

Slovenija gre v vesolje: zahtevnost tehnologije na krovu satelita

Leon Pavlovič

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: leon.pavlovic@fe.uni-lj.si

Povzetek. Prispevek navaja preteklo in trenutno delo na področju satelitske tehnologije v Sloveniji. Med drugim se trenutno gradita prvi slovenski nanosatelit in tudi prvi mikrosatelit. Gradnja elektronskih naprav za vgradnjo na krov satelita zahteva posebno znanje, zato so opisani bistveni koraki načrtovanja, težave in primeri iz prakse. Zahtevnost satelitske tehnologije se izkaže zaradi širokega temperaturnega razpona, vakuuma in posebnih pojavov, ki so značilni oziroma prisotni pri teh pogojih oziroma okolju. Posebej lahko omenimo rast brkov iz cina brez svinca in pojav multipaktor. Sestavljanje izdelkov za krov satelita zahteva visoko čistost okolja, zato je na kratko razloženo čiščenje komponent. Satelitska tehnologija potrebuje namensko testiranje, zato sta med drugim omenjena tudi termovakuumski in stresalni test.

Ključne besede: satelit, vesoljska tehnologija, vakuum, temperatura, multipaktor

Slovenia entering the space: challenges of the onboard satellite technology

The previous and the current development work in the field of the satellite technology in Slovenia is presented. Currently, among other work, there are endeavors to build the first Slovenian nano and also micro satellite. Building the onboard electronic systems requires special knowledge and skills, therefore some key steps of the design process, problems and practical examples are given. The complexity of the satellite technology is based on a broad operating temperature range, the vacuum and also some special phenomena which are typical or are present in these environments. The growth of the tin whiskers and the multipactor effect are especially important. The cleaning procedure is briefly described, since the satellite technology needs a clean assembly environment. The testing procedures like the thermo-vacuum test and the vibration test are also highlighted.

Keywords: satellite, space technology, vacuum, temperature, multipactor

1 UVOD

Vesolje in vesoljska (satelitska) tehnologija sta v preteklem stoletju močno zaznamovala človeštvo. Prostrano vesolje je za marsikoga zelo zanimivo področje, za nekatere posebnije pa celo do neke mere mistično. Raziskovanje vesolja in našega osončja, opazovanje Zemlje, osvajanje bližnjih planetov ter naravnih satelitov in satelitske komunikacije so v preteklih 60 letih doživeli velikanski napredek in širok razmah. Danes si ne moremo več predstavljati življenja brez uporabe satelitskih tehnologij, pa naj bo to navigacija v avtomobilu, visokoločljive slike površine Zemlje na računalniku (npr. od Google Maps/Earth),

napoved vremena ali pa prenos televizije iz daljnih krajev. Vse skupaj se je začelo, če ne prej, z izstrelitvijo prvega umetnega satelita Sputnik 1, to je bilo 4. oktobra 1957.

Kje pa je v tej zgodbi Slovenija? Tudi Slovenija je že prispevala svoj delež v vesoljski oziroma satelitski razvoj, s svojim znanjem načrtovanja, prav tako pa tudi z izdelki (elektronskimi sklopi) za vgradnjo na krove satelitov. Pravega razvojnega in proizvodnega okolja za satelitske tehnologije v Sloveniji takrat seveda še ni bilo, prav mogoče pa tudi v nekdanji Jugoslaviji ne. Slovenska vesoljska tehnologija je takrat temeljila na trdni volji (in lastnih stroških) posameznikov, izdelavi izdelka v garaži ali domači delavnici, a je bila kljub temu na vrhunski ravni. Slovenija je pustila svoj pečat predvsem na amaterskih vesoljskih projektih AMSAT, npr. na misiji AMSAT Microsat [1] leta 1990 in pozneje na misiji AMSAT AO-40/P3D [2] leta 2000. Tematika osnovnih vesoljskih pojmov, satelitske tehnologije in slovenske uporabe vesoljskih tehnologij v devetdesetih letih prejšnjega stoletja je lepo opisana v [3].

Danes se slovenski vesoljski oz. satelitski razvoj stežka, a vendarle počasi prebija naprej. Najmanjše satelite (razred nanosatelitov, teža do 10 kg) v obliki kocke (ang. cubesat) razvija Univerza v Mariboru [4], malo večje (razred mikrosatelitov, teža do 100 kg) pa Center odličnosti Vesolje-SI v Ljubljani [5]. Prvi slovenski nanosatelit (cubesat), imenovan Trisat, je prikazan na sliki 1. V tujini se danes satelitski razvoj premika s svetlobno hitrostjo. Ne mine mesec dni, ko so v tirnico okoli Zemlje poslani novi majhni sateliti. Trend satelitskih projektov se močno nagiba v prid mikro- in nanosatelitov. Kako ne, saj so razvojni in proizvodni stroški nizki, prav tako pa tudi stroški

izstrelitve rakete, ki so vezani na težo samega tovora. ZDA vodijo v satelitski tekmi majhnih satelitov, npr. Planet Labs iz San Francisca [6] skoraj vsak tretji mesec pošlje v nizko tirnico od 20 do 30 novih nanosatelitov. Evropa sicer zaostaja v tej tekmi, a vendarle bo s konzorcijem QB50 v bližnji prihodnosti v tirnico poslanih 50 nanosatelitov hkrati [7].

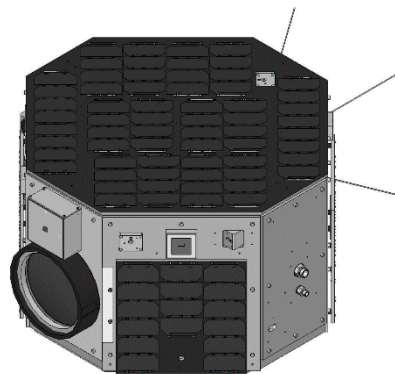


Slika 1: Prvi slovenski nanosatelit (cubesat) – Trisat [4]

2 ZAHTEVE GRADNJE MODERNEGA MAJHNEGA SATELITA

Vsakdo, ki se loti načrtovanja in izdelave tehnologije za vgradnjo na krov satelita, ve, da to ne bo lahka pot. Tehnologija na krovu satelita je izjemno draga, predvsem zaradi omejene izbire primernih elektronskih komponent (npr. primernost tipa ohišja integriranega vezja ali pa odpornost komponente proti sevanju, ki je v vesolju precej močnejše kot na Zemljini površini) ter na koncu še zaradi obsežnega in zahtevnega testiranja celotne naprave ali izdelka. Dokaj običajni dobavni roki za posamezne podskelepe satelita se štejejo v letih, izdelave celotnega satelita (od prvega sestanka do končanega satelita) pa mnogokrat v desetletjih.

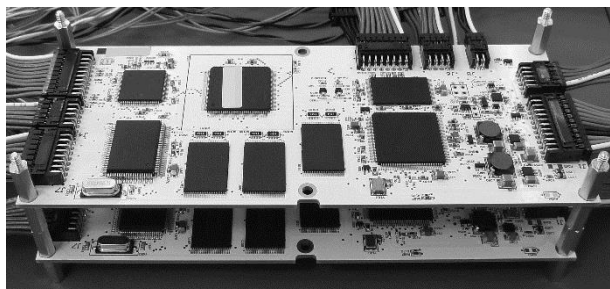
Dandanašnji so majhni sateliti izjemno sposobni, tehnološko dovršeni in se glede zmogljivosti merijo z obstoječimi velikimi sateliti v tirnicah okoli Zemlje. V zadnjem desetletju je napredovala predvsem tehnologija elektronske senzorike (senzorski čipi za videokamere in fotografske aparate), pomnilniška in seveda računalniška tehnologija. Katerikoli sodobni mikro- ali nanosatelit za opazovanje Zemlje brez visokoločljivostne kamere, katere senzor ima veliko milijonov točk, danes velja za zastarelega. Seveda velikanske količine podatkov iz senzorjev potegnejo za seboj velike zmogljivosti hranjenja teh podatkov v pomnilniških vezjih. Na primer, prvi slovenski mikrosatelit, imenovan NEMO-HD, ki je prikazan na sliki 2, premore skoraj 300 GB pomnilniške zmogljivosti [5].



Slika 2: Prvi slovenski mikrosatelit – NEMO-HD [5]

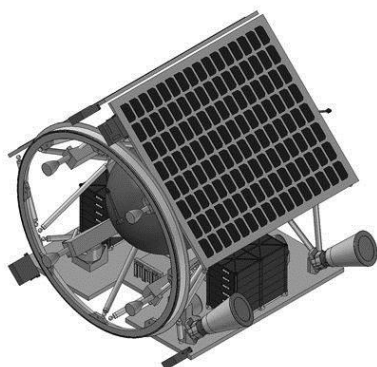
Poleg velikega pomnilnika potrebuje satelit tudi zelo zmogljivo komunikacijsko zvezo z zemeljsko postajo na površini. Ker so večinoma nano- in mikrosateliti poslani v nizke tirnice LEO (ang. low earth orbit) na višinah med 400 in 1000 km, je uporabni čas za prenos podatkov med enim preletom zelo kratek. Ta znaša največ okoli 15 minut, po navadi še precej manj (če satelit ne preleti zemeljske sprejemne postaje ravno v zenitu – tik nad glavo). Poleg tega je uporabnih preletov v teh nizkih tirnicah čez en dan ponavadi do kvečjemu okoli šest. Hiter izračun za zahtevano podatkovno hitrost prenosa podatkov z NEMO-HD satelita s polnim pomnilnikom 300 GB in šestimi preleti s povprečnim časom 12 minut v enem dnevu na zemeljsko sprejemno postajo je nedosegljivih 550 Mbit/s, kar je veliko še za domače internetne uporabnike prek optičnega vlakna. Vendar pa pomnilnik in zmogljiva komunikacija še zdaleč nista prva zahteva pri gradnji modernega majhnega satelita. Ta je namreč energijska učinkovitost. Električna energija je najpomembnejša reč na krovu kateregakoli satelita. Brez nje je satelit mrtev. Električno energijo dobiva satelit iz baterij (ali reaktorja, če gre za misijo v globoko vesolje) in še iz sončnih celic na velikih panelih, ki se raztegnejo proč od ohišja satelita, ali na površinah s celicami na samem ohišju satelita.

Srce satelita je seveda računalnik s procesorsko enoto in programom izvajanja operacij na krovu. Pravilno izvajanje operacij in komand med posameznimi moduli ali sklopi satelita (računalnik, primarni instrument, sekundarni instrument, različni senzorji, komunikacije, itd.) je ključno in ne sme odpovedati. Zato je računalnik po navadi podvojen in se izvajanje, če je zaznana napaka, preklopi na drugega (verjetnost, da napaka nastane v obeh računalnikih hkrati, je sicer zelo majhna). Primer podvojenega računalnika prikazuje slika 3.



Slika 3: Primer podvojenega računalnika za krov satelita

Razlogov za napačno izvajanje ukazov v računalniku je veliko: napaka v programski kodi, odpoved ali okvara katerega od sestavnih delov satelita, najbolj težavni pa so energetski delci, ki prosto švigajo po vesolju. Ti delci imajo visoko energijo in ob trku v elektronski čip lahko povzročijo napako (spremembo logičnega nivoja) v pomnilniku. Proti vsemu temu mora biti računalnik odporen. Poleg podvajanja procesorske enote imajo računalniki na krovu obvezno tudi namenska elektronska vezja za avtomatsko zaznavo in odpravo napake v pomnilniku, s čimer se »življenje« satelita močno podaljša. Tak računalnik je v študentski Esini misiji ESMO (ang. European Student Moon Orbiter) razvijala Univerza v Mariboru [8]. Predvideni satelit ESMO, katerega razvoj misije je bil žal predhodno zaustavljen (interna odločitev ESE), je prikazan na sliki 4.



Slika 4: Model satelita iz Esine misije ESMO [7]

Satelit je v vesolju med drugim izpostavljen še dvema pomembnima dejavnikoma: brezračnemu prostoru oz. vakuumu in temperaturni dinamiki. Sončni žarki so zunaj Zemljine atmosfere precej močnejši, zato se satelit na osončeni strani hitro ogreje na visoke temperature. Po drugi strani se v območju Zemljine sence hitro ohladi na zelo nizke temperature. Običajni temperaturni razpon, ki ga večkrat na dan doživi zunanja stran satelita v nizki tirnici, je od -170 do +120 stopinj Celzija. Ker je notranost satelita po navadi toplotno regulirana (pasivno ali aktivno), so notranji elektronski sklopi izpostavljeni nekoliko nižjemu temperaturnemu območju, po navadi od -30 do +60 stopinj Celzija, kar je še vedno precejšnja temperaturna razlika. Zato so vsi sestavni deli pred vgradnjo na krov testirani, najprej

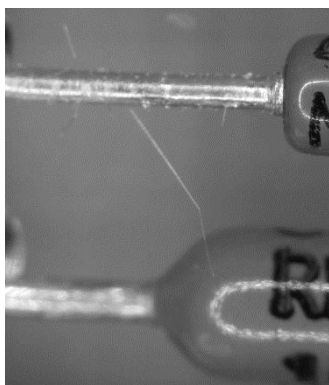
posamezno, nato pa še kot celota, vsaj v tem temperaturnem območju. Periodično ponavljanje temperaturne razlike 90 stopinj seveda pomeni nenehno raztezanje in krčenje materialov, zato lahko prihaja do nenadnih odpovedi komponent in okvar sklopov (pokanje spojev čina med čipi in tiskanim vezjem in posledična izguba stika). Satelit kot celota mora seveda imeti toplotno ravnovesje. To pomeni, če ima presežek toplotne energije na enem delu (osončen del satelita), mora ta presežek na nekem drugem delu odvesti proč. To funkcijo na satelitih opravljajo zunanje prazne oz. nepokrite površine, ki so seveda znotraj pritrjene oz. so del konstrukcije in so namenjene hlajenju s pomočjo sevanja v vesolje.

Vakuum je poseben izziv med načrtovanjem in izdelavo sestavnih delov satelita, saj zelo omejuje načine (predvsem) hlajenja elektronike. Ker toplotne konvekcije v vesolju ni (saj ni zraka), se lahko odvečna toplota, ki jo proizvajajo elektronske komponente, odpelje proč kvečjemu s kondukcijo, torej s toplotnim prevajanjem prek toplotnih mostov (kovine ali drugi toplotnopr vodni materiali). Zato ima satelit kovinsko konstrukcijo (po navadi je to aluminij, ker je lahek), prek katere se posamezni instrumenti/moduli/sklopi hladijo ali grejejo in tako ohranjajo vsaj približno toplotno ravnovesje po vsem satelitu. Poleg toplotnih problemov na krovu vakuum močno omejuje tudi izbiro materialov za samo gradnjo satelita in naprav na krovu [9]. Problematične so večinoma nekovine (plašči kablov in žic, plastika, pena, guma in podobno), saj imajo visoko t. i. razplinjevanje (ang. outgassing). To je pravzaprav nekakšno »hlajenje« samega materiala (primer je vonj v novem avtomobilu), ki je v vakuumu na krovu satelita v vesolju popolnoma nezaželeno. Namreč, plini iz materiala sami od sebe izhajajo in se nato prosto širijo po notranosti satelita. Molekule tega plina se seveda nato nekam nalagajo, in sicer predvsem na hladne površine. To so lahko tudi zelo kritični sestavni deli, npr. objektivni kamer in teleskopov na krovu. S časom se taka leča umaže in teleskop izgubi svoje odlične lastnosti, pozneje pa tudi samo funkcionalnost. Primernost oz. kriterij nekovin za vgradnjo na satelit je definirana s t. i. faktorjem celotne izgube mase (ang. TML – total mass loss) in za primerne materiale znaša največ 1 %. Npr. za električno ožičenje med napravami na krovu satelita je priporočljiva uporaba električnih (bakrenih) žic s teflonsko (PTFE – politetrafluoretilen) izolacijo, saj ima navadni PVC previsoko razplinjevanje. Po drugi strani so težavne tudi nekatere kovine, to je predvsem cink (in posledično medenina, ker je zlitina bakra in cinka), saj ima visok parni tlak.

Elektronski sklopi na krovu satelita so grajeni oz. prispajkani izključno s cinom, ki vsebuje poleg kositra še svinec (vsebnost Sn/Pb je po navadi 60/40). Razlogi za to bodo razloženi pozneje. A kako graditi elektroniko s cinom iz svinca, če pa je Evropa z direktivo RoHS (ang. Restrictions on Hazardous Substances) z letom 2003 prepovedala uporabo svinca (in drugih kemijskih

elementov) v vsej elektronski industriji? Kot zanimivost, vsa poraba svinca za elektroniko pomeni le 0,5 % celotne svetovne porabe svinca! Zato imajo veliki evropski graditelji satelitov lastne (ali pa najete) proizvodne linije, pri katerih še vedno uporabljajo svinčeni cin – le v tem primeru (za vesoljske in še za vojaške potrebe) je uporaba svinca za elektroniko namreč še vedno dovoljena [10].

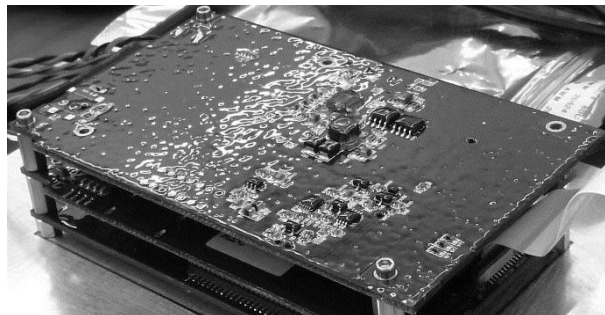
Še en nadležen pojav, ki ne nastaja samo v vakuumu, temveč tudi pri normalnem zračnem pritisku, je rast brkov iz cina (ang. tin whiskers). Brki iz cina so tanke strukture v obliki lasu, vejice ali druge podobne oblike, ki prosto rastejo iz začetne točke v prostor. Primer brka, ki je zrastle iz površine nogice od diode, je prikazan na sliki 5. Predvsem rast teh brkov najdemo pri cinu brez svinca (ang. Pb-free tin) in pa pri vseh kovinskih površinah, ki imajo večinsko sestavo iz kositra. Seveda so električno prevodni, lahko zrastejo v nekaj urah, mesecih ali pa letih. Sam pojav in razlogi njihove rasti še dandanes niso dokazani. Zrastejo lahko nekaj mikronov ali pa več milimetrov (najdaljši zabeležen brk je bil dolg 23 mm) [10, 11].



Slika 5: Primer brka (ang. whisker), ki je zrastle iz nogice diode [11]

Problem teh brkov je, da lahko kratkostaknejo dve sosednji električno-prevodni površini (nogici od čipa, dveh elektronskih elementov itd.). Lahko so dovolj debeli, da lahko prevajajo električni tok z jakostjo več deset miliamperov! Veliko nepojasnjenih težav ali okvar elektronike, ki nastanejo po določenem času uporabe, pripisujejo posledici rasti brkov iz cina. Pojav lahko zelo učinkovito omilimo oz. preprečimo, če kositru v cinu dodamo že majhno količino svinca. Za graditelje elektronike za satelit to pomeni prav nobene uporabe kositrovih spojin brez svinca. Pri tem pa ni nujno, da gre za elektroniko – npr. lahko je to tudi vijak ali pa ohišje škatle, v kateri je elektronika. Zato je treba prav vse elektronske RoHS komponente pred vgradnjo pociniti s cinom s sestavo Sn/Pb = 60/40. Druga možnost je, ki pa je ponavadi uporabljena poleg cina s svincom, zaščita površine elektronskega tiskanega vezja z dielektrično plastjo (ang. conformal coating), po navadi iz akrila. S to tehniko zaščite rasti brkov iz cina so cela vezja prekrita s plastjo debeline 0,1 do 0,2 mm in so fizično

videti, kot da bi bila »na debelo« prelakirana – slika 6. Seveda ta dielektrični sloj ne sme vplivati na delovanje vezja. Vendar pa se izkaže, da včasih brki prebijejo to tanko plast in rastejo kljub vsemu še naprej nad to plastjo. Torej ta tehnika rasti brkov ne ustavi v celoti.



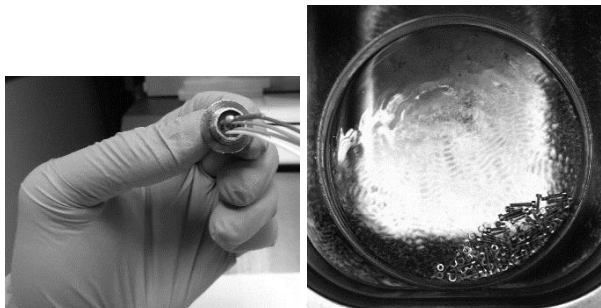
Slika 6: Primer zaščite zmontiranega tiskanega vezja s plastjo iz akrila (ang. conformal coating)

V posebnih primerih se pri načrtovanju satelita oziroma njegovih podsklopov srečamo s t. i. pojavom »multipaktor« (ang. multipactor). Ta močno nezaželen pojav nastaja pri izmeničnih signalih visokih frekvenc v visokem vakuumu. Deluje tako, da se izbiti elektroni iz kovinske površine prek sekundarne emisije ujamejo v rezonanco s frekvenco signala, ki je prisoten v praznem prostoru med kovinskimi površinami. Količina izbitih elektronov se takrat eksponentno povečuje (multiplicira), dokler ne pride do poškodb elektronike. Pojav je pogost pri komunikacijskih sklopih, kot so valovodi in rezonatorska sita. Če imamo opravka z visokimi frekvencami in vakuumom (npr. oddajnik na krovu satelita), se moramo tega pojava zavedati in ga preprečiti. ESA je v ta namen razvila priročnik kalkulator za ocenitev pojava multipaktor [12].

3 ČIŠČENJE IN TESTIRANJE SESTAVNIH DELOV ZA VGRADNJO V SATELIT

Testiranje sestavnih delov elektronike za satelit je po navadi zelo kompleksen in dolgotrajen proces. Posamezen elektronski sklop mora na koncu testiranja preživeti vse električno-funkcionalne, termo-vakuumske in vibracijske teste, prav tako pa mora biti dovolj odporen še proti sevanju. Funkcionalnost vezij se seveda testira v normalnih okoliščinah (sobna temperatura in običajni zračni tlak 1 bar) v razvojnem laboratoriju. Kljub temu mora že na začetku vezje za vgradnjo na satelit in pa do neke mere tudi laboratorij z vso opremo že zadostovati ustrezno čistim predpisom (klasifikacija čiste sobe je definirana s številom delcev določene velikosti v 1 m³ prostora). Posamezne elektronske komponente ali elemente je treba pred vgradnjo na tiskano vezje ali v ohišje očistiti, saj je čiščenje že zmontiranega vezja ali nemogoče ali nezadostno ali pa zelo zamudno. Zato je rokovanje s sestavnimi deli že takoj na samem začetku gradnje priporočljivo z ustreznimi rokavicami in čistim

orodjem, da jih dodatno ne »kontaminiramo«, ko so enkrat že očiščeni. Seveda čiščenje velja za vse sestavne dele, torej tudi za mehanske (npr. ohišje, vijaki, matice itd.). Primer rokovanja z že očiščenimi deli za vgradnjo v satelit in primer čiščenja vijakov prikazuje slika 7.

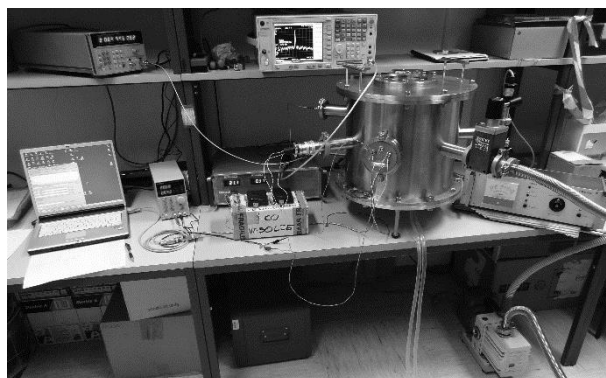


Slika 7: Rokovanje s čistimi sestavnimi deli za satelit (levo) in primer čiščenja vijakov (desno)

Prikazano čiščenje vijakov na sliki 7 (desno) poteka s pomočjo ultrazvočne kopeli v izopropilnem alkoholu. Vijaki in izopropilni alkohol so nameščeni v plitki stekleni posodici, ta pa je položena na površino vodne kopeli v banjici ultrazvočnega čistilca. Tako ultrazvočno čiščenje, ki traja približno eno minuto do dveh, zelo učinkovito očisti vijake majhnih delcev in maščob. Kopeli sledi večkratno namakanje oziroma spiranje v destilirani in deionizirani vodi, da pri sušenju ne pride do sledi oz. nanosa na površinah (ostanki umazanije). Sušenje je seveda priporočljivo že v čisti oziroma delno čisti sobi, kjer poteka sestavljanje sklopov oz. montaža elementov na vezja. Pomembno se je zavedati, da je ultrazvočno čiščenje prepovedano oz. ni priporočljivo za nekatere elemente (npr. prazna in tudi že zmontirana tiskana vezja, zmontirani konektorji itd.).

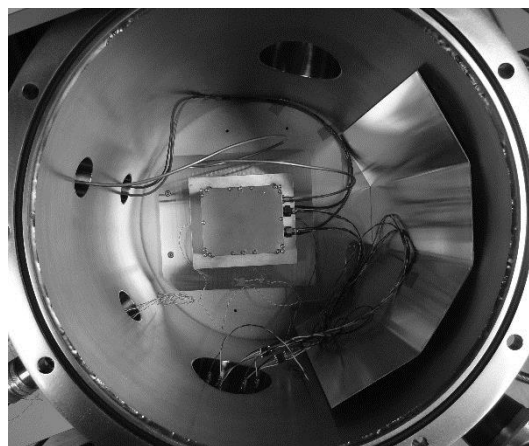
Testiranje posameznih elektronskih vezij ali naprav je sicer zelo specifično za vsakega posebej, kljub vsemu pa je treba med drugim test opraviti tudi v termovakuumski komori. To pomeni, da kakršenkoli sklop že delamo, moramo zanj imeti primerno termovakuumsko komoro. Kot je bilo omenjeno, je zaželeno testiranje izdelka od okoli -30 do +60 stopinj Celzija, in sicer pri tlaku okoli 10^{-8} bara (za razmere v notranjosti satelita v nizkih tirnicah). Za tlak do okoli 10^{-5} bara zadostuje že rotacijska (oljna) vakuumska črpalka, za višje vrednosti vakuuma pa potrebujemo veliko dražjo turbovakuumsko črpalko. Termovakuumska komora mora seveda imeti vse priključke in prehode, potrebne za priključitev vseh električnih kablov, žic, gonilnikov, vmesnikov, instrumentov in računalnikov, ki jih potrebujemo pri testiranju našega izdelka. Primer testiranja izdelka za vgradnjo na satelit (sekundarni oddajnik za prvi slovenski mikrosatelit NEMO-HD) z vsemi potrebnimi instrumenti in pripomočki je prikazan na sliki 8. Na sliki vidimo od leve proti desni: osebni računalnik za komunikacijo z izdelkom v termovakuumski komori in

frekvenčni števec nad njim, napajalnik za napajanje izdelka v komori, krmilnik za nastavitev temperature v komori in dva termometra, ki merita temperaturi v notranjosti komore, visokofrekvenčni spektralni analizator, na katerega je priključen oddajnik v komori, cilindrična termovakuumska komora iz nerjavečega jekla z vsemi električnimi in vakuumskimi priključki, merilnik tlaka in rotacijska vakuumska črpalka pod mizo.



Slika 8: Končno termovakuumsko testiranje izdelka za vgraditev v satelit

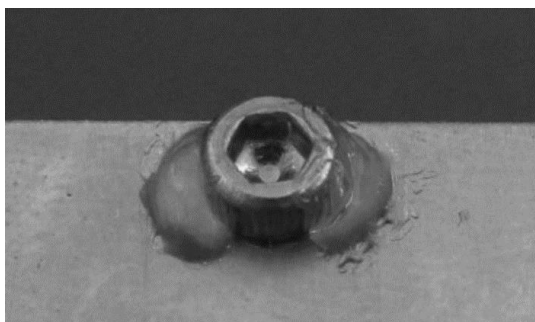
Slika 9 prikazuje notranjost termovakuumske komore z montiranim oddajnikom na dnu komore pri končnem testiranju. Vseh električnih priključkov oziroma žic iz/v termovakuumsko komoro pri končnem termovakuumskem testiranju je bilo natanko 23, od tega je bil eden koaksialni prehod.



Slika 9: Pogled v notranjost termovakuumske komore med končnim testiranjem oddajnika za prvi slovenski mikrosatelit NEMO-HD

Po uspešnih termovakuumskih testih sledi vibracijski test. Ta je potreben izključno zaradi same izstrelitve in prehoda rakete skozi ozračje, saj so pospeški in tresljaji v teh prvih nekaj minutah največji. Pozneje, ko je satelit že v vesolju, močnih tresljajev načeloma ni več (razen odklopitev satelita z nosilne rakete ali pa korekcije tirnice z motorji na krovu). Vibracijska miza je seveda

spet zelo specifičen kos testne opreme, vendar ne toliko kot termovakuumska komora. Vibracijski in termalni testi se mnogokrat izvajajo tudi za elektroniko na Zemlji, medtem ko je termovakuusko testiranje skorajda izključno namenjeno satelitski tehnologiji. Profil hitrosti odmikov oz. pospeškov stresalnika (vibracijske mize) moramo prilagoditi vnaprej, saj vemo, s katero raketo bo izstreljen naš satelit. Podatke o pospeških nosilne rakete nam posreduje sam ponudnik izstrelitve. Kot primer, ponudnik izstrelitev podjetje Space X iz Kalifornije navaja za svojo raketo Falcon 9 za lahke tovore (pod 1800 kg) vzdolžne pospeške do 8,5 G in prečne do 3 G (1 G ustreza $9,8 \text{ m/s}^2$) [13]. Ker je običajno izdelek za satelit v tej fazi že dokončan (in očiščen!), je tudi stresalnik nameščen v čisti sobi. Elektronske in mehanske sestavne dele satelita moramo seveda zaščititi pred tresljaji. V ta namen je običajni postopek lepljenje komponent ali elementov (ang. staking) na bližnjo oporno točko. Ta je lahko stena ali dno ohišja, tiskano vezje itd. Uporabimo za vakuum primerna lepila, največkrat je to dvokomponentno lepilo, ki ima majhno razplinjevanje. Primer pravilno zalepljenega vijaka na ohišju naprave za na krov satelita prikazuje slika 10.



Slika 10: Zalepljen vijak na ohišju naprave

Ugotavljanje odpornosti satelita oziroma posameznih komponent proti sevanju se največkrat ne izvaja. Za satelite v nizkih tirnicah LEO, kjer je zaradi Zemljinega magnetnega polja sevanja manj, testiranje na sevanje večinoma sploh ni potrebno. Seveda potrebujejo vse misije v visoke tirnice in pa v globoko vesolje (ang. deep space) sestavne dele, ki so zaščiteni pred sevanjem oz. visokoenergijskimi delci ali pa so odporne proti njim (ang. radiation hardened). Če že potrebujemo elektronsko komponento, ki mora biti sama odporna proti sevanju, potem od izdelovalca komponente kupimo posebno različico iste komponente, ki je že tovarniško odporna proti sevanju ali pa vsaj zaščiten pred njim.

4 SKLEP

Načrtovanje, gradnja in nazadnje še testiranje sestavnih delov satelita, pa naj bo to komunikacijska enota, procesorski program, napajalno vezje ali sama mehanska konstrukcija, ni mačji kašelj. Omenili smo le

nekaj glavnih tehničnih problemov pri načrtovanju elektronike za vgradnjo na krov satelita in nakazali nekaj rešitev iz praktičnih primerov. Dejstvo je, da bo tudi Slovenija stopila v vesolje z lastnim satelitom prav kmalu, verjetno v letu 2017. Seveda za drugimi vesoljskimi silami zaostajamo za več desetletij, a vseeno so ti prvi (za Slovenijo pionirski) koraki zanimivi. Razvoj satelitske in vesoljske tehnologije v Sloveniji je v polnem teku – zamisli, izdelkov in aplikacij je veliko. Posamezne infrastrukture in razvojno-testni laboratoriji za vesoljske tehnologije morda res še niso tako dovršeni in koncentrirani na enem mestu, kot imajo to razna podjetja ali inštituti v tujini, vendar se tudi tukaj premika v to smer. Znanje se seveda pridobiva z izkušnjami, poleg tega pa obstajajo še posebne oblike šolanja za gradnjo satelitov, ki lahko pomagajo premostiti začetne težave [14, 15]. Članstvo v ESI se je pred kratkim končno potrdilo, pridruženi člani ESE bomo v začetku leta 2017 in kar manjka, je morda samo še kanček politične volje in podpore slovenskemu vesoljskemu programu.

ZAHVALA

Za pomoč in nasvete glede dela v čisti sobi in čiščenju komponent za satelitski oddajnik se zahvaljujem dr. Danilu Vrtačniku, dr. Dragu Resniku in mag. Urošu Aljančiču iz Laboratorija za mikrosenzorske strukture in elektroniko Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Za konstruktivne nasvete in pripombe se zahvaljujem prof. dr. Matjažu Vidmarju iz Laboratorija za sevanje in optiko Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

LITERATURA

- [1] <http://lea.hamradio.si/~s53mv/microsat/microsat.html>
- [2] <http://lea.hamradio.si/~s53mv/amsatp3d/amsatp3d.html>
- [3] Drago Matko in ostali, Uporaba vesoljskih tehnologij, Didakta, Radovljica 1996.
- [4] <http://www.trisat.um.si/>
- [5] <http://www.space.si/sateliti/mikrosatelit-za-opazovanje-zemlje-z-visoko-loeljivostjo/>
- [6] <https://www.planet.com/>
- [7] <https://www.qb50.eu/>
- [8] http://www.esa.int/Education/European_Student_Moon_Orbiter
- [9] <http://esmat.esa.int/Databases/databases.html>
- [10] http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2011-kostic-pb-free.pdf
- [11] <http://nepp.nasa.gov/whisker/>
- [12] <http://multipactor.esa.int/>
- [13] http://www.spacex.com/sites/spacex/files/falcon_9_users_guide_rev_2.0.pdf
- [14] <https://escies.org/>
- [15] <http://www.asta-technology.co.uk/courses/esa-courses/>

Leon Pavlovič je diplomiral leta 2001, magistriral leta 2004 in doktoriral leta 2006 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in kot sodelavec v Centru odličnosti Vesolje-SI. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo hitro elektroniko, visoke frekvence in modeliranje vezij ter pasivnih struktur.