

RÁDIÓTECHNIKA

ELEKTRONIKAI FOLYÓIRAT

www.urbanelektronika.hu



URBÁN ELEKTRONIKA

RÁDIÓTECHNIKA

HAM-bazár

Elektronika FÜZETEK

Anico

www.anico.hu
www.radioamatorwebshop.eu

STANDARD HORIZON YAESU Vertex Standard

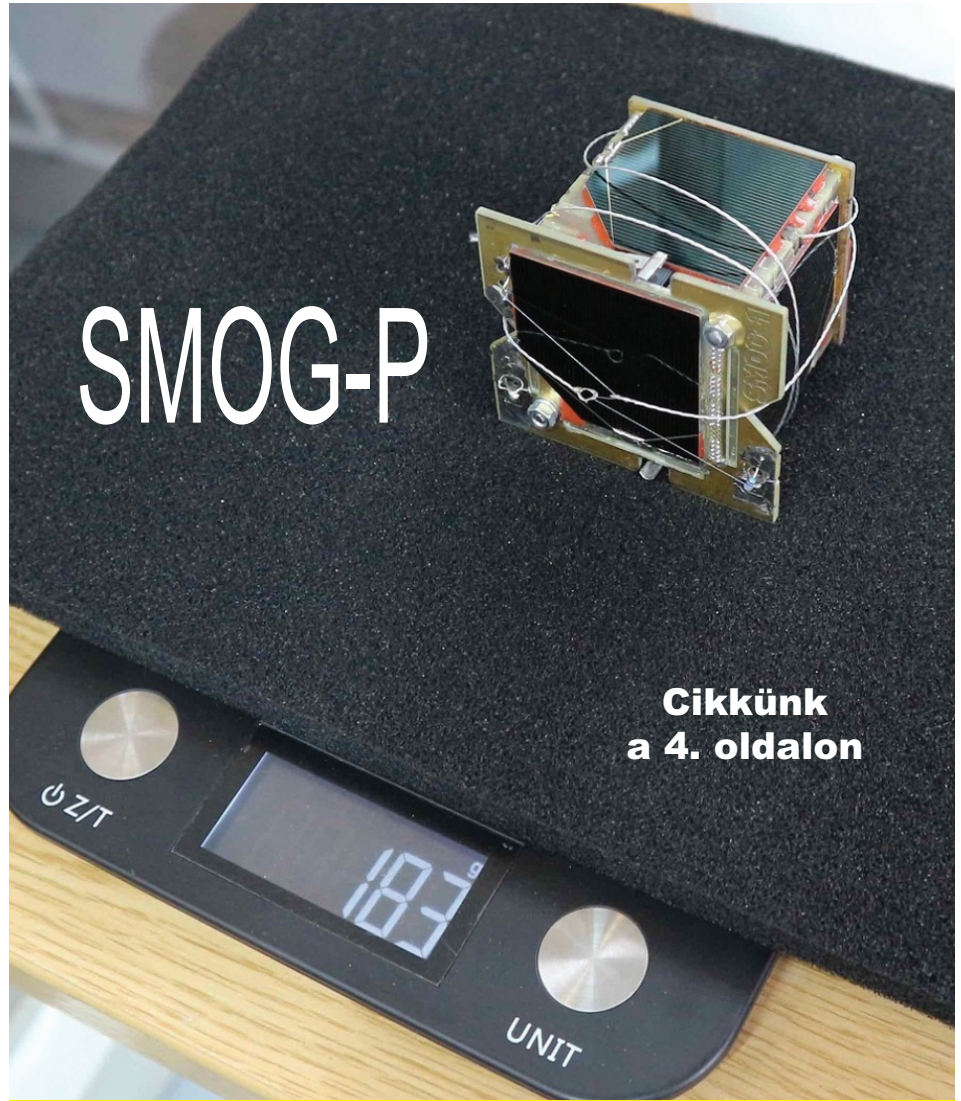
Számítógépeink védelméről az
ESET Endpoint Security Business Edition
gondoskodik.

SICONTACT 

biztonság a digitális világban

MEGMÉRTEGETT ÉS...

SMOG-P



**Cikkünk
a 4. oldalon**

... KÍVÁLÓNAK TALÁLTATOTT!

A HAM-bazár
H., K., Sze., P. 9-14 ó.
Csütörtökön 9-17 ó.
tart nyitva.

Támogatónk:


Nemzeti Kulturális Alap

ELFA ..ami az elektronikához szükséges

40.000 cikk egy katalógusban
Kérje ingyenes katalógusunkat!

www.aget.hu
e-mail: ageta@ageta.hu
tel: 30/256-4288



INCOMP Electronics

Alkatrész kis- és nagykereskedelem
EXPORT - IMPORT
2120 Dunakeszi, Fő út 35. ☎ (27) 342-407
www.incomp.hu



A SMOG-P-nek, a világ legkisebb műholdjának sikertörténete

Géczy Gábor okl. villamosmérnök, HA7GG, geczygabor@gnd.bme.hu

2014-ben egy, a BME fiatal mérnökeiből és tapasztalt oktatóiból álló maroknyi csapat elhatározta, hogy megépíti a világ legkisebb tudományos kutató műholdját 50×50×50 mm-es befogadó méret és 250 g teljes tömeg mellett. Kategóriája alapján „pikoműhold”, melynek SMOG elnevezése a küldetését szimbolizálja: a világon elsőként kimutatni az emberi tevékenységből eredő, a világűrbe kijutó elektromágneses szennyezettséget. A műholdstruktúra első repülő példánya, a SMOG-P 2019 végén kezdte meg küldetését a világűrben. Ez az írás a küldetés előkészületeit és eredményeit mutatja be.

Általános ismertetés

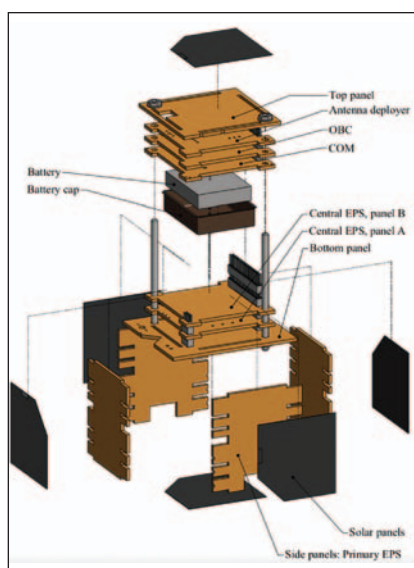
A parányi spektrumanalizátor, mint elsődleges mérőműszer mellett a műholdon helyet kapott egy kísérleti sugárzásmérő berendezés, mint második küldetés és egyéb technológiai kísérletek.

Az elsődleges mérőműszereken kívül a műhold tartalmaz 20 hőmérő szenzort a struktúra termikus vizsgálatához, valamint 2 magnetométert, 2 giroszkópot és 6 fényérzékelő szenzort.

Számos feszültség- és áramerősség-érték szintén monitorozható. Az így gyűjtött adatokból következtetéseket lehet levonni a műhold működésével kapcsolatban.

Fiatal mérnökként a hardver megtervezése tűnt a legnagyobb kihívásnak. Ebben a kis méretben a felhasználható napelemek mindössze 0,3 W elektromos teljesítményt képesek előállítani. A Naptól nyert energia eltárolható a fedélzeti akkumulátorban, és felhasználható a kommunikációhoz, az adatok feldolgozásához és a mérőműszerek működtetéséhez.

Az elektronikai rendszerek tervezése során a lehető legnagyobb határfok elérése volt a cél, hogy a műhold energiamérlege pozitív lehessen, azaz a napelemek által megtermelt energia elegendő legyen a műhold működtetéséhez. Az akkumulátort a pálya napfényrel megvilágított szakaszán tudják



1. ábra

tölteni a napelemek, míg a Föld árnyékában az eltárolt energiával „táplálkozik” a műhold. Csatunk a tervezés során úgy döntött, hogy a nagy megbízhatóságú rendszereknél (űreszközök, repülőgépek, erőművek, ipari alkalmazások) gyakran alkalmazott *redundanciával* építjük meg a műholdat, hogy a küldetés sikerének esélye minél nagyobb legyen. Ez azt jelentette, hogy minden alrendszerből legalább 2 példányt kellett elhelyezni ebben a kis méretben, egy fő és egy vele teljesen egyenértékű tartalék egységet. A fő egység meghibásodása esetén a tartalék egység automatikusan át tudja venni annak feladatait, így a küldetés tovább folytatható, nem zárul kudarccal.

Ebben az írásban a műhold általános ismertetésén kívül az energiaellátó rendszert és a tápegységeket mutatom be részletebben.

A műholdat alkotó rendszerek és feladataik

A tömeg- és méretkorlát miatt csupán a nyomtatott áramkörti lapok alkotják a műhold vázát, amelyekre ráterveztük az elektronikai alrendszereket is. A műhold hardvere 2256 elektronikai, és néhány mechanikai alkatrészből épül fel. A holdacska strukturális felépítését, robbantott rajz formájában az 1. ábra mutatja. Megemlítem, hogy a PCB-eket természetesen gyártattuk, az alkatrészek beültetése az egyetemen történt mikroszkóp alatt, hagyományos kézi forrasztással.

- A napelemcellák generálják az elektromos energiát, amelyek működtetik SMOG rendszereit. Az elsődleges energiaellátó rendszer részeként maximális munkapontkövető (MPPT) áramköröket helyeztünk el a műhold külső paneljeinek belső oldalaira, amelyek átalakítják a napelemek által előállított teljesítményt és továbbítják a központi energiaellátó rendszerbe további felhasználásra.
- A központi energiaellátó rendszer összegyűjti a napelemek által megtermelt energiát és eltárolja azt a fedélzeti Lítium-Ion akkumulátorban, vagy

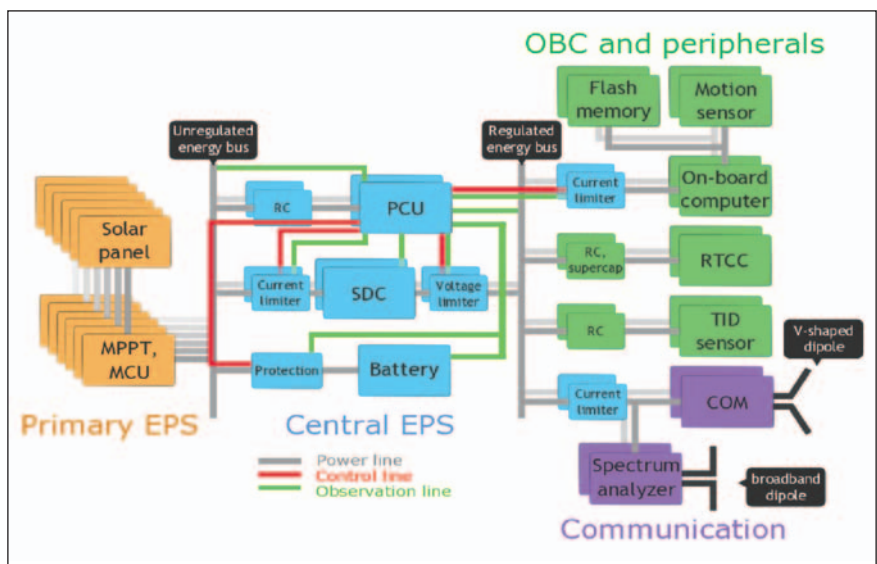
nagy hatáskörű tápegységen és védelmi áramkörökön keresztül továbbítja a további rendszerek és mérőműszerek működtetéséhez. Ennek a rendszernek a megtervezése volt a szerző feladata, amit a továbbiakban részletesen tárgyalunk.

- A Power Control Unit (PCU) vezérli az energiaellátást, gyűjti a fogyasztással és töltöttséggel kapcsolatos adatokat, és továbbítja azokat a fedélzeti számítógép, avagy On-Board Computer (OBC) számára. A PCU rendszer két, meleg redundanciával működő 16 bites PIC24 architektúrájú mikrovezérlőn alapul. A programmemória 128 KiB-os, a RAM 16 KiB-os. Mindkét kontrollert saját órajel ütemezi. Kommunikálnak egymással, és ha az elsődleges problémára van, akkor a tartalék átveszi a vezérlést.

- Az OBC feladata az adatok összegyűjtése és az összes többi rendszer vezérlése. A kommunikációs rendszer (COM) felelős a megbízható rádiókapcsolat biztosításáért a földi állomásokkal, hogy képesek legyenek letölteni a keletkező adatokat és vezérelni a műholdat. Az adóteljesítmény 100 mW (+20 dBm), a vevőérzékenység kb. -110 dBm, a frekvencia 437,15 MHz, a moduláció 2-GMSK. A COM tartalmazza az elsődleges mérőműszert, az elektromágneses szennyezettség mérésére használt *spektrumanalízátort* is. Ez egy Silicon Labs rádióvevő IC-n alapul. A pártázott frekvenciasáv 460...840 MHz, a vevőérzékenység -110 dBm, az alak szélessége 1,5 - 850 kHz, szoftverből vezérelhetően.

- A Total Ionizing Dosimeter (TID) egy új kísérleti mérőműszer, amelynek feladata a küldetés során az elektronikai alkatrészek által elnyelt ionizációs sugárdózis mérése. Ezt a későbbiekben egy külön cikkben terveztem bemutatni.

- Egy további alrendszer tervezünk az antennanyitó elektronika számára, valamint a különböző panelek összekapcsol-



2. ábra

lására. Az antennarendszer 4 rugalmas bowdenszálból áll, amelyeket felbocsátás közben egy erős műanyagszál a műhold házára tekercselve tart. Pályára állítás után a szálakat az említett antennanyitót két helyen átoltvasztja, miáltal az acélsodratok felszabadulnak, és a rugalmasságuk folytán „kimerednek” a világűrben.

A rendszerterv és egyben vezérlési terv – a különböző „buszok” felosztásával – a 2. ábrán látható. A műhold tervezésében részt vevő kollégák: *Dudás Levente, Herman Tibor, Hödl Emil Viktor, Kristóf Timur, Petróczy Balázs, Szüllő Ádám.*

Mivel az én fő tevékenységem a projektben az energiaellátó rendszer kifejlesztése volt, az alábbiakban erről kissé részletesebben értekezem.

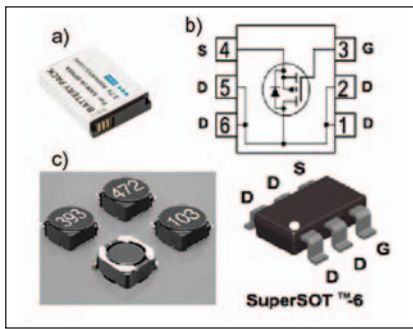
Az energiaellátó rendszer (EPS) feladatai

Az EPS (Electrical Power System) alapvető feladata, hogy az elektromos energia előállításáról, tárolásáról, szétosztásáról, szabályozásáról és monitorozásáról gondoskodjon. Az oldallapokról 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 töl-

töttségétől függően, ami nem használható fel közvetlenül a fedélzeti elektronikai eszközök táplálására, mert ezen eszközök jellemzően nem kapcsolhatók 3,6 V fölötti DC feszültségre. Szükség van egy átalakító eszközre, amely stabilizálja a fogyasztók számára szükséges tápfeszültséget a működés szempontjából biztonságos tartományba. Ezt a feladatot két redundánsan felépített SDC (Step Down Converter) tápegység látja el. Ezek a tápegységek tekinthetők a műhold „szívének”.

Az EPS további feladata, hogy biztosítsa az energiabuszok sértetlenségét 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 alrendszere, a PCU (Power Control Unit) monitorozza az energiarendszerre vonatkozó telemetria adatokat is, mint például az akkumulátor töltöttsége, az SDC áramkörök aktuális határfoka, vagy az energiabuszok leterheltsége. Ezeket az adatokat a PCU egységek dolgozzák fel, majd küldik tovább a központi fedélzeti számítógép számára.



3. ábra

A már bemutatott 2. ábra az említett szempontok alapján redundánsan megtervezett EPS rendszerszintű tömbvázlatát is magában foglalja.

A napelemek felől beérkező energia az első számú szabályozatlan energiabuszra kerül, ahol az akkumulátorban és a kerámia SM-kondenzátorokból álló kondenzátorbankban eltárolódik.

A 6 db redundáns MPPT (Maximum Power Point Tracking) áramkörrel ellátott napelem-oldal egységei gondoskodnak a napelemekből kivethető maximális teljesítményfelvételről. Ezek az áramkörök az elsődleges energiabusznál összegződnek, kis veszteségű Schottky diódák segítségével. Így legrosszabb esetben, ha a napelem-oldalon valami meghibásodik és zárlatossá teszi a töltőkimenetet, a dióda megvédi az elsődleges energiabuszt és az ellátható marad az öt működésképes oldal segítségével.

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 számára a vezérlésére szolgáló jeleket, továbbá folyamatosan felügyelik az energiaellátás helyes működését.

Az első számú energiabusz feszültsége tág határok (2,7...4,2 V) között mozog az akkumulátor töltöttségétől függően. Az akkumulátort a beépített aktív kapcsolója védi a túltöltéstől, mélykisütéstől, zárlatoktól, és csatlakoztatja a szabályozatlan buszra. Egy kis méretű, egycellás, 900 mAh kapacitású Li-ion akkumulátor

ról (3.a ábra) van szó, amelyet eredetileg a SAMSUNG BP85A típusú digitális kamerához szántak. Ezt az akkumulátort több lehetséges alternatíva közül a hőkamrás mérési eredmények alapján választotta ki csapatunk.

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 kapcsolóüzemű tápegység (SDC), amelyek kimenetei újabb védelmi kapcsolók bemenetére vannak kötve.

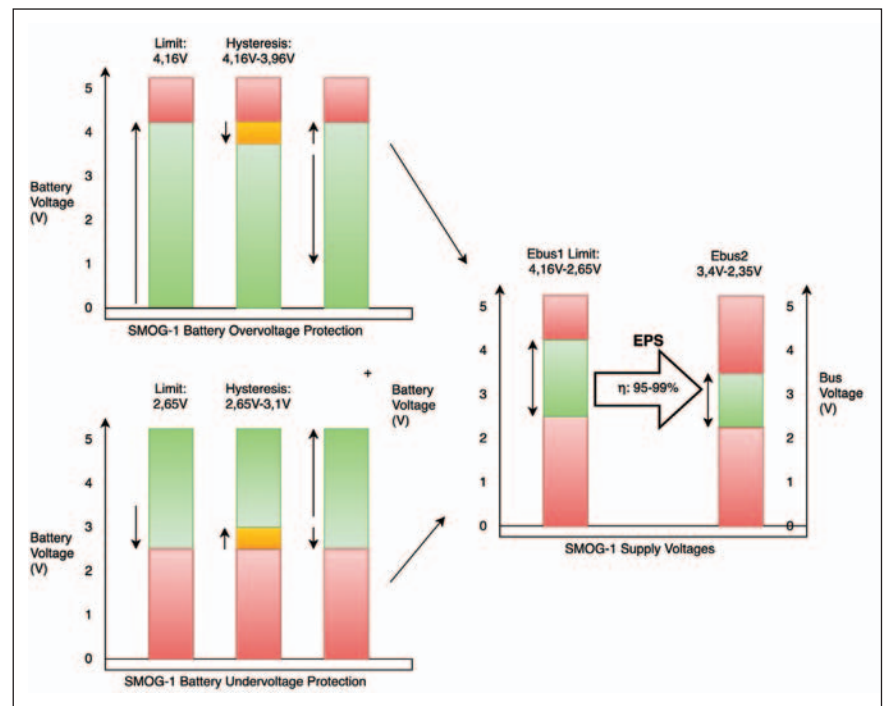
A „Voltage Limiter” kapcsolók túlfeszültségvédelmi funkciót valósítanak meg. Egy-egy adott egység csak akkor kapcsol össze, hogyha nincs a szabályozott buszra kapcsolódó eszközök veszélyeztető túlfeszültség a bemenetén. Ezek a kapcsolók folyamatosan ellenőrzik a tápegységek helyes működését.

Az ismertetett kapcsolók és az SDC áramkör segítségével egy láncot lehet felépíteni, amely a

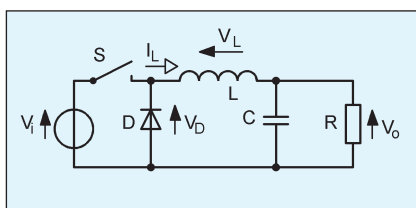
szabályozatlan buszfeszültséget átalakítja a szabályozott buszfeszültség szintjére, valamint felügyeli az átalakítást és izolálja az esetleges hibákat. A lánc egy túláramvédelmi kapcsolóval kezdődik, amely monitorozza és szabályozza a szabályozatlan buszról felvett áramot, ennek a kimenetéről kapja a betáplálást az SDC tápegység és a túlfeszültségvédelmi kapcsoló. Az SDC áramkör a kimenetén üzemszerűen 3,47 V-os feszültséget állít elő. A túlfeszültségvédelmi kapcsoló is méri a lánc kimenetén az áramerősséget, így a buszfeszültségek és a védelmeken átfolyó áramerősség ismeretében monitorozható az átalakítás aktuális hatásfoka.

A megbízhatóság érdekében két teljesen független lánc biztosítja a SMOG műholdak fedélzetén a szabályozott buszfeszültséget. Ezek a láncok a szabályozott busz előtt összegződnek a kimenetükön elhelyezett Schottky diódák által. 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 integ-



4. ábra



5. ábra

rált áramkörök és az egyéb nagyobb fogyasztású rendszerek védelmi kapcsolókon keresztül csatlakoznak a szabályozott energiabuszra, ezáltal ezen eszközök aktív túláramvédelemmel vannak ellátva és a működéshez felvett áramuk monitorozható.

A redundánsan kiépített két OBC egység energiaellátásához tartozó túláramvédelmi kapcsolókat is a PCU vezérli. Az elsődleges fedélzeti számítógép meghibásodása esetén a PCU feladata detektálni a hibás működést és bekapcsolni a tartalék OBC egységet. A kommunikációs rendszer számára beiktatott védelmi kapcsolók vezérlését az OBC végzi, autonóm módon. Az energiaellátó rendszer üzemi feszültségeit a 4. ábra oszlopdiagramjai szemléltetik.

A műhold tápegységei (SDC)

Az EPS bevezetésénél ismertett paraméterek alapján belátható, hogy a szabályozatlan és a szabályozott energiabusz közé szükséges beiktatni egy tápegységet, amely az elsődleges energiabusz szabályozatlan feszültségét az eszközök kívánalmainak megfelelően stabilizálja a szabályozott energiabuszra. Erre a feladatra földfelszíni körülmények között a legegyszerűbb megoldást a széles körben alkalmazott lineáris áteresztő stabilizátorok jelentenék (pl. a 78Lxx termékcsalád), azonban ezek az áramkörök túlzottan veszteségesek, mert működési elvükből adódóan az összes többletenergiát eldisszipálják. Ezek a feszültségszabályozók tehát az üresközöknél nem (vagy csak különleges esetekben) használhatók, mert a rendelkezésre álló energia nagyon korlátozott, így törekedni kell a lehető legjobb hatásfokú DC-DC konverziókra.

Az SDC (Step Down Converter) avagy másik ismert nevén buck converter egy kapcsolóüzemű tápegység, amely működési elve alapján az áramkör elméleti hatásfoka közel 100%.

Az SDC működési elve

Az 5. ábrán látható az SDC elméleti alapkapcsolás, amit szokás buck topológiának is nevezni. Ebben az alapáramkör két energiatároló elemből és két kapcsolóelemből épül fel. A buck átalakító működése a tekercsben folyó áram szabályozásán alapul, amit két kapcsolóelem, a legáltalvetőbb esetben egy tranzisztor (FET) 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, ezt a két különböző állapotot szemlélteti a 6. ábra.

A kezdeti állapotban a tárolóelemekben 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 áramiránnyal ellentétes, az önindukció az áramot fékezi és késlelteti annak növekedését és a mágneses tér felépülését. A tekercs feszültsége tehát kivonódik a forrás feszültségéből, és ez a különbségi feszültség fog jelentkezni a kimenetre kapcsolt fogyasztón.

A tekercs töltődése után már a rajta eső önindukciós feszültség csökken, ezáltal nő a fogyasztón mérhető feszültség. Ha a töltődés során a kapcsolóval 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 ed-

dig felépített mágneses tér leépülése, és a fogyasztót a tekercs táplálja. A kapcsoló zárásával a folyamat előlről kezdődik. A kimeneti feszültség (U_o) adott bemeneti feszültség (U_i) esetén a kapcsolás kitöltési tényezőjével (D) állítható az alábbi egyenlet alapján.

$$U_o = U_i \cdot t_{be} / T = U_i \cdot D.$$

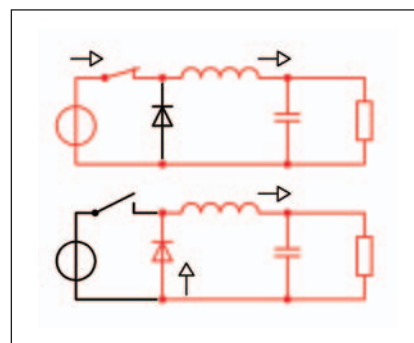
A buck konvertereknek két üzemmódját különböztetjük meg az alapján, hogy a folyamatban a tekercs árama nullára csökken-e (szaggatott üzem, vagy discontinuous mode), vagy sem (folytonos üzem, vagy continuous mode).

A nem ideális SDC alkatrészek veszteségei

A fizikailag realizálható buck áramkörök az ideálistól eltérő alkatrészekből épülnek fel, ezért a megépített konverterek hatásfoka sohasem éri el a 100%-ot, csak jól közelíti azt, helyes tervezés esetén. Az elméleti alaptól eltérően a valóságban veszteséggel üzemel a kapcsoló, a dióda és a tekercs sem ideális, valamint minden alkatrészen jelentkezik ohmikus veszteség.

Megkötések a SMOG-1 SDC áramkörének megtervezése során

A SMOG műhold tápegységének tervezése során figyelembe kellett venni néhány egyedi tervezési előírást. Az elsődleges tervezési szempont a minél nagyobb hatásfok elérése, hiszen a műhold összes fedélzeti áramköre az SDC



6. ábra

1. táblázat

INPUT TO OUTPUT VOLTAGE RATIO	SWITCHING FREQUENCY DETERMINED BY	PROPOSED DEVICE FOR HIGH SWITCHING FREQUENCY	PROPOSED DEVICE FOR LOW SWITCHING FREQUENCY
$V_I \gg V_O$ (e.g. $V_I = 5\text{ V}$, $V_O = 1,5\text{ V}$)	Minimum on-time	TPS64203	TPS64200, TPS64201
$V_I = V_O$ (e.g. $V_I = 3,8\text{ V}$, $V_O = 3,3\text{ V}$)	Minimum off-time	TPS64202	TPS64200, TPS64201

egység kimenetére kötött energia-buszról 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 méretű és tömegű energiataroló alkatrészek használata, amelyek a vibrációs terhelésekből adódóan egyébként is veszélyt jelentenének 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 mind a közel lemerült állapotban (2,7 V) mind a feltöltött állapotban (4,2 V) megoldható legyen az eszközök üzemeltetése. A szabályozott buszra kapcsolt áramkörök nem működtethetők 3,6 V DC-nél nagyobb tápfeszültséggel, ezért a szabályozott energiabusz maximális feszültségét az SDC áramkörnek 3,3 V körüli kell leszábályoznia. 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 kell képezzen a szabályozatlan és a szabályozott energiabusz között. Ez lényegében egy 100%-os kitöltési tényezőjű működésnek fogható fel.

Az SDC áramkörnek vákuumban is jó hatásfokkal kell üzemelnie akár 400...450 mA folyamatos fogyasztóoldali áramfelvétel esetén! A buck áramkörök hatásfoka jellemzően romlik a fo-

gyasztóoldalon felvett áram csökkenésével, ami a SMOG esetén ugyancsak egy kritikus kérdés, hiszen a fedélzetre tervezett kis fogyasztású eszközök üzeme-lése során előállhat akár 40 mA-nél kisebb terhelés is. Az áramkörnek tehát tág terhelési tartományok között kell a lehető legjobb hatásfokkal működnie.

A feladathoz kiválasztott integrált áramkör

Az SDC áramkörök működéséhez szükséges kapcsolófunkció ellátására sok félvezetőgyártó kínál integrált áramköröket, azonban ezek jellemzően csak nagyobb áramfelvétel (1...2 A) esetén működnek jó hatásfokkal, ezért a SMOG esetén a legtöbb ilyen csip nem jöhetett szóba. A gyártók kínálatában mindössze néhány olyan SDC kapcsoló IC található, amely hatásosan működik kis fogyasztóoldali áramfelvétel esetén is. Ilyen áramkörök a Linear Technologies LTC1622 típusa, valamint a Texas Instruments által gyártott TPS6420x család. Az LTC1622-vel megépített kapcsolás, bár a kezdetben biztatónak tűnt, a fejlesztés során nem hozta az elvárt

eredményeket. A kis áramoknál elérhető maximálisan 80% körüli hatásfok, valamint a szükséges diszkrét alkatrészek csekély száma és kis mérete miatt a TPS6420x IC-k bizonyultak optimális választásnak.

TPS64200

A tervezendő SDC áramkör esetén a bemeneten előforduló legnagyobb DC feszültséghez (kb. 4,2 V-hoz) a kimeneten megkövetelt feszültség (3,3 V) közel áll, ezért érdemes „minimum off-time”, azaz minimális kikapcsolási időre optimalizált vezérlő áramkört választani (1. táblázat; az IC-család adatlapjáról). A TPS6420x áramkörök további fontos paraméterei olvashatók ki a 2. táblázatból (a TI honlapjáról).

A választás a TPS64200-as áramkörre esett, mivel a kontrol-lercsaládból ennek a típusnak a legkisebb a kapcsolófrekvenciája (350 kHz). Az előző fejezetekben ismertetett tulajdonságok alapján a kapcsolófrekvenciával arányos az áramkör vesztesége, aminek a minimalizálása a kitűzött feladatok közé tartozik. A TPS64200 tömbvázlatát a 7. ábra mutatja (az IC-család adatlapjáról).

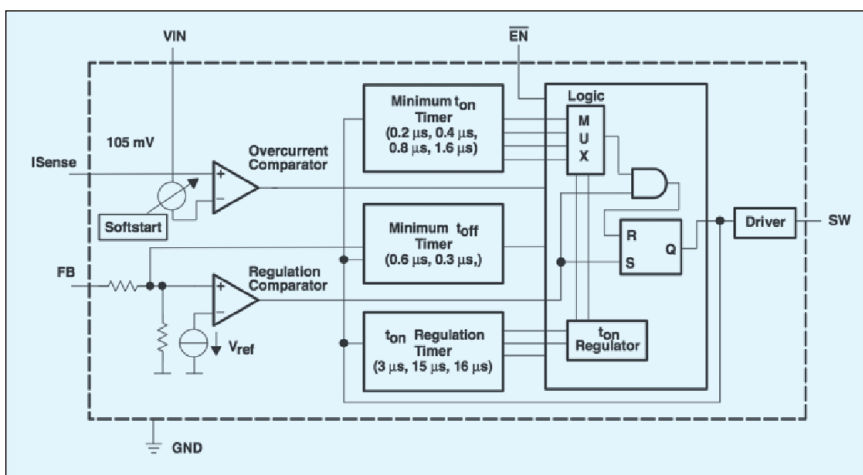
2. táblázat

	TPS64200	TPS64201	TPS64202	TPS64203
V_{in} (Min) (V)	1,8	1,8	1,8	1,8
V_{in} (Max) (V)	6,5	6,5	6,5	6,5
V_{out} (Min) (V)	1,2	1,2	1,2	1,2
V_{out} (Max) (V)	6,5	6,5	6,5	6,5
I_{out} (Max) (A)	3	3	3	3
Switching Frequency (Min) (kHz)	350	450	550	800
Switching Frequency (Max) (kHz)	350	450	550	800
I_q (Typ) (mA)	0,02	0,02	0,02	0,02
Duty Cycle (Max) (%)	100	100	100	100
Regulated Outputs (#)	1	1	1	1

Az áramkör működése során az SW (Switch) kimenetére küldött jelekkel vezérli egy külső P csatornás MOSFET gate elektrodáját úgy, hogy az FB (FeedBack) bemenetén mérhető feszültség lehetőleg a belső feszültségreferenciával egyezzen meg. Ekkor helyesen szabályozott a kimenet, és a kimeneten a beállított feszültségszint mérhető.

A feladathoz szükséges diszkrét áramköri elemek kiválasztása

A TPS64200 csak a kapcsolóléjel impulzusszélesség-modulációját (PWM) végzi, a buck topológia felépítéséhez további diszkrét áramköri elemek szükségesek. A tápegység megépítése során először egy „nulladik” verziót építettem meg a Texas Instruments javaslatai alapján, majd ezt az áramkört terveztem át a továbbiakban úgy, hogy az átépített verziók minden elvárásnak megfeleljenek a műhold fedélzetén, ugyanakkor ne romoljon lényegesen a hatásfokuk.



7. ábra

SDC V3.0

A TPS64200 vezérlő működése során úgy méri az átfolyó áramerősséget, hogy a kapcsoló FET bekapcsolása után párszor 10 ns eltelével mintavételezi a V_{in} és az I_{sense} bemenet között mérhető feszültséget. A MOSFET csatornaellenállása mindenképpen jelen van az áramkörben, ami a túláram érzékelésére hasznosítható.

A csatornaellenállás függ a Gate-Source feszültségétől, ezáltal változik a különböző szabályozatlan buszfeszültségeknek megfelelően, ezért pontos áramkorlátozásra nem alkalmas. Ezt a feladatot azonban az SDC elé kapcsolt limiter kapcsoló ellátja, így, ha a kapcsoló FET legrosszabb helyzetben mérhető (maximális) csatornaellenállása nagyobb áramerősség esetén jelent korlátozást,

1134 Budapest, Lehel utca 17.

Nagykereskedelem
 telefon: +36-1 349-5906
 fax: +36-1 320-3292
 honlap: www.lomex.hu
 e-mail: info@lomex.hu

nyitva tartás:
hétköznap 9:00 - 17:00

Szaküzlet (kisker)
 telefon: +36-1 320-26 10
 fax: +36-1 320-3292

e-mail: szakuzlet@lomex.hu

nyitva tartás:
hétköznap 9:00 - 17:00

Webshop
 telefon: +36-1 237-1639
 honlap: www.lomex.hu
 e-mail: webshop@lomex.hu

BEMUTATJUK

A SMOG-P-nek, a világ legkisebb műholdjának sikertörténete 2.

Géczy Gábor okl. villamosmérnök, HA7GG, geczygabor@gnd.bme.hu

Tervezés, építés, tesztelés, start

Csapatunk évekig dolgozott SMOG megépítésén, és felkészítettük, hogy bírja az űrben várható zord körülményeket. Extrém hőmérsékletekre készültünk, de mindössze szimulációkat lehetett végezni a várható viszonyokról, mivel korábban nem volt hasonló méretű műhold, ezáltal nem voltak elérhető mérési adatok.

Hőkamrás mérésekkel teszteltük a konstrukciót -45 és $+85$ °C között. Termovákuum-kamrás tesztekkel igazoltuk a műhold életképességét vákuumban, szélsőséges hőmérsékleti viszonyok mellett, valamint vibrációs tesztekkel bizonyosodtunk meg arról, hogy ez az apró szerkezet bírni fogja a rakéta felbocsátása során keletkező hatalmas mechanikai terheléseket. A fő mérőrendszerek működését speciális tesztekkel igazoltuk. A spektrumanalizátort magaslégköri ballonos kísérletek, míg a doziméter használhatóságát besugárzási tesztek eredményei igazolták.

SMOG már 2017-ben szinte teljesen elkészült, azonban nehéz volt egy ilyen új típusú műholdat

pályára állítani. A SMOG méretéhez igazodó PocketQube osztályú műholdakhoz nem volt elérhető hordozórakéta, sem pályára állító szerkezet, amelyek a MASAT-1 méretű CubeSat műholdakhoz már évek óta rendelkezésre állnak. Végül sikerült egy megfelelő lehetőséget találni. 2019 szeptemberében kiszállítottuk a struktúra első repülő példányát, a SMOG-P-t Skóciába, ahol rögzítettük az Alba Orbital nevű cég pályára állító szerkezetébe. Ez volt az utolsó alkalom, hogy láthattuk több évnyi munkánk eredményét, amely mindössze 183 grammot nyomott az integrációs eljárás során. Az eljárás részét képező tömegmérést láthatjuk a **12. ábrán**. Jól láthatók a dipólokot alkotó, még feltekerceselt acélsodratok, az azokat rögzítő műanyag szállal.

Az integráció után a szerkezetet, benne a műhoddal, Új-Zélandra szállították a RocketLab indító bázisára, és rögzítették egy Elektron típusú rakéta orrkúpjában. A holdacsának el kellett jutnia Magyarországról bolygónk egyik legmesszebbi pontjára, hogy végül 2019 december 6-án elindulhasson az űrbe a RocketLab tizedik, „Running Out of Fingers” elnevezésű küldetése során. A **13. ábra** az indítás eseményét örökítette meg Mahia Peninsulan (fotó: *Brendan Gully*).

Az indítás és pályára állítás a küldetés egyik legkritikusabb része. A több hónapos tárolás során az akkumulátornak nem szabad lemerülnie, viszont a műholdnak fel kell élednie és el kell indulnia a pályára állítást követően, majd sikeresen ki kell nyitnia az antennáit a kommunikáció biztosításához. Rengeteg műholdnak ez a kritikus szakasz nem sikerül, és ezért válik sikertelenné sok küldetés az űrben.

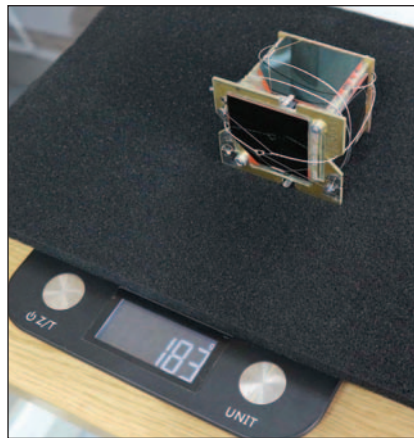
Néhány órával a felbocsátás után az első pályabecsléseket közzétették, és rádióamatőrök szerte a világban megerősítették, hogy SMOG-P feléledt, elkezdte küldetését, és rádiójelekkel kommunikál az űrből. Ezzel SMOG-P felállított egy új világrekordot, mivel eddig nem volt ilyen kis méretű működő műhold az emberiség történetében.

A csapat előkészített egy egyedi szoftvert, amellyel bárki képes a műhold által kibocsátott jelek dekódolására, és a vett csomagok továbbíthatók a szerverünkre további feldolgozás céljából.

Mérési eredmények, tapasztalatok

A küldetés kezdete óta több mint 233 ezer csomagot vettek világszerte (2020. 09. 18-án érvényes adat), amelyek fontos információkat tartalmaznak a SMOG-P fedélzetéről. Ezen adatok felhasználásával készült el az első térkép az emberi tevékenységből adódó elektromágneses szennyezettségről (**14. ábra**).

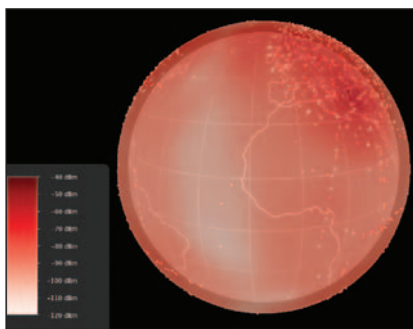
A leérkező adatok érdekes anomáliákat mutatnak. Kezdetől fogva gyakran tapasztalható,



12. ábra



13. ábra



14. ábra

hogy az energiaellátó rendszer védelmi elektronikáinak le kell kapcsolnia a védett rendszer túl-árama miatt, és át kell kapcsolnia a tartalék egységre.

A legvalószínűbb magyarázat ezekre a véletlenszerű jelenségekre az, hogy ilyenkor nagy energiájú részecske becsapódás éri a védett áramkört (latch-up jelenség), amely ezáltal maradandóan károsodna az egyedi védelem hiányában. Szerencsére a műhold védelme tökéletesen levizsgázott az űrben, már számos alkalommal mentette meg a küldetést!

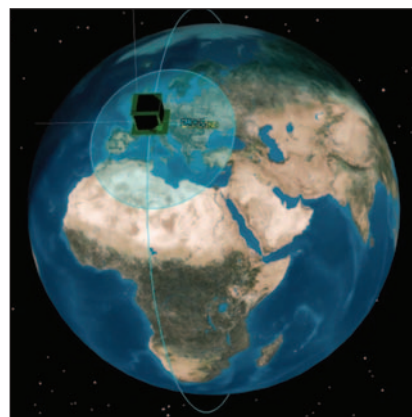
A küldetés kezdetén minden az elvárások szerint alakult. Az indítás után az akkumulátor közel teljesen fel volt töltve, nem mérült le a több hónapos tárolás és szállítás során, a gondos tervezésnek köszönhetően. A napsütötte pályaszakaszokon teljesen fel tudott tölteni, és a sötét szakaszok során is mindössze a teljes töltés 15%-át használta fel a műhold.

A SMOG-P pályájának közel 60%-át éri napfény, míg a pálya 40%-a a Föld árnyékában húzódik. A műhold közel 91 perc alatt

teszt meg egy teljes kört a bolygó körül, a napfényes és sötét szakaszok periodikusan váltják egymást. Egy pályaszimuláció-részletet láthatunk a **15. ábrán**.

Váratlan módon az energiámérleg megváltozását tapasztaltuk a küldetés során. Észlelhető volt az akkumulátor merülése, és közel 10 nap enyhén negatív energiámérleg mellett a műhold új energiaegyensúlyba került. A SMOG folyamatosan méri az akkumulátor töltöttségét, és automatikusan energiatakarékos üzemmódba vált, ha a töltöttség csökken. Az energiával úgy tud spórolni, hogy a kommunikációs rendszer adásainak időtartamát és gyakoriságát kezdi el korlátozni, mivel a vevőállomásokkal szükséges kommunikáció fenntartásához használja fel az energia nagy részét. Esetenként több, mint 2200 km-es távolságot kell a rádiós linknek megbízhatóan áthidalnia. Az adóteljesítmény 100 mW (+20 dBm), az antennanyereség kb. 0 dBi.

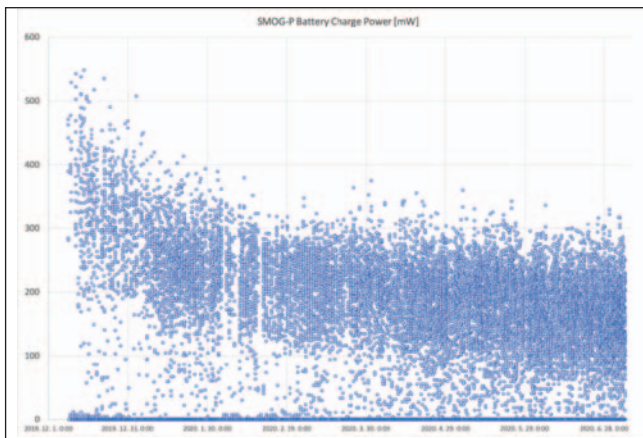
Az anomália megjelenésekor nem tudtuk megállapítani mi okozhatja az energiámérleg ilyen mértékű drasztikus megváltozását. Mára azonban a több ezer vett adatcsomagnak köszönhetően a vizsgálatom képes volt kimutatni a probléma forrását. Az akkumulátortöltő teljesítményének mért értékeiből kimutatható, hogy a napelemektől beérkező töltőteljesítmény drámai módon csökkent a küldetés kezdete óta. Ezekkel a teljesítményekkel jól jellemezhető az energiámérleg pozitív oldala, míg az



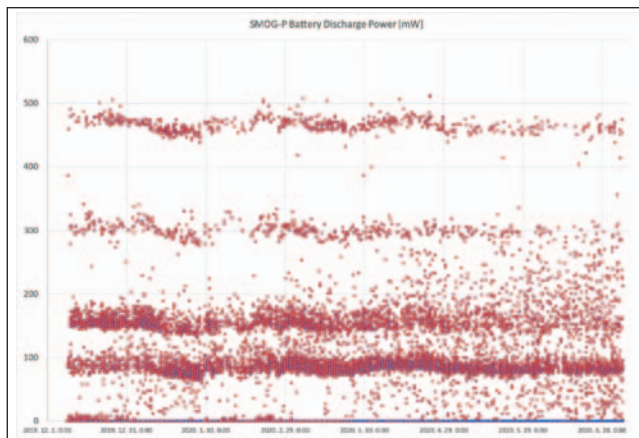
15. ábra

akkumulátort mérítő teljesítmények jól jellemzik a műhold által felvett energiát a mérleg másik oldalaként. A feldolgozott adatokból egyértelműen kimutatható, hogy a műhold próbál alkalmazkodni a megváltozott körülményekhez azáltal, hogy az alacsonyabb, energiatakarékos üzemmódokban egyre több időt tölt. A fedélzeten a küldetés során mért akkumulátortöltő teljesítmény változását a **16. ábra**, az akkumulátor mérítő teljesítményét a **17. ábra** szemlélteti

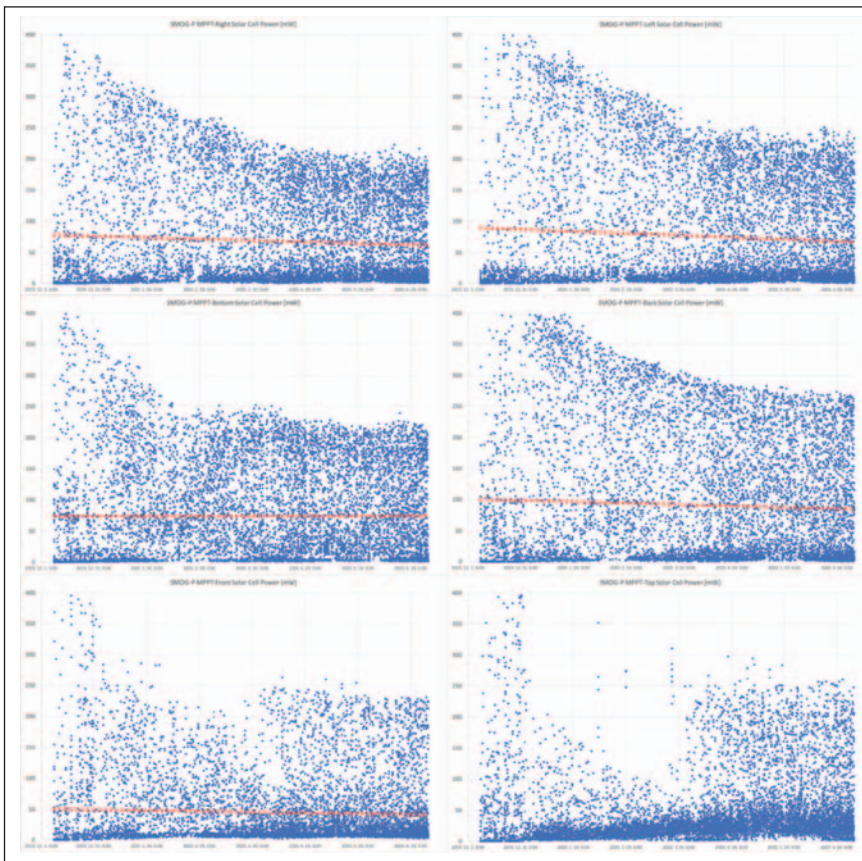
A SMOG-P mérte a napelemek feszültségét és töltő áramerősségét, amelyekből számítható a töltő teljesítmény, és ezáltal a napelemek állapota. Ezekből az adatokból jól megmutatkozik, hogy mind a hat napelem erősen degradálódott a küldetés során, és a beérkező teljesítmény csökkent (**18. ábra**). Ennek legvalószínűbb oka az, hogy bár űrminősített, de védőréteg nélküli cellákat használtunk fel a mű-



16. ábra



17. ábra



18. ábra

hold építése során. A védőréteg elhagyására azért volt szükség, hogy a napelemeket el lehessen helyezni a kis méretű oldalfelületeken. Ez a réteg lenne felelős azért, hogy a celláknak némi védelmet szolgáltasson a sugárzással és atomi oxigénnel szemben.

Az atomi oxigén (AO) a természetben nem fordul elő a Föld felszínén, mivel nagyon reaktív. Az űrben azonban a nagy mértékű UV sugárzás hatására az O₂ molekulák könnyen atomi oxigénné bomlanak. Az alacsony Föld körüli műholdas pályák atmoszférájának 96%-át atomi oxigén teszi ki. A NASA kezdeti űrrepülései során ez az atomi oxigén volt az egyik legnagyobb problémaforrás; lásd: www.nasa.gov/topics/technology/features/atomic_oxygen.html

Az AO nincs jelen az eredetileg tervezett 600 km magas pályán, azonban az alacsonyabb 360 km magasságú pályán már jelentős, amelyen SMOG-P végül elkezdte küldetését. A műhold nagy (kb. 8 km/s) sebességgel

beleütközött ezekbe a részecskébe, melyeknek a legjava a napelembe csapódik, mivel a külső felület nagy része napelemekkel borított.

Ezek a becsapódások okozták a napelemek teljesítményének csökkenését, mivel az AO korrodálhatja azok fémezéséhez használt ezüstreteget. Néhány egyéb tényező is okozhatta a tapasztalt degradációt, habár ezek valószínűsége kisebb.

A műhold hőmérséklete ciklikus változásban volt. Növekedett a napfényvel borított pályaszakaszokon és csökkent a Föld árnyékában, amíg a műhold újra el nem érte a napfényes szakaszt (19. ábra).

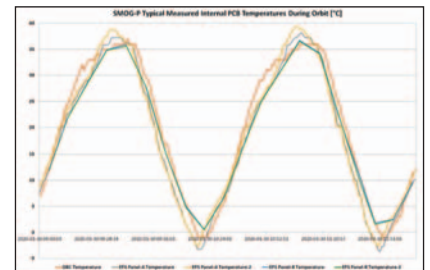
Mivel SMOG-P hőkapacitása tömegéből adódóan meglehetősen kicsi volt, ez a váltakozás sokkal jelentősebb, mint a nagyobb műholdak esetében. A külső oldalak belső felén elhelyezett hőmérsékletszenzorok adatai alapján a hőmérséklet ezeken a pontokon -20 és +70 °C között változott. A külső felületen elhelye-

zett napelemek hőmérsékletingadozása ennél még nagyobb lehetett, aminek hatására a cellákban mechanikai feszültség és ezáltal sérülés keletkezhetett. A műhold e cikk megírásáig közel 5000 alkalommal került meg a Földet, ami ugyanennyi termikus ciklust jelent. Az űrbe szánt napelemeket felkészítik ezekre a hatásokra, az ebből adódó degradációnak kisebb a valószínűsége.

Harmadik lehetséges hatásként a sugárzás szintén károsíthatja a cellákat, azonban jelenlegi tudásunk és a fedélzeti sugárzásmérő műszer adatai alapján SMOG-P pályáját még hatékonyan védte a Föld mágneses tere.

A műhold folyamatosan igyekezett kompenzálni a csökkenő beérkező teljesítményt. Ezt úgy érte el, hogy kevesebb energiát használt fel a rádiókommunikációra, ezért a belső panelek hőmérséklete lassan, de folyamatosan csökken a rádiózásból keletkező hő hiánya miatt.

A SMOG-P folyamatosan pörgött a pályára állítása óta. Nem volt lehetőség helyzetstabilizálás beépítésére ebben a kis méretben, és a küldetéshez nem is volt rá szükségünk. A pörgés miatt a töltőteljesítmény véletlenszerűen alakult az éppen napfényvel megvilágított cellák és azok megmaradó teljesítményének megfelelően. Néhány ritka esetben előfordul, hogy az akkumulátor nem tud eléggé feltöltődni a napfényes pályaszakaszon. Ekkor az ezt követő sötét szakaszban az akkumulátorhoz tervezett védelmi áramkör lekapcsol, hogy megvédje a túlmerítéstől. Ez az energiaellátó rendszer újraindulását eredményezi, amikor a műholdat ismét kellő erősségű fénysugárzás éri.



19. ábra

Annak ellenére, hogy nem várt módon a napelemekről beérkező teljesítmény közel felére csökkent az indítás óta, a SMOG-P képes volt sikeresen elvégezni a küldetését. A műhold tervezett élettartama 3 hónap volt, és még e sorok írásakor, 9 hónappal az indítás után is teljes funkcionalitással üzemelt. A rendszerek és tartalék rendszerek teljesen működőképesek, áramköri meghibásodást nem tapasztaltunk.

A napelemek degradációja az ATL-1 műhold esetén is kimutatható, amely a csapatunk bevonásával készült és a SMOG-P-vel együtt indult küldetésére. Ez a műhold jóval nagyobb napelemfelülettel rendelkezik, ezért itt még nem tapasztalható az energiaellátó rendszerben hasonló anomália, csak a korábban említett, valószínűleg részecskebecsapódásokból eredő kapcsolások a fő és tartalék rendszerek között.

Lehetőségünk volt néhány módon beavatkozni és segíteni SMOG-P-nek, ha a napelemekről beérkező teljesítmény tovább csökkent. Kiadhatunk a műholdnak olyan parancsot, ami végrehajtásával lekapcsolja időzítetten az óceánok fölött a kommunikációs rendszert, ahol nincsenek

állomások a műhold vételére, és nincs értelme tovább mérni az elektromágneses szennyezettséget. Ebben az állapotban SMOG-P mindössze 56 mW teljesítményt használt fel a működéshez, a többletenergia pedig eltárolható az akkumulátorban és később felhasználható volt a kommunikációhoz, amikor a műhold Magyarország fölé ért.

Alacsony pályamagassága miatt a műhold 2020 szeptember 29-én hajnalban belépett a Föld légkörébe, és végleg befejezte küldetését. Az utolsó rádiójeleket 3:33-kor vették Alabamában.

A következő műholdunk, a SMOG-1 kiszállítása már megtörtént. Rómában várja, hogy integrálják az Unisat-7 nevű műhold pályára állító szerkezetébe, amivel együtt egy Szojuz-2 típusú rakéta orrkúpjában indul majd küldetésére Kazahsztánból. Várhatóan 2021 év elején állítják majd pályára. Struktúráját megerősítettük és a SMOG-P tapasztalatai alapján felkészítettük, amennyire csak lehetett, mivel küldetése a pálya magasságából adódóan sokkal hosszabb lesz (akár 18...25 év).

A SMOG-P bebizonyította, hogy a konstrukció megállja a

helyét az űrben. A technológia és a tudás a rendelkezésünkre áll, hogy ilyen kis méretű mégis rendkívül intelligens űreszközöket alkossunk meg. Egy apró hullócsillagként fejezi majd be végleg küldetését. Nem marad utána űrszemét, csak a rengeteg tudományos mérési eredmény és tapasztalat, ami létrejött küldetése és megépítése során.

Referenciák:

- Képek: https://gnd.bme.hu/public/GeczyGabor_articles/
- SMOG projekt: <http://gnd.bme.hu/smog>
- SMOG-P státusz: http://gnd.bme.hu/grafana/d/jyKiTk_Wz/smog-p-status?orgId=1&kiosk
- 3D szennyezettségi térkép: <https://gnd.bme.hu/mb/site/>
- SMOG vételi szoftver: <https://gnd.bme.hu:8080>
- SMOG kommunikációs rendszer: http://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/levi_com/PID3627859.pdf
- Running Out of Fingers – Rocket-Lab Launch video: https://youtu.be/QK9mQdar5_w?t=915
- Running Out of Fingers - Rocket-Lab Mission Overview: www.rocketlabusa.com/news/updates/next-generation-electron-boosterson-the-pad-for-rocket-labs-10th-mission/
- Brendan Gully Photography: <https://brendangully.co.nz>

» Az áramkörök is csak a jó tápot szeretik «

Fémházas kapcsolóüzemű tápmodulok Labortápok (230 V-ról)



- stab. kimenet, rövidzár, túlfesz. és hőmegfutas elleni védelem
- 230 V/12 V= 5 A 3.990 Ft
- 230 V/12 V= 12,5 A 6.990 Ft
- 230 V/12 V= 21 A 9.990 Ft
- 230 V/12 V= 30 A 12.990 Ft



- nullától állítható áramlimit
- rövidzár, túlfesz., hőmegf., elleni védelem
- 0 ... 30 V / 5 A 29.990 Ft
- 0 ... 15 V / 2 A 19.990 Ft mobilitel. RF-teszterrel
- 0 ... 15 V / 2 A 15.990 Ft analóg kijelzéssel



(A képek csak illusztrációk!)

HAM-bazár (+36 1) 239-4932/36 m. 239-4933/36 m. hambazar@radiovilag.hu 1550 Bp., Pf. 123 2

Ageta méréstechnika

MÉRŐMŰSZEREK, OSZCILLOSKÓPOK, ANALIZÁTOROK, JELGENERÁTOROK, TARTOZÉKOK

Ageta Kft. <http://shop.ageta.hu> ; email: ageta@ageta.hu ; Tel.: 30/2564-288 ; Fax: 96/214-342