



1. ábra. A JUICE tesztelése az ESA napszimulátorral rendelkező hő-vákuum kamrájában (Fotó: ESA)

SZALAI SÁNDOR* – NAGY JÁNOS** – VIZI PÁL GÁBOR***

A JUICE-ŰRSZONDA MAGYAR GYÁRTMÁNYÚ TÁPEGYSÉGE

Az Európai Űrügynökség (European Space Agency – ESA) JUICE (Jupiter ICy Moons Explorer) nevű űrszondája a Jupiter és három, óceánnal rendelkező holdja – a Ganymedes, a Callisto és az Europa – kutatására készült.

[1] [2] A szonda a Jupiter rendszerét, környezetét és a lehetséges élet létezését fogja kutatni, és ezért a négy nagy hold közül a három jeges hold összetételének, a felszín alatti folyé-

kony vízrétegeknek vizsgálatát végzi majd. A magyar KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet – jelenlegi neve HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont – továbbiakban WFK – kutatói és mérnökei 2010-ben, ESA-tag-ságunk előtt 5 évvel kapcsolódtak be a JUICE-szonda műszereinek fejlesztésébe, két tagország kérésére.

A Jupiter Naprendszerünk legnagyobb bolygója, amely 300-szor na-

gyobb tömegű, és ötször messzebb van a Naptól, mint a Föld. A Jupiteren egy év tizenkétszer hosszabb a földinél, de egy jupiteri nap csak tíz óra hosszú. A bolygók közül a Jupiternek van a legtöbb holdja. A csillagászok körében a Jupiter már több évszázada a kutatások tárgya. Galileo Galilei a négy nagy holdat (Io, Europa, Callisto, Ganymedes) már 1610-ben felfedezte, ezért nevezik ezt a négy holdat Galilei-hol-

Összefoglalás: A JUICE-program a Jupiter és három holdjának tanulmányozását végzi, mely utóbbiak jeges felszíne alatt óceánok találhatók. Azt is vizsgálni fogja, jelen vannak-e ezeken a holdakon az élet kialakulásának feltételei, továbbá a Jupiter magnetoszférájának ionos összetételét, a magnetoszféra és a holdfelszínről felszabaduló részecskék közötti kölcsönhatási folyamatokat. Az űrszonda többször is el fog repülni a Jupiter és három holdja (Ganymedes, Callisto, Europa) mellett, majd pályára áll a Ganymedes körül.

Kulcsszavak: JUICE, Jupiter, Galilei-holdak, DC-DC átalakító, földi ellenőrző berendezés, PEP, SpaceWire

Abstract: The JUICE programme is studying Jupiter and its three moons, beneath the icy surfaces of which are hidden oceans. It will also investigate the conditions on these moons for the development of life, and the ionic composition of Jupiter's magnetosphere and the interaction processes between the magnetosphere and particles released from the surface of the moons. The spacecraft will fly several times past Jupiter and three of its moons (Ganymede, Callisto and Europa), and then orbit Ganymede.

Keywords: JUICE, Jupiter, Galilean moons, DC-DC converter, electrical ground support equipment, PEP, SpaceWire

* MTA doktora; HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont; kutató professor emeritus. ORCID: 0000-0003-3979-084X

** PhD; HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont; témavezető. ORCID: 0009-0004-9491-0888

*** HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont; csoportvezető. ORCID: 0009-0007-7001-8782

daknak. A NASA első, Jupitert kutató űrszondája szintén az ő nevét kapta.

Mára már kilenc űrszonda közelítette meg a Jupitert: a Pioneer-10, a Pioneer-11, a Voyager-1, a Voyager-2, a Galileo, az Ulysses, a Cassini, a New Horizons és a Juno. A felsorolt NASA-szondák közül a Galileo és a Juno nemcsak elrepültek a bolygó mellett, hanem a Jupiter körül pályára is álltak. A Galileo-szonda 1995-ben állt a Jupiter körüli pályára, és közel nyolc évig vizsgálta a bolygót. 2016-ban a Juno-szonda állt a bolygó körüli pályára, és küldetésének kétszeri meghosszabbítása után, jelenleg 2025 szeptemberéig tervezik fenntartani működtetését. A Juno működése hasonlóan fog befejeződni mint a Cassini-szondáé, azaz a kutatási tárgyát szolgáló gázbolygóba nagy sebességgel bevezérlük, hogy elégjen. Ezáltal kizárják annak a lehetőségét, hogy a Földről véletlenül hozott szennyeződés valamelyik holdra kerülve azt „megfertőzze”.

Jelenleg újabb két szonda van úton a Jupiter felé annak kutatására. 2024. október 14-én indult a NASA eddigi legnagyobb bolygóközi szondája az Europa Clipper, amely a lehetséges életet fogja kutatni az Europa holdon; 2031 tavaszán áll majd az Europa hold körüli pályára. Az ESA JUICE nevű szondájának a tervezett 2022. júniusi indítása 2023. április 14-re tolódott, és így a Jupiterhez érkezése 2031-ben, csak az Europa Clipper után várható. A küldetés célja, hogy a Jupitert és környezetét vizsgálja majd, különösen a Galilei-féle holdjai közül hármát, az Európát, a Ganymedest és a Callistót, hiszen ezekről feltételezik, hogy jeges kérgük alatt folyékony óceánok találhatók. Ezért a szonda lakható világok kialakulását is vizsgálni fogja a gázóriás körül.

A JUICE-űrszonda három tengelyre stabilizált, tömege 2400 kg (össztömege a szükséges pályakorrekciós üzemanyaggal együtt 6000 kg). A JUICE-szondát indító Ariane-5 rakéta hajtóanyaggal feltöltve 754 tonna tömegű volt, amelyről közel fél óra után vált le az űrszonda. Az egyes napelemtáblák mérete kb. 2,5 m × 3,5 m; az űrszonda mindkét oldalán elhelyezett öt-öt napelem két jellegzetes, kereszt alakú tömbben található, felülete összesen 87,5 m². (2. ábra) A Jupiternél a 10 tábla kb. 850 W elektromos telje-

sítményt tud majd biztosítani. A kommunikáció elsősorban egy fix, 2,5 méter átmérőjű, nagy nyereségű parabolaantennán, valamint egy irányítható, közepes nyereségű antennán keresztül történik, mind az X-, mind a K-sávban (8–12, illetve 18–24 GHz-es frekvenciatartományban). A földi rádióteleszkópos vevőhálózat segítségével 2 Gb/nap az adatátviteli sebesség a Föld irányába. A fedélzeti átmeneti adattárolási kapacitás 1,25 Tb.

A JUICE indítását követően több tervezett gravitációs pályakorrekció volt és lesz – a korlátozott mennyiségű korrekciós hajtóanyag minimális felhasználásával – a Jupiterhez vezető pályára állítására:

- a Hold-Föld-rendszer melletti elrepülés 2024. aug. 19. (Hold) és 20. (Föld);
- a Vénusz melletti elrepülés 2025. aug. 31.;
- második elrepülés a Föld mellett 2026. szept. 29.;
- harmadik és egyben utolsó elrepülés a Föld mellett 2029. jan. 18.;
- a Jupiterhez a terv szerint 2031 júliusában érkezik;
- a Jupiter körüli pályára állítás a Ganymedes hold mellett több gravitációs pályakorrekcióval;
- sebességcsökkentés a Ganymedes és Callisto holdak segítségével;
- a keringési pálya dőlésszögének növelése 10–12 fokkal a Callisto gravitációs hatásával.

Az űrszonda a Ganymedes és a Callisto melletti elrepüléseket használja majd a végleges kutatási pálya elérésére. Ezeket a pályákat a Jupiter és holdjai tanulmányozására használják majd. Először a Ganymedes körüli erősen elliptikus pályára állítják a szondát. A Jupiter perturbáló hatására a pálya 5000 km-es körpályává fejlődik, majd a szonda 500 km-es körpályára ereszkedik. Az ebben a magasságban végzett térképezés és egyéb vizsgálatok után a Ganymedes felszínétől 200 km-es körpályára süllyesztik. Az eszköz névleges küldetése kb. három év után ér véget, de lehetőség van annak 200 vagy több nappal történő meghosszabbítására. A feladat minden esetben a Ganymedes felszínére való becsapódással ér véget.

A JUICE-program megvalósításában 23 ország 18 kutatóintézete és 83 cégé-

nek több mint 2000 kutatója, mérnöke és munkatársa vett részt. A költségek elérik az 1,6 milliárd eurót. A résztvevő európai országok: Ausztria, Belgium, Csehország, Egyesült Királyság, Franciaország, Görögország, Lengyelország, Magyarország, Németország, Olaszország, Spanyolország, Svájc, és Svédország. Hazánkban a Wigner Fizikai Kutatóközpont, az SGF Kft., valamint a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont kapcsolódott be a JUICE-szondára kerülő műszerek fejlesztésébe.

A JUICE küldetése túlmutat az óceánok tanulmányozásán, mivel a Ganymedes egyedülálló mágneses mezőjének eredetét is szeretnék kideríteni. A Merkúrnál nagyobb Ganymedes az egyetlen olyan hold a Naprendszerben, amely saját mágneses mezővel rendelkezik – egy kis mágneses buborék a Jupiter sokkal nagyobb mágneses mezőjén belül. A Ganymedes és a Jupiter mágneses mezői állandó kölcsönhatásban vannak a bolygó környezetében lévő elektromágneses mezővel és részecskékkal. Ezek a Napból, a csillagközi térből és a Jupiter vulkanikus holdjáról, az Ióról származnak, amely az egész Jupiter-rendszerben terjedő nagy energiájú részecskéket lövell ki.

Az űrszonda 10 tudományos műszert tartalmaz, [3] köztük távérzékelő, geofizikai és közvetlen mérőműszereket (ezek tömege 280 kg), továbbá két kísérletet a szondán lévő ún. szolgálati egységek felhasználásával hajtának végre.

1. Távérzékelő műszerek:

- a) A JANUS-kamerarendszer nagy felbontásban fogja fényképezni a Jupiter felhőzetét, valamint a Ganymedes és az Europa holdak felszínét. Tizenhárom spektrális csatornája van a látható és a közeli infravörös tartományban, lehetővé téve az ásványtani vizsgálatot is. A Ganymedest akár 2,4 m-es, a Jupiter felhőzetét pedig mintegy 10 km-es felbontással fogja vizsgálni.
- b) A képkalkáló spektrométer (Moons and Jupiter Imaging Spectrometer – MAJIS) a Jupiter felhőzetének jellemzőit és légköri összetevőit fogja megfigyelni, valamint a jeges holdak felszínén található jég és ásványi anyagok vizsgálatára szolgál.

c) Az ibolyántúli képalkotó spektrográf (Ultraviolet Spectrograph – UVS) a jeges holdak exoszférájának összetételét és dinamikáját, a Jupiter sarki fényét, valamint a bolygó felső légkörének összetételét és szerkezetét vizsgálja.

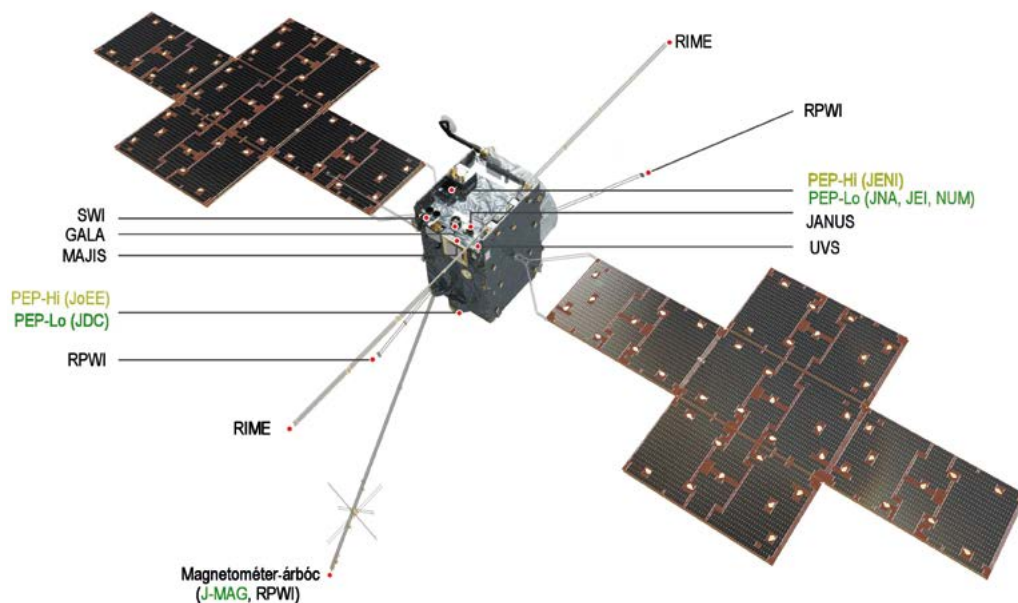
d) A szubmilliméteres hullámmérő (Submillimeter Wave Instrument – SWI) a Jupiter légkörének hőmérsékleti szerkezetét, összetételét és dinamikáját, valamint a jeges holdak exoszféráját és felszínét fogja vizsgálni.

2. Geofizikai műszerek:

a) A lézeres magasságmérő (GAnymedes Laser Altimeter – GALA) a Ganymedes árapály-deformációját és a jeges holdak felszínének topográfiáját fogja tanulmányozni.

b) A jégén áthatoló radar (Radar for Icy Moon Exploration – RIME) a jeges holdak felszín alatti szerkezetét vizsgálja kilenc kilométeres mélységig.

c) A holdak gravitációját és geofizikáját vizsgáló (Gravity & Geophysics of Jupiter and Galilean Moons – 3GM) rádiórendszer a Ganymedes gravitációs terét, a jeges holdak belső óceánjainak kiterjedését, valamint a Jupiter és holdjai semleges légkörének és ionoszférájának szerkezetét vizsgálja. A 3GM elektronikai egységei, a Ka-transponder, az ultrastabil oszcillátor és a nagy



pontosságú gyorsulásmérő a szonda védett belső terében található.

3. Közvetlen mérőműszerek:

a) Részecskedetektor-rendszer (Particle Environment Package – PEP), amely hat különböző fajta részecske detektálására alkalmas érzékelőegységből áll.

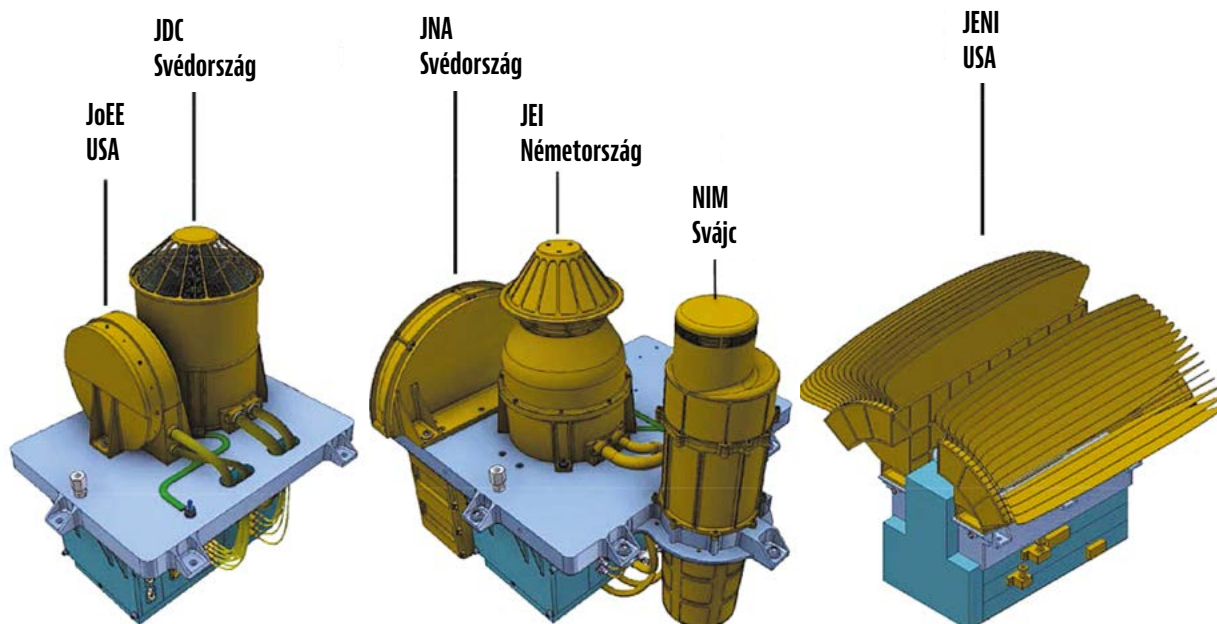
b) Magnetómetér (Jupiter Magnetometer – J-MAG), amely elektromos- és mágneses-mező-érzékelőket és négy Langmuir-szondát tartalmaz.

c) A rádió és plazmahullám-mérő (Radio and Plasma Wave Investigation – RPWI) műszer a Jupiter és jeges holdjainak rádiósugárzását és plazmakörnyezetét fogja vizsgálni.

4. Kísérletek szolgálati egységek felhasználásával:

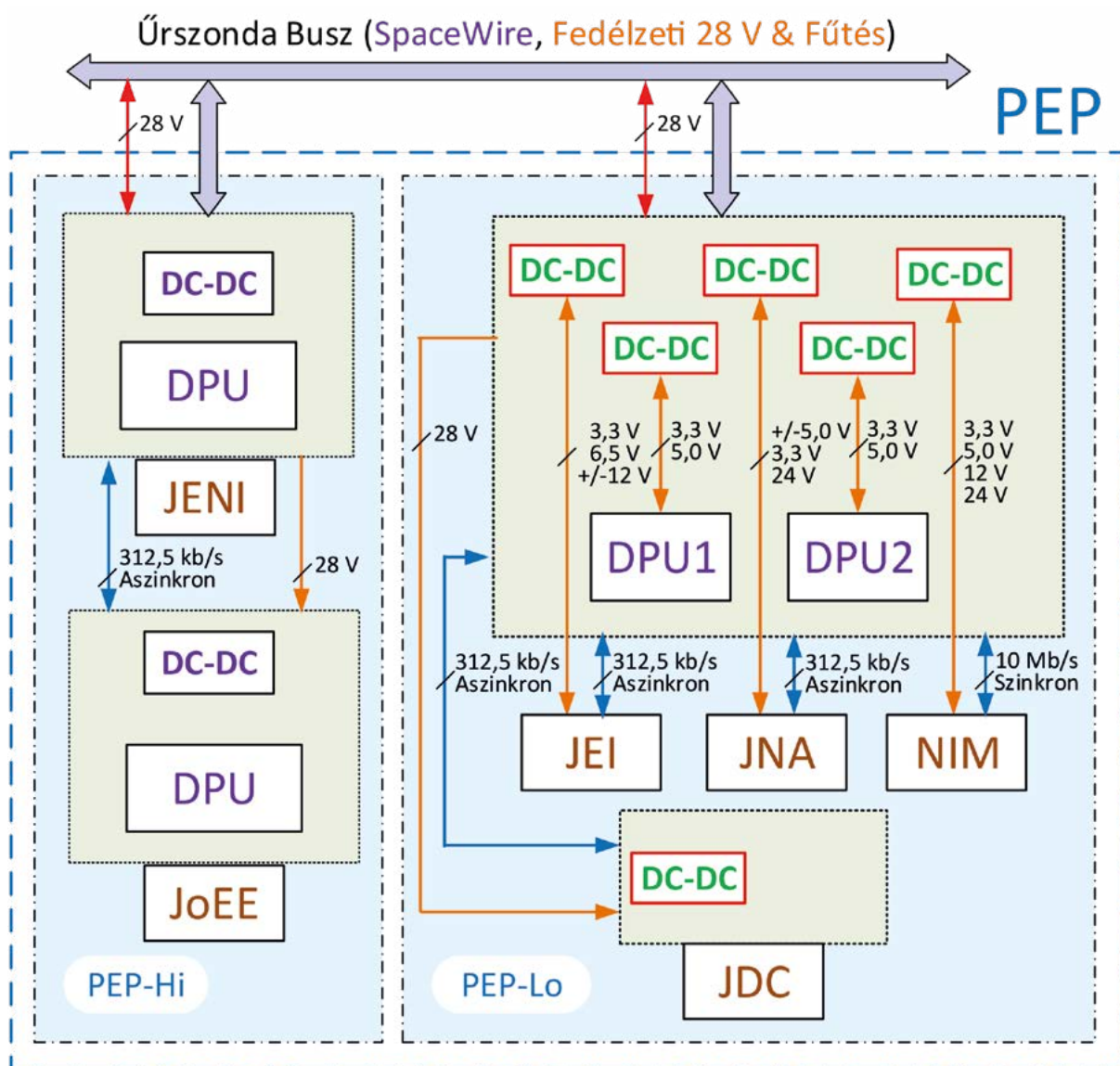
a) A rádió interferométerrel (Planetary Radio Interferometer & Doppler Experiment – PRIDE) végzendő kísérlet földbázisú, nagyon hosszú alapvonalú interferometriát használ az űrszonda helyzetének és sebességének pontos meghatározására. A PRIDE-kísérlet az űrszonda szabványos távközlési rendszerét használja a földi rádióteleszkópokkal együtt a JUICE-űrszonda helyzetének és sebességének pontos meghatározására, a Jupiter és a jeges holdak gravitációs mezőinek vizsgálatához, és ezek belső szerkezetének megismerésére.

2. ÁBRA. A tudományos műszerek elhelyezése az űrszondán (A szerzők szerkesztése az ESA ábrája alapján)



3. ÁBRA. A PEP hat érzékelője és azok gyártó országai (Forrás: Svédországi Űrfizikai Kutatóintézet [Institutet För Rymdfysik – IRF])

4. ÁBRA. A PEP-műszeregység funkcionális blokkvázlata (Forrás: WFK)



b) A nagysugárdózis-indikálóegység (RADiation hard Electron Monitor – RADEM) a tudományos műszerek számára szolgáltat figyelmeztető jelet, azok esetleges kikapcsolására. Ugyanakkor a folyamatos mérési adatait felhasználva regisztrálni lehet vele a sugárzási fluxust a Jupiter környezetében.

A JUICE antennái és árbócai számos mágneses érzékelőt tartanak távol az űreszköz testétől, hogy elkerüljék a szonda működése során a változó áramfelvételek által keltett zavaró interferenciát. A JUICE magnetométere (J-MAG) és a rádió- és plazma-hullám-vizsgáló (RPWI) műszer két érzékelőjét egy 10,6 m hosszú kinyúló árbóca szerelték. Az RPWI négy Langmuir-szondája 3 méteres árbócokra került (csak 2 látszik a 2. ábrán).

Egy 16 méter hosszú, kinyúló antennán található a radarműszer (RIME).

Magyarországról a WFK és az SGF Kft. a PEP-műszer együttes fejlesztésében vett részt. Az SGF Kft. a J-MAG-műszer részére is fejlesztett földi ellenőrző berendezést. A HUNREN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont a PRIDE tudományos kísérlet adatfeldolgozásában vesz részt.

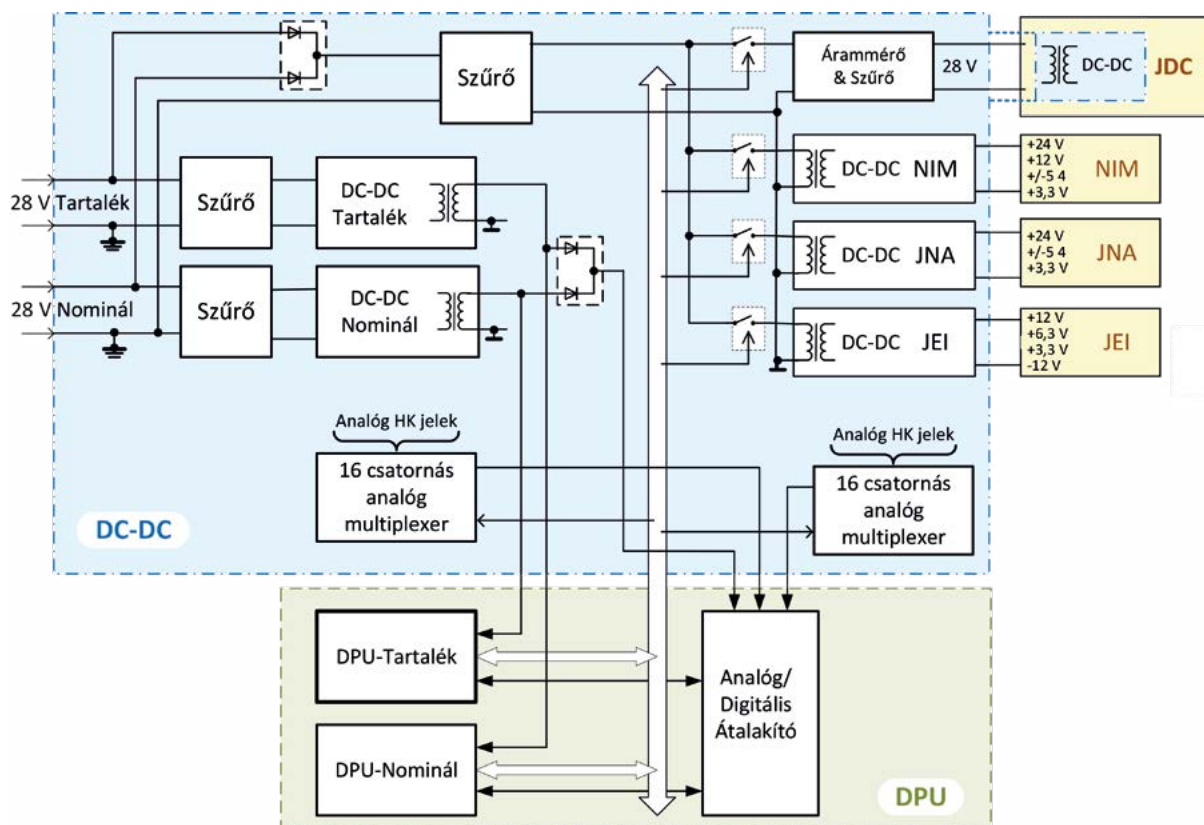
A PEP-műszeregység egy részecske-spektrométer a Jupiter-rendszerben lévő semleges és töltött részecskék mérésére, hat különböző érzékelővel, ami mérni fogja a pozitív és negatív ionok, elektronok, exoszférikus semleges gáz, termikus plazma és nagy energiájú semleges atomok sűrűségét és áramlását. [2] [3] A PEP-rendszer két alegységből áll [4]:

PEP-Hi alegység:

1. A nagy energiájú elektronok mérőműszere (Jovian Energetic Electrons – JoEE) a nagy energiájú elektronok irányeloszlását méri, amely az elektronok szögeloszlásai a gyorsulásmechanismusa, a mágneses mező topológiája és a határfelületek meghatározására alkalmas (nagy energiájú elektronok 25 keV–1 MeV).
2. A nagy energiájú részecskék mérőműszere (Jovian Energetic Neutrals and Ions – JENI). Az Europa és az Io exoszféra és a magnetoszféra globális képalkotását nagy felbontású energetikai ionmérésekkel kombinálva lehet majd kiértékelni (nagy energiájú elektron <5 MeV, ionok ~0,5–300 keV).

PEP-Lo alegység:

3. Az elektron és ion mérőműszere (Jovian Electrons and Ions – JEI)



5. ÁBRA. A PEP-Lo tápellátási rendszere (Forrás: WFK)

a plazma elektronjait méri. Az elektronplazma aktuális 3D-eloszlását vizsgálja nagy energiafelbontással, a holdak auráiban elektronok és gáz ionizációjának mérésével (~1 eV–50 keV).

4. A plazma pozitív ionjainak mérőműszere (Jovian plasma Dynamics and Composition – JDC). Méri az ionplazmát és annak összetételének aktuális 3D-áramlását a magnetoszféra és a magnetoszféra-hold kölcsönhatásoknál (1 eV–41 keV).

5. Ez a műszer a plazma nagy energiájú semleges atomjainak energiáját méri (Jovian Neutrals Analyser

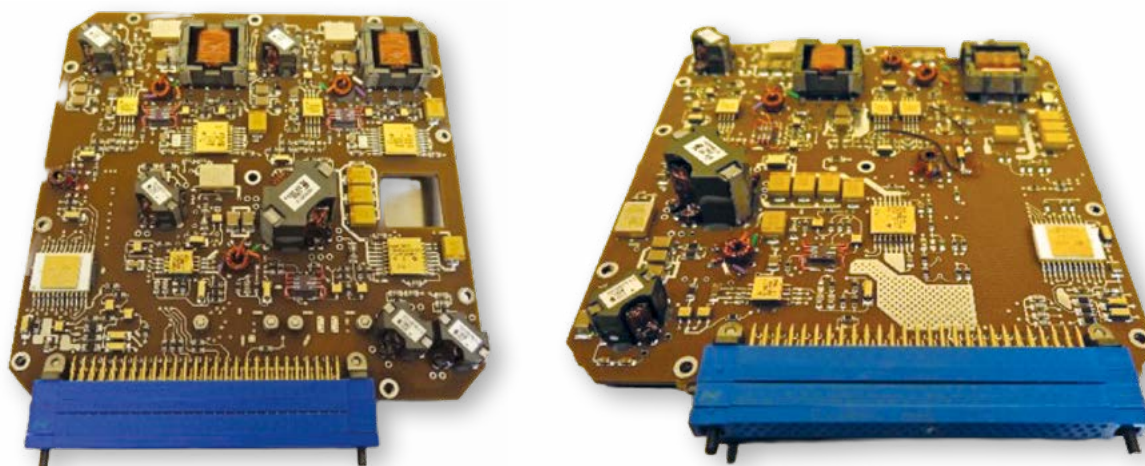
– JNA), az Europa, a Ganymedes és a Callisto exoszférajának első közvetlen mintavételével (10 eV–3 keV).

6. A semleges gáz és ion tömegspektrométer (Neutral Ion Mass spectrometer – NIM) a semleges légköri gáz- és ionoszféraionok mérését végzi. Az Europa, a Ganymedes és a Callisto exoszférajának első közvetlen mintavétele (thermal semleges ion <5 eV; tömeg: 1–1000 atomi tömegegység).

A PEP-rendszer egységeinek tömege 50 kg, maximális fogyasztása 72 W.

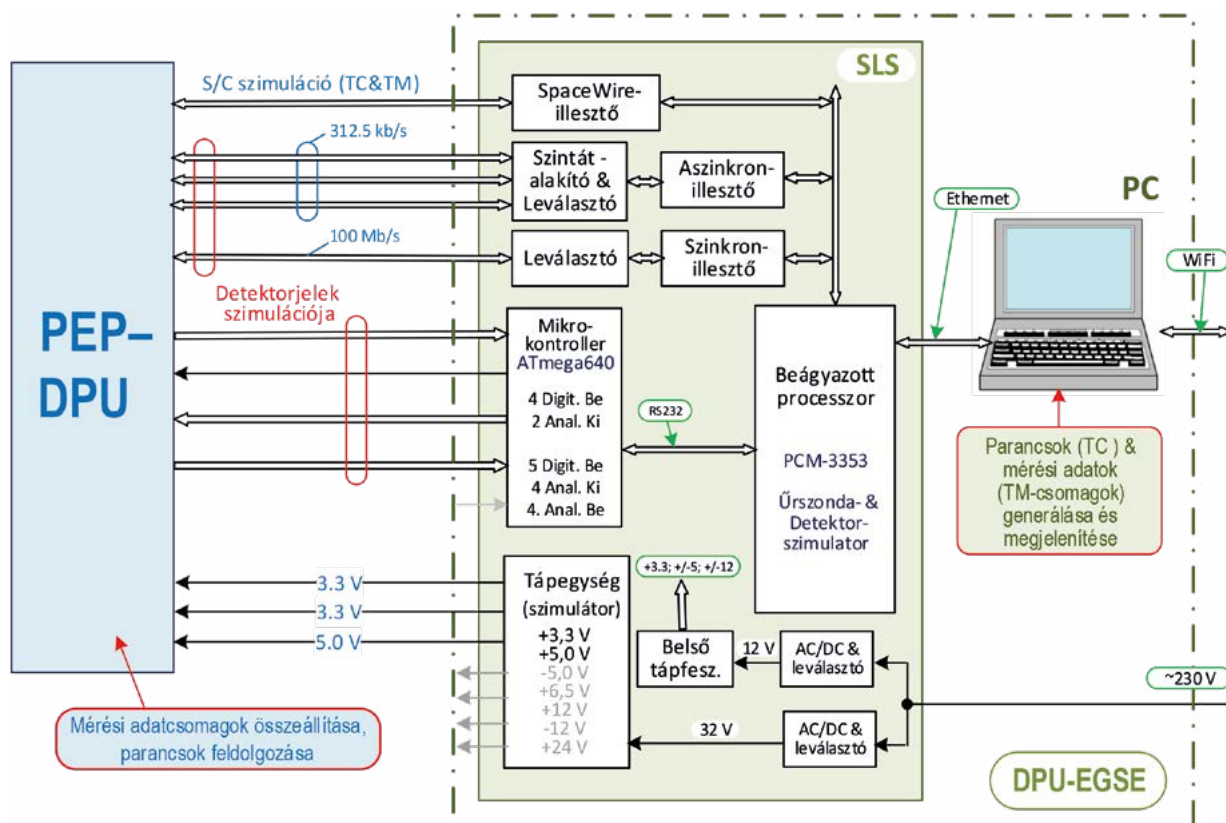
A WFK mérnökei fejlesztették a PEP-Lo négy részecskeérzékelő-

je (JNA, JEI, NIM és JDC), valamint a tartalékolt processzoregység (Digital Processor Unit – DPU) részére az áramellátó egységet, az úgynevezett alacsony feszültségű, egyenáramú-feszültség-átalakítót (Direct Current – Direct Current converter – DC-DC). [6] Az egység feladata a fedélzeti 28 V feszültségből előállítani a PEP-Lo egyes műszerei által igényelt feszültségeket. A feszültségek egymástól izolálva vannak, így a szenzorok működése egymásra nem hat (áthallás), tranzienseket nem generál, valamint zárlatból eredő meghibásodások terjedését megakadályozza. A PEP-mérőrendszer tápellátási funk-



6. ÁBRA. A PEP DC-DC négy kártyája közül kettő (Fotó: WFK)

7. ÁBRA. A PEP-DPU egységének bemérését segítő EGSE. (TeleCommand - TC; TeleMetria - TM; űrszonda [Space Craft - S/C]) (Forrás: SGF Kft.)



cionális blokkvázlata az 5. ábrán látható. A DC-DC-egységet négy nyomtatott áramköri kártyán valósították meg. A JDC-mérőegység részére készített DC-DC kártya fizikailag a detektorral közös egységben található, melynek mérete 80×120 mm. A másik három kártya (méretük 125×130 mm) a DPU-val közös dobozba került. (6. ábra) A tartalékolt processzoregység számára a DC-DC-ben is tartalékolt tápfeszültség-ellátás lett kialakítva. A DPU megkettőzésének köszönhetően a nominális DPU meghibásodása esetén a tartalék DPU biztosítja a mérési adatok továbbítását. A szenzorok mérési tartományában némi átfedés van, ami szintén bizonyos redundanciát biztosít.

A DC-DC kártyák topológiájának tervezését a laboratóriumi működő kártya bemérése után újra kellett kezdeni, mert a PEP közös elektronikai-egység-dobozában, a hátlapon lévő „busz” jellegű csatlakozó kiosztását a processzorkártya miatt jelentősen meg kellett változtatni. Ezenfelül meg kellett felelni az ESA ECSS-Q-ST-70-12C dokumentum által előírt, a nyomtatott áramkörök tervezésére vonatkozó 520 előírásnak. A DC-DC kártya bemérése egy külön földi

ellenőrző-berendezés (EGSE) készült, amely megkönnyítette, „automatizálta” a kártyák bemérését. A DC-DC elektromos makettjéből több példányt is kellett készíteni a részecskeérzékelő egységek fejlesztői számára.

Az űrkutatási műszereknek igen szigorú követelményeknek kell megfelelniük, és a megbízhatóságukat többszörösen ellenőrizni kell. Az alkatrészeket az Európai Űrügynökség által engedélyezett alkatrészlistáról (Preferred Parts List – PPL) lehetett kiválasztani, amely a világűrbeli használatra minősített alkatrészeket tartalmazza. Az induktivitásokat az ESA által minősített gyártó egyedileg készítette számunkra.

A JUICE többéves bolygóközi utazása során, de különösen a Jupiter környezetében jelentős sugárzással kell számolni, ennek megfelelően a kiválasztott alkatrészeknek sugárzázállónak kell lenniük, 50 krad dózist hiba nélkül el kell viselniük. Az áramköri alkatrészek elhelyezése során szimulálták a várható sugárterhelést és a mechanikába beépített árnyékolással csökkentették azt (a szonda belsejében max. 50 krad-ra), mely érték az emberi szervezet esetében a halálos dózis közel ötvenszerese.

A műszereknek az indításnál fellépő vibráció, valamint a bolygóközi tér szélsőséges hő- és vákuumhatásai ellenére is működőképesnek kell maradniuk. A Vénusz melletti elrepülésnél +250 °C, a Jupiternél pedig csak -230 °C hőmérséklet várható, ezért a szondát többretegű szigetelőanyaggal (Multi-Layer Insulation – MLI) borították be. Az űrben nincs levegő, ami a műszer működése során a keletkeztetett hőt elvezetné, ezért nemcsak az alkatrészek, de az elektronikusártya- (9. és 10. ábra), valamint műszeregység- (11. ábra) és űrszonda-szinten (1. ábra) is ellenőrizték a megbízható működést, mind a vibráció, mind a hő- és vákuumhatások alatt a megfelelő szimulátorokban.

Az áramkör megbízhatóságát a legjobb és a legrosszabb eset elemzésével (Worst-case analysis), a várható élettartamára vonatkozó számításokkal, az egyes alkatrészeken fellépő maximális terhelések számításával és azokra történő méretezéssel biztosítottuk. Az áramköri tesztek elvégzése egy adott konfiguráció működését vizsgálja, a szimuláció viszont szélesebb tartományban, az alkatrész-paraméterek különféle lehetséges értékeinél elemzi a működést, így újabb

példányok szerelésénél az alkatrészek paramétereinek szórása esetén is a megfelelő működés biztosítható.

A szerelést csak az ESA szerelési tanfolyamait elvégzett személyek végezhetik, ehhez a szerelési vizsgát két évente meg kell ismételniük. A laboratóriumot, ahol a szerelést végzik, minősíteni kell, és minden egyes alkatrész tokozására külön tanúsítvánnyal kell rendelkezniük, továbbá minden egyes forrasztást fotókkal szükséges dokumentálniuk. Magyarországon nem volt ilyen – minden szükséges tanúsítvánnyal rendelkező – labor, és ez jelentős problémát okozott, amikor a bemérés során néhány passzív alkatrészt cserélni kellett volna, így ezt Angliában kellett elvégezni. A szerelés után a kártyákat védőbevonattal (conformal coating) kellett ellátni, ami megakadályozza, hogy az alkatrészekből az űrbeli vákuum hatására anyagreszcsekk lépjenek ki, amelyek a műszerek méréseit módosíthatnák.

Az űrszondán lévő tudományos műszerek egymás működését nem zavarhatják, ezért az elektromos, nemkívánatos, kisugárzott zavarójeleket adott szint alatt kell tartani. A káros interferenciák megelőzése érdekében a szondára kerülő műszereknek meg kell felelniük az elektromágneses összeférhetőségi (Electromagnetic Compatibility – EMC) előírásoknak. Ez azt jelenti, hogy nem szabad kibocsájtani olyan elektromos jeleket, amelyek hatással lehetnek más berendezésekre, valamint bizonyos szintű immunitást kell biztosítani a műszereknek a külső elektromágneses zavarokkal szemben. Mivel a DC-DC átalakító a kis tömeg és jó hatásfok érdekében 200 kHz-en működő, kapcsoló üzemi feszültségátalakítót tartalmaz, a keletkező zajok adott szint alá történő elnyomása megfelelően méretezett áramköri szűrőkkel és az áramköri elemek elhelyezésével történt. Az általunk fejlesztett tápegység EMC-tesztjét a Bosch cég budapesti laboratóriumában tudtuk elvégezni. A DC-DC átalakítóknak ugyanakkor a szenzorokat védeni kellett az esetleges túlfeszültségtől, túláram-felvételnél a készüléknek le kell kapcsolnia és a bekapcsolási tranzienseket adott határon belül kell tartania.



Az SGF Kft. hét különböző hardver- és szoftverkonfigurációjú földi elektromos ellenőrző berendezést (Electrical Ground Support Equipment – EGSE) fejlesztett az érzékelők számára, beleértve a PEP DC-DC feszültségátalakítót és a J-MAG EGSE-t is.

Az EGSE két egységben valósult meg. A jelszintű szimulátor (Signal Level Simulator – SLS) egy beágyazott processzort tartalmaz, amelyen Linux operációs rendszer, a Micro kontrolleren saját fejlesztésű szoftver fut. Az SLS-egységet a tesztelt műszer közelében kell elhelyezni. Ethernet alapú kommunikáció van a jelszintű szimulátor és a számítógép (Personal Computer – PC) közt, az utóbbi a felhasználói interfész (User Interface – UIF).

A PEP-DPU részére a legösszetettebb EGSE-elektronika készült (7., 8. ábra), mert nemcsak a négy érzékelőegységet, de az űrszonda elektromos illesztő felületét is szimulálni kellett. Az érzékelők földi ellenőrző berendezéseiben csak a szükséges tápfeszültség és a DPU-hoz kapcsolódás illesztőfelületét építették be, de az operátori kezelői felületek (UIF) több egyedi szolgáltatással rendelkeztek.

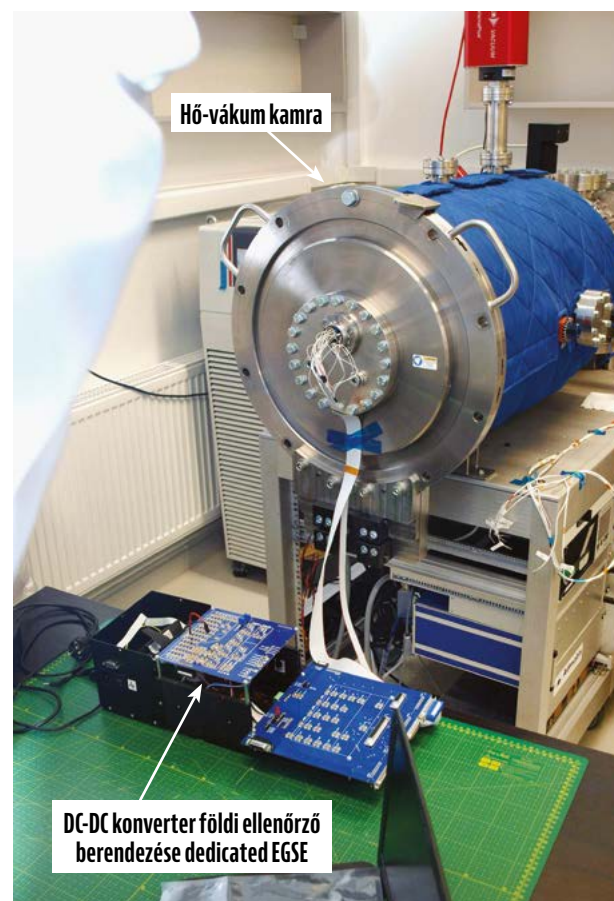
Az űrkutatási műszerek több lépésben készülnek: külméretmakett (nincs benne elektronika, csak tömeg- és mérethelyes), laboratóriumi makett, elektromos makett (méret- és működéshelyes, de nem minősített, nem drága alkatrészekből készül), majd a repülőpéldány és utóbbival azonos tartalékpéldány készült űrminősített alkatrészekből. A bolygóközi szondák többnyire bonyolult pályán jutnak el a célbolygóhoz (akár 10 év is lehet), ezért a tudásmegőrzés igen fontos, azaz a teljes küldetés idejére biztosí-

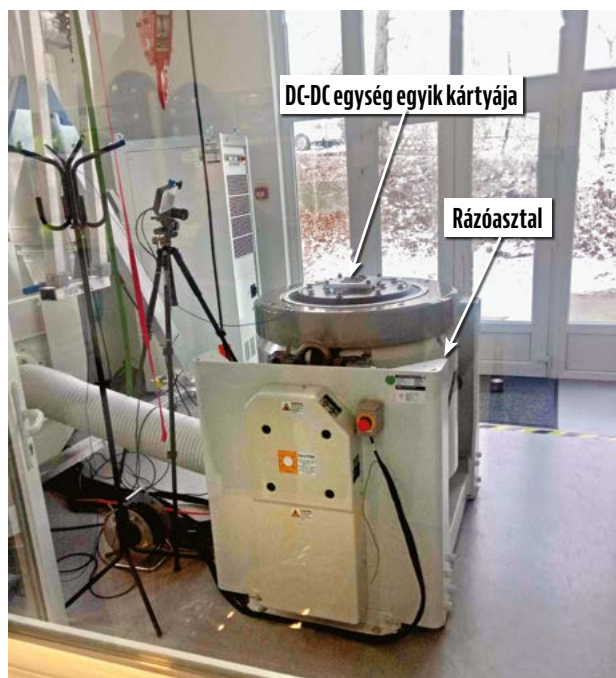
tani kell a hardver- és szoftverismeretek megőrzését. A tartalékpéldány nemcsak a földi ellenőrzőkor a hibás egység cseréjére, hanem referenciaként is szolgál, azaz a felküldendő parancsok ellenőrzésére, esetleg a szonda fedélzetén lévő egység hibás működése esetén a hiba behatárolására és lehetséges csökkentett funkcionalitású működtetés ellenőrzésére is használható.

A szenzorok világűrben történő üzembe helyezése során – mielőtt a szonda még a Jupiterhez érne – a műszerek működését ellenőrzik, kalibrá-

8. ÁBRA. A PEP-Lo DPU, valamint a J-MAG EGSE-k fényképe (Fotó: SGF Kft.)

9. ÁBRA. DC-DC tápegységkártyák az ADMATIS Kft. hő-vákuum kamrájában (Fotó: WFK)





10. ÁBRA. A DC-DC átalakító egyik kártyájának vibrációs tesztje a HUN-REN EK-ban (Fotó: WFK)

lásra is sor kerül. Jelenleg már a működtető szoftvereket is lehet frissíteni, amennyiben szükséges. 2024. augusztus 19-én és 20-án került sor az első pályakorrekcióra (Lunar-Earth Gravity Assist – LEGA-manőver), amelynek során a műszerek többségét bekapcsolták. A JUICE 2024. augusztus 19–20-i Hold–Föld gravitációs pályakorrekciója során a NASA ARTEMIS-P1 szondája közeli pályán haladt (kb. 3200 km). A szondák plazmadetektorai, mágneses tér detektorai azonos időben ugyanazt a régiót mérték, a korábban már kalibrált ARTEMIS mérési adatai alapján lehetővé vált a JUICE hasonló típusú műszerei helyes működésének ellenőrzése. A Ju-

piter elérése előtt még további ellenőrzésre is sor kerül. A kutatók a LEGA során kapott adatok összehasonlító/kalibráló kiértékelését végzik. Jelenleg a JUICE a Föld pályáján belül folytatja útját, és mivel a Naphoz közel van, a túlmelegedés elkerülésére a műszereket egyidejűleg nem kapcsolják be, és csak korlátozott mennyiségű állapotokat leíró szolgálati adatokat (Housekeeping – HK) küldenek a Földre.

Jelenleg a HUN-REN Energiakutató Központban dolgozó mérnökök, akik részt vettek a PEP fejlesztésében, figyelemmel kísérik a DC-DC átalakító működési paramétereit. A berendezés állapotának ellenőrzésére 32 paramétert monitoroznak a rendszer állapotának követésére (bejövő áram, kimenő feszültség, áram- és hőmérsékleti értékek). A jeleket digitális formában a PEP processzori egysége (Digital Processor Unit – DPU) ún. szolgálati csomagokban (HK) továbbítja a JUICE központi számítógépéhez, amely a rádiókapcsolatok során a Földre sugározza. Az adatvevő rendszerből rendszeresen megkaptuk a PEP–Lo DC-DC HK adatcsomagjait. A telemetriai adatok szerint az elmúlt két évben az eszköz meghibásodás nélkül, 80%-os energiahatékonysággal működött, hőmérséklete a várt működési határértékeken belül volt, 4–5 °C pontossággal. Működése a tényleges űrben bizonyítja, hogy mérnökeink kiváló munkát végeztek. Jelenleg a mérnökök projektvezetője dr. Nagy János, a megvalósításában részt vett továbbá a korábbi projekt-

vezető, dr. Szalai Sándor, valamint Szalai Lajos, Hevesi László, Horváth István, Sódor Bálint, Sulyán János, Tróznai Gábor, Vizi Pál Gábor és Dinnyés Lajos.

A magyar részvételt a PEP-kísérletben kezdetben a Magyar Űrkutatási Iroda, majd az ESA PECS és PRODEX programjai támogatták. Jelenleg a Külgazdasági és Külügyminisztérium PRODEX-szerződés útján biztosítja az űrtechnikai csoport számára a JUICE-programban való részvételt, tudásmegőrzésre és mérési adatok kiértékelésére. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] Jupiter Icy Moons Explorer. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice (Letöltve: 2025.04.29)
- [2] Juice spacecraft specs. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice/Juice_spacecraft_specs (Letöltve 2025.04.29)
- [3] JUICE's instruments. <https://sci.esa.int/web/juice/-/61110-juice-instruments> (Letöltve 2025.04.29)
- [4] Particle Environment Package (PEP) for the ESA JUICE mission. <https://ssed.gsfc.nasa.gov/IPM/2014/PDF/1065.pdf> (Letöltve 2025.04.29)
- [5] Barabash et al.: The Particle Environment Package (PEP) for the JUICE mission: Ready to go! Europlanet Science Congress 2022, Granada, Spain, 2022.09.18–23. EPSC2022-681, <https://doi.org/10.5194/epsc2022-681>
- [6] Nagy, J et al.: Hungarian Participation in JUICE Project of European Space Agency. Acta Polytechnica Hungarica Vol. 19, No. 9, 2022. <https://doi.org/10.12700/APH.19.9.2022.9.2> (Letöltve 2025.04.29)

11. ÁBRA. Az integrált PEP-Lo-egység hő-vákuum tesztje (-170 °C – +60 °C) a Berni Egyetemen. A PEP egységeit – néhány érzékeny alkatrész miatt – a beépített fűtőelemek -50 °C alá nem engedik hűlni a JUICE űrszondán (Fotó: UBE)

