Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso **40**, 191 – 196, (2010)

Vývoj a kvalifikácia kozmických vedeckých aparatúr na Ústave experimentálnej fyziky SAV

J. Baláž

Ústav experimentálnej fyziky Slovenskej akadémie vied,
Watsonova 47, 040 01 Košice, Slovenská republika
(E-mail: jan.balaz@saske.sk)

Doručené: November 2, 2010; Akceptované: December 8, 2010

Abstrakt. Vývoj kozmickej prístrojovej techniky pre prácu na palube satelitov patrí do špeciálnej oblasti vedecko – technických aktivít, keďže na túto techniku sú kladené mimoriadne nároky kvôli požadovanej vysokej spoľahlivosti v nehostinnom kozmickom prostredí. Jej vývoj vyžaduje skúsený, kvalifikovaný personál, drahé komponenty kvalifikované pre prácu v kozmickom prostredí a nákladné kvalifikačné testy v súlade s požiadavkami príslušných zahraničných kozmických agentúr. „Centrum kozmických výskumov: vplyvy kozmického počasia“, ktoré vzniklo s podporou európskych fondov v rámci Operačného programu výskum a vývoj, projektu ITMS 26220120009, významne prispieva k rozvoju Oddelenia kozmickej fyziky ÚEF v súvislosti so zabezpečením kozmicky kvalifikovaných komponentov a materiálov pre novo vyvíjané kozmické experimenty ako aj technologických možností v oblasti potrebnej vývojovej a testovacej infraštruktúry.

Kľúčové slová: vedecké satelity – kozmické technológie – vedecké prístroje

1. Introduction

Počiatky kozmických vedecko-technologických aktivít Oddelenia kozmickej fyziky (OKF) ÚEF spadajú na začiatok 70-tych rokov minulého storočia, keď sa pracovisko zapojilo do programu Interkozmos. Prvé detektory kozmických energetických častíc boli pre pracovisko vyvíjané na Karlovej univerzite v Prahe a na Elektrotechnickej fakulte vtedajšej VŠT v Košiciach, čoskoro sa však pracovisko podujalo na samostatnú vývojovú činnosť v rámci malej technickej skupiny vedenej Ing. Jozefom Rojkom, CSc. Prvým úspešným zavŕšením týchto aktivít bol úspešný štart detektora neutrónov a gama žiarenia SK-1 na palube satelitu INTERKOZMOS-17 v roku 1977. Odvtedy pracovisko vyvinulo, resp. sa so zahraničnými pracoviskami podieľalo na vývoji a vyslaní do kozmu vyše dvadsiatich vedeckých aparatúr. Zatiaľ posledným prístrojom pracujúcim na orbite je snímkovací detektor energetických neutrálnych atómov NUADU vypustený v 2004 (McKenna-Lawlor et al., 2004, 2009). Kozmickým experimentom je aj detektor energetických elektrónov PEEL vyslaný na palube suborbitálnej nórskej rakety HotPay-2 v roku 2008. Na vynesenie na orbitu čaká programovateľný spektrometer energetických častíc MEP-2, vo vývoji je spektrometer DOK-M pre projekt RESONANCE.

Kozmická prístrojová technika patrí medzi najnáročnejšie technické disciplíny vyvíjané človekom. Alfou a omegou je zabezpečenie vysokej dlhodobej spoľahlivosti a stability v podmienkach otvoreného kozmu.

Ide o úlohu náročnú, keďže sa prístroje musia podrobiť tvrdému ionizujúcemu žiareniu, extrémnym zmenám teploty, ultravysokému vákuu a taktiež veľmi silným akceleráciám, vibráciám a rázom počas štartu kozmického nosiča. A to všetko pri zachovaní tvrdých váhových, rozmerových a energetických limitov. Závažným špecifikom je aj pomerne úzky informačný kanál, ktorým musia kozmické meracie prístroje odovzdať nameranú informáciu na Zem, čo sa nezaobíde bez nutnosti dátovej kompresie a predspracovania informácie už na palube kozmickej sondy.

2. Prostriedky a metódy zabezpečenia vysokej spoľahlivosti kozmickej techniky

Vzhľadom na vysokú finančnú náročnosť kozmických misií a principiálnu nemožnosť akéhokoľvek servisu u automatických satelitov na orbite (ale aj krátko pred štartom), je prirodzenou požiadavkou zabezpečiť maximálnu možnú spoľahlivosť použitej prístrojovej techniky. Základnými prostriedkami je použitie kozmicky kvalifikovaných komponentov a materiálov, kvalifikované a certifikované technologické postupy a kvalifikačné testy samotných dohotovených kozmických aparatúr. Významným prostriedkom je redundancia systémov na viacerých úrovniach – od individuálnych funkčných blokov až po zdvojenie celého systému prístroja.

2.1. Kozmicky kvalifikované komponenty

Komponenty a materiály s kozmickou kvalifikáciou sú už samotným výrobcom pripravované pre použitie vo vysoko spoľahlivých kozmických systémoch. Už sám výrobca prispôsobuje tomuto cieľu samotnú technológiu výroby (napr. čistota polovodičov, typ zapuzdrenia – keramické a kovovo keramické puzdrá, atď.), zabezpečí výber najlepších výrobných sérií a najlepších kusov z danej série (skríning), uskutoční zahorenie za sťažených environmentálnych podmienok (teploty, vibrácie, radiácia) s cieľom vylúčiť menej spoľahlivé exempláre. Podľa stupňa náročnosti testov sú komponenty zatriedené do určitých kvalifikačných tried. Renomované kozmické agentúry zverejňujú zoznamy osvedčených kvalifikovaných komponentov „Qualified Part List“ (ESA-QPL, NASA-QPL). Ako minimálne kvalitatívne kritérium elektronických komponentov pre kozmické systémy slúži americká norma MIL-STD-883B.

2.1.1. Príspevok projektu CKV k zabezpečeniu kozmicky kvalifikovaných komponentov

V oblasti nadobúdania kozmicky kvalifikovaných komponentov je významným príspevkom projektu CKV predovšetkým zabezpečenie iónovo - implantovaných polovodičových detektorov ionizujúceho žiarenia na realizáciu spektrometrov kozmického žiarenia vyvíjaných na OKF. Detektory sú zabezpečené od renomovaných výrobcov ORTEC a CANBERRA.

Ďalšou významnou položkou sú radiačne odolné elektronické súčiastky s kozmickou kvalifikáciou, ktoré sú nutné na budovanie kozmickej prístrojovej techniky. V prvej etape projektu sa nadobúdanie zameriava najmä na hybridné integrované obvody na analógové predspracovanie signálu polovodičových detektorov od renomovaného výrobcu AMPTEK. V druhej etape ide najmä o obvody analógovo číslicovej konverzie a informatické časti prístrojov (procesory, pamäte, interfejsové obvody).

2.2. Kvalifikačné testy kozmickej prístrojovej techniky

Úlohou kvalifikačných testov dohotovených kozmických aparatúr je dôkladné preverenie a demonštrácia ich spoľahlivosti za predpísaných environmentálnych podmienok (teplotné cykly, termovákuové cykly, vibrácie, rázy, akcelerácie a optimálne zahorenie na vylúčenie nespoľahlivých komponentov)

2.2.1. Vibračné – akceleračné kvalifikačné testy'

Aj keď je kozmická aparatúra umiestnená na orbite spravidla už bez mechanickej záťaže (mikrogravitácia), je veľmi ohrozená počas štartu kozmického nosiča. Vzhľadom na optimálnu energetickú bilanciu raketového štartu musia jeho raketové motory počas niekoľkých minút uvoľniť obrovské množstvo energie, čo v súčinnosti s aerodynamickými efektami v hustejších vrstvách atmosféry spôsobuje veľké vibračné zaťaženie aj vedeckej časti užitočného nákladu. K tomu sa ešte pripája lineárne zrýchlenie v smere hlavného ťahu a intenzívne rázové zaťaženia pri postupnom „odstreľovaní" nižších raketových stupňov a pyropatrón, ktoré uvoľňujú aerodynamické kryty a ďalšie mechanizmy pri „rozbaľovaní" satelitu na orbite. Keďže intenzívne akcelerácie ohrozujú integritu prístrojov, ich konštrukcia musí byť veľmi odolná a kompaktná. Samotné dosky s elektronickými obvodmi musia mať množstvo oporných bodov kvôli potlačeniu nebezpečných nízkych rezonančných frekvencií, elektronické komponenty sú dodatočne fixované kvalifikovanými štrukturálnymi lepidlami a tmelmi (napr. ScotchWeld 2216 B/A).

Kvalifikačné testy sú špecifické pre konkrétny projekt a určuje ich najmä typ kozmického nosiča. Na ich realizáciu sa používa špecializovaná, počítačom riadená vibračná aparatúra (shaker), ktorá dokáže testovanému prístroju udeliť potrebné vibračné zaťaženia. Používajú sa vibrácie sinusoidálne, ktoré sú spravidla definované rozsahom frekvencií, príslušnými akceleráciami, rýchlosťou frekvenčnej zmeny, dobou trvania testu, ako aj náhodné (random), ktoré majú definované frekvenčno-amplitúdové spektrum a dobu trvania. Záťažovým testom predchádza tzv. skanovanie charakteristických rezonančných frekvencií testovaného prístroja, ktoré sa zopakuje po vykonaní záťažového testu. Ak prístroj absolvoval záťažové testy bez akéhokoľvek poškodenia, tieto dve spektrá sa zhodujú.

Pre ilustráciu komplexných mechanických kvalifikačných testov možno použiť napr. predpis z projektu ESA-BepiColombo, nosič Ariane-5.

- počítačové záťažové simulácie (FEA – finite element analysis)
- testy sinusoidálne (10 Hz – 3000 Hz, 24g, 2 minúty pre každú os X,Y,Z,)
- „random spectrum" (10 Hz – 3000 Hz, 22g-rms, 2 minúty pre každú os X,Y,Z)
- impaktný test (1000g, 5ms, 2 x pre každú os a orientáciu, t.j. 12 úderov)
- lineárne akcelerácie (20g, na centrifúge, 10 minút)

2.2.2. Príspevok projektu „Centrum kozmických výskumov: vplyvy kozmického počasia" k testovacej infraštruktúre OKF-ÚEF na realizáciu kvalifikačných vibračných testov

Významným príspevkom projektu CKV je zaobstaranie úplného systému vibračných kvalifikačných testov od renomovaného výrobcu Brüel & Kjær / LDS v zostave: Vibračný systém V780, výkonový zosilňovač HPAK, kontrolný systém Laser USB s riadiacim softvérom LAS-200 a 4ks snímače akcelerácie IEPE 100mV/g.

Základné parametre systému sú:

- akčná sila (sinus peak): 5100 N,
- akčná sila (random-rms): 4200 N,
- akčná rýchlosť (sinus peak): 1,9 m/s
- akčná akcelerácia (sinus peak): 1050 m/s2
- akčná akcelerácia (random-rms): 480 m/s2
- frekvenčný rozsah: DC – 4000 Hz
- rozlišovacia schopnosť riadiaceho systému: 24 bit
- interface k riadiacemu počítaču: USB 2.0

Systém vibračných testov umožní zabezpečiť akceleračné kvalifikačné testy kozmickej prístrojovej techniky jednak priamo vyvíjanej na OKF ÚEF, jednak môže poslúžiť na testy prístrojovej techniky spolupracujúcich partnerských inštitúcií v rámci medzinárodnej spolupráce v kozmickom výskume.

2.3. Termovákuové kvalifikačné testy

Závažnou požiadavkou na kozmické aparatúry je schopnosť pracovať v extrémnom teplotnom rozsahu (operačný teplotný rozsah), prípadne odolať bez poškodenia ešte extrémnejším výkyvom teploty v neoperačnom móde (napr. silné podchladenie počas dlhodobého zatmenia satelitu Zemou, alebo prehriatie pri niektorých orientačných manévroch satelitu). Ešte zložitejší teplotný režim majú diaľkové kozmické sondy (deep space), u ktorých teplotný príkon od Slnka môže kolísať až o niekoľko rádov. Pre kozmické elektronické systémy je významným faktorom aj vákuový režim, pri ktorom úplne odpadá chladenie elektronických komponentov prirodzenou či nútenou cirkuláciou vzduchu. Komponenty s významnejšou disipáciou tepla, ktoré by sa v pozemských podmienkach spoľahlivo schladili prirodzenou cirkuláciou vzduchu, sa môžu vo vákuovom prostredí ľahko prehriať a zničiť, preto je nutné zabezpečiť dostatočný odvod nimi vyvinutého tepla konvekciou (tepelne vodivé mostíky k chladnejším častiam), prípadne radiáciou – radiačným chladičom.

Pri väčších výkonoch je na odvod tepla niekedy nutné používať tepelné trubice. Keďže maximálny operačný teplotný rozsah väčšiny polovodičových komponentov s kozmickou kvalifikáciou je -55°C až +125°C, pričom v záujme extrémnej spoľahlivosti sa neodporúča vyššia teplota ako +80°C, je teplotný režim kozmickej techniky mimoriadne dôležitý a venuje sa mu špeciálna časť kozmického inžinierstva. Kvalifikačné termovákuové testy spravidla pozostávajú z predpísaného počtu pomerne presne definovaných teplotných cyklov v operačnom aj neoperačnom móde testovaného zariadenia a to pri tlaku spravidla menšom ako 10-5 mBar, keď je konvekčná tepelná výmena vzduchom prakticky zanedbateľná. Typické teplotné cykly pre prístroje elektronickej sekcie satelitu sú stanovené v rozsahu -40°C až +50°C v operačnom móde a -50°C až +70°C v neoperačnom móde, avšak pre niektoré vysunuté časti (senzory na výklopných ramenách) môže byť rozsah aj podstatne širší. Testovaný prístroj je elektricky prepojený so simulátorom satelitu pomocou vákuových priechodiek.

2.3.1. Príspevok projektu CKV k testovacej infraštruktúre OKF-ÚEF na realizáciu termovákuových kvalifikačných testov

Aj keď pracovisko OKF ÚEF získalo základné časti systému termovákuových testov (vákuová komora, vývevy) z iných zdrojov, budovanie pracoviska nie je ukončené a vyžaduje si dodávky ďalších komponentov. Z prostriedkov CKV takto boli zakúpené Dewarove nádoby na skladovanie tekutého dusíka a v 2. etape projektu sú plánované dodávky tepelných výmenníkov na odvod tepla z priestoru vákuovej komory.

2.4. Kvalifikačné testy elektromagnetickej kompatibility (EMC)

Keďže na palube satelitu pracuje súčasne množstvo elektronických zariadení, je nevyhnutné zabezpečiť ich minimálne vzájomné ovplyvňovanie.

Úlohou EMC testov je overiť, že testované zariadenie:

– emituje rušivé signály nižších úrovní ako je predpísaný limit v celom rozsahu vyšetrovaného elektromagnetického spektra (emisné testy)

– nie je citlivé na rušenie od iných zdrojov na úrovni predpokladanej na palube satelitu (testy imunity, resp. susceptibility).

OKF-ÚEF doteraz nedisponovalo vlastným pracoviskom na uskutočnenie EMC testov a preto bolo odkázané tieto testy realizovať v zahraničných partnerských laboratóriách.

2.4.1. Príspevok projektu CKV k testovacej infraštruktúre OKF-ÚEF na realizáciu testov elektromagnetickej kompatibility (EMC)

Z prostriedkov CKV je zabezpečená dodávka úplného systému na realizáciu emisných testov kondukčných (vodivostných, na napájacích vodičoch) aj radiačných (elektromagnetická energia vyžarovaná do éteru), ako aj imunitných vodivostných testov (odolnosť testovaného zariadenia voči rušeniu na napájacích vodičoch).

Testovacia zostava pracoviska pozostáva z týchto komponentov:

– EMI prijímač 10Hz – 30MHz certifikovaný podľa normy CISPR 16-1-1

– Rozširujúca jednotka 30 MHz - 3 GHz, certifikovaná pre CISPR 16-1-1

– Súprava antén pre radiačné emisné testy:

– Aktívna tyčová anténa 9kHz-30MHz,

– Bi-kónická anténa 30-200MHz,

– Logaritmicko-periodická anténa 200MHz-2700MHz

– Umelá sieť V 150 Ohm na konduktívne emisné testy

– Systém pre vodivostnú imunitu 10kHz až 230MHz

– RF merač výkonu do 1 GHz

– Súprava injekčných prvkov

– Súprava väzobných prvkov pre vodivostnú imunitu

Poďakovanie. Táto publikácia bola vytvorená realizáciou projektu ITMS číslo 26220-120009, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

Viď zoznam literatúry (References) v anglickej verzii článku.