

Fot. Kasia Guzik

Pamiątkowa fotografia z uroczystości otwarcia w dniu 22 stycznia 2013 roku Laboratorium Plazmowych Napędów Satelitarnych w IFPiLM w Warszawie.

Per aspera ad astra

Efektywny transfer wiedzy do praktyki jest nieodzowny w tworzeniu postępu technicznego. Jednak droga od poznania praw rządzących zjawiskami fizycznymi do tworzenia konkretnych urządzeń nigdy nie była łatwa. Przekonują nas o tym dotychczasowe dzieje ludzkiej cywilizacji. Większość innowacyjnych rozwiązań technicznych przed osiągnięciem dojrzałości technologicznej, a zatem i użytkowej, pozwala na ich szersze wykorzystanie, wymaga zazwyczaj wielu dziesiątek lat ciągłego udoskonalania.

Takim klasycznym przykładem w historii techniki są silniki. Dlatego każdemu osiągniętemu sukcesowi na tym polu warto poświęcić więcej uwagi. Zwłaszcza, że przykład silnika prezentowany w niniejszym tekście nie jest szerzej znany opinii publicznej, gdyż nie dotyczy szerokiej gamy najbardziej popularnych silników wykorzystywanych na przykład w samochodach, ale za to może stać się przyszłością astronautyki.

Pogląd Jamesa Clerka Maxwella, że siła przesuująca przewodnik w polu magnetycznym nie działa na prąd, ale na two-

rzące go nośniki (poruszające się ładunki elektryczne) został potwierdzony doświadczalnie przed 135 laty przez Edwina Herberta Halla. Z biegiem lat zjawisko powstawania różnicy potencjałów w przewodniku w kierunku prostopadłym do kierunku prądu płynącego prostopadle do wektora pola magnetycznego zostało nazwane efektem Halla i znalazło szerokie zastosowanie w technice, w tym aktualnie także w energoelektronice. Jest ono podstawą m. in. działania hallotronu. Z kolei zastosowanie hallotronu umożliwiło – na przykład – produkcję tanich silników napędzających m. in. wentylatory instalowane w komputerach.

Dlatego wydawałoby się zastanawiające, gdyby tak efektywnego i efektywnego zjawiska fizycznego, jak właśnie efekt Halla nie próbowaliby wykorzystać z pożytkiem specjaliści od badań kosmicznych właśnie do ...eksploracji kosmosu.

DYLEMAT WYBORU

Najbardziej skrótkowo można zdefiniować silnik plazmowy jako rodzaj napędu raketowego, gdzie funkcję czynnika no-

śnego spełniają jony rozpędzone w wyniku oddziaływania elektromagnetycznego.

Historia silników plazmowych, które zostały niezależnie opracowane w ZSSR i USA jest jeszcze stosunkowo krótka, sięga bowiem przełomu lat 50. i 60. minionego stulecia. Do ich do wykorzystania w przestrzeni kosmicznej przyczyniły się dokonania A. I. Morozowowa, uczonego radzieckiego, który był projektantem i konstruktorem prototypu, używanego do dziś wariantu silnika Halla, określanego w angielskiej literaturze rosyjskiej jako Stationary Plasma Thruster (SPT). Natomiast w literaturze zachodniej obowiązuje dziś powszechnie termin „Hall Effect Thruster” (HET). Radziecki projekt będący w znacznym stopniu dziełem A. I. Morozowowa został w 1970 roku praktycznie wdrożony. Silniki te były początkowo używane przede wszystkim do stabilizacji satelitarnej północ-południe, wschód-zachód.

Historycznie ujmując rozwój satelitarnych silników plazmowych można zauważyć, że pomimo, iż w USA ilościowo przeważały pierwotnie tzw. silniki jonowe,

zasadniczo różniące się od silników typu Halla, to jednak w programach eksploracji kosmosu ZSRR i późniejszej Rosji te ostatnie weszły do powszechnego użytku.

W momencie kiedy kosmiczne technologie rosyjskie stały się bardziej dostępne na Zachodzie, również w Europie i Japonii przewagę zyskuje silnik Halla. Z czasem jego walory zaczęto także doceniać w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej.

Dlaczego, skoro silniki jonowe początkowo preferowane przez NASA wytwarzają większy impuls właściwy, niż silniki typu Halla?

W silnikach jonowych skonstruowanych w USA – wyjaśnia dr Serge Barral z IFPiLM – dla ich prawidłowego działania należy zadbać o bardzo mały odstęp między siatkami przyspieszającymi jony. Ze względu na rozszerzalność termiczną materiałów. Rodzi się tu szereg trudności natury technicznej, szczególnie związanych z mechaniką precyzyjną. Z tego też technicznego powodu w przypadku siatkowych silników jonowych występują problemy z zagwarantowaniem odpowiednio wysokiego stopnia niezawodności eksploatacyjnej. Silniki typu Halla, mają tę przewagę nad silnikami jonowymi, że wskazane trudności nie występują. Oczywiście każde rozwiązanie techniczne ma swe mocne i słabsze strony. Przy konkretnym wyborze wszystko zależy od tego, czego od urządzenia oczekuje użytkownik. W przypadku silników Halla argumentem przeważającym jest dłuższy czas jego eksploatacyjnej funkcjonalności.

Począwszy od 1970 roku za sprawą kolejnych napędów typu Halla pracujących w przestrzeni kosmicznej na

pokładach rosyjskich statków kosmicznych, technologia ta wielokrotnie została przetestowana i jest już na tyle dojrzała, że można mówić o wyraźnym prymacie silników tego typu. Rosyjski sukces techniczny – konstatuje dr Serge Barral – zaowocował w stosunkowo krótkim czasie znaczącym liczbą podejmowanych badań i prac rozwojowych dotyczących tego silnika zarówno w USA, jak i Japonii oraz przed wszystkim w Europie Zachodniej, gdzie pierwszy „zachodni”, a nie rosyjski silnik Halla został użyty w kosmosie podczas francuskiej misji SMART-1 w roku 2003. Był to bez wątpienia najbardziej spektakularny przykład użycia silnika Halla. Do napędzania sondy SMART-1 wykorzystano silnik PPS 1350-G o impulsie właściwym równym 1640 sekundom. Silnik został uruchomiony po raz pierwszy 30 września 2003 roku. W trakcie prawie dwóch lat trwania misji (do pełnych dwóch zabrakło zaledwie 10 dni) odpalano silnik 844 razy, a łączny czas jego pracy wyniósł 4958,3 godzin, przy czym zużyty został prawie cały zapas służącego jako paliwo-ksenonu (ok. 80 kg).

Dr Serge Barral podkreśla, że pomijając wielką złożoność procesów fizycznych zachodzących podczas pracy silników Halla, niekwestionowanym ich atutem, pozostaje nie tylko to, że są one bardziej kompaktowe, niż silniki jonowe, ale posiadają również zaletę, której w długo trwających misjach kosmicznych przecenić nie można. W eksploatacji są dużo bardziej niezawodne, od siatkowych silników jonowych.

Do tej pory w kosmosie użytkowano ponad 200 satelitów i sond kosmicznych z silnikiem Halla, w tym ponad 100 silników Halla produkcji radzieckiej i rosyjskiej, służących głównie do pozycjonowania i utrzymywania lub dokonywania niewielkiej zmiany w orbicie satelity.

POLSKI SILNIK HALLA

Szczególnie aktywna w dziedzinie fizyki i technologii związanej z silnikami plazmowymi jest grupa badaczy polskich z Instytu-

tu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy. Naukowcy i inżynierowie z tego Instytutu podjęli się opracowania, nowego prototypu silnika Halla. Dlaczego właśnie temat silnika plazmowego zaintrygował polskich badaczy? Powodów ważnych z punktu widzenia poznawczego i naukowego jest kilka.

„Zauważmy, że generatory strumieni plazmy są jednym z istotnych kierunków badawczych od lat już rozwijanych w IFPiLM – przypomnieli kierownik zespołu, dr Jacek Kurzyński – i korzystając ze zgromadzonych już doświadczeń, nasz zespół zdecydował się na przedstawienie własnej konstrukcji plazmowego silnika typu Halla. Należy podkreślić, że w chwili obecnej istnieje wiele rozwiązań w zakresie napędów przeznaczonych dla małych satelitów (tj. satelitów o masie 100-500 kg), takich jak raketowe silniki chemiczne, silniki z zimnym gazem lub systemy oparte na napędach jonowych/plazmowych (których liczba ciągle rośnie). Ale dotychczas szybko rozwijający się sektor nanosatelitów (tj. satelitów o masie kilku kilogramów) wciąż nie dysponuje żadnymi rozwiązaniami w zakresie napędu. Istnieje więc potrzeba opracowania nowego, innowacyjnego rozwiązania dla potrzeb w tym zakresie. Z tą koncepcją wiąże się też drugi zakres zainteresowań zespołu”.

Aktywność naukowa zespołu obejmuje dość szerokie spektrum badań. Są to studia teoretyczne i komputerowe modelowanie, projektowanie, prace konstrukcyjne oraz eksperymentalne badania źródeł plazmy, ze szczególnym uwzględnieniem silników Halla. Zespół zajmujący się akceleratorami plazmowymi jest organizacyjnie częścią Oddziału Plazmy w Polu Magnetycznym, wchodzącym w skład Zakładu Technologii i Techniki Plazmowych IFPiLM. Niektórzy z członków tego zespołu zajmowali się tymi zagadnieniami od strony teoretycznej pracując wcześniej w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Podkreślają jednak, iż w IFPiLM mogli nie tylko efektywnie wykorzystać wcześniej zdobytą w IPPT wiedzę na temat napędów plazmowych, ale właśnie w IFPiLM zostały stworzone optymalne warunki do intensyfikacji tych badań w oparciu o eksperymenty, dzięki rozwojowi nowoczesnej bazy laboratoryjnej IFPiLM sfinansowanej ze środków własnych instytutu. Inwestycyjna odwaga, którą należy nazwać w tym przypadku racjonalnym prognozowaniem, okazała się

Fot. Kasia Guzik



Fragment Laboratorium Plazmowych Napędów Satelitarnych w IFPiLM

trafny wyborem i dobrą podstawą do intensywnej współpracy międzynarodowej, wynikającej z dotychczasowych kontaktów zagranicznych zespołu (m. in. w ramach naukowej sieci laboratoriów prowadzonej przez Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) francuską organizację rządową odpowiedzialną za rozwój i koordynację badań Kosmicznych; Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), francuską państwową instytucję naukową oraz SNECMA renomowaną grupę firm zajmujących się m. in. silnikami kosmicznymi i realizowanych obecnie projektów europejskich.

Fot. Kasia Guzik



Dr Jacek Kurzyzna – twórca laboratorium PlanS podczas pracy przy montażu silnika Halla

UNIKATOWE LABORATORIUM

W 2012 roku w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy nastąpiło otwarcie pierwszego w Polsce i jednego z nielicznych w Europie specjalistycznego laboratorium plazmowych silników satelitarnych służącego – między innymi – do symulacji warunków panujących w przestrzeni kosmicznej. Utworzone je dla potrzeb projektu L- μ PPT (Innovative Liquid Micro Pulsed Plasma Thruster) realizowanego w ramach 7. Europejskiego Programu Ramowego. Prowadzone są tu prace badawcze nad napędami plazmowymi dla satelitów. Napędy te mogą też potencjalnie zostać wykorzystane dla sond kosmicznych wysyłanych w odległe obszary przestrzeni. Ze środków europejskich laboratorium wyposażone zostało m.in. w cylindryczną komorę próżniową o objętości dwóch metrów sześciennych z zainstalowanym bardzo wydajnym układem pompowym, umożliwiającym badanie napędów przy ciśnieniu otoczenia ponad 100 milionów razy niższym niż atmosferyczne.

Dlaczego laboratorium powstało właśnie IFPiLM w Warszawie? Odpowiedź nie nastręcza trudności. Badania w laboratorium plazmowych silników satelitarnych służą testom innowacyjnego napędu plazmowego dla nanosatelitów, zaprojektowanego właśnie przez zespół z IFPiLM kierowany przez dr Serge'a Barrala z prezentowanego zespołu przy współudziale pozostałych uczestników europejskiego konsorcjum L- μ PPT, którego prace koordynuje hiszpańska firma JMP Ingenieros. W skład konsorcjum wchodzi także firmy Kopoos (Francja), NASP (Hiszpania), Mecartex (Szwajcaria) i Nanospace (Szwecja), reprezentujące sektor małych i średnich przedsiębiorstw.

Powód dla których naukowcy z IFPiLM zajęli się tym obszarem badań fizycznych

i technologicznych rysuje się jeszcze bardziej wyraziście, jeśli dokonamy porównania silnika plazmowego z tradycyjnym chemicznym silnikiem raketowym. Zasadniczym walorem klasycznych silników chemicznych jest to, że wykorzystując energię zgromadzoną w paliwie charakteryzują się one ogromną mocą. Energia paliwa po prostu przekłada się na wielką siłę ciągu. Dlatego raketowe silniki chemiczne mogą w tak spektakularny sposób wynosić rakiety z ich ciężkimi ładunkami na orbitę kosmiczną. I tu są i chyba na długo pozostaną rzeczywiście niezastąpione. Jednak to co stanowi fundamentalną zaletę raketowych silników chemicznych, a więc siła ciągu, wynika z energii zgromadzonej w paliwie, która zostaje szybko uwalniana, co powoduje proporcjonalne, a więc również szybkie zużycie paliwa, tak, że w efekcie czas działania silników wynosi zaledwie kilkadziesiąt sekund. Jest to czas wystarczający tylko dla wyniesienia urządzeń na orbitę. Tymczasem dla satelitów poruszających się już w kosmosie niezbędne są silniki mogące działać o wiele dłużej. Czas ich użytkowania i czynnej eksploatacji powinien wynieść od kilku miesięcy, nawet do kilku lat w zależności od przewidywanego czasu trwania misji. I tu znalazła się idealna nisza dla napędów plazmowych.

W przestrzeni kosmicznej gdzie opory ruchu są zanedbywalnie małe – wyjaśnia dr Jacek Kurzyzna – wysoce użyteczne stają się napędy gwarantujące długotrwały czas użytkowania. Właśnie do urządzeń tego rodzaju należą silniki Halla.

Są one jedną z odmian elektrycznych napędów kosmicznych. Stosowane od lat 70. ubiegłego wieku w bezzałogowych lo-

tach kosmicznych, umożliwiają prowadzenie bardzo precyzyjnych manewrów i korekt orbit satelitów. Mogą jednak spełniać także i inne funkcje. Coraz częściej proponuje się silniki typu Halla jako napędy marszowe dla sond kosmicznych dalekiego zasięgu. Już więc dziś tego rodzaju silniki stanowią poważną konkurencję dla klasycznych silników raketowych, tym bardziej, że sprawdzają się nie tylko jako napędy użytkowane do korekty orbity, ale jako napędy manewrowe.

INNOWACYJNY POMYSŁ

Silniki Halla mają jednak jedną istotną wadę. Nie chodzi tu o aspekt techniczny, ale w gruncie rzeczy sensu stricto finansowy. Gazem roboczym jest w nich ksenon stosowany w optyce i oświetleniu, medycynie i energetyce jądrowej. Stosowany jest również w silnikach plazmowych z uwagi na dość wysoką masę atomową, niską energię jonizacji i duży przekrój czynny na jonizację w zderzeniach z elektronami. Zawartość ksenonu w powietrzu wynosi 0,085 ppm, jest więc trudno dostępny, a zatem i drogi. Inny gaz szlachetny krypton, którego zawartość w atmosferze ziemskiej wynosi 1,14 ppm jest nawet 10-krotnie tańszy od najczęściej stosowanego w silnikach jonowych ksenonu. Dlaczego nie spróbować zbudowania silnika napędzanego tym „tańszym paliwem”?

Naukowcy z IFPiLM nie mieli dotychczas „swojego silnika Halla”. Celem zespołu kierowanego przez dr Jacka Kurzynę była budowa silnika typu Halla tańszego w eksploatacji od dotychczas używanych poprzez zastosowanie właśnie kryptonu jako gazu roboczego. Pomysł nie jest zupełnie nowy,

Fot. Kasia Guzik



Mgr Anita Pokorska i dr Jacek Kurzyzna w laboratorium PlanS

a badania silnika Halla zasilanego kryptonem prowadzone są w kilku laboratoriach na świecie już ponad 10 lat. Jednak zazwyczaj wydajność silników Halla zasilanych kryptonem bada się w układach zoptymalizowanych do pracy z ksenonem.

Naukowcy i inżynierowie z mieszczącego się na warszawskim Bemowie laboratorium IFPiLM zaprojektowali, skonstruowali i zbudowali silnik Halla już w fazie konstrukcyjnej optymalizowany do pracy z tym znacznie tańszym od ksenonu gazem szlachetnym.

Mimo że faktycznie wytwarzanie jonów kryptonu wymaga nieco większych energii, niż w przypadku ksenonu, są one jednak lżejsze od ksenonowych i można je przyspieszać do tej samej prędkości za pomocą niższego napięcia, uzyskując podobny impuls właściwy.

Do przekształcenia gazu roboczego w plazmę i wytworzenia siły ciągu, silniki typu Halla wykorzystują zewnętrzne źródło zasilania – na przykład – baterie słoneczne. Cząsteczki plazmy (jony i elektrony) są obdarzone ładunkiem elektrycznym, mogą więc być przyspieszane w polu elektrostatycznym do dużych prędkości, sięgających w silnikach Halla od 15 do 30 km/s i więcej (prędkość gazów odrzutowych w silnikach chemicznych nie przekracza 4 km/s). Silnik plazmowy wytwarza słaby ciąg (od kilku do 1000 miliniutonów, w zależności od mocy), ale może działać długo i zmienić prędkość sondy nawet o kilka kilometrów na sekundę. Ze względu na relatywnie niskie zużycie „paliwa” są konkurencyjne wobec tradycyjnych silników raketowych potrzebujących dla takiej samej misji ko-



Fot. Kasia Guzik

Dr Serge Barral, jeden z konstruktorów silnika Halla i autor specjalnego oprogramowania informatycznego do jego projektowania

smicznej, kilka razy więcej (nawet do 4-5 przy najwyższych uzyskiwanych prędkościach przyspieszanych jonów) paliwa od silników plazmowych.

Nowy silnik jest napędem średniej wielkości, przeznaczonym do pracy ciągłej.

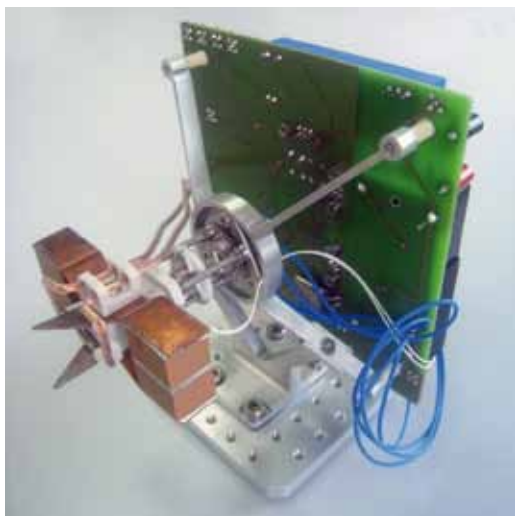
„Polski silnik Halla” o wadze 4 kg ma kształt cylindra o średnicy 10 cm i długości 12 cm, a maksymalna moc z jaką może pracować wynosi ok. 0,5 kW. Napęd plazmowy skonstruowany i wykonany przez naukowców z IFPiLM wytwarza siłę ciągu wystarczającą do pracy na satelitach o masie do ok. 100 kg.

„Sonda SMART-1, którą ESA wystawiła na orbitę Księżyca, dysponowała silnikiem ksenonowym o mocy około 1,35 kW. Był on w stanie zwiększyć prędkość sondy o 3,6 km/s. Zatem w małych próbnikach kosmicznych również nasz silnik mógłby pełnić rolę silnika napędowego” – mówi dr Serge Barral.

dobrze zgadza się ze wstępnymi wynikami testów wykonanych w laboratorium ESA. Ważnym zadaniem było zaprojektowanie konfiguracji pola magnetycznego i odpowiadającego jej obwodu magnetycznego. Wszystkie części elementów silnika należało przy tym zaprojektować i wykonać w sposób gwarantujący, że wytrzymają zwiększone obciążenia cieplne.

Prototyp pierwszego polskiego silnika plazmowego do sond kosmicznych z sukcesem przeszedł wstępne testy w laboratorium Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA - ESTEC) w Noordwijk (Holandia) – w warunkach zbliżonych do tych, jakie opanują w przestrzeni kosmicznej.

„Napęd zniósł „swoistą próbę ogniwą” i jest „osmalony w bojach” – żartuje dr Jacek Kurzyzna – i prezentuje „polski silnik Halla” mówiąc: „Tak wygląda nasz beniaminek po próbach w laboratorium napędów plazmowych w Holandii gdzie pra-



Fot. archiwum laboratorium PlanS



Pierwsza wersja (prototyp) silnika LuPPT (impulsowego) oraz jego widok podczas pracy.

cował w ekstremalnych warunkach podniesionej temperatury. Widać że miało tu miejsce bardzo mocne oddziaływanie plazmy, widać na nim efekt tego, co w terminologii angielskiej określa się „sputtering”, czyli wybijanie z powierzchni przez przyspieszone cząsteczki materiału, widać biały izolator oczyszczony przy ujściu kanału plazmowego całkowicie, a w jego środku środka przebarwiony w wyniku osadzania się na powierzchni materiału uwalnianych cząsteczek.

Podczas sesji eksperymentalnej silnik pracował wystarczająco długo, by zmierzyć najważniejsze parametry, w tym oczywiście siłę ciągu”. Czy można mówić o sukcesie? Na tak postawione pytanie dr Jacek Kurzyzna odpowiada, że należy mówić o pierwszym kroku do sukcesu, „ale jest faktem, iż bezproblemowe uruchomienie silnika wprawiło w zaskoczenie nawet doświadczonych pracowników ESA. Zazwyczaj pierwsze uruchomienia wymagają odpowiedniego doboru parametrów pracy układu, których ustalenie a priori jest skomplikowane” – dodaje dr Jacek Kurzyzna.

DUŻY PIERWSZY KROK

Zatem pierwszy krok postawiony, a jest nim zaprojektowanie, skonstruowanie i budowa prototypu silnika oraz jego uruchomienie. Po wspólnie wykonanych w Holandii badaniach i otrzymaniu pełnych wyników testów opracowanych przez specjalistów z ESA przychodzi czas na rzetelne opracowanie wszystkich danych eksperymentalnych przez polskich naukowców.

„Przez pełne dwa tygodnie trwania sesji eksperymentalnej dokonaliśmy wielu pomiarów. Danych zebranych w eksperymencie jest dużo, a ich rzetelna obrób-

ka wymaga sporo pracy” – mówi dr Jacek Kurzyzna.

Pierwszy polski egzemplarz silnika typu Halla musi przejść jako prototypowe urządzenie, niezbędne testy w warunkach próżniowych.

„Jeśli testy wypadną pomyślnie, czeka nas jeszcze optymalizacja silnika i cała seria dalszych badań kwalifikacyjnych.

Zgłoszenie projektu do ESA w ramach II konkursu PECS, czyli Porozumienia o Europejskim Państwie Współpracującym, zawartego między Polską a ESA, zaowocowało pozytywną oceną i uzyskaniem funduszy na bieżące badania.

Po zakończeniu obecnego projektu o kryptonimie KLIMT – Krypton Large Impulse Thruster będziemy chcieli rozpocząć procedurę kwalifikacyjną” informuje dr Jacek Kurzyzna. I dodaje: „Planujemy, że niebawem kolejny prototyp, nad którym pracują naukowcy z IFPiLM, będzie przechodził testy, podobnie jak pierwszy prototyp w laboratorium ESA, ale też we własnym instytutowym laboratorium”.

WYPEŁNIĆ NISZĘ

Prototyp pierwszego polskiego silnika plazmowego już działa. Teraz jest przedmiotem serii badań naukowych, ale zakłada się, że w nieodległym czasie może zostać podjęta jego produkcja z udziałem partnerów przemysłowych i ostatecznie będzie użytkowany podczas kolejnych misji kosmicznych. Koniecznie trzeba zaznaczyć, że w IFPiLM ten sam zespół naukowców pracuje nad drugim, o wiele mniejszym rozmiarami silnikiem, dedykowanym dla małych sond lub satelitów, takich jak właśnie nasz krajowy LEM (20x20x20 cm, waga 6 kg). Z racji na efektywne wykorzystanie paliwa i brak zagrożeń chemicznych napędy jonowe/

plazmowe stanowią potencjalnie najlepsze rozwiązanie technologiczne dla nanosatelitów, co między innymi wyniki projektu L- μ PPT mają za zadanie udowodnić.

W odróżnieniu od istniejących napędów typu PPT, w których paliwo stanowi blok polimerowy zintegrowany z silnikiem, w projekcie L- μ PPT napęd będzie wykorzystywał paliwo ciekłe, co pozwoli na zachowanie identycznej geometrii wyładowania oraz siły ciągu przez całe życie silnika, a zarazem daje możliwość zmagazyrowania dowolnej masy paliwa w oddzielnym zbiorniku.

Planuje się, że po zakończeniu projektu L- μ PPT wyposażenie próżniowe laboratorium plazmowych napędów satelitarnych IFPiLM będzie mogło być wykorzystane do badania silników o średniej mocy dla sond kosmicznych i konwencjonalnych satelitów. Do tej klasy napędów plazmowych należy kryptonowy silnik Halla, nad którym bieżące prace badawczo-rozwojowe prowadzone są w ramach umowy z Europejską Agencją Kosmiczną.

Nie bez znaczenia pozostaje fakt, iż wyniki badań nad silnikami plazmowymi typu Halla znajdują zastosowanie poza astronautyką i mogą służyć także przemysłowi. Akceleratory ciągłych strumieni plazmy są stosowane w wielu procesach technologicznych, m.in. do czyszczenia powierzchni materiałów, jej uszlachetniania oraz nakładania m.in. cienkich warstw węglowych o wytrzymałości diamentu. Zespół naukowców z IFPiLM opracował między innymi koncepcję nakładania cienkich warstw tlenkowych do zastosowań w ogniwach fotowoltaicznych z wykorzystaniem plazmowego silnika typu Halla.

Tekst: **Andrzej Raguski**, zdjęcia: **Kasia Guzik**