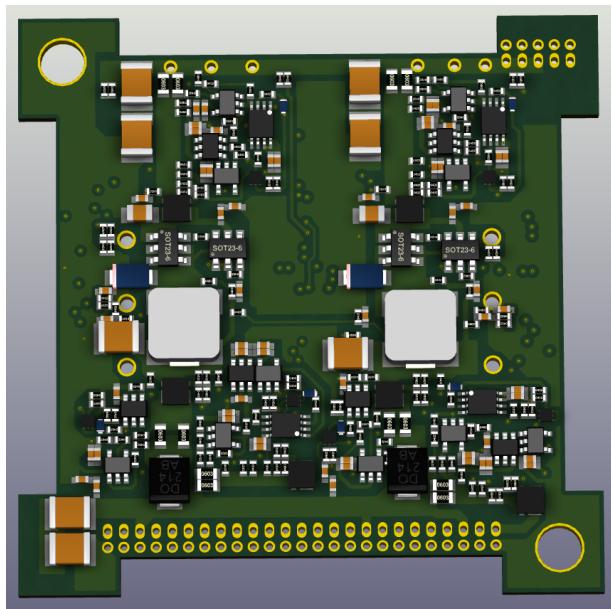


4.45. ábra: Az EPS egységek elhelyezkedése a hordozókon

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 buszfeszültség, a PCU-OBC kommunikációs vonalak, az OBC tápvonalak és a földvonalak továbbvezetése szükséges, az összes többi elfoglalt csatlakozási pont felszabadítható.

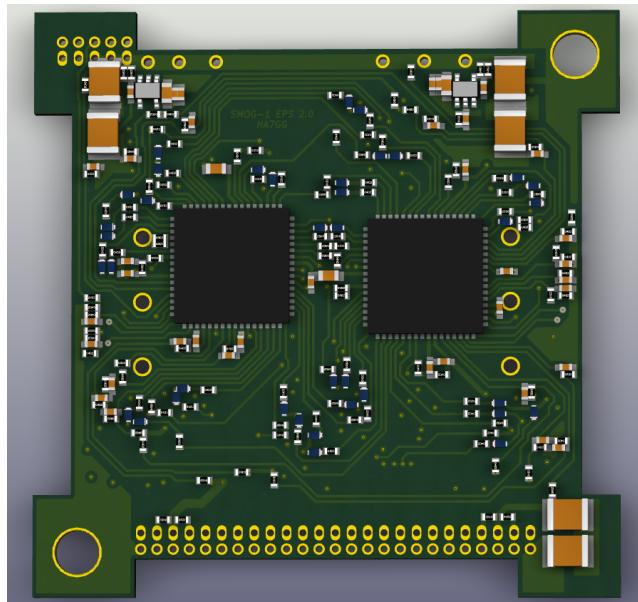
4.10.1 EPS Panel-1

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 (4.46. ábra).



4.46. 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 (4.47. ábra).



4.47. ábra: A vezérlő elektronikai alkatrészeket tartalmazó oldal

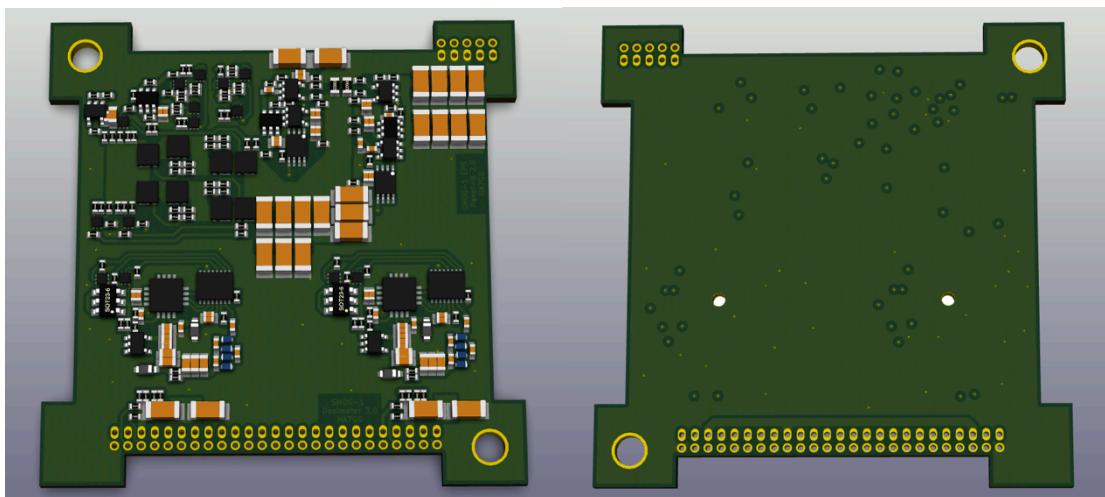
A panel 560 darab alkatrész összeköttetését valósítja meg 6 rajzolati rétegen, amelyből az első réteg a vezérlő elektronikákat tartalmazó réteg, majd 3 belső jelvezető réteg a buszcsatlakozóhoz való csatlakozás és az áthidalások megvalósításához, majd 1 teljes földréteg, amely valamelyest árnyékolja a tápegységek által generált elektronikus zavarjeleket is, végül az alsó teljesítményelektronikát tartalmazó réteg. A központi energiaellátó rendszer első paneljének nagy felbontású képei láthatóak az alábbi ábrákon, az alkatrészek beültetését kézi forrasztással végeztem el (4.48. ábra).



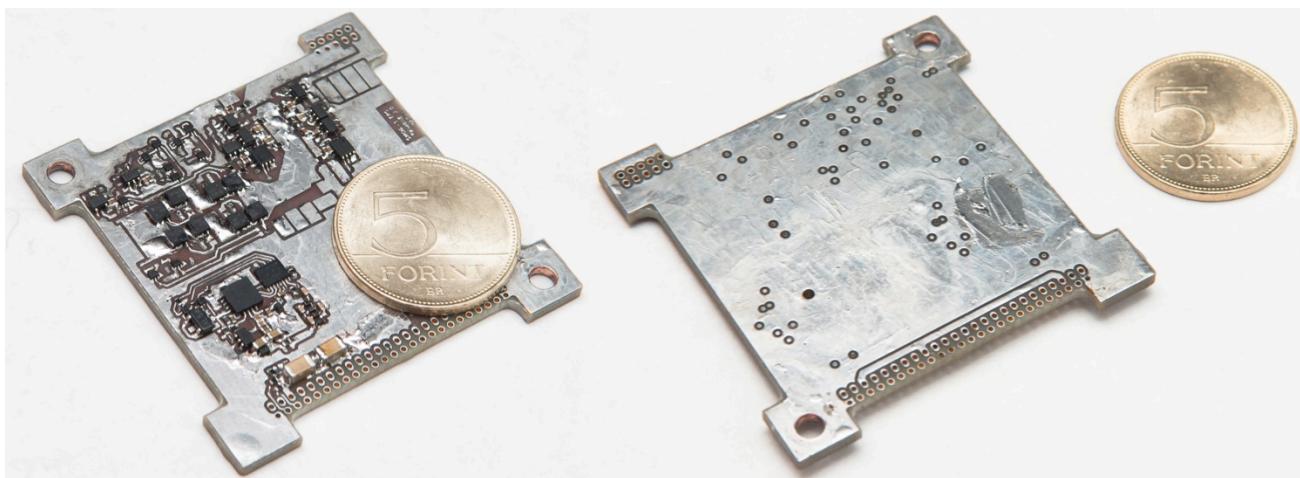
4.48. ábra: A központi energiaellátó rendszer első paneljének elkészült prototípusa

4.10.2 EPS Panel-2

Az akkumulátort a szabályozatlan buszra csatlakoztató védelemi áramkör mérete miatt már nem férne el az első panelra annak telítettsége miatt, ezért ez az egység egy másik belső hordozón fog helyet kapni. 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 teljes felületére. A panel mintegy 300 darab alkatrész összeköttetését valósítja meg 4 rajzolati rétegen, amelyből az első réteg az alkatrészeket tartalmazó réteg, majd 2 belső jelvezető réteg a buszcsatlakozóhoz való csatlakozás és az áthidalások megvalósításához, majd az alsó teljes földréteg az akkumulátor felőli oldalon (4.49. ábra).



4.49. ábra: A központi energiaellátó rendszer második paneljének látképe



4.50. ábra: A központi energiaellátó rendszer második paneljének képei a doziméter prototípusával

Ezen a panelen kapott helyet az általam tervezett 2 redundáns fedélzeti doziméter is, amelyek az energiaellátó rendszertől teljesen független egységek. Ezek a mérő rendszerek a szabályozott buszról kapják a tápfeszültséget és a fedélzeti számítógép számára továbbítják a mérési eredményeket. A doziméterek tervezéséről egy későbbi fejezetben számolok be (6.2).

5 Mérési eredmények

Ebben a fejezetben foglalom össze az energiaellátó rendszerre vonatkozó legfontosabb mérési eredményeket és a különböző fokozatokra jellemző paramétereket.

5.1 Fogyasztási paraméterek

A prototípus élesztése során lemértem minden részegység készenléti áramfelvételét egy $0,1 \mu\text{A}$ felbontású Agilent 34401A multiméter segítségével (3. táblázat). A táblázatba rendezett mérési eredmények a feltöltött akkumulátor által szolgáltatott 4,2 V feszültségű szabályozatlan busz feszültség mellett értendőek. A mérések hibája az adatlap alapján legrosszabb esetben is $\pm 2 \mu\text{A}$.

Alrendszer	Statikus áramfelvétel	Statikus fogyasztás
Túláram védelem (Offline)	$65 \mu\text{A}$	$0,27 \text{ mW}$
Túláram védelem (Online)	$75 \mu\text{A}$	$0,31 \text{ mW}$
SDC	$65 \mu\text{A}$	$0,27 \text{ mW}$
Akkumulátor védelem (Bye-bye)	$7,2 \mu\text{A}$	$0,03 \text{ mW}$
Akkumulátor védelem (Offline)	$185 \mu\text{A}$	$0,77 \text{ mW}$
Akkumulátor védelem (Online)	$320 \mu\text{A}$	$1,34 \text{ mW}$
Túlfeszültség védelem (Offline)	$48 \mu\text{A}$	$0,20 \text{ mW}$
Túlfeszültség védelem (Online)	$288 \mu\text{A}$	$1,21 \text{ mW}$
1 lánc aktív (akku védelem nélkül)	$640 \mu\text{A}$	$2,69 \text{ mW}$
Online EPS (1 lánc + akku védelem) (Normál működés)	$960 \mu\text{A}$	$4,03 \text{ mW}$
EPS Panel-1 Minden védelem Online (2 lánc)	$1040 \mu\text{A}$	$4,36 \text{ mW}$
EPS minden védelem Online (Hot Redundancy Mode)	$1360 \mu\text{A}$	$5,71 \text{ mW}$

3. táblázat: Az EPS alrendszereinek teljesítmény felvétele

A felsorolt eredmények tartalmazzák a PCU kontrollerek vezérlő áramait, azonban nem tartalmazzák a programkód végrehajtásához szükséges áramfelvételt, amely erősen függ a kontrollerek ébredési gyakoriságától és az ébrenlét hosszától. Az idő jelentős részét a kontrollerek alvó állapotban fogják tölteni amelyben áramfelvételük mindössze $10 \mu\text{A}$ körüli, ezért nehéz megbecsülni a PCU statikus fogyasztását amíg nem készül el a többi alrendszer, és nem körvonalazódik a szükséges ébredési gyakoriság. Az aktuális mérési eredmények alapján az egész központi energiaellátó rendszerre vonatkozó teljesítmény felvétel várhatóan 5 mW alatt lesz.

5.2 Tömeg paraméterek

A beültetett prototípus panelen tömeg méréseket végeztem egy AND HM-300 típusú 100 µg felbontású mérleg segítségével (5.1. ábra).



5.1. ábra: Tömeg mérés a beültetett panelnél

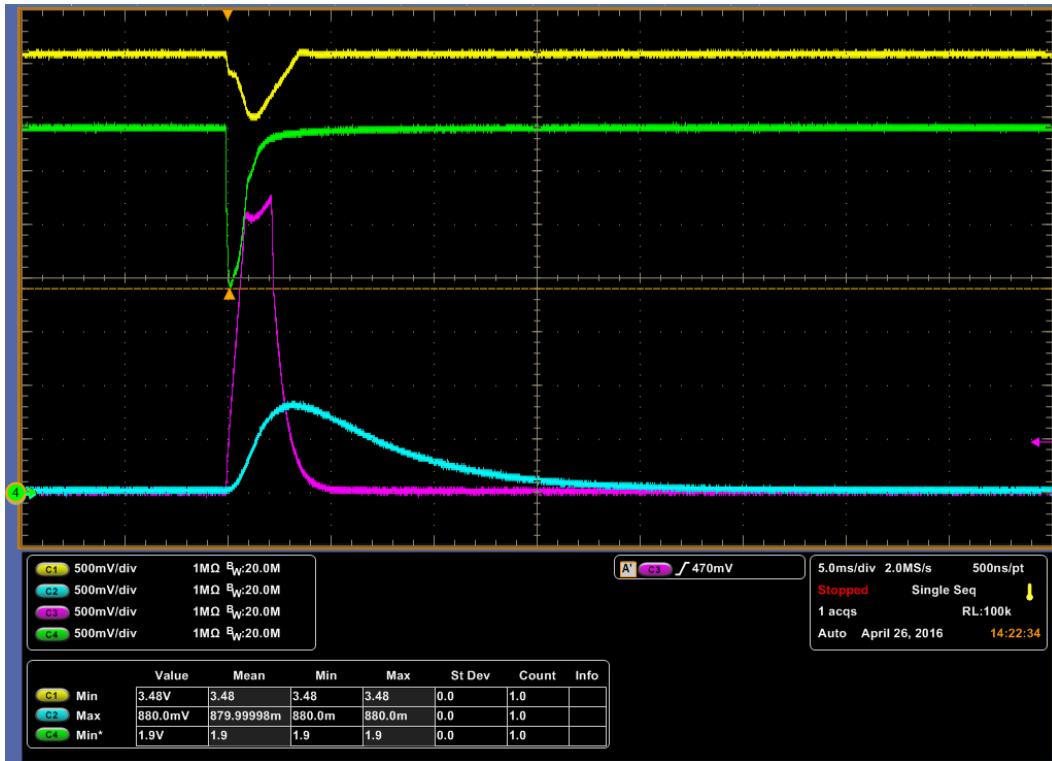
Az átlagolt mérési eredményeket az alábbi táblázat tartalmazza (4. táblázat).

Mért eszköz	Mért tömeg
EPS-1 Beültetett panel (rendszerbusz csatlakozó nélkül)	12,537 g
Üres ónozatlan panel	6,676 g
Deployment Switch	0,756 g
Rendszerbusz csatlakozó	0,298 g
Murata 1210 47 µF X7R kondenzátor	0,124 g

4. táblázat: Az EPS rendszerre vonatkozó tömeg értékek

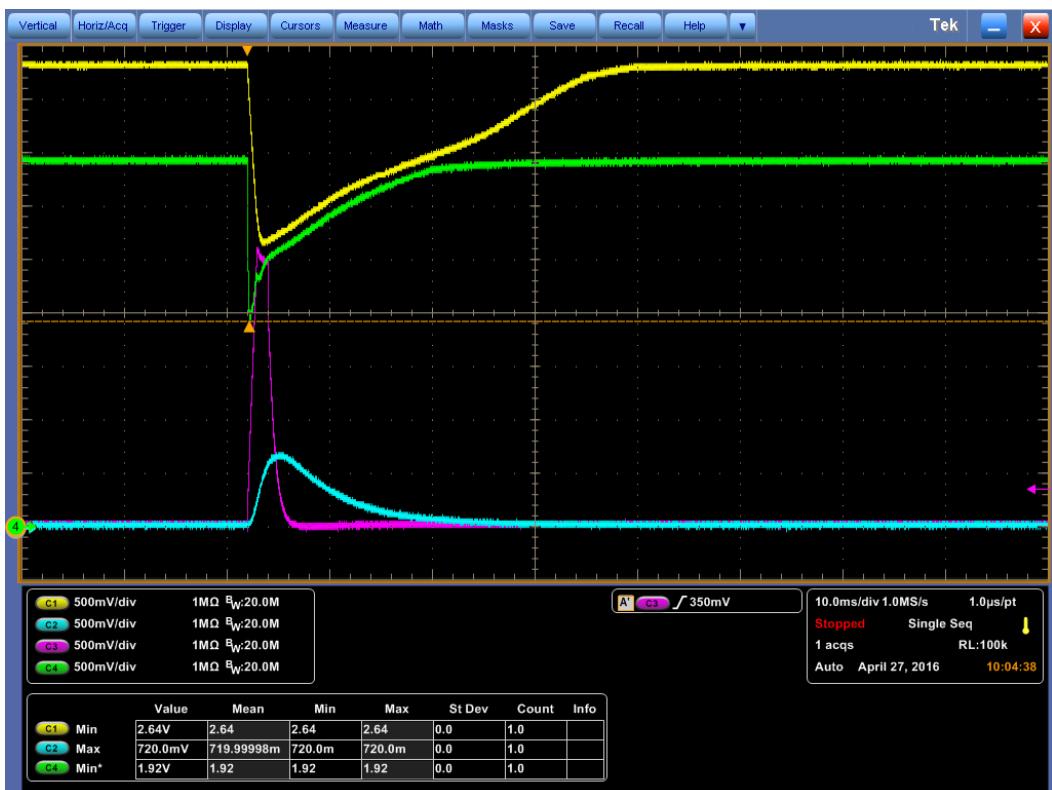
5.3 Túláram védelem mérési eredményei

Az energiaellátó rendszer túláram védelmeit úgy állítottam be, hogy a szabályozott buszra kapcsolódó védelmek késleltetése minimális legyen, a tápegységek előtti védelmek pedig a beállított késleltetés után aktiválódnak. Ezzel az elrendezéssel elérhető, hogy a szabályozott busz feszültsége visszaálljon a zárlatos rendszer leválasztása után. Az OBC védelmények jelalakjai láthatóak az alábbi ábrán egy zárlat esetén oszcilloszkópos felvételen (5.2. ábra). A **sárga** jel a szabályozatlan busz feszültsége, a **zöld** a szabályozott busz feszültsége, a **lila** az OBC védelem árammérőjének kimeneti jele (áramerősség), a **kék** a tápegység védelem árammérőjének késleltetett kimeneti jele (áramerősség). Látható, hogy a zárlat megszüntetéséhez a rendszernek kb. 1500 µs időre van szüksége, ezután visszaáll a szabályozott busz feszültsége.



5.2. ábra: A fedélzeti számítógép zárlatának jelalakjai

Minden fedélzeti védelem működését megvizsgáltam az akkumulátor szimulált meghibásodása esetén is. Ezeknél a teszteknél az akkumulátor le volt választva, és minden össze az elsődleges energiaellátó rendszer táplálta napelemről a rendszert, amely így is megállta a helyét (5.3. ábra).



5.3. ábra: A fedélzeti számítógép zárlatának jelalakjai napelemről táplált rendszer esetén

Az alábbi táblázat foglalja össze a túláram védelmek jellemző paramétereit (5. táblázat).

Statikus fogyasztás (Offline)	0,27 mW
Statikus fogyasztás (Online)	0,31 mW
Válaszidő (késleltetés nélkül)	~1500 µs
Áramkorlát (SDC Limiter)	335 mA
Áramkorlát (OBC Limiter)	81 mA
Áramkorlát (COM Limiter)	223 mA
Hordozó méret	~10×10 mm

5. táblázat: Az aktív túláram védelmek legfontosabb paraméterei

5.4 Túlfeszültség védelem mérési eredményei

A túlfeszültség védelmet a kapcsoló üzemű tápegység kapcsolótranzisztorának rövidre zárásával teszteltem. Ebben az esetben védelem nélkül a szabályozatlan busz feszültsége jutna ki a szabályozott energiabuszra, amely tönkretenné az erre érzékeny alrendszereket, úgy mint a kommunikációs rendszer vagy a fedélzeti számítógép kontrollerei. Az oszcilloszkópos mérések során rögzített mérési eredmény látható az alábbi ábrán (5.4. ábra). A **sárga** jel a szabályozatlan busz feszültsége, a **zöld** a szabályozott busz feszültsége, a szabályozott buszról műterhelő hálózattal 50 mA körüli áramerősséget vettem fel.



5.4. ábra: A túlfeszültség védelem működésének jelalakjai a tápegység kapcsoló tranzisztorának zárlata esetén

A felvételen látható, hogy a védelem aktiválódása alatt egy maximum 3,5 V amplitúdójú feszültség impulzus kerül ki a szabályozott buszra, amely kb. 200 μ s ideig áll fenn. Ezt a feszültséget károsodás nélkül elviseli minden eszköz a szabályozott buszon.

Az alábbi táblázat foglalja össze a túlfeszültség védelmekre vonatkozó legfontosabb paramétereket (6. táblázat).

Statikus fogyasztás (Offline)	0,20 mW
Statikus fogyasztás (Online)	1,21 mW
Válaszidő	\sim 200 μ s
Feszültség korlát	3,56 V
Hordozó méret	\sim 10 \times 10 mm

6. táblázat: A túlfeszültség védelem jellemző paraméterei

5.5 Akkumulátor védelem mérési eredményei

Az akkumulátor védelmet egy, a kiválasztott BP85A típusú Li-ion akkumulátorral teszteltem. A védelem legfontosabb paramétereit az alábbi táblázat foglalja össze (7. táblázat).

Statikus fogyasztás (Offline)	0,77 mW
Statikus fogyasztás (Online)	1,34 mW
Áramkorlát (töltő áram)	420 mA
Áramkorlát (kisütő áram)	800 mA
Túltöltés védelem feszültség korlátja	4,16 V
Túltöltés védelem deaktiválási feszültsége	3,95 V
Túlmerítés védelem feszültség korlátja	2,65 V
Túlmerítés védelem deaktiválási feszültsége	3,10 V
Hordozó méret	\sim 19 \times 30 mm

7. táblázat: Az akkumulátor védelem legfontosabb paraméterei

5.6 SDC mérési eredményei

Az SDC tápegységek működését az energiaellátó rendszerbe integráltan is alaposan megvizsgáltam, különös tekintettel a tranzisztors terhelésekre.

Az alábbi ábrán látható, hogy a tápegység hogyan viselkedik abban az esetben, ha az akkumulátort annak meghibásodása miatt le kellett választani, és a rendszer kizárolagosan csak napelemekről üzemel (5.5. ábra).

A tápegység terhelése a kommunikációs rendszer prototípusa, amely a beprogramozott periódusidő felét vétellel tölti, majd a másik felében maximális teljesítményű adásra kapcsol. A **sárga** jel a szabályozatlan busz feszültsége, a **zöld** a szabályozott busz feszültsége, a **lila** a COM védelem árammérőjének kimeneti jele (áramerősség), a **kék** a tápegység védelem árammérőjének kimeneti jele (áramerősség). Látható, hogy a tápegység szépen leköveti a tranzisztors terheléseket, az adó bekapcsolásakor átkapcsol híd üzemmódba és úgy folytatja a szabályozást, majd a kikapcsolásnál visszaáll a normál üzemmódra és az üzemi feszültséget biztosítja.



5.5. ábra: Az SDC tranzisztors terhelések vizsgálata oszcilloszkópon

A tápegység a mérési eredmények alapján minden kritériumnak eleget tett, a fedélzeti spektrum analizátor és a kommunikációs rendszer üzemi frekvencia tartományában nem kimutatható zavaró hatás. A tápegység főbb paramétereit tartalmazza az alábbi táblázat (8. táblázat).

Statikus terheletlen fogyasztás	0,27 mW
Névleges kimeneti feszültség	3,47 V
Maximális bemeneti feszültség	6,50 V
Minimális üzemi feszültség	1,70 V
Maximális hatásfok	99,4 %
Túláram áramkorlát	min. 900 mA
Hordozó méret	~9×17 mm

8. táblázat: Az SDC tápegység legjelentősebb paraméterei

6 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 elektronikáihoz tartoznak.

6.1 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 időbélyeggel 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. 30 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.

6.1.1 RTCC áramkör

Az RTCC egység megépítéséhez a svájci Microcrystal cég RV-3049-C3 típusú kis fogyasztású integrált áramkörét használtam (6.1. ábra), amely minden szempontból a legoptimálisabb választás.

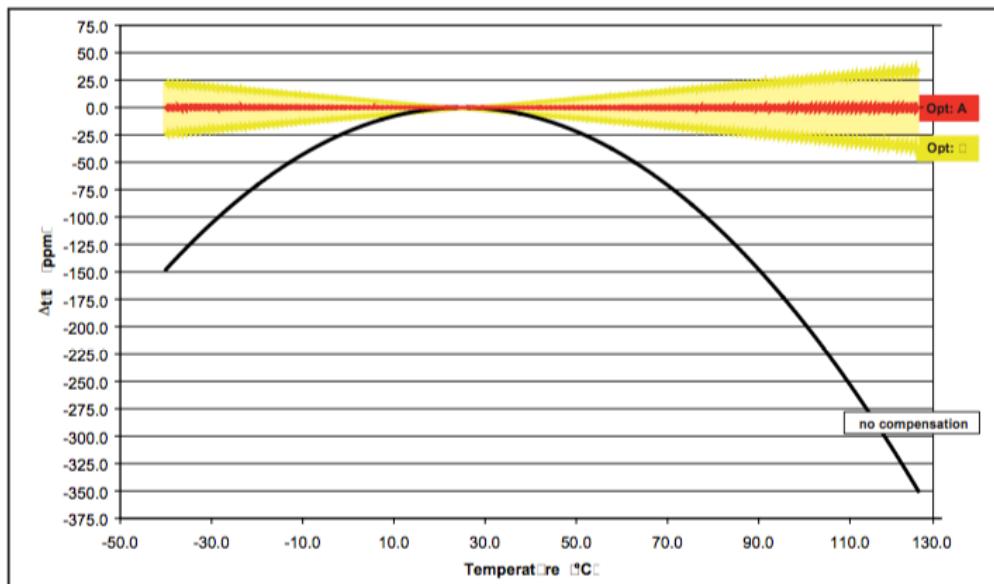
Az chip tartalmaz egy integrált 32,768 kHz frekvenciájú DTCXO (Digital Temperature Compensation Crystal Oscillator) egységet, amely egy vezérlő elektronika segítségével folyamatosan kompenzálja a kristály hőmérsékletből adódó pontatlanságát, és így széles hőmérsékleti tartományok között is rendkívül pontos időzítést lehet megvalósítani (6.2. ábra , 6.3. ábra).[18] Erre nagy szükségünk van, mivel a műhold hőtehetetlensége a tömegéből adódóan kicsi és nagy hőingadozások várhatóak.



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

Option A:	Calibrated Time Deviation	
Temperature		
@ +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

6.2. ábra: Az RTCC áramkörre vonatkozó pontossági adatok különböző hőmérsékleti tartományokban[18]



6.3. ábra: A DTCXO pontossága a kompenzálatlan külső kristályos megoldásokhoz képest[18]

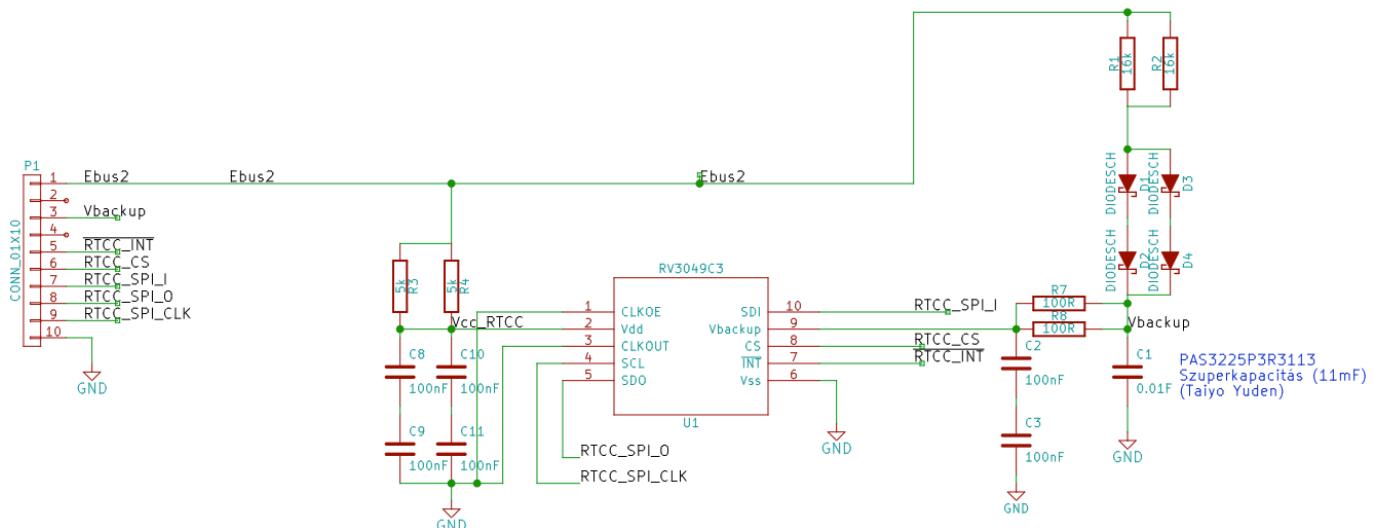
Az egységből a pontos fedélzeti idő, a pontos hőmérséklet és a felhasználói EEPROM adatai a beépített SPI interfészen keresztül olvashatóak ki a fedélzeti számítógép számára. Az áramkör a regiszterek értékét befagyasztja kiolvasás közben, ezzel véd a hibás kiolvasások ellen.[18] A 2 Byte EEPROM memória alkalmas lehet például a redundáns RTCC áramkörök egyedi azonosítójának eltárolására, amely segítségével megkülönböztethető a két áramkör.

6.1.2 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 (6.4. ábra) és minimális kiegészítő hálózattal valósítottam meg (6.5. ábra). Az RV-3049-C3 működéshez szükséges áramfelvétele maximum 1 μ A, amelyet a 4 μ Ah névleges kapacitású szuperkapacitás bőségesen fedez a szükséges ideig.[18][19]



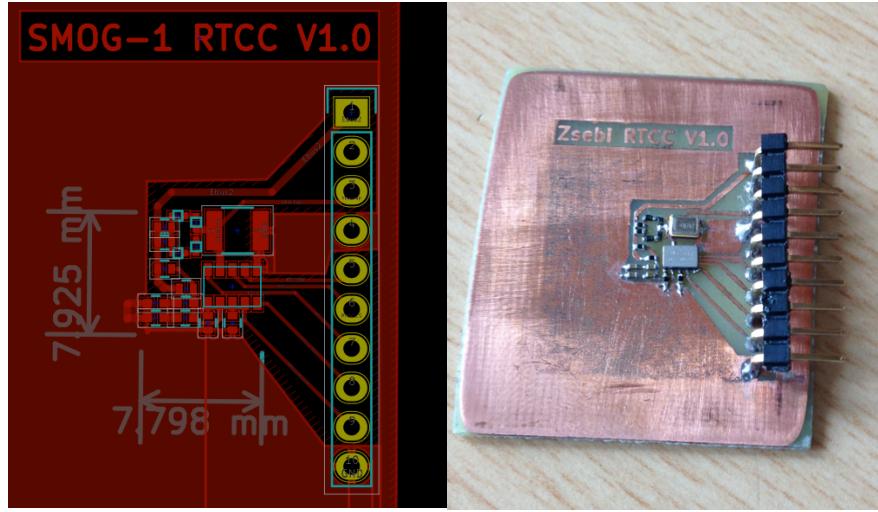
6.4. ábra: PAS3225P3 szuperkapacitás



6.5. ábra: Az RTCC áramkör kapcsolási rajza

A szuperkapacitás közvetlenül a szabályozott buszra csatlakozik, töltőáramát soros ellenállások segítségével korlátoztam. Így a szuperkapacitás izolálható ha esetleg zárlatossá válik, valamint a Föld árnyékból kikerülve sem jelent jelentős tranziens 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 mindössze 8×8 mm hordozófelületet foglal el (6.6. ábra).



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

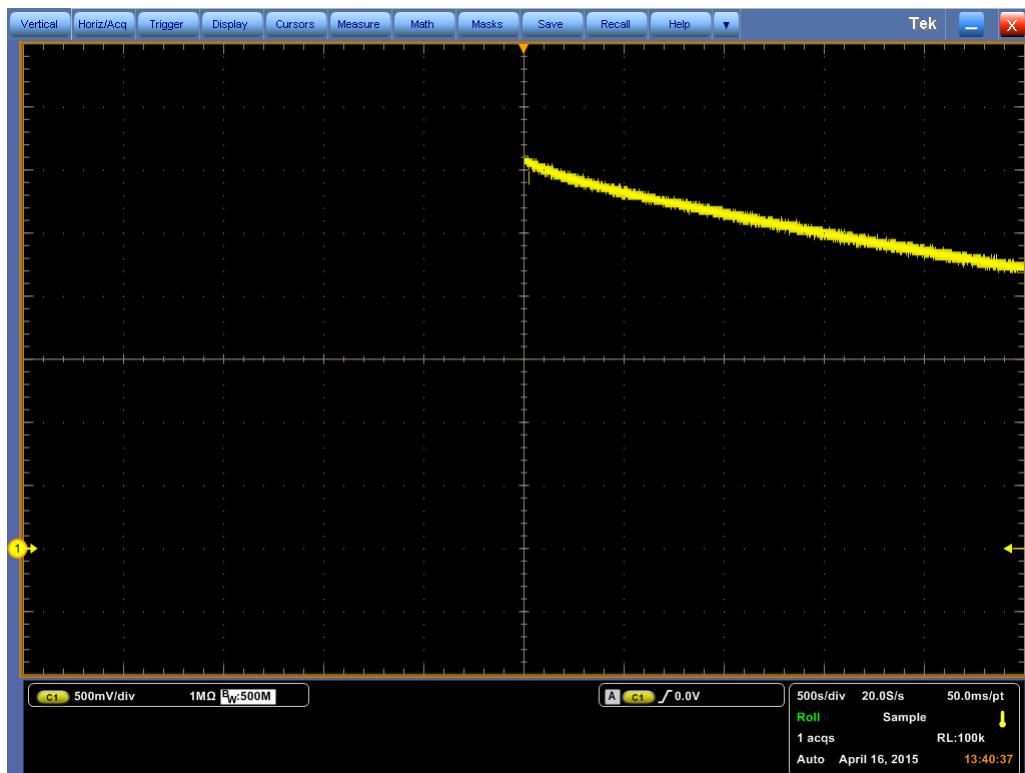
A mérések során különböző buszfeszültségek esetén vizsgáltam azt, hogy az áramkör mennyi idő alatt éli fel a tartalék rendszerben eltárolt energiát. Az RTCC 1,3 V fölötti feszültség esetén garantálja a pontos idő eltárolását, ha a szuperkapacitás feszültsége 1,3 V alá süllyed, akkor nem garantálható az áramkör korrekt működése.[18]

Az alábbi ábrán látható a szuperkapacitás töltődési folyamata szabályozott 3,3 V feszültségű energiabuszról töltve (6.7. 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.



6.7. ábra: A szuperkapacitás töltődési folyamata

Az alábbi ábrán követhető az RTCC-t tartalékágát tápláló szuperkapacitás merülése (6.8. 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.

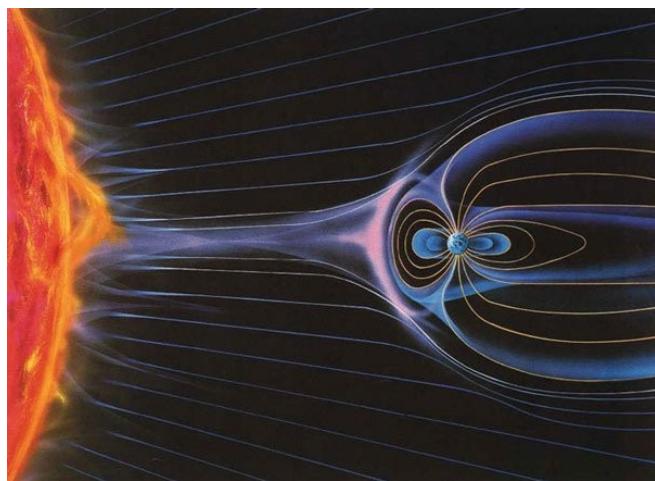


6.8. ábra: A szuperkapacitás merülési folyamata

Elkészítettem egy tesztelő programot, amely 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.

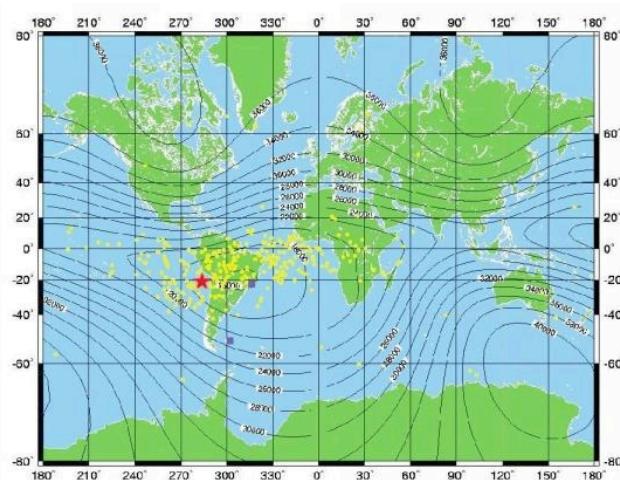
6.2 Doziméter áramkör

A világűrben a Föld felszínéhez képest közel két nagysárenddel 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 (6.9. ábra), az ūreszközök azonban a felszíntől távol jelentős sugárterhelésnek vannak kitéve, különösen a Van Allen sugárzási övekben.[20]



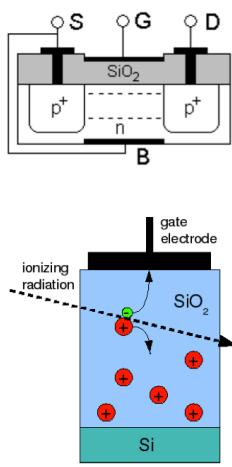
6.9. ábra: Napszél és a Föld mágneses tere

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.[21][22] A dózis az a mérőszám, amely megadja, hogy egy adott tömegű tárgynak mekkora energiát adott le az ionizáló sugárzás. Mértékegysége: Gray_(Si) [J/kg].



6.10. ábra: A Dél-Atlanti Anomália környékén észlelt műhold meghibásodások[21]

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 kivitelezhetőek.

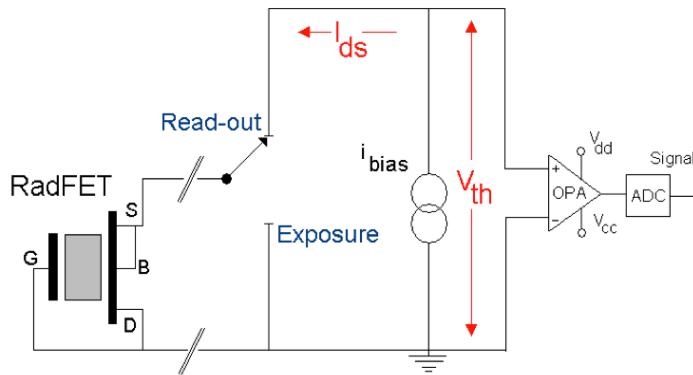


6.11. ábra: A RadFET

szerkezeti felépítése

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).[20] 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 rétegben (6.11. ábra). [24][25]

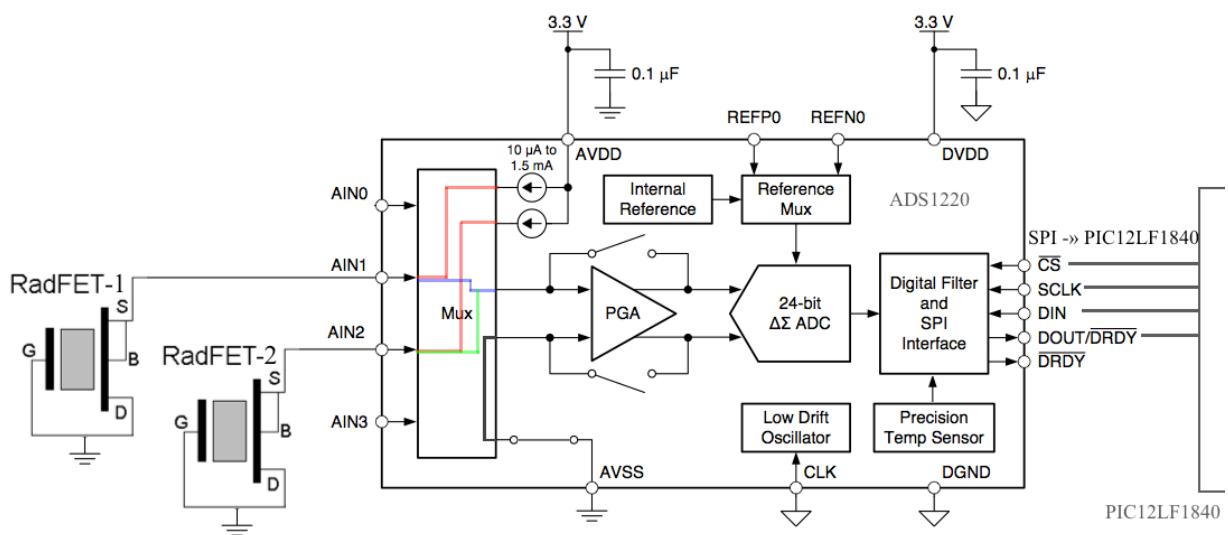
A mérési elrendezésben a szenzorként használt P típusú RadFET Drain és Gate elektródáját földpotenciálra kapcsoljuk, áramgenerátorosan meghajtjuk a Source elektródát, majd a Source–Drain kapcsok között létrejött egyenfeszültséget a megfelelő szűrés és erősítés után egy Analóg/Digitális átalakító segítségével pontosan mérjük (6.12. ábra). Az ionizáló sugárzás hatására a gate oxidban létrejött lyukak a Source–Drain csatorna fokozatos elzáródását okozzák, amely azonos előfeszítő áramerőssége esetén a dózissal arányosan megnövekedő küszöbfeszültséget eredményez. [24]



6.12. ábra: A doziméter mérési elrendezése

Az ūrben jelen lévő sugárzás legnagyobb része ionizáló sugárzás így ezzel a módszerrel pontosan mérhető a teljes elnyelt sugárdózis.[25] 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 áramerősséggel áramgenerátort, amely alkalmas a legtöbb RadFET meghajtására, így nem igényel további alkatrészeket az áramgenerátoros előfeszítés létrehozása.[23] A szenzorokat olyan áramerősséggel kell előfeszíteni, amelynél azok hőmérsékletfüggése minimális, ez típusonként különböző de általában $100 \mu\text{A}$ körüli.[24] 4 független csatorna áll rendelkezésre a szenzorok olvasásához, így akár 4 különböző érzékenységű RadFET is csatlakoztatható a doziméterhez (6.13. ábra).



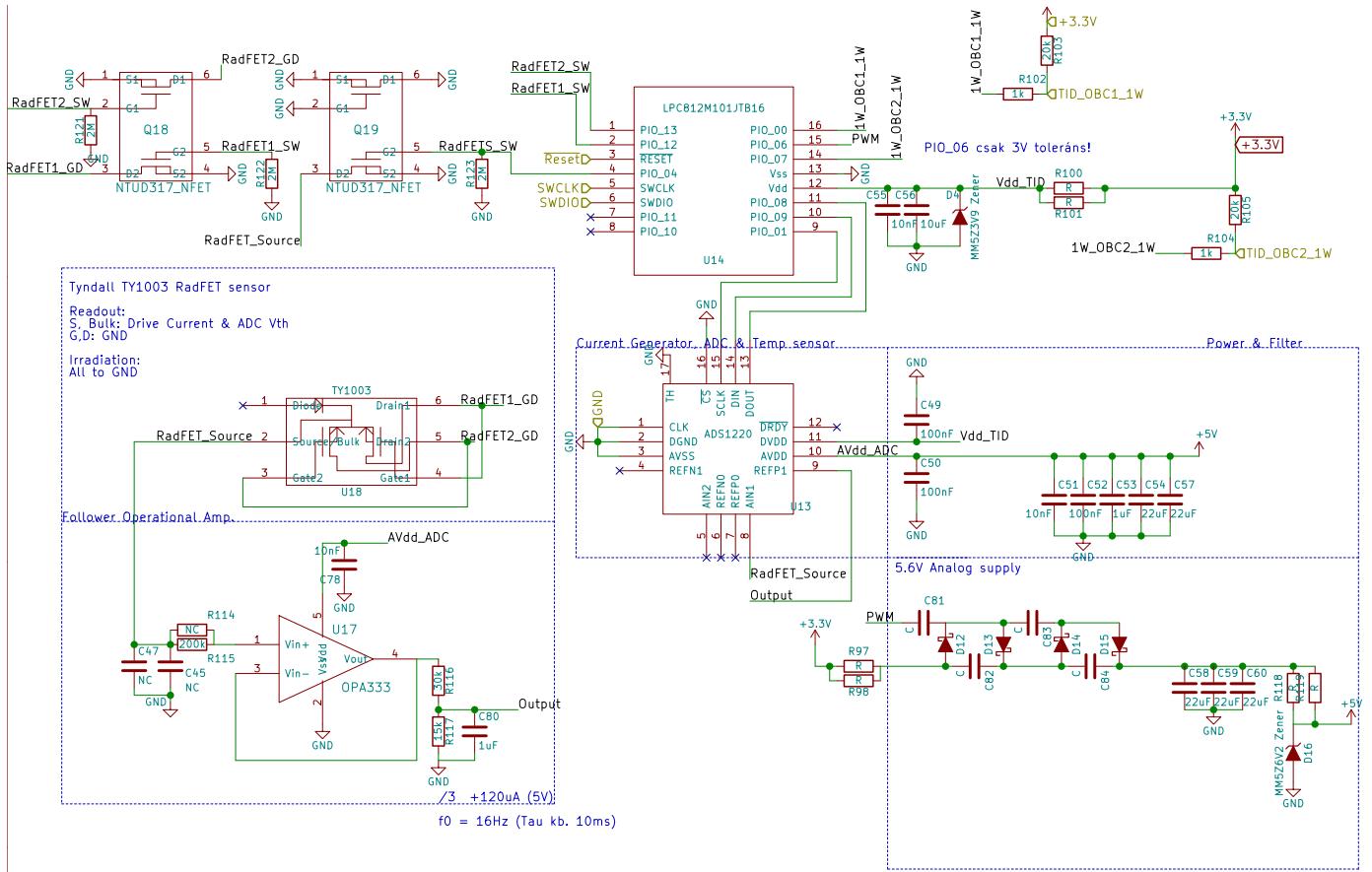
6.13. ábra: A megtervezett doziméter funkcionális felépítése

A „Duty-Cycle” mód hasznos az energiabelhasználás 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 $1 \mu\text{A}$ alatti.[23]

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.[23] 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 LPC812 típusú Cortex M0+ mikrovezérlő számára, amelyet kis mérete és energiatakarékossága miatt választottam ki a feladatra. 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 fedélzeti számítógép számára egy OneWire porton keresztül (6.14. ábra)(Mellékletek, „TID.pdf”).

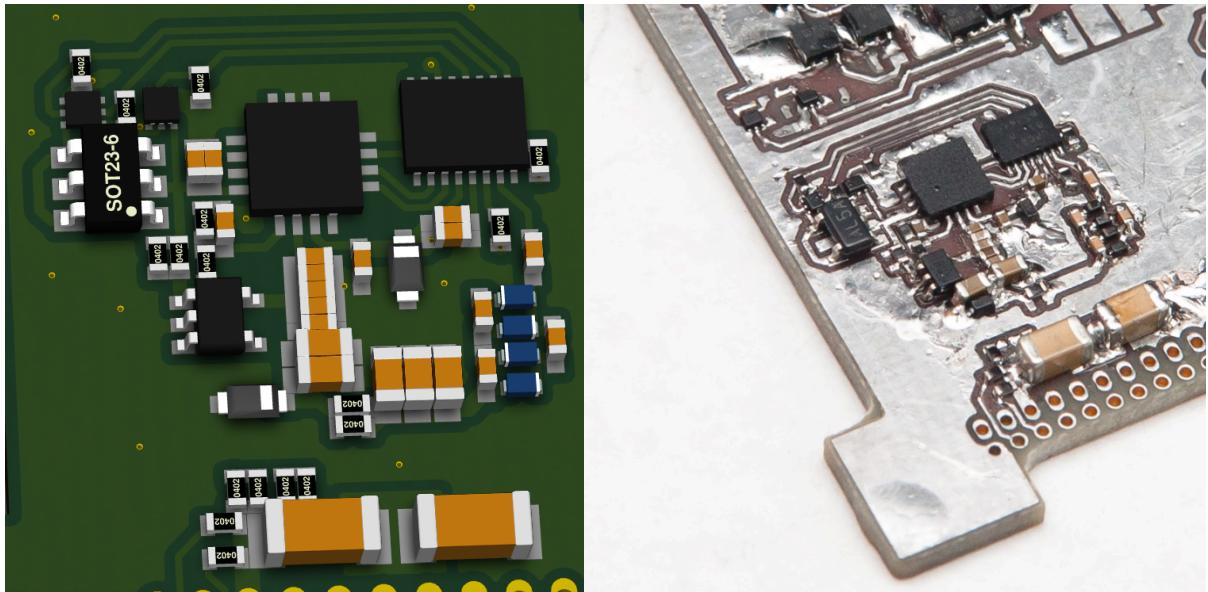


6.14. ábra: A doziméter áramkör teljes kapcsolási rajza

A redundancia miatt 2 doziméter áramkör fog üzemelni a műhold fedélzetén, amelyek TY1003 típusú RadFET szenzorokkal végeznek méréseket. A Tyndall TY1003 szenzorokban egyenként 2db RadFET van beépítve, így műholdunk összesen 4 RadFET segítségével fogja vizsgálni az ionizáló sugárzást.

A szenzorok 0-1 kGy (0-100 krad) tartományban használhatóak fel mérésre, azonban a kiolvasó áramkört a tápfeszültség korlátozza, így a doziméter a saját beépített 5,6 V feszültségű tápellátásával körülbelül 0-400 Gy (0-40 krad) tartományban lesz képes méréseket végezni. [24] A tervezett LEO pályán a várható sugárterhelés kb. 110 Gy/év (11 krad/év). A műhold élettartamát figyelembe véve ez azt jelenti, hogy a doziméter áramkörrel képesek leszünk a misszió ideje alatt végig figyelemmel kísérni a fedélzeti elektronikus rendszereket érő ionizáló sugárzást.

A prototípus elkészült, az áramkör az elvárásoknak megfelelően működik, a szenzorokkal együtt a doziméter mindössze kb. 1cm² hordozófelületet foglal el. A doziméterek a központi energiaellátó rendszer korábbiakban már ismertetett 2. paneljén kaptak helyet a fedélzeten (6.15. ábra).



6.15. ábra: Az egyes számú doziméter elhelyezkedése a központi energiaellátó rendszer második panelján

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 valamint a vezérlő szoftvert.

Az elkészült áramköri tervek alapján elkészítettem a központi energiaellátó rendszer hordozónak tervét, amelyek már összekapcsolva tartalmazzák az összes részegységet és a vezérlő alrendszer a végleges méretben. A elkészült panelekre beültettem az alrendszereket és felélesztettem azokat, majd mérések segítségével meggyőződtem a komplett rendszer működőképességről.

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.

A projekt folytatásának további fázisaiban a többi alrendszer prototípusának elkészülése után szeretném hozzáigazítani az általam tervezett rendszert a többi rendszerhez és az integrációs lépések után további méréseket végezni a valós fogyasztó rendszerekkel.

8 Köszönetnyílvánítás

Szeretném megragadni az alkalmat, és megköszönni konzulensemnek Dudás Leventének, valamint Herman Tibornak, Kristóf Timurnak és Szüllő Ádámnak, amiért szakmai tanácsaikkal és tapasztalataikkal segítettek a fejlesztésben és a projekt kivitelezésében.

Szeretném továbbá megköszönni Dr. Hirn Attilának, a doziméterrel kapcsolatos modellezések és számítások elvégzésében, valamint a RadFET szenzorok beszerzésében nyújtott segítségét.

Különösképpen szeretném megköszönni a családomnak és barátnőmnek Szeibel Leilának, amiért támogattak az egyetemi éveim alatt, és segítettek eljutni a nagybetűs élet kezdetéig.

Irodalomjegyzék

- [1] Dudás Levente, Szűcs László, Gschwindt András, The Spectrum Monitoring System of SMOG-1 Satellite, 14th Conference on Microwave Techniques, COMITE 2015, Pardubice, pp. 143-146, ISBN: 978-1-4799-8121-2
<http://dx.doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120316>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [2] Jáger Dávid, Török Péter – PocketQube műhold numerikus hőtani szimulációja, TDK Dolgozat BME, 2014
- [3] Dudás Levente, Szűcs László, Gschwindt András, A SMOG-1 kisműhold spektrummonitorozó rendszere, Repüléstudományi Közlemények XXVII:(1) pp. 85-105. (2015), Repüléstudományi Konferencia, Szolnok
http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-08-0194-Dudas_L_Szucs_L_Gschwindt_A.pdf
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [4] Small Spacecraft Technology State of the Art – NASA/TP–2015–216648/REV1, Dec. 2015
- [5] PocketQube 1.0, NASA Ames Research Center, Mountain View, CA, April 2014
- [6] SMOG-1 Elsődleges energiaellátó rendszere Diplomaterv – Herman Tibor, 2015 május
<https://diplomaterv.vik.bme.hu/hu/Theses/A-Smog1-PocketQube-elsodleges-energiaellato/Attachment/27089>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [7] KiCad – A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite
<http://kicad-pcb.org>
- [8] MPLABX – Integrated Development Environment
<http://www.microchip.com/mplab/mplab-x-ide>
- [9] Logisim – Educational tool for designing and simulating digital logic circuits
<http://www.cburch.com/logisim/>
- [10] LPCXpresso – Development Tool Platform for LPC MCUs
<https://www.lpcware.com/lpcxpresso>
- [11] Texas Instruments - Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supplies, March 1999
<http://www.ti.com/lit/an/slva057/slva057.pdf>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [12] Analog Dialogue 45-06 Back Burner, June 2011
http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/45-06/buck_regulators.pdf
(elérés dátuma: 2016. május 22.)

- [13] Texas Instruments - TPS64200 , August 2003
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps64202.pdf>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [14] Texas Instruments – LPV521 , December 2014
<http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lpv521.pdf>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [15] Microchip – PIC24FJ128GA310, March 2014
<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ128GA310>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [16] NASA - JPL Institutional Coding Standard for the C Programming Language, March 2009
http://lars-lab.jpl.nasa.gov/JPL_Coding_Standard_C.pdf
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [17] NASA - C Style Guide, SEL-94-003, August 1994
<http://homepages.inf.ed.ac.uk/dts/pm/Papers/nasa-c-style.pdf>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [18] Micro Crystal – RV 3049 App Manual V2.1 , January 2013
http://www.microcrystal.com/images/_PDF/5_Real-Time-Clock_RV/appmanual/RV-3049_App-Manual.pdf
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [19] Taiyo Yuden – Ceramic Type Polyacene Capacitor PAS3225P3R3113 Spec Sheet, March, 2015
http://www.yuden.co.jp/productdata/catalog/en/capacitor04_e.pdf
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [20] A. Holmes-Siedle and L. Adams, – Handbook of Radiation Effects, 2nd Edition 2002
- [21] 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.
- [22] Southern Regional Space Research Center – IAA-CU-13-04-07
- [23] Texas Instruments – ADS1220 , February 2015
<http://www.ti.com/lit/ds/sbas501b/sbas501b.pdf>
(elérés dátuma: 2016. május 22.)
- [24] European Organisation For Nuclear Research – CERN Sensor Catalogue, May 2005
- [25] REM Data Sheet – RFTDAT-CC10 – Rev W, September 2010