

Kisműholdak megbízhatóság és hatásfok szerint optimalizált energiaellátó rendszere

KOCSIS GÁBOR, SZIMLER ANDRÁS

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék, Űrkutató Csoport
{gabor.kocsis, szimler}@mht.bme.hu

Kulcsszavak: energiaellátó rendszer, megbízhatóság, hatásfok, napelem

A nagyméretű műholdak fedélzetén a költséghatékonyság, illetve a tervezés és kivitelezés egyszerűsítése céljából alkalmazott (és sokszor standardként kezelt) rendszertechnikai, áramköri és technológiai megoldások gyakran nem adoptálhatók a kisműholdas missziókba. Ennek oka főként az erősen korlátozott rendelkezésre álló teljesítmény és a szigorú méretkorlát. Ezért a kisméretű űreszközök esetén elengedhetetlen a küldetésorientált tervezési szemlélet. Különös tekintettel igaz ez az alaprendszerekre, melyek meghibásodása esetén az egész misszió veszélybe kerül, illetve kudarcba fulladhat. Minden űreszköz egyik legkritikusabb alrendszerre az energiaellátó rendszer. A cikk két konkrét példán keresztül tárgyalja a kisműholdak tápellátó rendszereinek fő tervezési szempontjait, valamint ismerteti a két különböző specifikációnak megfelelő rendszer tervezése során felmerült optimalizálási szempontokat.

1. Bevezetés

A két bemutatott műhold egyike egy 120 kg tömegű, 600 mm átmérőjű kisműhold, melynek fejlesztése jelenleg is zajlik. Az ESEO (European Student Earth Orbiter) az Európai Űrügynökség (ESA, European Space Agency) által koordinált program, melynek keretében európai egyetemista diákcsoportok egymással kooperálva fejlesztenek ki egy kisműholdat. A programban 12 ország több mint 20 egyeteme vesz részt és minden egységet külön-külön csoport fejleszt. A műhold energiaellátó rendszerét az Űrkutató Csoport által támogatott diákcsoport fejleszti, továbbá két tudományos műszer is a BME-n készül. Az űreszköz tudományos célja sugárzás mérése a Van-Allen övekben, új alkatrészek és egységek tesztelése, fényképek készítése a Földről és a Holdról, valamint egy plazmadiagnosztikai mérőműszer is helyet kap rajta. Az ESEO műhold látványterve és strukturális felépítése az 1. ábrán látható.

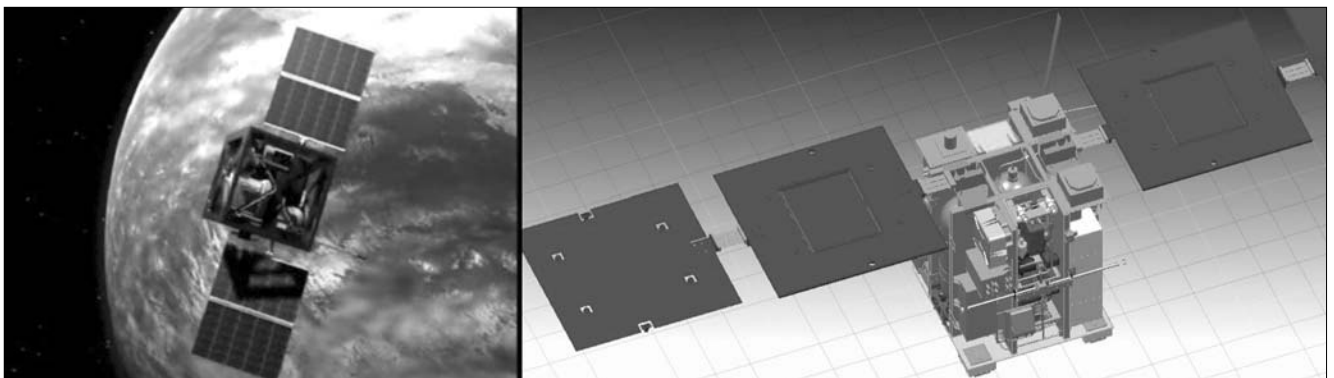
A másik, szintén az Űrkutató Csoport által kifejlesztett rendszer egy mindössze 1 dm³ térfogatú, úgynevezett nanoműhold egyetemi hallgatói mérés számára elkészített modelljének energiaellátó rendszere. A speci-

fikáció alapján jól szemléltethető, hogy az igen alacsony költségvetésű programokban a misszió szempontjából kritikus egységek tervezésénél milyen kompromisszumokra kényszerül a tervező. Ezen felül a mindössze maximum néhány centiméteres oldalhosszúságú műholdak esetén a költségvetés mellett két másik kulcsfontosságú paraméter határozza meg a tervezést: a szigorú méret és teljesítmény korlát. Mint később látni fogjuk, az imént felsorolt paraméterek egymással is összefüggenek.

2. Energiaforrások

Az ESEO esetében részben a sokféle fedélzeti kísérlet miatt, részben pedig amiatt, hogy egy diákműholdról van szó, az energiaellátó rendszernek a műhold méretét tekintetbe véve viszonylag nagy, 250 W körüli teljesítményt kell kezelnie. A műhold két kinyitható napelemtáblája a pálya napos szakaszán folyamatosan a napsugárzás maximális beesési szögének irányába lesz vezérelve, így megfelelő számú napelem cellával a két panel képes biztosítani a műholdfedélzeti egységek név-

1. ábra Az ESEO műhold



leges energiaigényét. Az ESEO geostacionárius átmeneti pályára (GTO, Geostationary Transfer Orbit) kerül, ahol az árnyékos szakasz várható maximális hossza 2 óra. Ezen időszak alatt a műhold teljes energiaellátásáért két, egyenként 7 darab 6.8 Ah kapacitású cellából álló Li-ion akkumulátor felel. Ezen felül a napszakaszon fellépő nagy teljesítményigényű folyamatok (mint például a misszió pályamódosítási fázisában a fűvókák működése) esetén a napelemek mellett az akkumulátor szolgál másodlagos energiaforrásként. Általánosan elmondható, hogy az akkumulátor a műholdak egyik legkritikusabb egysége, meghibásodása már számos misszió kényszerű befejeződéséhez vezetett. Ezért a megfelelő, ürkörülmények között is használható típus kiválasztásán túl igen fontos az akkumulátor védelme, valamint aktuális állapotának ismerete.

Az ESEO energiaellátó rendszerében két független akkumulátorvédelem található: a szélsőséges hőmérsékleti viszonyok, valamint a túltöltés, illetve mélykisülés elleni védelem. A passzív hőmérsékletszabályozással rendelkező ESEO fedélzetén a termál szimulációk alapján a minimális hőmérséklet $-45...-50^{\circ}\text{C}$ is lehet, ezért az akkumulátor melegítése céljából az akkumulátor dobozának falára kapton szigetelésű fólia ellenállások kerülnek. Az ezekre folytatott áram szolgál az akkumulátor fűtésére. A másik szélsőség a $+80...+90^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklet. Ebben az esetben a hőelvezető réteg, valamint a fölösleges hő eldisszpálása jelenti a megoldást.

Az akkumulátor túltöltésének, illetve túlzott kisütésének megakadályozását megbízható analóg elektronika végzi. Ezen kívül az akkumulátor állapotának folyamatos figyelését egy akkumulátorfeszültséget monitorozó áramkör végzi, mely külön méri minden egyes cella feszültségét és a mérési eredményeket telemetria adatként szolgáltatja a fedélzeti számítógép számára.

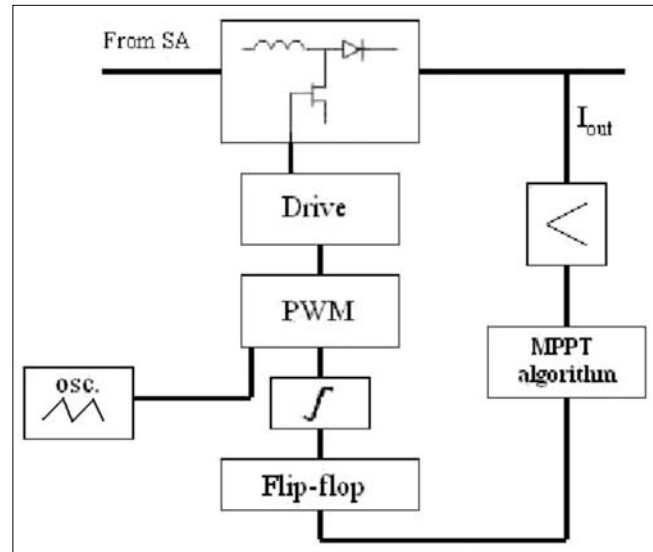
A nanoműhold esetén részben hasonló, részben viszont eltérő az alapkoncepció. A primer energiaforrást a műhold mind a hat oldalára rögzített napelemtáblák biztosítják, míg a szekunder energiaforrás két párhuzamosan kötött Li-polimer akkumulátor cella. A rendkívül kis méret, továbbá az ebből adódó igen korlátozott teljesítmény miatt csak a legszükségesebb védelmi áramkörök (alul- és túlfeszültség, valamint hőmérsékleti védelem) kerülhetnek a rendszerbe.

3. A maximális teljesítmény kinyerése

Mindkét energiaellátó rendszer fontos része az MPPT (Maximum Power Point Tracker) egység. Ennek feladata, hogy a hozzá kapcsolódó napelemet folyamatosan annak maximális teljesítményű munkapontjában tartsa, illetve kimozdítsa onnan abban az esetben, ha a rendelkezésre álló energia meghaladja a műholdfedélzeti egységek által igényelt és az akkumulátor töltéséhez szükséges energiamennyiség összegét.

A két különböző rendszer MPPT áramkörei ugyanazon az alapelven működnek: kimeneti teljesítményük maximalizálása érdekében bemeneti feszültségüket, vagyis

a napelem feszültséget változtatják. Az egyszerűsített MPPT blokkvázlat a 2. ábrán látható. Itt egyből szembeűnik, hogy a kimeneti teljesítmény helyett a visszacsatolt szabályzási paraméter a kimeneti áram, ami azon a feltételezésen alapszik, hogy a kimeneti feszültség állandónak tekinthető. Ez jogos feltevés, mivel a kimeneti feszültség maga a buszfeszültség, amit a rákapcsolódó akkumulátor feszültsége határoz meg. Ez utóbbi pedig az MPPT szabályzó körének 20 kHz nagyságrendű frekvenciájával összevetve valóban olyan lassan változik, hogy egy szabályozási ciklus alatt konstansnak tekinthető.



2. ábra MPPT blokkdiagram

Az alapelv tehát megegyezik, az áramköri realizáció viszont eltérő az ESEO, illetve a nanoműhold esetében. Ennek oka a megbízhatóság és a fogyasztás közti optimalizációban keresendő. Az ESEO esetében rendelkezésre álló napenergia elegendő ahhoz, hogy egy picit nagyobb fogyasztású, azonban nagy megbízhatóságú, teljesen analóg auto-oszcillációs MPPT kerülhetett az energiaellátó rendszerbe. Ezzel szemben a nanoműholdon az analóg IC-k több száz mikroamperes fogyasztása is már gondot okoz. LEO (Low Earth Orbit, vagyis Földközeli) pályákon a napsugárzás felületi teljesítménysűrűsége nagyjából 1400 W/m^2 . Ez azt jelenti, hogy a 10 cm-es oldalhosszúságú nanoműhold modell teljes bemenő teljesítménye a legoptimistább közelítés mellett is csak maximum 2-3 W (háromrétegű, 28%-os konverziós határfokkal rendelkező napelem cellákat feltételezve és szem előtt tartva, hogy a Nap egyszerre csak legfeljebb 3 oldalát világítja meg a műholdnak, azokat sem 90° -os beesési szög mellett).

Ebből az igen kis teljesítményből kell megoldani az összes fedélzeti egység (kommunikáció, fedélzeti számítógép, kísérletek, esetleg aktív stabilizálás) táplálását. Ezért a fogyasztás csökkentésének itt nagyobb szerepe van, mint az ESEO esetén, még akkor is, ha ez a megbízhatóság rovására megy. A nanoműholdas MPPT modelláramköre ezért az MPPT algoritmust alacsony fogyasztású mikrokontrollerben valósítja meg.

A redundancia azonban mindkét rendszerben hasonló filozófián alapszik: minden egyes napelemre külön MPPT csatlakozik, melyek kimenetei – a visszatáplálást elkerülendő – diódával közösítve kapcsolódnak a buszra. Ez látható a 3. ábrán, mely az ESEO rendszertervét mutatja be. (Az ábrán feltüntetett többi egység a későbbiekben kerül ismertetésre.)

Ez a megoldás egyfajta melegtartalékot biztosít, magában foglalva természetesen azt a lehetőséget, hogy az egyik MPPT meghibásodása miatt a hozzá kapcsolódó napelem is használhatatlanná válik. További tartalékegységek beiktatása azonban az energiaellátó rendszer méretének megengedhetetlen mértékű növekedését eredményezné. Az ESEO-n két napelem van, ezért a fent említett melegtartalékolás racionális megoldásnak bizonyul.

Felmerülhet azonban a kérdés, hogy az egyébként is igen kis méretű nanoműholdra miért kell minden egyes oldalhoz külön MPPT-nek kapcsolódnia, hiszen a szemben lévő napelemeket egyidejűleg soha nem éri közvetlen napsugárzás, így ezek dolgozhatnának közös MPPT-re. Azonban éppen a kis méret miatti rendkívül kis bemeneti teljesítmény okán merült fel annak gondolata, hogy az albedo-jelenséget, vagyis a Földről visszavert napsugárzást is felhasználjuk energianyerésre. Ez LEO pályákon átlagosan a közvetlen sugárzás teljesítménysűrűségének 30%-ára tehető, ami közel sem elhanyagolható. Így a közvetlenül megvilágított és a visszavert sugárzást kapó napelemek külön-külön MPPT-re dolgoznak, melyek így minden egyes napelemből a tényleges maximálisan kivethető teljesítményt juttatják a buszra.

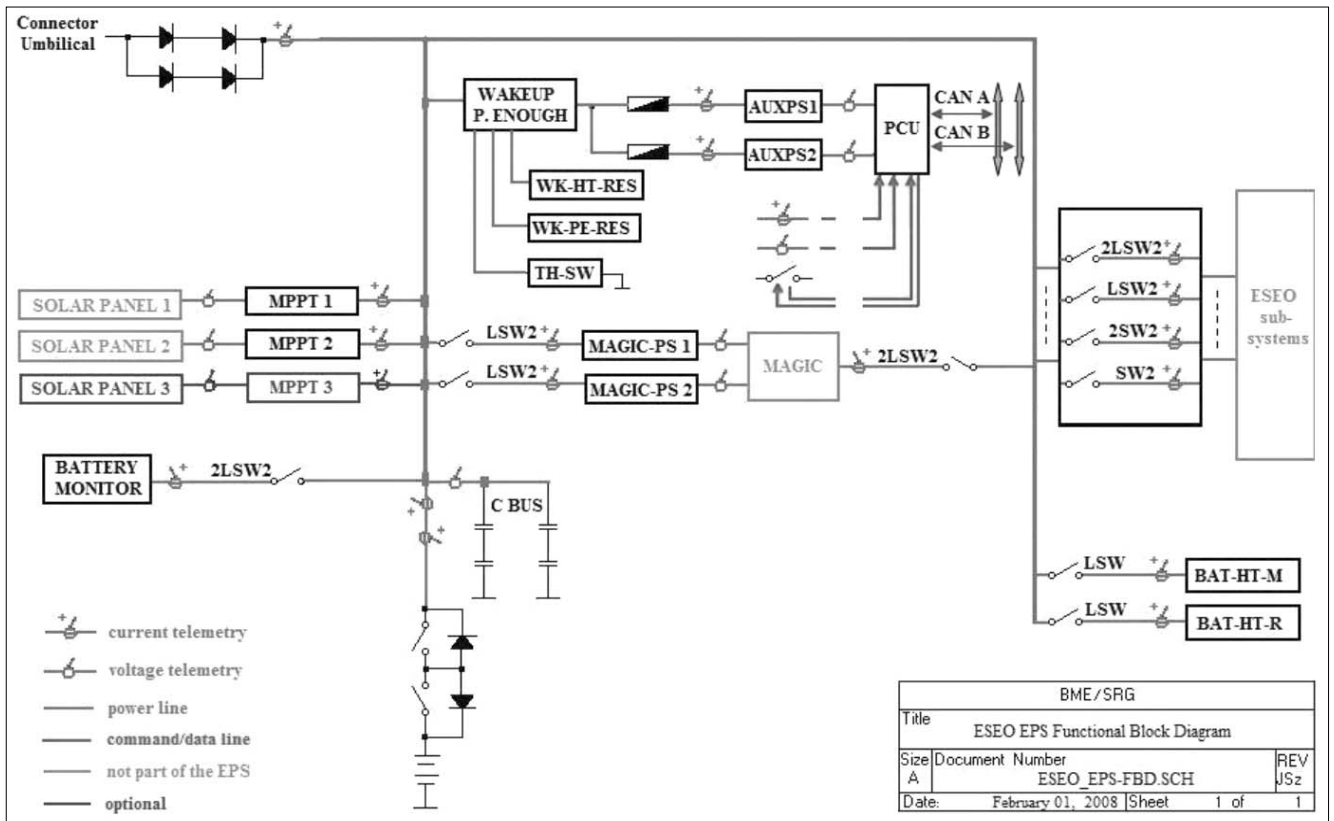
4. Energiaelosztás

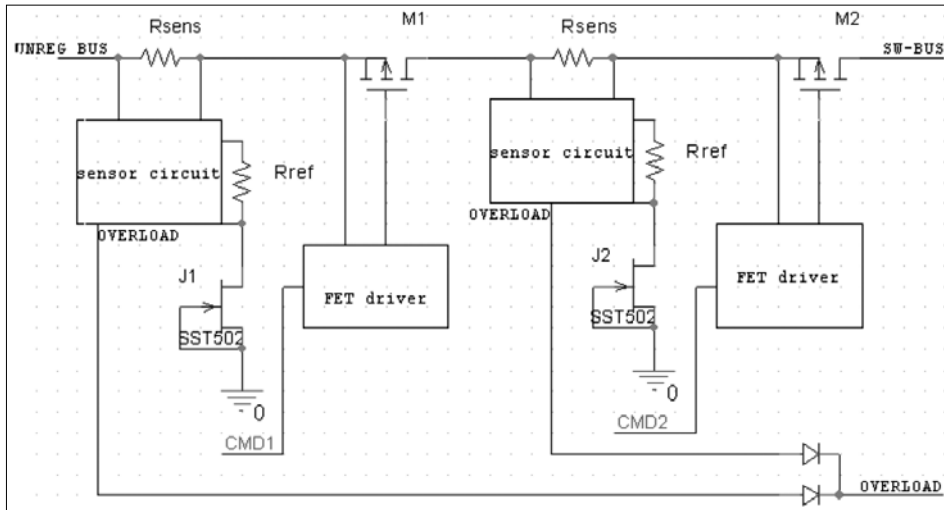
Mindkét rendszer szabályozatlan buszfeszültségű architektúrára épül. Ez azt jelenti, hogy a napelemeket az MPPT konverterek illesztik a buszra és a buszfeszültség az akkumulátor aktuális feszültsége határozza meg. Egy buszra kapcsolódó egység meghibásodásából adódó esetleges túláram a buszra kapcsolódó többi egység meghibásodásához vezethetne. Ezért minden egység áramlimitált kapcsolókkal választható le, amint egy meghatározott időnél (10 ms) hosszabb ideig a küszöbértéknél nagyobb áramot vesz fel. Ez az áramküszöb természetesen minden egység esetén más és más, az adott egység névleges és maximális teljesítményfelvételéhez igazított érték.

A 4. ábra a limiter kapcsolók működését szemlélteti. A kapcsoló FET a központi vezérlőegységtől érkező parancs jellel (CMD) kapcsolható be és ki. Ha az érzékelő ellenálláson (R_{sens}) mért áram meghaladja az előre beállított küszöbértéket, akkor a kapcsoló automatikusan limitálja az átfolyó áramot és az áramkör overload jelzést generál a központi vezérlő egység számára, ami 10 ms múlva lekapcsolja a terhelést a buszról.

A 4. ábrán két soros kapcsoló látható. Ez a 3. ábra rendszertervében jobb oldalt látható négyféle kapcsoló közül az LSW2 jelzésűnek felel meg. A négy kapcsoló közül a kapcsolt egység típusától függően kell választani. Ha az egység nem redundáns, akkor a szakadás és a rövidzár elleni védelem céljából két párhuzamos kapcsoló ágon keresztül csatlakozik a buszra és mindkét ág két soros kapcsolót tartalmaz (2LSW2).

3. ábra Az ESEO műhold energiaellátó rendszerének blokkvázlata





4. ábra Limiter kapcsolók

A fent bemutatott LSW2 a redundáns egységek kapcsolására szolgál. A további két kapcsoló típus (2SW2, SW2) a rezisztívnek tekinthető nem redundáns, illetve redundáns terheléseket kapcsolja. Ezeknél az egységeknél nem áll fenn rövidzár veszélye, jellegükből adódik az áramkorlátozás, így külön védelmi áramkörre nincs szükség. Ilyen rezisztívnek tekinthető terhelés például az akkumulátor fűtőellenállása.

5. Vezérlés

Az ESEO műhold energiaellátó rendszerének blokkvázlatán látható a PCU (Power Control Unit) nevű egység, mely két, egymással hideg redundanciában működő FPGA-n alapul. A PCU feladata a fent ismertetett kapcsolók vezérlése, valamint telemetriai adatok begyűjtése és CAN buszon való továbbítása a műhold fedélzeti számítógépe számára. A telemetria adatok a napelemek és az akkumulátor áramát, feszültségét és hőmérsékletét, valamint a buszra kapcsolódó további alrendszerek által felvett áramokat tartalmazzák. A PCU két FPGA-ja egy-egy segéd tápegységen (AUX-PS) keresztül kapja a működéséhez szükséges 5V-ot. Az ESEO PCU egységének köszönhetően az energiaellátó rendszer a fedélzeti számítógéptől függetlenül képes működni.

Belátható, hogy a nanoműhold esetében a fenti megoldás méretéből adódóan nem valósítható meg, ezért az energiaellátó rendszer vezérlését a redundáns fedélzeti számítógépre kell bízni. Szintén a helykorlát miatt nem kerül be a rendszerbe az a kiegészítő áramkör, ami az ESEO energiaellátó rendszerében a túlzott lehűlés esetén az összes egység lekapcsolásáért, az energiaellátó rendszer dobozának felfűtéséért, majd az egységek oszcilláció-mentes bekapcsolásáért felel (Wakeup áramkör).

6. Alkatrészválasztás

Mivel az űrminősítésű alkatrészek ára igen magas (használatukat sokszor nagyobb költségvetésű programok-

ban is kerülik), ezért az ESEO tápellátó rendszerében lehetőség szerint hétköznapi, azonban az űrben tapasztalható sugárzásnak és szélsőséges hőmérsékleti viszonyoknak ellenálló alkatrészek kerülnek. Fontos a megfelelő tokozás kiválasztása, mely nem csak a széles hőmérsékleti ingadozásokkal, hanem a vákuummal szembeni védelmet is szolgálja. A kritikus alkatrészek, mint például az FPGA-k ipari változata kerül a repülő példányba.

Nanoműholdas modell esetén minden egység COST (Commercial Off-The Shelf) alkatrészekből épül fel. Ennek nem az az oka, hogy a modell csak földi alkalmazásra (nevezetesen hallgatói mérésre) készült, mivel elkészítésénél a teljes mértékű hitelességre törekedtünk. Az ilyen kis műholdaknál az általában igen alacsony költségvetés miatt a repülő példányokba is közönséges alkatrészek kerülnek. Ezt valamelyest kompenzálhatja a rendelkezésre álló hely függvényében beépített redundancia.

7. Összefoglalás

A cikk két konkrét példán keresztül tárgyalta a kisméretű műholdak alrendszereit érintő rendszertechnikai kérdéseket és áramköri megoldásokat. A két megvalósított energiaellátó rendszer felépítését bemutatva rávilágított a kisműholdas alrendszerek missziótól függő tervezési szempontjaira, továbbá szemléltette a két legfontosabb paraméter, a megbízhatóság és a határfok szerinti optimalizáció jelentőségét.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket a Magyar Űrkutatói Irodának a két energiaellátó rendszer megvalósításához nyújtott támogatásért.

A szerzőkről

Szimler András 1989-ben szerzett diplomát a Budapesti Műszaki Egyetem (BME) Villamosmérnöki Karán. Azóta a BME Szélessávú Hírközlés és Villamoságtan Tanszék Űrkutató Csoportjában dolgozik. Szakterülete a műhold fedélzeti tápellátó rendszerekben belül a napelemes energiaellátás témaköre. Részt vett több űreszköz energiaellátó rendszerének fejlesztésében, gyártásában és integrálásában.

Kocsis Gábor 2006-ban diplomázott a BME Szélessávú Hírközlés és Villamoságtan Tanszékén. 2005-ben kapcsolódott be a tanszéken működő Űrkutató Csoport munkájába, ahol jelenleg doktorandusz hallgatóként több műholdas energiaellátó rendszer fejlesztésében is részt vesz.