

SMOG-1 elsődleges energiaellátó rendszere

Herman Tibor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Szélessávú és vezeték nélküli kommunikáció szakirány

Email: therman89@gmail.com

Kivonat—A SMOG-1 egy PocketQube méretű (5 cm élhosszúságú kocka) műhold, amely a Műszaki Egyetemen, gépész és villamosmérnök hallgatók és oktatók közreműködésével készül. A fedélzetre kerülő mérőrendszer az ember által kisugárzott EM szennyezést vizsgálja a Föld körül a földfelszíni mősorszórók frekvenciasávjában (430 - 860 MHz). A kis térfogat, illetve az alacsony tömeg miatt a fedélzetre csak kis teljesítményű telemetria rendszer kiépítése lehetséges. A műhold életben maradása nagyban függ a rendelkezésre álló energiától, így a folyamatos, megbízható energiaforrás lételem a rendszernek, anélkül egy alrendszer sem működhetne. Az energia biztosításáért az Energiaellátó Rendszer a felelős, cikkemben e rendszer tervezését, építését és mérését mutatom be. A napelem a Naphól érkező sugárzott elektromágneses energiát vezetett elektromos energiává alakítja, a beérkező teljesítményt maximalizálja a napcellákhoz közel elhelyezkedő energia átalakító, amely a beérkező teljesítményt az akkumulátorba tölti, lehetőleg minél nagyobb hatásfokkal, majd az akkumulátorból kivett teljesítményt a rendszer számára szükséges stabil feszültségszintre a másodlagos energiaellátó rendszer alakítja át.

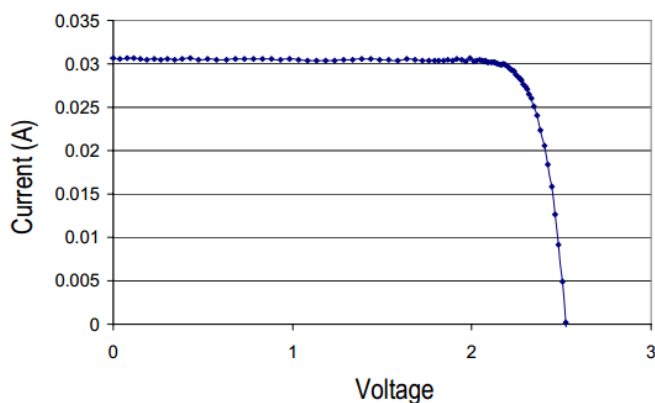
I. BEVEZETÉS

I-A. Napelemek

A műholdon használt háromrétegű napelemek hatásfoka az űrben 28 % körüli, míg a földön 16 % körüli. Ez az érték az öregedéssel csökken, ezért különösen fontos, hogy az energiaátalakítók hatásfoka maximalizálva legyen. Az Elsődleges Energiaellátó Rendszer feladata a napcellákból beérkező teljesítmény átalakítása oly módon, hogy egy akkumulátort tölteni tudjon. A napcellák jellemzője a hatásfok mellett, az üresjárás feszültség ($U_{üj}$) és a rövidzárási áram (I_{rz}). A napelemből kivehető teljesítmény pedig $P < U_{üj} I_{rz}$. A napelem U-I karakterisztikájáról (1 ábra) nagyjából sejthető, de tapasztalati úton meghatározható, hogy a maximális teljesítményű munkapontja az $U_{üj}$ 80-90 %-a körül van. A műholdhoz épített párhuzamosan kapcsolt 8 cellás napelemtábla üresjárás feszültsége és rövidzárási árama $U_{üj} = 2,1V$, $I_{rz} = 200 mA$, amiből a maximális teljesítményű munkaponti feszültség 1,68-1,89 V körülre adódik. A napelem maximális munkapontja függ a megvilágítás szögétől, a hőmérséklettől és a beeső fény spektrumától. [1]

I-B. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Az MPPT olyan eljárás, amely egy generátorból kivehető energiát maximalizálja. Erre létezik több különböző algoritmus, mint például a Perturb & Observe, Incremental Conductance, stb. Ezek „hegymászó” stratégiák, ami azt jelenti,



1. ábra. A napelem UI karakterisztikája [1]

hogy a vezérlés a feszültség változtatása mellett figyeli a kivett teljesítményt és addig folytatja egy irányba a változtatást, amíg nő a teljesítmény, különben a másik irányba kezd el korrigálni.

A műholdon található eszközök tápfeszültsége 3,3 V, ezért ezt a stabil feszültség szintet kell előállítani. Mivel a napelem feszültsége alacsonyabb, mint a szükséges tápfeszültség, illetve az akkumulátor feszültség, ezért egy feszültségnövelő kapcsolásra van szükségem, ami elvégzi az MPPT feladatát is.

I-C. Akkumulátor töltés

A műholdra beérkező többletenergiát egy Lítium-Ion akkumulátorban tároljuk el, melynek töltése áramgenerátoros módon lehetséges. Amíg az akkumulátor el nem éri maximális feszültségét (4,2 V), addig áramgenerátorosan, maximális árammal lehet tölteni, felette már korlátozni kell a töltőáramkör feszültségét, különben visszafordíthatatlan kémiai folyamatok indulnak meg a Li-Ion cellában.

I-D. Feszültség stabilizálás

Az akkumulátorról működő alrendszerek számára stabil tápfeszültséget kell biztosítani. Ezek 3,3 V-ról működnek, ami az akkumulátor feszültségének alsó tartományában van, ezért ezeknek a stabil tápfeszültséget egy feszültség csökkentő kapcsolással kell biztosítani. Ezt a feladatot megoldó alrendszert a Másodlagos Energiaellátó Rendszernek nevezzük.

I-E. Redundancia

Ahhoz, hogy a műhold biztonságosan működhessen, a létfontosságú elemeket redundánsan kell tervezni úgy, hogy 1

pont meghibásodás ellen védve legyenek. Ez azt jelenti, hogy ha egyetlen alkatrész meghibásodik (átmegy szakadásba vagy rövidzárba), a műholdnak továbbra is működőképesnek kell lennie. Ezt a redundanciát a töltőáramkörök esetében a hat oldalra feltett, egymástól függetlenül működő áramkörökkel oldom meg. Az egyetlen alkatrész, aminek a redundanciáját nem tudjuk megoldani a rendelkezésre álló hely és a probléma bonyolultsága miatt, az az akkumulátor, így ebből csak egy kerül a fedélzetre.

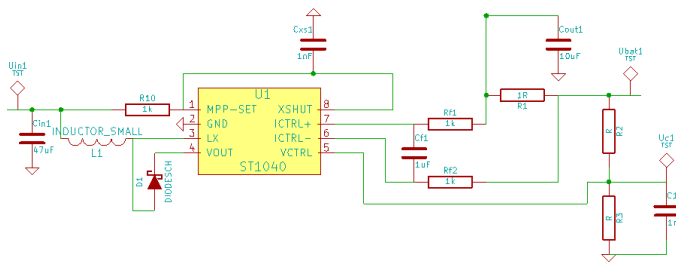
II. TERVEZÉS

II-A. MPPT áramkör

Az MPPT funkciókat ellátó rendszer megvalósítására több lehetőség ismert. Az egyik a mikrokontroller vagy FPGA alapú, felhasználó által megírt algoritmus használata, amely a rendelkezésre álló hely szükségessége miatt esetemben nem célravezető megoldás. Egy másik lehetőség egy integrált áramkör használata, melyet erre a funkcióra terveztek és jó hatékonysággal képes elvégezni az energiaátalakítást.

A mikroelektronikai gyártók több ilyen IC-t kínálnak, viszont legtöbb esetben Wattos, illetve kilowattos nagyságrendbe esik az alkalmazott teljesítmény, ezért ezek az áramkörök méretükből, illetve a kis teljesítményű határfokukból adódóan nem alkalmasak a feladatra. A műhold felületére beérkező napenergiából kivehető teljesítmény néhányszor 100 mW nagyságrendű. Több kísérletet elvégezve az SPV1040 típus vált be leginkább, annak hatásfoka és könnyű alkalmazhatósága miatt. A különböző típusú chipek közül az SPV1040 típusúra esett a választásom.

Ennek az eszköznek a hatásfoka a gyártó szerint elérheti a 95%-ot is, de a tapasztalataim szerint az ilyen értékeket fenntartásokkal érdemes kezelni. Az IC 0,3 V-tól 5,5 V bemenő feszültségig képes működni, ami a napelem 1,8 V körüli munkaponti feszültségétekintve megfelelő. A kapcsoló frekvenciája 100 kHz és a kimeneti áramot egy beépített árammérővel lehet szabályozni, külső sönt ellenálláson keresztül. Az IC MPPT algoritmus (Perturb & Observe) kikapcsol, ha a sönt ellenálláson eső feszültség meghaladja az 50 mV-ot. Mivel a cél az akkumulátor töltése, ezért ezt a funkciót nem használtam, az árammérő lábait rövidre zártam, mert a napelemekből kivehető maximális teljesítmény nem teheti tönkre az akkumulátort. A gyártó által kiadott referencia kapcsolás, melyből kiindulhatok a 2. ábrán látható.



2. ábra. Az SPV1040 alkalmazása

A maximális kimeneti feszültséget ez esetben is visszacsatolással lehet megoldani. A visszacsatolásra vonatkozó egyenlet az 1 egyenlet szerint alakul, ahol R_1 és R_2 a 2. ábra szerinti ellenállások. [2]

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{OUTmax}}{1,25} - 1 \quad (1)$$

II-B. Energiatároló elemek méretezése, kiválasztása

A feszültség-átalakító áramkörök fontos része a bemeneti és kimeneti puffer-kondenzátor és az energiatároló inductivitás. Ezen alkatrészek minősége nagyban befolyásolja az eszköz hatásfokát, ezért minél jobb minőségűeket kell használni, már csak azért is, mert üreszközről van szó. A jó inductivitás jellemzően vasmagos, alacsony az egyenáramú ellenállása, és az IC által használt kapcsolófrekvencia fölött van legalább egy nagyságrenddel a határfrekvenciája. Ezen kívül kis méretűnek kell lennie, de mivel a kisebb mérettel a telítődési áram is csökken, ezért kompromisszumot kell kötni. Ahhoz, hogy az optimális tekercset megtaláljam, több típust is kipróbáltam. Ezek különböző gyártótól, különböző inductivitás-, telítődési áram-, soros ellenállás értékekkel rendelkeznek és más-más méretűek. Az inductivitás értéktartománya 10 és 100 µH között kell, hogy legyen a bemeneti feszültségtől függően. Alacsonyabb bemeneti feszültségre nagyobb inductivitást kell használni. A mérések során 10, 18, 22 és 33 µH-s tekercset használtam. Végül egy 4x4x2,6 mm-es, 22 µH-s inductivitást használtam az áramkörben...

A kondenzátorok kiválasztásánál figyelni kell a dielektrikum minőségére, mert ez meghatározza a kapacitás ekvivalens soros ellenállását (ESR). Minél kisebb az ESR, annál tovább tartja a feltöltött állapot-béli feszültséget a kondenzátor. Ez alapján a választásom az X7R dielektrikumra esett. Fontos szempont, hogy az űrben nem használható akármilyen anyagból készült alkatrész. A kapacitások esetében ez lekorlátozódik a kerámia kondenzátorokra, mivel a tantál és elektrolit kondenzátorok vákuumban gigőzölögnek és elveszítik kapacitásukat. Ezen kívül a méretet és az kapacitás értéket is figyelembe kell venni; 1206-os méretben a legnagyobb kapacitás, amit találtam 22 µF-os, amiből kettőt párhuzamosan kötve használtam. Mivel puffer kondenzátorról van szó, minél nagyobb az kapacitás, annál jobb a puffer hatás.

II-C. Mérőrendszer

Mivel a műholdhoz működés közben távolságból és sebességből adódó okok miatt nem férünk hozzá közvetlenül, ezért egy önvizsgáló mérőrendszert terveztem a napelem oldalához. Ennek a mérőrendszernek az a feladata, hogy mérje a be- és kimeneti feszültségeket és áramokat. Továbbá hibaelenőrzés céljából vizsgálom azt is, hogy az adott oldalt éppen süti-e a Nap vagy sem, amit fotodiódával mérek. Ezen kívül mérem a hőmérsékletet is.

A központi fedélzeti számítógéppel a kommunikációt, az adatok kis mennyiségéből kiindulva, minél egyszerűbb módon és minél kevesebb vezetékkel érdemes megoldani a hibalehetőségek csökkentése érdekében. A legegyszerűbb és csupán két vezetékkel alkalmazható kommunikáció a 1-Wire, amihez csak

but
why?

a jel és föld vezetékek szükségesek. Ez a kommunikációs protokoll mester-szolga üzemmódú. A mester minden bit kezdetekor jelzést küld a szolgának úgy, hogy az adat lábat logikai 0-ba állítja egy bizonyos ideig. Ha éppen írási fázis van, akkor a mester az adatnak megfelelő szintre állítja a vonalat, olvasás esetén pedig megnézni a várakozási idő után, hogy milyen logikai szintet lát a vezetéken. A várakozási idők μs nagyságrendűek, így az adatátviteli sebesség maximum néhány ezer b/s lehet.

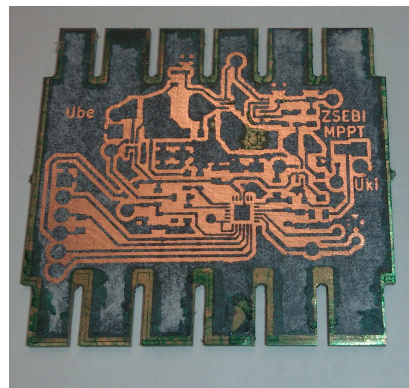
A mérőrendszer feladatainak elvégzéséhez ma már elegendő egy apró, $3 \times 3 \text{ mm}$ -en elférő mikrokontrollert használni. Az általam kiválasztott vezérlő a C8051F972, amit a Silicon Laboratories gyárt. A feszültségeket elég a controller ADC bemeneteire kötni, az áramokat pedig egy fix erősítésű műveleti erősítő árammérő IC kimeneti feszültségével lehet vizsgálni. Az áramkör egyenáramú jellegéből kiindulva várhatóan a mért értékek lassan változnak. Ha a mért érték topológiailag nincs azonos helyen a mérés helyével, a hozzávezetések igen sok, például az IC kapcsoló üzemi működéséből adódó zajt szedhet, ezért a mérés helyén, a mikrokontroller lábaihoz közel egy aluláteresztő szűrőn érdemes szűrni a jelet. A műhold forgását figyelembe véve, $10 \frac{\text{fordulat}}{\text{sec}}$ forgási sebességgel felülről becsülve, a szűrőnek ennél nagyjából két nagyságrenddel nagyobbak kell lennie, hogy tudja követni ezt a változást, így a szűrő határfrekvenciáját 1 kHz -re választottam.

Az analóg-digitális konvertáláshoz szükséges egy referencia feszültség, aminek stabilnak kell lennie. Mivel a kontrollert az MPPT IC kimenetéről táplálom, ami áramgenerátoros jellegű, ezért a feszültség biztosan nem stabil, referenciának nem használható. Ezt egy precíziós zéner dióda segítségével oldom meg, mely elegendő nyitó irányú áram esetén igen pontosan tartja a névleges feszültségét. A feladatra az LM4040 típusú $2,5 \text{ V}$ -os diódát használom. Mivel az akkumulátor feszültsége majdnem mindig $2,5 \text{ V}$ felett lesz és az ADC maximum a referencia feszültséggel megegyező feszültséget tud mérni, ezért az előbbit le kell osztani úgy, hogy feltöltött esetben is beleessen a mérési tartományba. Ehhez egy $1/2$ -es osztót használtam.

III. ÁRAMKÖR TERVEZÉS, ÉPÍTÉS ÉS ÉLESZTÉS

Az első teszt áramkörök gyártása után megterveztem a műhold oldallemmezére a kapcsolást. A szerkezet emeletes kiviteléből adódóan figyelni kellett a magas alkatrészek elhelyezésére, nehogy azok hozzáérjenek a köztes lemezekhez, ezzel zárlatot okozva. Az elkészült NYÁK-rajzolat a 3. ábrán látható. A fejlesztés ezen fázisában még úgy terveztem meg a NYHL-t, hogy egy oldalon legyen csak vezetékvezetés, ugyanis a gyártás vasalásos módszerrel történt, ezért viákat nem tudtam használni.

Az elkészült áramkör élesztése során felfedezett hibákat kijavítva elkezdtem az mérőrendszer szoftverét megírni, mely képes a feszültségeket és áramokat megmérni, majd azokat elküldeni 1-Wire protokollon keresztül. Az adatokat a tesztelés során egy rádiós kommunikációra képes egységgel fogadtam, amely az OBC (Onboard Computer) szerepét töltötte be. Ez az egység, miután fogadta az adatstruktúrát (4. ábra), elküldi



3. ábra. A legyártott NYHL

a földi állomásnak rádióan keresztül. A struktúra a mérési eredmények mellett tartalmazza a napelem oldal azonosítóját és egy ellenőrző összeget, melyből megállapítható, hogy hibamentes-e a vett adat.

```
xdata struct T_Meres{
    U8 SideID;
    U16 Vcell;
    U16 Icell;
    U16 Vbat;
    U16 Ibat;
    U16 Temp;
    U16 Photom;
    U8 CRC;
};
```

4. ábra. A tárolt mérési adatok struktúrája

Miután a teljes mérőrendszer működőképes volt, kipróbáltam, hogy a valóságoshoz közelebbi környezetben is működik-e. A mikrokontroller eddig a programozó kábelről kapta a tápellátást, úgyhogy most leválasztottam azt, és az energiát a konverter kimenetéről a diódán keresztül kapta. A kísérlet sikeresnek bizonyult ugyanis az „OBC” megkapta a mérési eredményeket és a rádió vevő is fogadta a csomagokat, melyekben megtalálható a mért adat.

A következő lépés egy szimulációs környezet megépítése lesz, melynek feladata méginkább megközlíteni az űrbéli környezetet. Első sorban a műhold forgásából adódó tápfeszültség ingadozás vizsgálata, illetve az oldalak megvilágításának mérése lesz a feladat. Meg kell határoznom, hogy milyen forgási sebesség felett nem képes már beindulni a mérőrendszer annyi időre, hogy elvégezze a mérést és elküldje a fedélzeti számítógépnek. Ehhez már majdnem elkészült a forgató rendszer, illetve még szükséges lesz egy műnap is, amely a naphoz hasonló teljesítménysűrűséggel rendelkezik.

További feladatok között szerepel a hőkamrában, illetve vákuum kamrában való tesztelés, valamint a rázás teszt, ami a hordozórakéta kilövésakor fellépő rázkódást szimulálja.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkemben röviden bemutattam a SMOG-1 PocketQube méretű hallgatók és oktatók által épített műhold feladatát és felépítését, specifikáltam az általam elvégzendő feladatot és az abba tartozó részfeladatokat. Ismertettem a kritériumokat és tervezési szempontokat, melyek alapján megterveztem a műhold Elsődleges Energiaellátó Rendszerét, illetve paramétereinek mérésére szolgáló mérőrendszert. Megépítettem és felélesztettem a már véglegesnek mondható oldallemezre általam gyártott NYÁK-ot, melynek programozását is elvégeztem. A mérési adatokat rögzítettem és elküldtem a fedélzeti számítógépnek, ami már képes rádiós kapcsolaton keresztül elküldeni a földi állomásnak a mért adatokat. Mindezt kipróbáltam úgy is, hogy a tápellátást a rendszer már csupán a napelemekből kapja.

HIVATKOZÁSOK

- [1] http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/space/TASC_ITJ_datasheet.pdf
- [2] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00287506.pdf>