

Széchenyi István Egyetem
Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar

A GYŐRI MŰHOLD ENERGIAELLÁTÁSA

Szűcs Ágoston Koppány

Mechatronikai mérnök BSc

Második évfolyam

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

Témavezető: Németh Péter Ernő - Tanársegéd

Győr, 2023

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	3
Abstract.....	4
1. Bevezetés.....	5
2. A műhold felépítése, az alrendszerek és a paraméterek ismertetése.....	8
2.1. A győri műhold által megvalósítható célok.....	8
2.2. A műhold felépítése.....	8
2.3. A műhold paramétereinek megkötései.....	9
2.4. Redundancia.....	9
2.5. A műhold fő rendszerei és alrendszerei.....	10
3. Az energiaellátó rendszer felépítése és céljának ismertetése.....	11
3.1. Az energiaellátó rendszer feladata és az energiaellátás folyamata.....	11
3.2. Az energiaellátó rendszer felépítése.....	12
3.3. Az energiaellátás nem kívánt üzemállapotai.....	13
3.4. Követelmények az energia előállításában és az energiaellátásban.....	14
4. Az energiaellátó rendszer elemei.....	15
4.1. A napelem.....	15
4.2. Step-up konverter és MPPT.....	15
4.2.1. LTC3105 konverter.....	17
4.2.2. LTC3106 konverter.....	19
4.2.3. SPV1050 konverter.....	20
4.2.4. A kiválasztás.....	21
4.2.5. Az LTC3105 további paraméterei.....	21
4.2.6. A step-up konverter áramköre.....	22
4.3. Áramerősség és feszültség mérési rendszer.....	24
4.3.1. INA226 feszültség és áram mérő egység ismertetése.....	24
4.3.2. Az INA226 feszültség és áram mérő egység áramköre.....	26
4.4. Az energiatárolás.....	26
4.5. Akkumulátor védelem.....	29
4.5.1. MCP1316 feszültségfelügyelő egység tulajdonágai.....	29
4.5.2. Az alacsony fezsültség védelmi egység áramköre.....	30

4.6. A buck-boost konverter.....	32
4.6.1. TS63020 konverter ismertetése.....	32
4.6.2. A buck-boost konverter áramköre.....	35
4.7. Az energiaellátást vezérlő egység.....	36
4.8. E-Fuse.....	36
5. Összefoglalás.....	37
5.1. Jövőbeli tervek, és feladatok.....	37
6. Köszönetnyilvánítás.....	38
7. Irodalomjegyzék.....	39

Kivonat

A múlt évben megrendezett távközlési világnapon a Széchenyi István Egyetem Jedlik Ányos szakkollégium SZESAT csapata az MRC-100 műhold győri moduljának elkészítésén fellelkesülve bejelentették, hogy megtervezik az első önálló győri műholdat.

Dolgozatom témája, a győri műhold energiaellátásának fejlesztése és tervezése.

Egy műhold elkészítésekor időrendben az energiaellátás megtervezése a legelső között van. Az energia kulcsfontosságú, hiszen az űreszköznek a világűrben önállóan kell megtermelni a működéséhez szükséges energiát. Jelen dolgozatom célja, hogy ismertesse a leendő győri műhold energia előállító moduljának tervezési folyamatát, az alapkövetelményeket és emellett, hogy részletes tájékoztatásul szolgáljon a műhold energiaellátó rendszeréről.

Az energiaellátásért felelős rendszert több fontos szempont alapján kell megtervezni. Az első szempont, hogy kellő mennyiségű energiát állítsunk elő a világűrben. Ez jelenlegi eszközeinkkel a Napból érkező fény felhasználásával történhet meg a speciális űr körülményekre fejlesztett napelemek segítségével. Az energiaellátásnak nagyon jó hatásfokúnak kell lennie, mert nem mindig éri egyenletesen a napfény a műhold felületét, valamint fizikai korlátai vannak a napelem méreteinek. A második szempont, hogy a napelemekből érkező energiát maximalizálva kell továbbítani, mivel a napelemre nem megfelelő terhelést állítva energiavesztés jelentkezik. A harmadik szempont az energia eljuttatása az alrendszereknek megfelelő módon és veszteségmentesen történjen. A negyedik szempont, hogy a megtermelt energiát pontosan, mérve számon tarthassuk. Ez azért fontos, hogy az akkumulátor élettartamát maximalizálhassuk, valamint a felettes rendszerek (energia menedzsment) megfelelő információval ellássuk.

Abstract

In the last year at the world Telecommunications day the SZESAT team of the Jedlik Ányos College of the Széchenyi István University by getting excited of creating the module of the MRC100 satellite Győr they announced the design of the first satellite of Győr.

My essay topic is the development and design of the energy system of the satellite of Győr.

In the design of a satellite the development of the energy system is one of the first steps. The energy is a key importance because the spacecraft has to product the required energy itself in space. My essay goal to introduce the process of the energy productor module of the prospective satellite's of Győr and it's basic requirements and the energy harvesting system.

The responsible system of the energy producting has to be designed by several aspect. The first aspect is to generate required quantity of energy in space. This could happen by our tools to use the light which is coming from the Sun with the help of solar panels that created for space conditions. The supply of the energy has to be efficient because not always reach the sunlight perfectly the area of the satellite and also the solar panel's sizes has physical limits. The second aspect that the energy must to be harvested to the maximum because energy loss performs when to load the solar panels in most cases. The third aspect is to the bring the energy to the subsystems in the right way and without loss. The fourth aspect is to supervise the harvested energy with precise measurements to maximalize the lifetime of the battery and to provide the required information to the superior system.(energy management).

1. Bevezetés

Az MRC-100 nevű magyar műhold, győri paneljének elkészítésekor a SZESAT tagjai sok tapasztalatot szereztek a megtervezési folyamatoknak köszönhetően. Célunk az, hogy tovább fejlődve egyre több tapasztalatot szerezzünk, és ezt úgy tudjuk elérni, hogy elkezdjük szélesíteni az ismereteinket azáltal, hogy a műholdfejlesztésnek területein továbblépünk.

A győri műhold energiaforrása a napelem lesz. Az energia előállítás jelen formája elég elterjedt a műholdak esetén, viszont ennek az energiatermelési lehetőségnek felhasználása olyan módszert igényel, amelynek a hétköznapi kifejlesztése és alkalmazása is komoly műszaki tudást igényel. Manapság nagy a fejlődés tapasztalható ezen területen. Egy műhold esetén a napelemes rendszer felhasználásának sikeressége energiatermelés szempontjából nem magától értődő, ugyanis számos probléma adódhat a folyamat során. Célszerű támaszkodni a széles témakörrel rendelkező terület legújabb eredményeire, ugyanis az ezeknek a kutatásoknak nagy tapasztalati háttere van, mivel a korábbi módszereknek vizsgálata eredményezi a technológiának a fejlődését. A fejlődés magyarázható azzal, hogy az űrtechnikában az energiaellátás legelterjedtebb formája a napelemcellák használata. Nem csak a napelemek kifejlesztésének módszerében történik meg a fejlődés. Számos félvezetővel foglalkozó vállalat végez kutatásokat, olyan integrált áramkörök kifejlesztése okán, amelyek megfelelően kapcsolatba hozhatóak a napelemekkel, emellett azok megfelelően történő felhasználásával.

Jelenlegi műhold űrbeli alkalmazása szintén egy kutatási folyamat lesz, amely a napelemes rendszert is érinti. Célja, hogy a rendelkezésre álló technológiákat összehangolt módon felhasználja és megvizsgálja, hogy a gyakorlatban miként valósulhat meg a különböző tudományterületek alkalmazása az energiaellátás érdekében.

Az áramköröket és a nyomtatott áramköri rajzokat a KiCad nevű tervező szoftverrel készítem el. Legtöbb esetben a szoftver könyvtára tartalmaz az integrált áramkörökhöz rajzot és lenyomatot is [1]. Az alkalmazott képletek helytállóságát az alkatrészek dokumentumaiban feltüntetett képletek igazolják.

Jelen kutatásban is vannak problémák, amelyek kérdéseire meg kell keresni a választ. Fontos meghatározni az energiaellátás elemeit hogyan méretezzük. Nem minden napelem megfelelő, hogy egy olyan rendszernek az egyik építőeleme legyen, amelynek méretei korlátozottak a

kockaműhold szabvány előírásai által. Az említett probléma maga után vonja azt a kérdést, hogy a kiválasztott elemek képesek lesznek-e ellátni a fogyasztó egységeket? Kihívást jelent olyan hosszú élettartamú napelem kiválasztása is, amelynek bizonyítottan jó a minősége, mivel ezeket nehezebb beszerezni, és az áruk is magas sok esetben. A megfelelő akkumulátor kiválasztása szintén megoldást igényel. Ezen a területen több tapasztalatot kell még gyűjteni ahhoz, hogy megfelelő legyen a döntés.

A műhold az energiaellátásának megtervezése további munkákat igényel. Szükséges a korábban említett módon kiválasztani a megfelelő napelemet és az akkumulátort, továbbá méréseket kell végezni az energiaellátás valamennyi szegmenséről. A mérések nagy részét akkor lehet elkezdeni, ha a megtervezett nyomtatott áramköröket el tudjuk készíteni, és be tudjuk szerezni a szükséges alkatrészeket. Mindezek mellett érdemes szimulációkat is végezni, amelyek segítségével meg lehet előzni az egyes alkatrészek nem megfelelő felhasználását.

2. A műhold felépítése, az alrendszerek és a paraméterek ismertetése

2.1. A győri műhold által megvalósítható célok

A győri műhold megépítésénél a fő rendszerek megtervezése az elsődleges, emellett a SZESAT szekción belül vannak olyan projektek, amelyek keretein belül a műholdon kísérleteket lehet végezni. Ezek közül sorolnék fel néhányat.

Az egyik kísérlet az lenne, hogy a LoRaWAN hálózatot használva gyűjtsük be a műhold által leküldött adatokat. A LoRa egy kommunikációs technológia, melynek neve a „long range” kifejezésből származik. A neve utal arra, hogy ezt a kommunikációs módot használva egy eszköz képes nagy távolságok esetén is arra, hogy információt juttasson el egyik pontból a másikba. Műholdak esetében azért célszerű alkalmazni ezt a technológiát, mivel segítségével kisebb teljesítménnyel is meg lehet valósítani a kommunikációt, emellett a vevőállomások száma meglehetősen nagy. Ha valamely vevőállomás dekódolja a műhold által LoRa kommunikációs módszer segítségével küldött jelet, akkor a vevőállomás feltölti a dekódolt információt a hálózatra, ahonnan az elérhetővé válik [2]. Ezt a technológiát is felhasználva tervezzük meg a műholdunk kommunikációs részét, emellett jó lehetőség a kommunikációra.

Egy másik projekt, a négy napelem mellett négy kinyitható napelem használata is. Ez lehetőséget adna az energiát termelő napelemfelület növelésére.

A projektek között van, hogy a műholdon egy kamerás egység is helyet kapna. Ennek tervezésénél figyelembe kell venni a különféle előírásokat, amelyek a kép készítésre vonatkozik a műholdak esetén.

Ezen projektek akkor kapnak nagyobb hangsúlyt, mikor a műhold fő egységei bizonyítottan megállják helyüket működési szempontból, emellett pedig jól működnek kritikus körülmények között.

2.2. A műhold felépítése

A jelenlegi tervek arra mutatnak rá, hogy a győri műholdnak 10 x 10 x 10 cm-es méretei lesznek, amely egy PocketQube méretnek felel meg.

A megfelelő helykihasználással csökkenthető a közel lévő alkatrészek azon tulajdonsága, hogy zavarják az integrált áramkörök ki, és bemeneti jeleit, mivel az alkatrészek közel

helyezkedhetnek el az integrált áramkörökhöz. Ezek hatásainak csökkentésével pontosabbak lesznek a mérési eredmények. Az alkatrészek elhelyezése ha nagyobb területre történik, akkor a forrasztásuk is kevesebb hibával járhat.

A műholdnak kocka alakja lesz, melynek 5 oldalán lesznek elhelyezve napelemek. A hatodik oldalán lesz az antenna, és a kamerás egység. A műhold belsejében lévő paneleken lesz elhelyezve valamennyi alrendszer, a központi vezérlőegység és az energiaellátó rendszer.

2.3. A műhold paramétereinek megkötései

Számos előírásnak kell megfelelnie egy kockaműholdnak, amelyeket figyelembe kell venni a tervezés folyamán. A tervezésben fontos szerepe van annak, hogy figyelembe vesszük azt, hogy nem mindig éri majd napfény a műhold felületét. Az alkatrészeket tekintve érdemes minél hosszabb élettartamúak közül választani.

A megkötések közé tartoznak, a tömeg és méretkorlátozások. Ezen paraméterek minden típus esetén meg vannak adva. Fontos, hogy nem megengedett lakkot alkalmazni az áramkörök esetében, emellett elektrolit kondenzátorokat sem szabad használni, mivel a bennük lévő elektrolit folyadék elpárolog a világűrben, így azok a kondenzátorok használhatatlanná válnak [3].

Vannak olyan speciális megkötések is, amelyek előírásainak meg kell felelni. Mechanikai oldalról nézve a műholdra különféle erők hathatnak a fellövésnél a gyorsulás miatt, ezért itt a legfontosabb az ideális kialakítás, a megfelelő összeszerelés, a jó rögzítés és a kifogástalan forrasztás.[4] Termikus szemszögből nézve figyelni kell a tervezés során arra, hogy a lehűlés sokkal lassabban történik a világűrben a közvetítő közeg hiánya miatt. Érdemes tehát széles hőmérséklet tartományban működő alkatrészeket használni [5].

2.4. Redundancia

Egy műhold működésének végét jelentheti ha az egyik részegysége nem működik tovább. Az integrált áramköri egységek sokszor egy negatív behatás miatt hibásak lesznek, vagy nem képesek tovább működni.

Felléphet túlmelegedés egy műhold működése során, ami rövidtávon sem megfelelő, viszont hosszabb távon igen káros lehet. A túlterhelés is okozhatja az alkatrészek rossz működését, ez akár lehet rövidzárlat miatt is. Az alkatrészek rossz működéséből adódó problémának az

elkerülése érdekében két fontos dolgot érdemes tenni. Az első megoldás lehet a meghibásodás kezelésére, hogy minden egységet többféleképpen és sokszor letesztelünk. A második megoldás, hogy a tesztelés mellett a legfontosabb egységeket redundánsan tervezzük meg. A redundáns tervezés jelentése, hogy a nélkülözhetetlen „Master” integrált áramkörök mellé egy „Slave” egységet építünk be [6]. A Master integrált áramkör folyamatosan kommunikál a melegtartalékkal, viszont hidegtartalék esetén csak az egyik van aktív üzemben. Abban az esetben, ha a Master integrált áramkör nem működik megfelelően, akkor az lekapcsolásra kerül, és amint ez megtörtént, a Slave egység lesz aktív.

2.5. A műhold fő rendszerei és alrendszerei

Három fő rendszer van, amely minden műhold esetében elengedhetetlen, hogy jelen legyen.

Az első fő rendszer az energiaellátásért felelős egység. Feladata, az előállított energia tárolása az akkumulátorban, az energia átalakítása és eljuttatása az alrendszereknek és a fő rendszereknek. Az energiaellátás magában foglalja a hibás rendszerek lekapcsolását. Minden feladat, amely azzal kapcsolatos, hogy egy adott pillanatban melyik egység működjön a műholdon belül, az energiával való gazdálkodás érdekében, az energiaellátásért felelős egység feladata.

A második fő rendszer a vezérlés. Feladata, hogy vezérelje az alrendszereket, és információt gyűjtsön be, az alrendszerektől.

A harmadik fő rendszer a kommunikációs egység. Ez a rendszer amelyik kommunikál a földi állomással. A vezérlő rendszer és az energiaellátásért felelős rendszer fogja eldönteni, hogy mikor működjön a kommunikációs egység, mivel folyamatos működtetése sok energiát igényelne. A vezérlés segítségével a kommunikációs egység csak akkor kapcsolhat maximális adásteljesítményre, amikor rálátása van a földi állomásra. Ellenkező esetben kisebb teljesítményen sugároz, vagy ki van kapcsolva. Azt, hogy milyen adatot fog lesugározni a műhold, azt a vezérlés határozza meg.

3. Az energiaellátó rendszer felépítése és céljának ismertetése

3.1. Az energiaellátó rendszer feladata és az energiaellátás folyamata

Az energiaellátó rendszer feladata, hogy a napelemek segítségével a lehető leghatékonyabban továbbítsa az energiát. A napelemekből beérkező energia feszültségét szabályozni kell. Fontos emellett, hogy az energia megfelelően legyen tárolva az akkumulátorban, ugyanis a Föld sötét oldalán nem fog elegendő energia érkezni a napelemekből.

Az energiahány ideje alatt is működni kell egyes főbb rendszereknek. Az is bekövetkezhet, hogy nem lesz elegendő energia minden rendszer működéshez. Az említett esetben alvó üzemmódba kell kapcsolni egyes alrendszereket, míg a vezérlő áramköröket érdemes aktív állapotban tartani. A megválasztott alkatrészeknek képeseknek kell lenniük megfelelő módon kezelni az energiahányból adódó lekapcsolást. Jó megoldás, ha olyan integrált áramkört kerül megválasztásra, amelyiket lekapcsolás után később újra el lehet indítani. Amennyiben erre nem kerülhet sor, akkor ki kell használni az energiaellátó rendszer áramtermelő egységeinek LDO funkcióját, amely lehetővé teszi, hogy alacsony bemeneti feszültség esetén az áramtermelő egység képes legyen egy ideig energiával ellátni például egyes vezérlő egységeket. Különösen fontos, hogy a vezérlők és az alrendszerek integrált áramkörei energiatakarékos üzemben is képesek legyenek működni.

A legtöbb egységeknek egyenletes feszültség érték mellett kell energiát biztosítani, a normál működésükhöz. Ezt meg kell valósítani, ugyanis a napelemekből érkező energia feszültsége folyamatosan változik.

Az energiaellátásban kiemelt figyelmet igényel az akkumulátor. Fontos, hogy túlságosan ne merüljön le, ami mélykisülést eredményez. A mélykisülés visszafordíthatatlan folyamatokkal jár, emellett hátránya, hogy az akkumulátor nem lesz képes többé ugyanakkora mennyiségű töltést eltárolni, mint korábban [7]. A túltöltést szintén meg kell akadályozni, mivel ha bekövetkezik, akkor ugyancsak lerövidül az akkumulátor élettartama.

Valamennyi felsorolt megoldás segít abban, hogy a véges energia minél hosszabb ideig elég legyen a megfelelő és biztonságos állapot fenntartásához. Ezt viszont még az említett módszerekkel sem egyszerű megvalósítani. Van azonban több megoldás is amelyekkel az energiaellátás hatékonysága növelhető. Az egyik megoldás, hogy folyamatosan méréseket

végez az energiaellátás a töltésről, a beérkező energiáról és az energiaelosztás megfelelő működéséről.

Az energiaellátást felügyelő integrált áramkör egy mikrokontroller lesz, ami hasonlóan a központi vezérlőegységhez képes önállóan beavatkozni, a megfelelő működés érdekében. A energiaellátást felügyelő mikrokontroller feladata magában foglalja a redundáns integrált áramkörre való átállást, ha a fő integrált áramkör meghibásodik. Egyéb feladata, hogy a méréseket megfelelő módon megvalósítsa, emellett a begyűjtött adatokat eltárolja. Az energiaellátást felügyelő vezérlő mikrokontroller nem szigetelődik el, emiatt elengedhetetlen, hogy a vezérléssel folyamatosan kommunikáljon.

3.2. Az energiaellátó rendszer felépítése

A napelemeknek köszönhetően a Napból érkező fény által az energiaellátó rendszer áramot tud előállítani. Egy napelemnek számos paramétereit kell figyelembe venni a kiválasztásnál, amelyek majd befolyásolják az energiaellátás más egységeinek jellemzőit.

A napelemeket nem lenne megfelelő közvetlenül az akkumulátorra csatlakoztatni, mivel napelem kimenete szabályozatlan feszültségű. Az akkumulátort egy megfelelően beállított feszültséggel kell táplálni, éppen ezért arra lenne szükség, hogy a napelemből érkező áram feszültségét szabályozzuk. Ezt úgy lehet elérni, hogy egy úgynevezett step-up konvertert használunk.

A step-up konverter egy olyan áramkör, amely a bemenetére adott áram feszültségét alakítja át nagyobb feszültségre a kimenetére. Ha szabályozatlan is a bemeneti feszültségérték, a kimeneten szabályozott egyenfeszültség áll elő.

A töltés módja nagyban befolyásolja az akkumulátor élettartamát. Érdemes olyan töltési módszert alkalmazni, amelyek nem okoznak kárt az akkumulátorban.

Ha megoldott az akkumulátor biztonságos töltése, akkor gondoskodni kell arról is, hogy elkerüljük az akkumulátor lemerülését. Ezt a célt szolgálja az akkumulátorfelügyelő egység. Működésének lényege, hogy lekapcsolja a terhelést az akkumulátorról, ha annak feszültségértéke egy adott érték alá csökken.

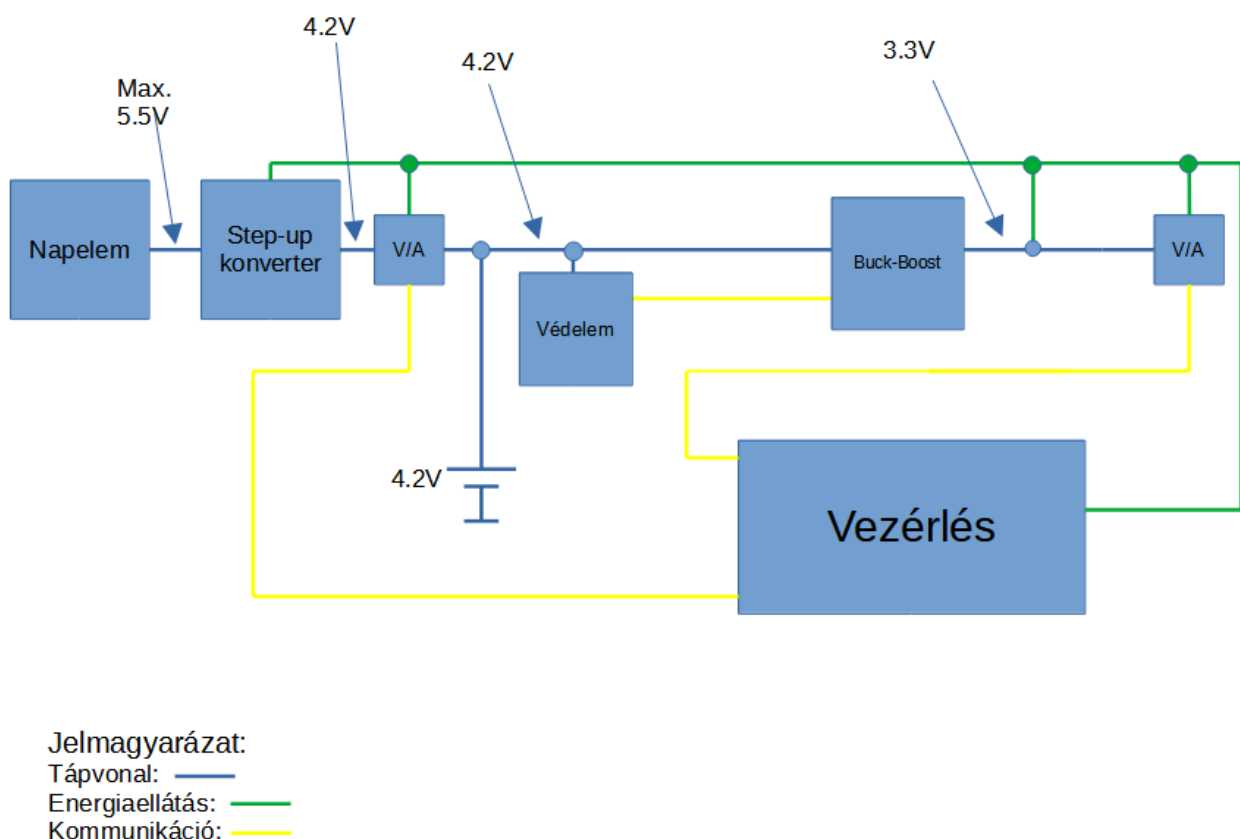
Ha az akkumulátor biztonságosan képes áramot felvenni és leadni, akkor az akkumulátorból érkező feszültséget át kell alakítani, hogy értéke az energiát igénylő rendszereknek megfelelő legyen. Ehhez egy olyan áramkörre lesz szükség amelyik ezt oldaná meg, a már korábban is

említett feszültség átalakítás módszerével. Egy ilyen áramkör azért is szükséges, mivel az akkumulátornak a merülésekor folyamatosan csökken, feltöltésekor pedig folyamatosan nő a kimeneti feszültség, és ez a feszültségváltozás pedig nem lenne megfelelő a fogyasztó egységeknek. Az említett probléma megoldására a megfelelő áramkör a buck-boost konverter.

Az energiaellátó rendszer elemeinek és a fogyasztóinak a biztonsága az egyik legfontosabb az energiaellátásban. Éppen ezért szükséges a feszültség és áramerősség mérése bizonyos pontokban mivel ez olyan információt biztosít, amelyek elemzésével megakadályozható bizonyos rendszerek élettartamának gyors csökkenése, vagy a rendszerek tönkremenetele. A terheléskapcsoló egy egység amely túláram esetén az adott az alrendszert lekapcsolja a tápvonalról, hogy rövidzárlat esetén a műhold többi egysége épségben maradjon.

A mérő egységeket az energiaellátásért felelős mikrokontroller kezeli.

A 3.1. ábra az energiaellátás rendszertervét ábrázolja.



3.1.ábra: Az energiaellátás folyamatának rendszerterve

3.3. Az energiaellátás nem kívánt üzemállapotai

Az energiaellátásban fontos szerepe van annak, hogy az energiát továbbítsuk az egyik pontból a másikba. Az energiaellátásban szintén fontos a rendszert alkotó egységek kommunikációja. Mindkét említett folyamatot befolyásolhatja, a zavar. Ez a zavar lehet rádiófrekvenciás, de érkezik magából az energiaellátás részegységeiből. Az utóbbi esetre példa a feszültségátalakítás egy félvezető folyamatos kapcsolgatásának eredménye, ami idézhet elő zavart.

A feszültség átalakító egységekből érkező áram feszültségét szűrni kell, mivel a kimeneti feszültségük a legtöbb esetben nem zavarmentes. Ezt a jelenséget feszültség hullámosságnak nevezik.

A feszültséghullámosságra megoldás egy szűrő kondenzátor alkalmazása, amely értéke a legtöbb esetben 47 μF alá esik.

Az energiaellátásban át kell alakítani a napelemből érkező feszültséget emellett az akkumulátorból érkező feszültséget is. Ezt feszültségosztóval meg lehetne tenni, viszont ez nem lenne hatékony ez a megoldás, ugyanis az ellenállásokon átfolyó áram nagy része hővé alakul és nem kerül hasznosításra. A feszültségosztót olyan helyen érdemes felhasználni, ahol kis áramok folynak, például a visszacsatolásoknál. A feszültségátalakítására a korábban említett nagy hatásfokkal rendelkező konvertereket érdemes alkalmazni.

3.4. Követelmények az energia előállításában és az energiaellátásban

A műhold paneleinek méretbeli megválasztása korlátozva van. Célszerű tehát olyan alkatrész méreteket megválasztani, amelyek felhasználása nem okoz elhelyezésbeli problémát. Abban az esetben, ha kisebb alkatrészeket választunk figyelni kell arra, hogy a kisebb alkatrészek kisebb teljesítményt képesek elviselni. Mivel az tápvonalban nem célszerű ellenállásokat használni az energiaveszteség miatt, ezért csak más helyeken fordulnak elő, ahol kisebb áram folyik át rajtuk, így a kisebb méret nem okoz gondot az alkatrész túlterhelését illetően.

A kondenzátorokat tekintve jelen esetben kerámia kondenzátorokat érdemes használni. Ennek oka, hogy kis kapacitású kondenzátorokat alkalmazok az műhold áramköreinek esetén, emellett a nagyfrekvenciás zajokat is képesek kiszűrni. További előnyük, hogy kis méretűek, emellett széles feszültség tartományban képesek működni és nem polarizáltak [8].

Az általam felhasznált alkatrészek többsége kis méretükből adódóan SMD kivitelűek lesznek.

Az akkumulátornak megfelelően nagy kapacitással kell rendelkeznie ahhoz, hogy elegendő mennyiségű energiát lehessen benne tárolni. Ehhez az is hozzátartozik, hogy a mérete és tömege ne legyen túlságosan nagy. Az említettek mellett az is fontos, hogy az akkumulátor kibírja a 0 °C körüli hőmérsékletet, és 40 °C fölött is képes legyen megfelelően üzemelni.

A napelemeknek elegendő energiát kell biztosítani ahhoz, hogy a műhold valamennyi rendszere megfelelően működhessen. A napelemek a műhold oldalain fognak helyet kapni, amiből az következik, hogy a napelemek méretei korlátozva vannak. A Napsugárzás képes felmelegíteni a napelemeket, míg a Föld árnyékos oldalán a hőmérsékletük 0 °C alá is eshet. Érthető tehát, hogy a napelemek vannak leginkább kitéve a hőmérsékleti hatásoknak, emiatt a kiválasztott típus célszerű, ha minél szélesebb hőmérséklet tartományban képes működni. Ez az általam választott többi áramköri elemre szintén igaz.

Az integrált áramkörök széles feszültség tartományon belüli működése azért fontos, mivel az űrben a körülmények nem kedvezőek a műholdra nézve. Az integrált áramköröknek terhelhetősége kellően nagy kell, hogy legyen ahhoz, hogy probléma esetén is üzemképesek legyenek.

4. Az energiaellátó rendszer elemei

4.1. A napelem

A napelem egy olyan eleme a energiaellátásnak, amely a Napból érkező elektromágneses sugárzást alakítja át villamos energiává. A Föld légköre elnyeli a Napból érkező sugárzásnak egy részét, viszont az alacsony Föld körüli pályán, ahol a kis méretű műholdak többsége kering, olyan elektromágneses sugárzások is érik majd a napelemeket, amelyek csökkentik azok élettartamát. Ennek okán a napelemeket le kell fedni olyan üveggel, amely ellenáll a részecskesugárzásnak, valamint az ultraibolya sugárzásnak.

A napelemnek vannak bizonyos paraméterei, amelyek alapján fog a döntés megszületni a kiválasztásról. Az egyik ilyen paraméter az élettartam. A napelem az élettartama az egyik meghatározója a műhold élettartamának. A napelem kiválasztásnál előtérbe kerülnek a monokristályos vagy a polikristályos napelemek. A napelem kiválasztása attól nagyban függ, hogy akkor szeretnénk nagyobb hatásfokkal áramot továbbítani a napelemből amikor alacsonyabb a megvilágítás, vagy pedig abban az esetben, ha magasabb a megvilágítás. Egy másik fontos paramétere a napelemnek, hogy mekkora a napelem teljesítménye. Figyelembe kell venni más fontos paramétereit is a napelemnek a kiválasztáskor, például a maximális kimeneti feszültségét, a rövidzárlati áramát és az üzemi hőmérséklet tartományát.

4.2. Step-up konverter és MPPT

A step-up konverter egy olyan áramkör, amely a bemenetére kapott feszültség hatására a kimenetére nagyobb feszültséget állít elő a bemeneti feszültségnél. Ez a feszültségátalakítás nagy hatásfokkal történik, ugyanis a feszültségkülönbséget nem hővé alakítja át az áramkör, hanem növeli a kimenetén az áramerősséget. Ez az egység azért nélkülözhetetlen, mivel szabályozott feszültség szükséges az energiaellátáshoz.

A step-up konverter feszültség átalakítás és feszültség szabályozás céljából kerül felhasználásra az energiaellátásban. Erre a feladatra egy buck-boost konverter is megfelelő lenne, amely abban tér el a step-up konvertertől, hogy képes a kimenetére alacsonyabb feszültséget is adni a kimeneténél, amennyiben indokolt.

Mivel a napfény intenzitása egyes esetekben nagyon alacsony, ezért olyan áramkört kell használni ebben az esetben, amely sokkal alacsonyabb feszültségen is képes üzemelni, mint amit a kimenetén szolgáltatnia kell.

Egy step-up konverter tartalmaz egy diódát, egy tranzisztort, emellett energiatárolás céljából egy tekercset és egy kondenzátort. A kimeneten mindig nagyobb lesz a feszültség mint a bemeneten a tekercsnek köszönhetően, ha a bemeneti feszültség a megengedett tartományban marad. A tekercs képes fenntartani az elektromos folyamatot azáltal, hogy mágneses terét használja. A tekercs mindig nagyobb feszültséggel próbálja fenntartani a folyamatot, mint amivel korábban az táplálva volt, így a step-up konverter kimenetén mindig nagyobb lesz a feszültség mint a bemenetén. Ahhoz, hogy a tekercs felhasználja a mágneses mezejét, ahhoz meg kell szüntetni az áramkör tápforrását, tehát meg kell szakítani az összeköttetést energiaforrás és a tekercs között. Ezt egy félvezető tranzisztorral meg lehet tenni. Amikor a félvezető zárt állapotba kerül, akkor rákapcsolja az áramforrást az áramkörre, majd egy meghatározott idő után nyitott állapotba kerül és megszakítja az összeköttetést az áramforrás és az áramkör között egy külső hatásra.

Az MPPT, amelynek a jelentése maximális teljesítménypont követés, egy módszer amelyet alkalmazva a napelemből az arra beállított terhelésnek változtatásával a lehető legnagyobb mértékben nyerhetjük ki az áramot. Erre azért van szükség, mert a napelemek a teljesítménye nem állandó a megvilágításnak megváltozásából adódóan. Ha tehát a napelem által leadható teljesítmény nagyobb, de a terhelés állandó és kisebb, mint ami szükséges lenne, akkor energiát veszítünk el. Az sem megfelelő, ha a terhelés lesz nagyobb, mint amennyi a napelem pillanatnyi teljesítményéből adódna. Szükséges tehát az optimális nagyságú terhelést beállítani a napelemre [9]. Az optimális terhelésnek a beállítása a napelem feszültségének a mintavételezésével történik, ugyanis a mintavételezett értékből meg lehet határozni a napelem által leadható maximális teljesítmény nagyságát.

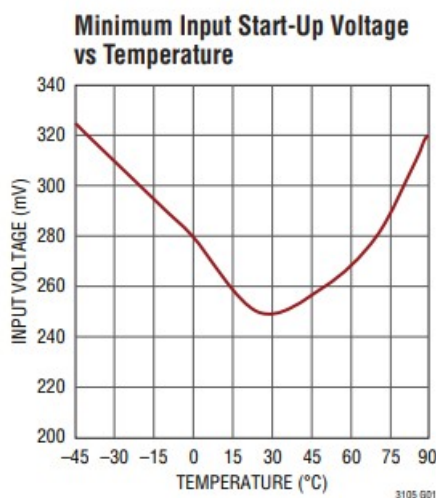
A napelemből érkező áram továbbítására és szabályozására célszerű egy integrált áramkört használni. Három integrált áramkört találtam megfelelőnek az említett feladatokra.

Fontos szempont a kiválasztásban, hogy a kiválasztott integrált áramkör nagyon alacsony bemeneti feszültség esetén is működőképes legyen, emellett a kimenetén megfelelő feszültséget tudjon előállítani az akkumulátor számára. A kiválasztás során az egymáshoz viszonyítottan alacsony fogyasztású integrált áramkörök kerültek előtérbe.

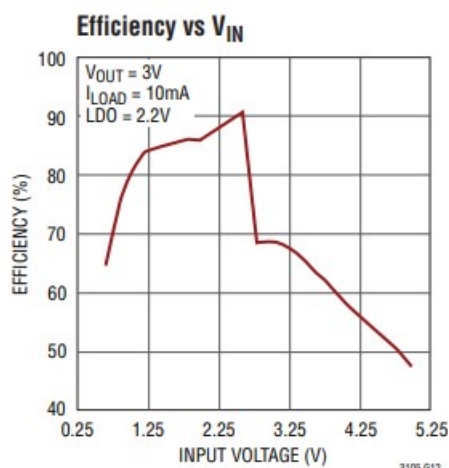
4.2.1. LTC3105 konverter

Az LTC3105 konverter, amelyet az Analog Devices fejlesztett ki, egy step-up konverter, amely képes MPPT módban üzemelni, valamint nagy előnye, hogy már 250 mV bemenő feszültség esetén is képes 1.6 V-tól 5.25 V-ig feszültséget biztosítani. A kimeneti áramerősség szintén meghatározó tényező. Az LTC3105 500 mA áramerősséget elérni a kimenetén 80 %-os hatásfok mellett nagyobb bemeneti feszültségek esetén. A legtöbb esetben 60 % feletti a hatásfoka. A napelem képes lehet az akkumulátor számára a megfelelő feszültségnél nagyobb feszültséget is szolgáltatni, emiatt fontos, hogy ez az integrált áramkör akkor is képes üzemelni, ha a bemenetén nagyobb a feszültség, mint a kimenetén lenne, viszont ebben az esetben a hatásfoka csökkenni fog. Ez valójában egy újabb mód arra, hogy a kedvezőtlen viszonyok esetén is megfelelő legyen az energiaellátás. A fogyasztása maximálisan 24 μ A [10].

A 4.1. ábra az LTC3105 integrált áramkör legkisebb üzemelési feszültségének az értékét mutatja a hőmérséklet függvényében, a 4.2. ábra pedig a hatásfokát ábrázolja.



4.1. ábra: Az LTC3105 legkisebb bemeneti feszültség értéke, amelyen üzemelni kezd a hőmérséklet függvényében



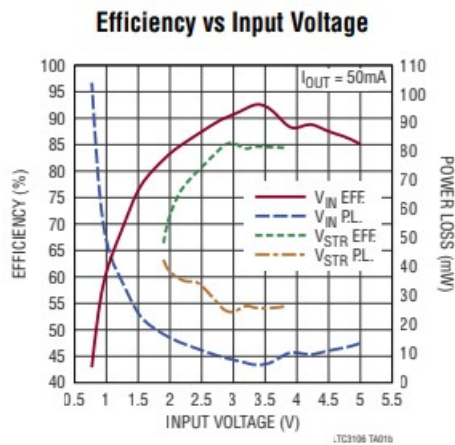
4.2. ábra: Az LTC3105 hatásfok a bemeneti feszültség függvényében

4.2.2. LTC3106 konverter

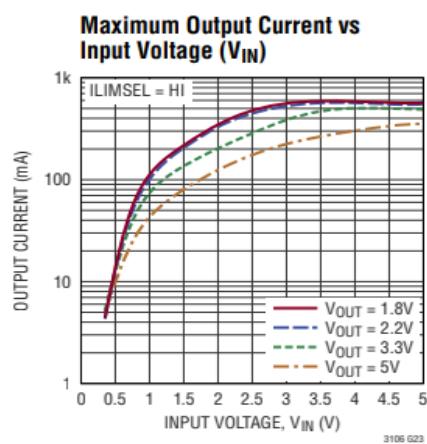
Az LTC3106 egy buck-boost konverter, amely szintén az Analog Devices által lett kifejlesztve.

Ezen integrált áramkör esetén 850 mV az a feszültségérték ami már elég ahhoz, hogy elkezdjen üzemelni, ami magasabb feszültségérték, mint az LTC3105 esetén. Nagy hatásfokkal rendelkezik, ugyanis 1.7 V - 5 V-ig 80 % fölött van a hatásfoka, amelyben az LTC3105 integrált áramkörnél jobb. Mindezek mellett alacsonyabb a fogyasztása, mint az LTC3105-nek, és több funkcióval is rendelkezik.

Hátránya, hogy bár 400 mA áramot képes továbbítani, tipikusan 300 mA körüli maximális kimenet esetén érdemes alkalmazni, ami viszont kevesebb, mint az előbbinél. Ennek az integrált áramkörnek a maximális fogyasztása 3 μ A [11]. A 4.3. ábra az LTC3106-nak a hatásfokát ábrázolja, a 4.4. ábra pedig a maximális kimeneti áramerősségét.



4.3. ábra: Az LTC3106 hatásfoka a bemeneti feszültség függvényében



4.4. ábra: Az LTC3106 maximális kimeneti áramerőssége a bemeneti feszültség függvényében

4.2.3. SPV1040 konverter

Az STMicroelectronics által kifejlesztett SPV1050 szintén egy buck-boost konverter, amely alacsony feszültségről is működőképes.

Az MPPT funkciója nagy pontossággal rendelkezik, emellett nagy előnye, hogy töltési funkciója is van az előzőekkel szemben. Hátránya, hogy 70 mA, esetleg 190 mA körüli

áramot képes továbbítani, ami a korábbi integrált áramkörökhöz képest sokkal alacsonyabb. Széles bemeneti feszültség esetén alkalmazható, és nagy hatásfoka van, még abban az esetben is, ha a bemeneti feszültség nagyobb lenne, mint a kimeneti feszültség. Fogyasztása $2.6\ \mu\text{A}$ lehet [12].

4.2.4. A kiválasztás

A választásom az LTC3105 nevű integrált áramkörre esett, mivel ez képes megfelelő mennyiségű áramot felhasználni a napelemből.

Az LTC3106-nak kisebb a fogyasztása, viszont a legtöbb funkcióit nem hasznosítanám fel. Az SPV1050 előnyei ellenére sajnos jelentősen kisebb áramot biztosít, mint az LTC3105, ezért is választottam az utóbbit.

4.2.5. Az LTC3105 további paraméterei

Az LTC3105-nek fontos funkciói vannak, például a LDO funkció. Ez egy kimenete, amely képes egy bizonyos feszültségen energiával ellátni egy olyan egységet, amely nélkülözhetetlen, és még kis bemeneti energia esetén is mindenképp működni kell. Ez a lábkiemenet $6\ \text{mA} - 12\ \text{mA}$ -t képes biztosítani és $1.4\ \text{V} - 5\ \text{V}$ feszültségű lehet. Ez akár elég lenne egy mikrokontroller tápellátására szélsőséges esetben. Az LDO akkor is működő funkció, mikor a bemeneti feszültség értéke közel van a minimumhoz.

Az SHDN lábat szabadon hagyva folyamatosan működik az áramkör, viszont földre kötve, lekapcsol.

Ahhoz, hogy a kimeneti feszültség folyamatosan stabil maradjon, visszacsatolást kell alkalmazni, amely elősegíti, hogy eltérő kimeneti érték esetén újból stabilá válhasson a kimenete. A visszacsatolást az FB „feedback” lábra kell tervezni.

Az MPPC nevű lábat le kell kötni a földre egy ellenálláson keresztül. Ezzel a ellenállással történik az MPPT folyamat feszültség beállítása.

Ez az integrált áramkör $-40\ ^\circ\text{C}$ és $85\ ^\circ\text{C}$ között üzemképes.

4.2.6. A step-up konverter áramköre

A tápellátás zajos lehet és emiatt van szükség szűrő kondenzátorok használatára. A szűrő kondenzátorok közül a $0.1\ \mu\text{F}$ értékű legtöbb esetben a rádiófrekvenciás zajokat szűr, míg a $10\ \mu\text{F}$ értékű a belső kapcsolgatásból származó zajokat szűri ki [13]. Jelen kondenzátorok

értékei a gyártó által javasoltak. Célszerű ezeket a kondenzátorokat minél közelebb helyezni az integrált áramkör lábához, mert az összekötő vezeték képes növelni a kapacitás értékét.

Az R_1 ellenállás értéke befolyásolja az MPPT funkció működési feszültségét. A 4.1. képlet amely alapján R_1 kiszámolható.

$$(4.1.) \quad R_{MPPC} = \frac{V_{MPPC}}{10 \mu A}$$

Az R_2 -es és R_3 -as ellenállás az LDO lábhoz tartoznak, ugyanis ezek az ellenállások a lábkimeneti feszültségnek stabilizáló visszacsatolását adják. Kiszámítási képleteik a 4.2. és a 4.3. képletek.

$$(4.2.) \quad R_2 = \left(\frac{V_{ki}}{1.004} - 1 \right) * R_3$$

$$(4.3.) \quad R_3 = \left(\frac{1.004}{V_{ki} - 1.004} \right) * R_2$$

Az R_5 -ös és R_6 -os ellenállás hasonlóak az LDO feszültséget visszacsatoló ellenállásokhoz. Ezek a kimeneti feszültségnek a beállításáért felelős ellenállások. A 4.4. és a 4.5. képletek segítségével számolható ki a két ellenállás érték.

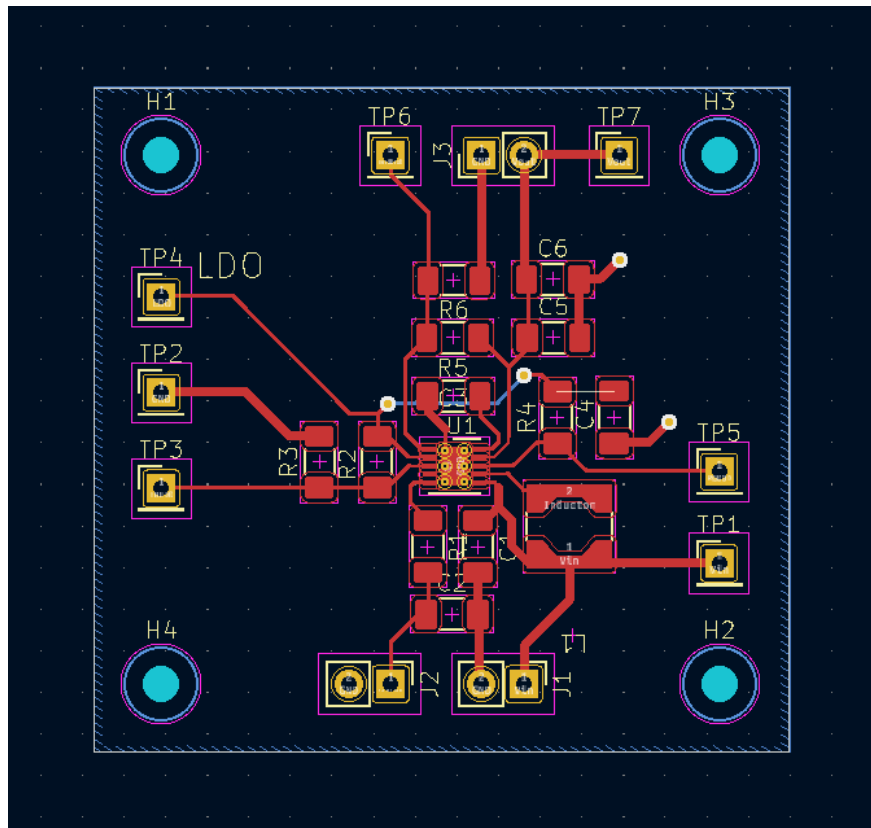
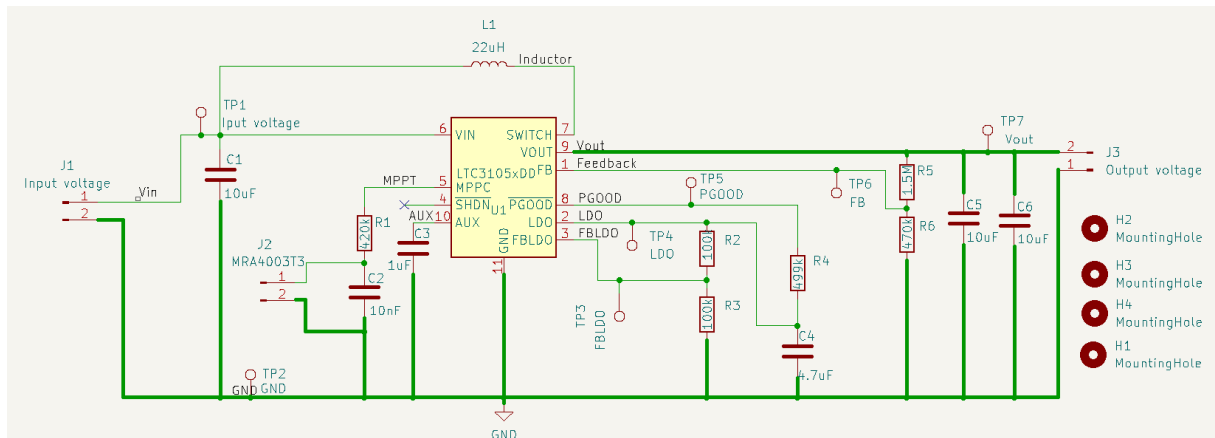
$$(4.4.) \quad R_5 = \left(\frac{V_{ki}}{1.004} - 1 \right) * R_6$$

$$(4.5.) \quad R_6 = \left(\frac{1.004}{V_{ki} - 1.004} \right) * R_5$$

Az L_1 értéke gyártó által javasolt, és 4.7 μH és 30 μH között kell lennie. Mivel egyes esetekben alacsony feszültséggel kell üzemelnie a konverternek, érdemes valamennyivel nagyobb értéket választani a minimálistól. Ez azzal indokolható, hogy nagyobb hatásfokot eredményez a nagyobb értékű tekercs. Mivel a nagyobb tekercs impedanciája nagyságával együtt növekszik így nem célszerű túlságosan nagy értékű induktivitás alkalmazása sem. A gyártó a Coilcraft MSS5131 típusú tekercs családot javasolja.

A J_2 helyre kerül egy dióda, amelynek célja, hogy kompenzálja „ V_{MPPC} ” értéket beállító ellenállás hőmérséklet miatti értékváltozását. Az MRA4003T3 típust javasolja a gyártó erre a célra.

Az általam tervezett áramkört a 4.5. ábra, a nyomtatott áramköri rajzot pedig a 4.6. ábra szemlélteti.



4.3. Áramerősség és feszültség mérési rendszer

Ennek az egységnek a feladata, hogy információval szolgáljon mérési értékekről. Képes monitorozni rákötött busz feszültségét, vagy a lábaira rákötött ellenálláson eső feszültséget. Utóbbi módszer segítségével megállapítható, az úgynevezett Shunt ellenálláson átfolyó áram erőssége, ha megadjuk, hogy mekkora a beépített ellenállás értéke. Az előbb említett ellenállás értékének aránylag kicsinek kell lennie, mivel nem szabad, hogy rajta számottevően nagy feszültség essen, ugyanis ez csökkentheti a tápegység kimeneti teljesítményét, mivel nagyobb áram folya az említett ellenálláson.

Az adott teljesítmény értéke megadható a buszfeszültség és a Shunt ellenálláson eső feszültség ismeretében.

Olyan integrált áramkör tölti be ennek a feladatnak a szerepét, amelynek van digitális kimenete, ami magában foglalja azt, hogy tartalmaz egy „analóg-digitális” átalakítót, amely a a mintavételezni kívánt feszültséget alakítja át digitális jellé. A digitális jellel műveleteket lehet végezni, amelynek köszönhetően az áramerősség és a teljesítmény értéke megadható. Ezeket az értéket el kell juttatni a digitális kimenetekre. Az adatoknak az eljuttatása az egység kommunikációs protokolljától függ.

Az általam választott integrált áramkör az INA226.

4.3.1. INA226 feszültség és áram mérő egység ismertetése

Az INA226, a korábban említett feladatok mellett számos hasznos funkciót is képes ellátni. Bizonyos funkciói miatt lett a Texas Instruments ezen érzékelője a megválasztott integrált áramkör. Megvalósítható a használatával az energiavesztés nélküli mérés.

Az adatokat az egység öt fő regiszterben tárolja. A kiindulási adatokat a Bus Voltage és a Shunt voltage regiszter tárolja. A Calibration regiszterbe kell beírni az ellenállás értékét megadó adatot, a Current regiszter pedig tárolja a kiszámított áramerősség értékét megadó adatot. A Power regiszter a kiszámított teljesítmény értékét megadó adatot tárolja. Az adatok I²C protokollal kerülnek továbbításra.

Az INA226 a buszfeszültségét 0V - 36 V-ig képes mérni. A Shunt feszültség értékét addig képes mérni, amíg a rajta átfolyó áram el nem éri a 10 A értéket. A mérés hibája 10 μ V lehet maximálisan.

A mérésre megválasztott egység működőképes, ha a bementi feszültsége 2.7 V és 5.5 V között van, és maximálisan 420 μA lehet a fogyasztása.

Egyik unkción, az Alert kimenet. Az Alert regiszterbe a felhasználónak meg kell határoznia egy előre megadott eseményt, amely ha bekövetkezik, akkor a kimeneten ezt jelzi. Öt lehetséges esemény bekövetkezésekor képes az Alert funkció aktívvá válni. Az egyik ilyen eset, ha az ellenálláson eső feszültség a megadott értéknél nagyobb, vagy ha kisebb. Egy másik esemény ami aktívvá teheti a funkciót ha a számolt teljesítmény értéke alacsonyabb, mint a meghatározott érték vagy akkor, ha a busz feszültség a megadott értéknél nagyobb, vagy ha kisebb [14].

Az integrált áramkör képes emellett átlagolni a beérkező adatokat, és be lehet állítani a mintavételezési sebességet, ezt pedig 140 μs és 8.244 ms között.

Az INA226 -40 °C-tól 125 °C-ig működőképes.

A 4.7. ábra és a 4.8. ábra az INA226 ofszet hibáit mutatják.

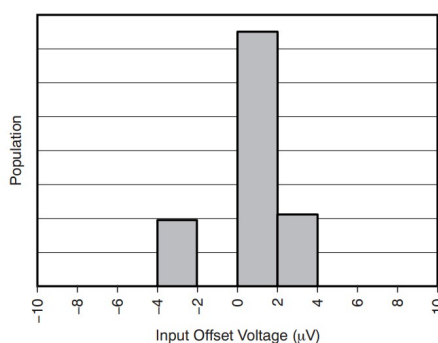


Figure 2. Shunt Input Offset Voltage Production Distribution

4.7. ábra: Az INA226 Shunt ellenálláson mért feszültségének ofszet hibájának gyakorisága

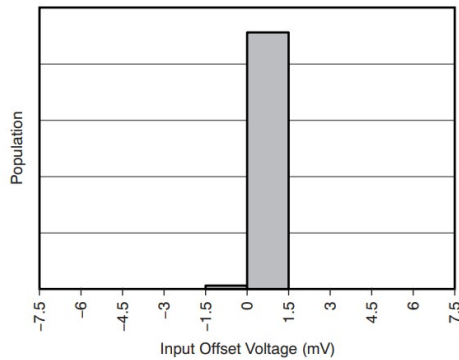


Figure 8. Bus Input Offset Voltage Production Distribution

4.8. ábra: Az INA226 Bus-on mért feszültségének offset hibájának a gyakorisága

4.3.2. Az INA226 feszültség és áram mérő egység áramköre

Az áramkör megtervezésénél érdemes szűrő alkatrészeket alkalmazni, mivel az analóg-digitális átalakító 500 kHz-en üzemel, és ha a bemenetre kisebb frekvenciás zaj érkezik be, akkor hibás lehet az átkonvertált adat. Nemcsak a mérendő oldalt kell szűrni a zaj miatt, hanem a tápoldalt is.

A szűrő alkatrészek közé egy kondenzátor és két ellenállás tartozik, amelyek értékei a gyártó által meghatározottak.

Szükséges felhúzó ellenállásokat tenni a kimenetekre a kommunikáció megvalósulásának érdekében [15]. A felhúzó ellenállások értékét a 4.6. képlet adja meg.

$$(4.6.) \quad R_{fel} = \frac{V_{táp} - V_{Hmin}}{I_S}$$

A képletben „ V_{Hmin} ” az érték ami a minimális kimeneti feszültség érték amikor a kommunikációs lábkimenet még magas logikai szintű, az „ I_S ” pedig a láb által szolgáltatott áramerősség.

A „Shunt” ellenállásnak nagy teljesítményűnek kell lennie mivel nagy áramerősség is átfolyhat rajta. Értékének megadása a 4.7. képlettel lehetséges.

$$(4.7.) \quad R_{Shunt} = \frac{V_{drop}}{I_{source}}$$

A képletben az „ I_{source} ” az ellenálláson maximálisan átfolyó áram erőssége, a „ V_{drop} ” pedig az ellenálláson eső feszültség maximuma.

Jelenleg nincs véglegesen megtervezett áramkör ehhez az integrált áramkörhöz.

4.4. Az energiatárolás

Az akkumulátor használata szükséges, mivel a korábban említett probléma miatt napelemek sem képesek folyamatosan energiát biztosítani, viszont abban a esetben ha tudnak, akkor tárolni kell a rendelkezésre álló energia fel nem használt részét, mert az esetek többségében szükség lenne rá, emellett pedig a napenergiát a műhold rendszerei nem képesek az összes napelemből egyszerre felhasználni amikor a műhold a Föld világos oldalán tartózkodik.

Számos tényező befolyásolja, hogy milyen akkumulátort szükséges megválasztani. Fontos tényezők, hogy az akkumulátor mekkora energiát képes tárolni a tömegéhez képest, mekkora lehet a maximális töltési teljesítménye, mekkorák legyenek a feszültséghatárai, hogyan reagál a hőmérséklet megváltozására, és hány töltés – kisütési ciklust képes kezelni.

Felmerülnek a kérdések, hogy milyen biztonságos töltési módszerek lehetnek alkalmasak a hosszabb élettartam elérése érdekében, emellett hogyan lehet a töltést a leghatékonyabban megvalósítani. Milyen elemeknek kell alkotnia a töltési rendszert, és milyen funkciókat lásson el? A lemerült állapot után mekkora legyen az a töltöttségi állapot ahonnan az akkumulátor újra elkezdhet energiát szolgáltatni?

A megfogalmazott kérdésekre akkor kapható válasz, ha az akkumulátor paramétereinek figyelembevételével kiválasztjuk a legmegfelelőbbet, és teszteljük különböző feltételek mellett. Az előzőből egy újabb kérdés következik. Az akkumulátor vizsgálata során milyen méréseknek kell alávetni az akkumulátort, hogy az adott típusról meg lehessen állapítani, hogy megfelelő lesz-e a feladatra, emellett biztonságosan üzemel majd? Alapvető mérések elengedhetetlenek, például mérni kell, hogy hogyan reagál az akkumulátor a töltésre, vagy a kisütésre. Mivel mechanikai erőhatásnak is ki lesz téve az akkumulátor ezért fontos rázkódás tesztnek is alávetni. Azt szintén meg kell vizsgálni, hogy az akkumulátor hogyan reagál alacsony vagy éppen a magas hőmérsékletre.

Az akkumulátor élettartamának megőrzése egybefügg a műhold élettartamával. Az akkumulátor hőmérsékletét figyelni kell. A kritikus hőmérséklet az akkumulátor üzemidejének csökkenését idézi elő, ezért ha a hőmérséklet szenzor alacsony hőmérsékletet

érzékel, akkor célszerű lekapcsolni az energiát igénylő egységeket, és az energiát az akkumulátor fűtésére fordítani, amíg a hőmérséklete stabil nem lesz. Ezt egy fűtőszál segítségével lehet kivitelezni. Szigetelést szintén is érdemes alkalmazni.

A műhold akkumulátora teljesítményének a 30 %-án, már nem használható amíg el nem kezd a napelemek segítségével töltődni, és el nem ér egy bizonyos töltöttségi szintet. A feszültségének maximális értékét sem szabad elérnie, mivel ekkor túltöltött állapotba kerül, és ennek hatására később nem lesz képes ugyanakkora töltésmennyiséget eltárolni, mint a túltöltés előtt.

Az akkumulátor töltése integrált áramkör segítségével történik. Minden akkumulátor töltő egy akkumulátor cellát fog tölteni. Az akkumulátor töltő mellett alkalmazni kell egy korábban említett hőmérséklet mérő szenzort, emellett zárlatvédelmet is.

4.5. Akkumulátor védelem

Az akkumulátort közvetlenül egy korábban megemlített buck-boost konverter fogja terhelés által fogyasztani. Alap esetben az akkumulátor feszültségét a konverter képes lehet annak küszöbfeszültségére csökkenteni abban az esetben, ha nincs a napelemekből elegendő beérkező energia, és az folyamatosan rá lenne csatlakoztatva a konverterre. Mivel az akkumulátor feszültsége egy bizonyos feszültség érték alá nem eshet, ezért van szükség egy biztonsági áramkörre, amely folyamatosan figyeli az akkumulátor feszültségét, és logikai státuszkiemenete határozza meg a fogyasztó konverter aktivitását. Ezt a kimenetet legtöbb esetben egy úgynevezett Enable bemenetre kell csatlakoztatni a buck-boost konverteren.

A védelmi egység egy feszültség osztó által beállított feszültség érték elérésekor, ami a minimális feszültség érték a kimenetén megszünteti a jelet, ezzel a konverter lekapcsolásra kerül, és nem fogyasztja tovább az akkumulátort. Erre a feladatra az MCP1316 típusú integrált áramkört választottam ki. Ezt ez integrált áramkört a Microchip Technology forgalmazza.

Fontos megjegyezni, hogy ez az integrált áramkör nem csak az akkumulátort védi. Ha az energiát feldolgozó egységben nincs alacsony feszültségi védelem, abban az esetben ha mégis bekapcsolt állapot esetén kellene alacsony feszültséggel dolgoznia, akkor a konverter kimenetének feszültsége is csökkenhet. Ha az energiafogyasztó elemek a konverter alacsony kimeneti feszültségét használják fel, akkor maguk a számításokat végző egységek hibás

működésre jutnak, mivel ahelyett, hogy kikapcsolt állapotba mennének, alacsony feszültséggel kell üzemelniük. Érdemes olyan biztonsági áramköröket alkalmazni, amelyek lekapcsolják az egyes elemeket, ha a bemeneti feszültség alacsonyabb a szükségesnél.

4.5.1. MCP1316 feszültségfelügyelő egység tulajdonságai

Ez az integrált áramkör 2.9 V - 4.7 V között képes változtatni a kimenetének az állapotát, amely megfelelő ha a használt akkumulátornak az alsó küszöbfeszültségének értéke 2.9 V.

Üzemi feszültségtartománya 1 V–5.5 V. Maximális fogyasztása 10 μ A.

Kimenete active-low és Push-Pull, ami azt jelenti, hogy a buck-boost konverter Enable bemenetére alacsony logikai szintű jel kerül az MCP1316 integrált áramkör kimenete által, ha a bemeneti feszültség a beállított érték alá esik, vagy ha éppen bekapcsolási állapotban van. Egyéb esetben is képes alacsony logikai szintű jelet szolgáltatni, viszont ezeket a funkciókat nem használok ki jelen alkalmazásban.

Ahhoz, hogy alap helyzetben a kimenetén magas logikai érték legyen, egy felhúzó ellenállást kell a kimenetére helyezni. Ezt az ellenállást a tápfeszültség és a kimenet közé kell kötni. A típus amit választottam tartalmaz egy belső ellenállást, amelynek köszönhető, hogy nem szükséges külső felhúzó ellenállást használni [16].

Az MCP1316 integrált áramkör -40 °C-tól 125 °C-ig üzemképes.

A 4.9. ábra az MCP1316 fogyasztását mutatja.

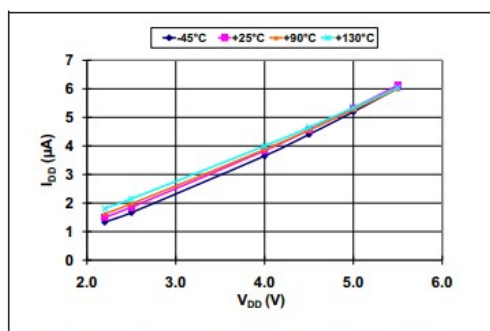


FIGURE 2-15: I_{DD} vs. V_{DD} (Reset Power-up Timer Active or Watchdog Timer Active) (MCP1316-2.0).

4.9. ábra: Az MCP1316 fogyasztása a bemeneti feszültség és hőmérséklet hatására

4.5.2. Az alacsony feszültség védelmi egység áramköre

Az érzékelt feszültségnek nem szabad nagy mennyiségű zajt tartalmaznia, hiszen ez kritikus helyzetben okozhat a kimenetében olyan értékváltozást, amely megszakíthatja az energiaellátást a konverter felől, és ez nem megfelelő, ugyanis ahhoz, hogy újra tudjon indulni a folyamat, ahhoz a konverternek át kell mennie a bekapcsolási folyamaton, ami idővesztést okoz. Ezt el kell kerülni.

Két módszert lehet alkalmazni az említett problémára. Az egyik, hogy a beépített hiszterézis kerül felhasználásra, amely nem engedi, hogy a bemeneti feszültség kis változásai folyamatosan ellenkező értékére változtassák meg a logikai kimenet értékét. A másik lehetőség, hogy egy szűrő kondenzátor kerül beépítésre, amely értékét a rádiófrekvenciás zajokra kell méretezni.

A gyártó által javasolt értékű kondenzátor alkalmazása mellett döntöttem, mivel ez az érték megfelelően van méretezve, akár az említett zajok szűrésére is.

A bemeneti ellenállások azért szükségesek, mivel a küszöbfeszültséget, ahol a kimenet alacsony logikai szinten lesz, ezekkel kell beállítani manuálisan, jelen alkalmazásban visszacsatolás által. A kiszámítási képletet a gyártó határozta meg, ami alapján az R_1 , és R_2 ellenállás meghatározható. Ezek képlete a 4.8. képlet.

$$(4.8.) \quad \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} = \frac{V_{trip}}{V_{source}}$$

A fenti képlet esetén a „ V_{trip} ” a küszöbfeszültség értéke, a „ V_{source} ” pedig a tápfeszültség értéke.

Az R_3 ellenállás értelme az alacsony bemeneti feszültséggel függ össze. Ha a bemeneti feszültség egyes esetekben túlságosan alacsony lenne, akkor a kimenetre az integrált áramkör nem lesz képes alacsony logikai állapotot előállítani, ehelyett a kimenete úgynevezett „lebegő” állapotba fog kerülni. Ha az energiaellátás nem képes elég energiát biztosítani, akkor a konvertert is le kell kapcsolni. Ahhoz hogy a konverter biztosan le legyen kapcsolva, még alacsony feszültség esetén is, az akkumulátor védelmét biztosító egységnek a kimeneti lábára egy „le húzó” ellenállást kell tenni, amely a GND-re vezeti a lábat, amely a földet jelenti. Ez esetben a kimenet biztosan alacsony logikai szintű lesz a beállított minimális feszültség elérésekor, és a küszöbfeszültség alatt is. Ezen ellenállásnak értékét képlettel meg lehet adni,

viszont a gyártó ajánlja, hogy az általuk meghatározott értékű ellenállás kerüljön alkalmazásra. Az ellenállás kiszámolási képlete a 4.9. képlet.

$$(4.9.) \quad R_3 = \frac{V_{Lmax} - 0}{I_{source}}$$

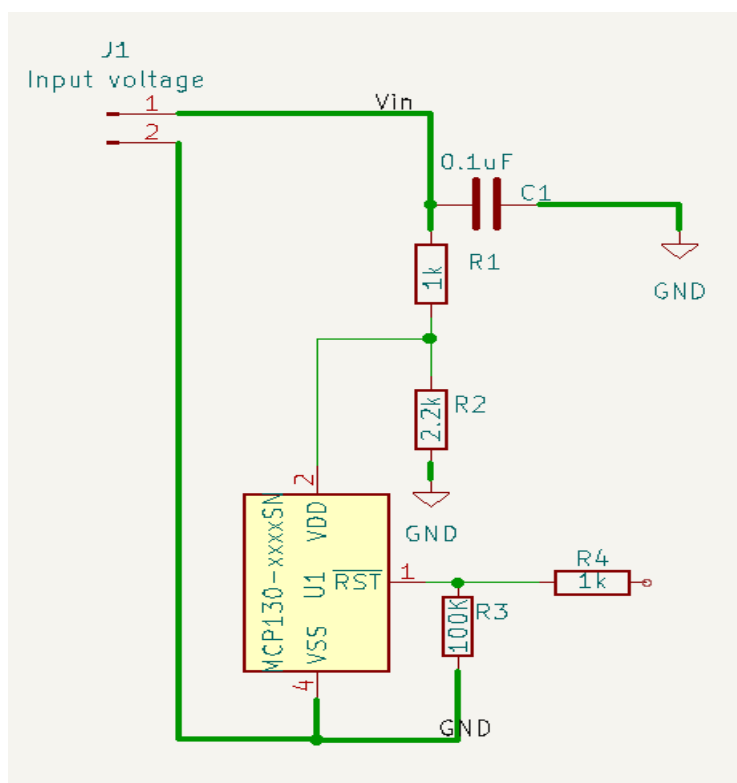
A „ V_{Lmax} ” az alacsony logikai szintű kimenet kimeneti feszültségének a maximuma, az „ I_{source} ” pedig a kimenet által szolgáltatott áram erőssége.

Mivel a kimeneti áramerősség nagysága lehet, hogy túl magas a konverter Enable bemenetére, éppen emiatt kell áramkorlátozó ellenállást használni. Ezt a célt szolgálja az R4-es ellenállás. Az akkumulátor védelmi áramkörének adatlapjában ez az érték 1 k Ω , viszont értéke képlet segítségével is megadható [17]. Az R4-es ellenállás képlete, a 4.10. képlet.

$$(4.10.) \quad R_4 = \frac{V_{kiRST} - V_{beEN}}{I_{En}}$$

A „ V_{kiRST} ” a kimenetet szolgáltató áramkör kimeneti feszültsége ha magas logikai szinten van, a „ V_{inEN} ” a konverter bemenetének maximális feszültség értéke, az „ I_{EN} ” pedig a konverter bemenetére maximálisan adható áramerősség.

A 4.10. ábrán az MCP1316 integrált áramkörhöz megtervezett áramkör látható.



4.10. ábra: Az MCP1316-hoz megtervezett áramkör

4.6. A buck-boost konverter

Az előállított feszültségnek megfelelőnek kell lennie az akkumulátor számára, viszont a többi energiát fogyasztó egységnek 3.3 V egyenfeszültséget kell biztosítani.

Ahhoz, hogy alacsonyabb, de stabil feszültséget lehessen előállítani, elég lenne egy step-down konverter is. Mivel az akkumulátor feszültsége, a teljesítményének leadásának köszönhetően csökken, így az akkumulátor feszültsége 3.3 V alá is eshet, amely feszültséget viszont felfelé kell konvertálni. Ha 3.3 V fölé megy az akkumulátor feszültsége, akkor le kell konvertálni a feszültséget. A legfontosabb, hogy a kimeneti feszültségnek minden esetben 3.3 V-nak kell lennie.

Az áramkört, amely mindkét folyamatot képes végrehajtani, a bemeneti feszültségtől függően buck-boost konverternek nevezzük [18].

Számos előnye miatt a TPS63020 integrált áramkör választottam.

4.6.1. TPS63020 konverter ismertetése

Az integrált áramkör egy buck-boost konverter, melyet a Texas Instruments hozott forgalomba.

A kapcsolgatás PWM jellel vezérelt, ezáltal hozza létre a konverter belül a DC/DC konverziót. Üzemelési feszültségének tartománya 1.8 V - 5.5 V. A kimenete 1.2 V - 5 V között lehetséges. Maximális fogyasztása 50 μ A, ami nagyon jónak minősül. Hatásfoka 90 % feletti 100 mA és 1 A kimeneti áramerősség között. Képes 4 A áramerősséggel is dolgozni, és több funkciója is van, amelyeket felhasználva sok probléma megoldható.

A Dynamic Current Limit funkció azt a célt szolgálja, hogy szélsőséges helyzetben csökkenti a kimeneti áram erősségét, csökkentve ezzel az integrált áramkör hőmérsékletét, emellett a forrásának a terhelését. Szélsőséges helyzet lehet például, ha a bemeneti feszültség 2.3 V alá esik, vagy ha a hőmérséklet jelentősen megnő.

Az Enable funkció lehetővé teszi, hogy ki lehessen kapcsolni, ha szükség lenne rá. Ha a bemenet logikailag magas szintű, akkor kerül bekapcsolt állapotba, ha a bemenet logikailag alacsony szintű, akkor kikapcsolt állapotba fog kerülni. Mindehhez egy Start-up folyamat kapcsolódik, ami lecsökkenti a maximálisan feldolgozható energiának az áramerősség határát, amivel képes dolgozni, amíg a felkapcsolás folyamata be nem fejeződik.

A Feedback funkció segítségével be lehet állítani a konverter kimeneti feszültségét egy feszültségosztóval, amit vissza kell csatolni a FB „feedback” lábra.

Az Overvoltage protection funkció akkor lép életbe, ha a Feedback lábra nincs megfelelően visszacsatolva a kimenet. Abban az esetben ha a „Vki” kritikus értéket érne el akkor a funkciónak köszönhetően a belső erősítést csökkentett lesz.

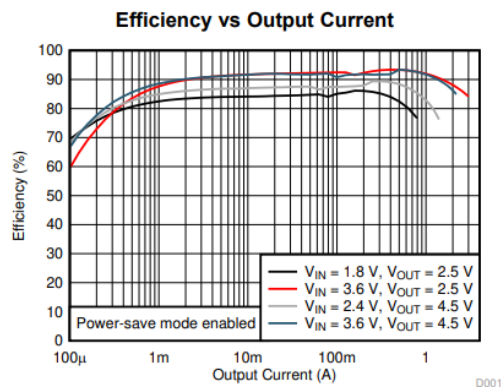
A számos hasznos funkció mellett van egy biztonsági mechanizmus a konverterben, ami az Undervoltage Lockout. Azt a célt szolgálja, amit az akkumulátor védelmére szolgáló integrált áramkör. Ha a konverter bekapcsolása alatt a bemeneti feszültség nem megfelelően nagy, akkor nem megy végbe a bekapcsolás folyamata. Azonban, ha a bemeneti feszültség működés közben lenne kisebb, akkor automatikusan lekapcsol egy minimális bemeneti feszültség esetén. A minimális feszültség értéket a V_{INA} bemeneten keresztül érzékeli. Ha a bemenetre megfelelő nagyságú feszültség érkezik, akkor újra üzemelni fog a konverter.

Az Overtemperature Protection funkció hasonló a Dynamic Current Limit funkcióhoz, mivel ennek a funkciónak köszönhetően ha a hőmérséklet meghalad egy értéket, amelyet az integrált áramkörben található hőmérséklet szenzor figyel, akkor lekapcsolja az egységet megvédve azt a túlzottan magas hőmérséklettől. Ha a hőmérséklet újra megfelelő, akkor megint működésbe léphet az integrált áramkör. Beépített hiszterézis gátolja meg a konverter biztonsági okokból mért értékeinek kis változásakor bekövetkező bizonytalan működést.

Az energiafelhasználást nagy figyelemmel kell kísérni. Egy másik hasznos funkció újabb lehetőség erre, a Power Save mód. Ha a bemeneti feszültség és áramerősség alapján a kimeneti áramerősség 100 mA alatti lenne, akkor az áramkör olyan módon kezd el üzemelni, hogy minél kevesebb energiát veszítsen el. A kapcsolási frekvenciát csökkenti, így a fogyasztás csökkenhet, a hatásfok viszont nőhet. Ez a funkció csak akkor lesz aktív, ha az adott körülmények mellett a PS/SYNC láb a földre van kötve. A 4.11. ábra a TPS63020 hatásfokát mutatja, a 4.12. ábra pedig annak maximális kimeneti áramerősségét.

Ez a konverter típus $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ között üzemképes [19].

A 4.11.-es ábra jelen konverter hatásfokát, a 4.12.-es ábra pedig annak kimeneti áramerősségét ábrázolja.



4.11. ábra: A TPS63020 hatásfoka a kimeneti áramerősség hatására

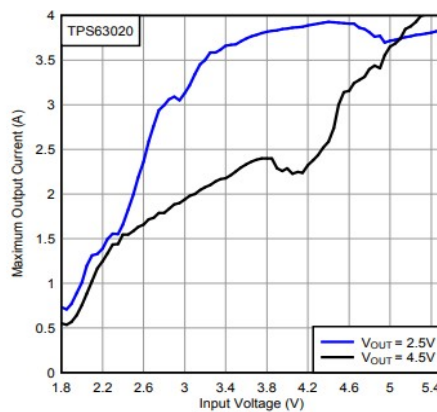


Figure 1. Maximum Output Current Versus Input Voltage, TPS63020, V_{OUT} = 2.5 V/4.5 V

4.12. ábra: A TPS63020 maximális kimeneti áramerőssége a kimeneti feszültség, és a bemeneti feszültség függvényében

4.6.2. A buck-boost konverter áramköre

Egy bemeneti kondenzátor szükséges a tápvonalon megjelenő elektromágneses interferencia miatt, mivel ez befolyásolja a konverter működését. A bemeneti kondenzátor kiszámításának képlete a 4.11. képlet [20].

$$(4.11.) \quad C_{be} = \frac{I_{be}}{2 * f_{sw} * V_{hull}}$$

Az „ f_{sw} ” a kapcsolási frekvencia Hz-ben, a „ V_{hull} ” a megengedett maximális feszültség hullámosság és az „ I_{be} ” pedig $P_{be}=P_{ki}$ képletből számítható, vagy az akkumulátor és az akkumulátort töltő elemek kimeneteinek áramerősségeinek az összegéből adható meg. A javasolt bemeneti kondenzátor egy kerámiakondenzátor, és 10 μF értékű, de akár lehet nagyobb is. A képletet használva, ha kisebb kimeneti feszültség hullámosságot kellene elérni és a bemeneti áramerősség célszerű, ha nagyobb értékkel van megadva a kritikus helyzetek elkerülése miatt akkor ezekből az következik, hogy a kondenzátor értéke előnyösebb, ha magasabb, ezért két 10 μF értékű kondenzátort kötöttem párhuzamosan.

A kimeneti kondenzátorok a 4.12. képletet használva kapható meg [21].

$$(4.12.) \quad C_{ki} > \frac{I_{ki}}{f_{sw} * V_{hull}}$$

A képletben szereplő „ I_{ki} ” szintén a $P_{be}=P_{ki}$ képletből számítható ki. A kimeneti kondenzátor értéke közelebb van 88 pF értékhez, így a gyártó által javasolt módon négy darab 22 pF-os kondenzátort kötöttem párhuzamosan.

Az R_5 és R_6 ellenállás a kimeneti feszültség beállítása miatt szükséges. A két ellenállás egy feszültségosztót alkot, amelyet vissza kell csatolni, a kimeneti feszültség folyamatos szabályozása miatt. A 4.13. és 4.14. képleteket használva megkaphatóak az ellenállás értékek.

$$(4.13.) \quad R_5 = R_6 * \left(\frac{V_{ki}}{V_{FB}} - 1 \right)$$

$$(4.14.) \quad R_6 = R_5 * \left(\frac{V_{FB}}{V_{ki} - V_{FB}} \right)$$

A képletekben a „ V_{FB} ” a visszacsatoláshoz szükséges referenciafeszültség, melynek értéke 500 mV.

Az L_1 értéke a konverter adatlapjában található meg, emellett a kiszámolási képlet is fel van tüntetve a dokumentumban. A képlet a 4.15. sorszámmal rendelkező képlet [22].

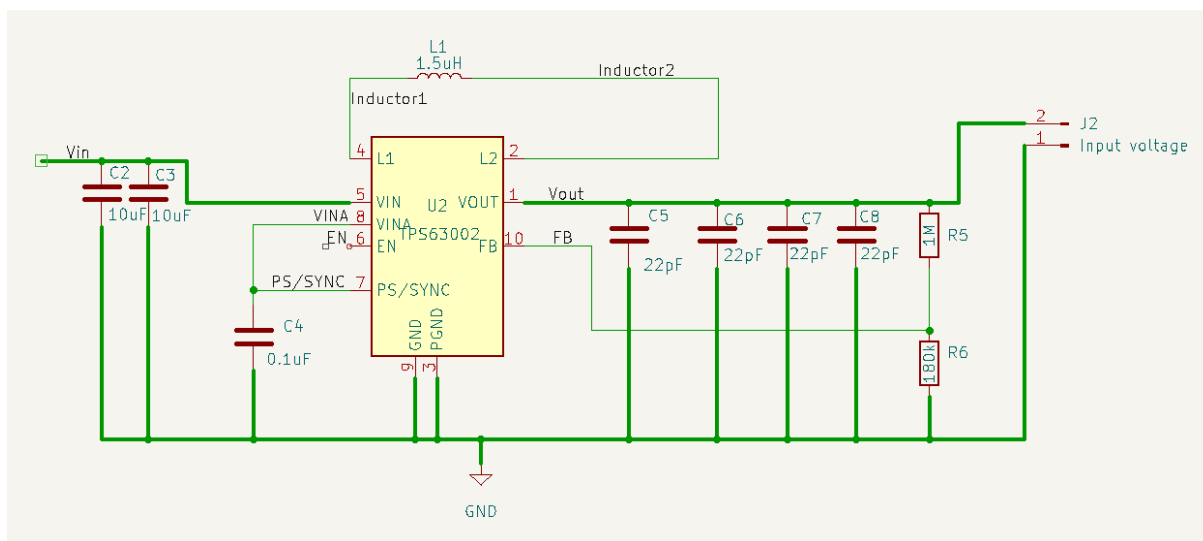
$$(4.15.) \quad L > \frac{U_{ki}^2}{P_{be}} * \frac{(D * (1 - D))^2}{2 * f_{sw}}$$

Az „ L ” a tekercs induktivitása, a „ P_{be} ” a bemenő teljesítmény, a D pedig a kitöltési tényező.

A tekercs értéke 1.5 μH lesz. A gyártó ajánl típus szerint tekercset, amely a Coilcraft XFL4020-152ME sorszámmal rendelkező tekercs.

Célszerű a tekercset, és a kondenzátorokat minél közelebb helyezni egymáshoz és a lábakhoz. Ezt mindegyik már megemlített egység megtervezésekor célszerű figyelembe venni.

A 4.13.-as ábra az általam TPS63020-as konverterhez tervezett áramkört mutatja.



4.13. ábra: A TPS63020 áramköre

4.7. Az energiaellátást vezérlő egység

Azt, hogy hogyan jut el az energia a napelemekből a fogyasztókhoz felügyelni kell. Érdekes ebben az esetben a folyamatnak alkotóelemeit folyamatosan ellenőrizni, és információt gyűjteni azok állapotáról.

A hibás egységeket érdemes mielőbb lekapcsolni, és a redundáns egységet működésbe hozni. Vezérelni és szabályozni kell bizonyos elemeit a rendszernek. A begyűjtött adatokat el kell juttatni a központi vezérlő számítógéphez.

Ezeket a feladatokat látja el az energiaellátásért felelős vezérlő egység. Ez az egység egy mikrokontroller lesz.

Képes önállóan beavatkozni, a központi vezérlő számítógéptől függetlenül, ugyanakkor folyamatosan kommunikál azzal. Amennyiben a választott mikrokontrollernek vannak analóg értékeket digitálissá átalakító bemenetei, akkor ezeket érdemes feszültség mérésre felhasználni. Egy nagyobb számítóképességű vezérlőt célszerű alkalmazni, mivel a begyűjtött információk alapján el kell döntenie, hogy egyes rendszereket lekapcsol-e, esetleg engedélyt ad a működésükre.

Mivel jelenleg nem lett kiválasztva mikrokontroller, hogy betöltse az energiaellátást vezérlő egység feladatát, ezért annak paraméterei, áramköre, pontos feladatainak megfogalmazása és programozása nem része a dolgozatomnak.

4.8. E-Fuse

Az E-Fuse egy olyan részegysége a műhold rendszerének, amely képes az általa mért rendszer megfigyeléséből szerzett információ alapján eldönteni, hogy egy bizonyos egység jól működik, vagy hibás. Ha hibás működést észlel, akkor dönthet úgy, hogy lekacsolja az alrendszert, majd erről információt küld a vezérlő egységnek. A vezérlő rendszer utasítása alapján ha lehetséges, akkor visszakapcsolja a lekapcsolt rendszert. A redundáns tagra való átállás az említett vezérlő egységnek a feladata.

A vezérlő és az E-Fuse folyamatosan kommunikálnak. Az E-Fuse tartalmaz egy feszültség és áramerősség mérő egységet, amely a mérési információkat szolgáltatja.

5. Összefoglalás

Első lépésként elkészítettem az energiaellátás rendszertervét, amely tartalmazza az alkotóelemeinek energiaellátását, és az áram útját, amely a napelemből érkezik, és a buck-boost konverterbe jut el. A rendszerterv tartalmazza a mérési pontokat is.

Második lépésben kiválasztottam az egyes feladatokra milyen megoldást választok, ezen belül, pedig megválasztottam a megfelelő integrált áramköröket. Különféle szempontok alapján választottam ki az egyes elemeket az egységeknek, legtöbb esetben az üzemelési feltételeket emeltem ki. Fontos szerepet játszott a kiválasztásban a fogyasztás, számos esetben a hatásfok, és az egyes funkciók.

A harmadik lépésben megválasztottam az alkatrészeket, méret, tűrés, és működési tartomány figyelembevétele alapján.

A negyedik lépés volt az áramkörök és a nyomtatott áramköri rajzok megtervezése. A folyamatot meghatározták a gyártó javaslatai, és más megoldások elemzése. Az elkészült nyomtatott áramköri rajz tartalmaz mérési pontokat, amelyek fontos részeit képezik a továbbiakban az egyes vizsgálatoknak.

Az alkatrészek méreteit illető kérdésre a kutató munka által megszületett a válasz, miszerint a tesztelésre megtervezett paneleken 1206-os méretű SMD alkatrészek, a végleges paneleken viszont a 0603-as méretű SMD alkatrészek lesznek felhasználva.

5.1. Jövőbeli tervek és feladatok

A következőekben el kell végezni a méréseket, panelenként, majd egybeépítve. További feladat, hogy megtervezem az áramerősség és feszültség mérő egység áramkörét, majd a töltési rendszert. Emellett meg kell, hogy tervezzem a vezérlő rendszert, majd annak feladatait pontosan meg kell határoznom. Ezután az említetteket tesztelni kell. Ezt követően ki kell választani a megfelelő akkumulátort, és annak darabszámát, a napelemek típusát, és azok bekötésének módját. Az energiaellátás minden elemén méréseket kell végezni beleértve akkumulátort és a napelemeket.

6. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani Németh Péter Ernő konzulensemnek. Fontos ismeretekkel látott el, és többször is időt szánt arra, hogy felkészítsen olyan témákban, amelyek ismereteinek elsajátítása nagyban hozzájárult jelen munkámhoz.

Szeretném megköszönni Marton Gábornak, hogy lehetőséget adott arra, hogy részt vehessek a győri műhold fejlesztésében, emellett, hogy nagy odaadással vezette a győri műholdprojektet. Hálás vagyok, hogy mindig segítőkész volt, és szakmailag támogatott a munkámban.

Köszönöm Nagy Zoltánnak, hogy a felmerülő kérdéseimre készségesen válaszolt, és ellenőrizte az energiaellátó rendszer fejlesztésének folyamatait.

Végezetül szeretném megköszönni Dr. Vári Péternek, hogy támogatta a munkámat, és a műhold projekt előrehaladását, emellett és lehetőséget biztosított olyan személyekkel konzultálni, akik segítenek a műholdfejlesztésben.

7. Irodalomjegyzék

[1]

KiCad EDA - Schematic Capture & PCB Design Software

<https://www.kicad.org/>

(elérés dátuma: 2023.11.06.)

[2]

TinyGS: Home

<https://tinygs.com/>

(elérés dátuma: 2023.11.06.)

[3]

Géczy Gábor – SMOG-1 műhold központi energiaellátó rendszer és kísérleti doziméter tervezése

https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/gabor_eps2/GeczyGabor_OTDKdolgozat_v2t.pdf

(elérés dátuma: 2023.11.06.)

[4]

Stanford University – Cubesat Design Specification

https://org.ntnu.no/studsat/docs/proposal_1/A8%20-%20Cubesat%20Design%20Specification.pdf

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[5]

Géczy Gábor – A SMOG-1 másodlagos energiaellátó rendszere

https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/gabor_eps2/Geczy_Gabor_MSc_Diplomaterv_3_v0_t.pdf

(elérés dátuma: 2023.11.06.)

[6]

Herman Tibor – SMOG-1 elsődleges energiaellátó rendszere

https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/tibi_eps1/Smog-1_EPS.pdf

(elérés dátuma: 2023.11.06.)

[7]

Herman Tibor – A Smog-1 PocketQube elsődleges energiaellátó rendszere, 2015.03.11.

https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/tibi_eps1/A-Smog1-PocketQube-elsodleges-energiaellato-Dolgozat-4.pdf

(elérés dátuma: 2023.11.06.)

[8]

RF & Wireless Vendors and Resources - Advantages of Ceramic Capacitor | Disadvantages of Ceramic Capacitor

<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Ceramic-Capacitor.html>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[9]

Texas Instruments - Buck Charger with MPPT and Boost Converter for Solar Powered Application, August 2022

<https://www.ti.com/lit/pdf/slva6c9>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[10]

Analog Devices – LTC3105, 2015

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3105fb.pdf>

(elérés dátuma: 2023.11.05.)

[11]

Analog Devices – LTC3106, 2010

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3106f.pdf>

(elérés dátuma: 2023.11.05.)

[12]

STMicroelectronics – SPV1050, January 2022

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1050.pdf>

(elérés dátuma: 2023.11.05.)

[13]

All About Circuits - Analog & Mixed-Signal Design

<https://forum.allaboutcircuits.com/threads/different-value-decoupling-capacitors.141195/>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[14]

Texas Instrumnets – INA226, 2010-2015

<https://www.ti.com/lit/gpn/ina226>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[15]

Circuit Digest - Pull Up and Pull Resistor

<https://circuitdigest.com/tutorial/pull-up-and-pull-down-resistor>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[16]

Microchip Technology – MCP131X/2X, 2005-2010

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21985d.pdf>

(elérés dátuma: 2023.11.05.)

[17]

OurPCB Tech - Current Limiting Resistor: Protective Resistor for Regulating Curret

<https://www.ourpcb.com/current-limiting-resistor.html>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[18]

Texas Instruments - Basic Calculations of a 4 Switch Buck-Boost Power Stage, January 2018

<https://www.ti.com/lit/pdf/slva535>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[19]

Texas Instrumnets – TPS6030, July 2019

<https://www.ti.com/lit/gpn/tps63020>

(elérés dátuma: 2023.11.05.)

[20]

Texas Instruments - Input and Output Capacitor Selection, February 2006

<https://www.ti.com/lit/pdf/slta055>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)

[21]

ElectronicsBeliever - How to Select Capacitors – Selecting Capacitor Rating

<https://electronicsbeliever.com/how-to-select-capacitors/>

(elérés dátuma: 2023.11.2.)

[22]

Texas Instruments - Basic Calculations of a 4 Switch Buck-Boost Power Stage, January 2018

<https://www.ti.com/lit/pdf/slva535>

(elérés dátuma: 2023.11.02.)