



Tytuł opracowania: **Ekspertyza dotycząca potencjału Polski w robotyce orbitalnej i planetarnej na rzecz misji międzynarodowych**

Autor ekspertyzy: Kamil Grassmann

Opracowanie wykonane na zlecenie: Polska Agencja Kosmiczna

Rok opracowania: 2025

Spis treści

1	BIBLIOGRAFIA	4
1.1	Referencje	4
1.2	Definicja nazw	5
2	STRESZCZENIE WYKONAWCZE	6
2.1	Cel ekspertyzy	6
2.2	Najważniejsze wnioski	6
2.3	Rekomendacje strategiczne	6
3	WPROWADZENIE	7
3.1	Uzasadnienie potrzeby ekspertyzy	8
3.2	Robotyka orbitalna w Europie	8
3.2.1	Komisja Europejska	8
3.2.2	Europejska Agencja Kosmiczna (ESA)	9
3.3	Robotyka orbitalna globalnie	9
3.3.1	NASA	9
3.3.2	JAXA	10
3.4	Robotyka orbitalna w Polsce	10
3.5	Metodyka użyta w ekspertyzie	11
4	CEL EKSPERTYZY	12
5	ZAKRES EKSPERTYZY	12
5.1	Globalne trendy rozwoju robotyki kosmicznej	12
5.2	Planowane misje kosmiczne	14
5.3	Ocena stanu polskich technologii	15
6	ANALIZA KONKURENCJI I POZIOMÓW TRL W ODNIESIENIU DO RYNKU EUROPEJSKIEGO	20
7	ANALIZA KOMPETENCJI I POTENCJAŁU W POLSCE	21
7.1	Identyfikacja istniejących technologii	21
7.2	Identyfikacja polskich podmiotów zajmujących się robotyką kosmiczną	22
7.2.1	Instytuty naukowe	22
7.2.2	Firmy	23
7.2.3	Laboratoria	24
7.2.4	Zespoły	28
7.3	Identyfikacja luk kompetencyjnych i infrastrukturalnych	29
7.4	Mapowanie polskiego potencjału technologicznego w misjach ESA	29
8	PROPOZYCJA KIERUNKU ROZWOJU	32
8.1	Kierunki długofalowe:	32
8.1.1	Specjalizacja w Logistyce i Serwisowaniu (ISAM)	32
8.1.2	Specjalizacja w pozyskiwaniu i przygotowaniu surowców planetarnych (ISRU)	32
8.2	Kierunki średniofalowe:	33

8.2.1	Specjalizacja w Orbitalnych Systemach Robotycznych.....	33
8.2.2	DEMO-1 programu RAVEN (ISAM)	33
8.2.3	Rozwój planetarnego ramienia robotycznego na TRL6	33
8.3	Kierunki krótkofalowe:	34
8.3.1	Specjalizacja w Planetarnych Systemach Robotycznych	34
8.3.2	Specjalizacja w Orbitalnych Systemach Robotycznych.....	34
8.3.3	Rozwoju układów jezdnych platform mobilnych.....	34
8.3.4	Rozwoju systemów GNC do platform mobilnych	35
9	PLAN ROZWOJU TECHNOLOGII / ŚCIEŻKA TRL	35
10	MOŻLIWOŚCI WSPÓŁPRACY MIĘDZYNARODOWEJ.....	45
11	ANALIZA RYZYK I BARIER.....	45
12	REKOMENDACJE STRATEGICZNE	47
12.1	Wytyczne dla Instytucji Administracji Publicznej (MRiT, POLSA, NCBR).....	47
12.2	Wytyczne dla Sektora Przemysłowego i Badawczego	47
13	PODSUMOWANIE	49
13.1	Najważniejsze ustalenia	49
13.2	Znaczenie ekspertyzy dla Polskiej Strategii Kosmicznej	49
13.3	Szacunkowa wartość wdrożenia wyników	49

1 Bibliografia

1.1 Referencje

Poniższe dokumenty, w dokładnie określonym wydaniu i/lub rewizji, stanowią część niniejszego dokumentu w zakresie w nim wyszczególnionym. W przypadku braku wskazania wydania, obowiązuje wydanie najnowsze.

Tabela 2-1 Lista referencyjnych dokumentów

RD #	Nazwa dokumentu	Numer dokumentu	Wersja/ data
RD-1	Guidance Document for the EU ISOS Pilot Mission. IN-SPACE OPERATIONS & SERVICES 4 INFRASTRUCTURE ISOS4I	HORIZON-CL4-SPACE-2025	v1.0/ 30.04.2025
RD-2	European Proximity Operations Simulator 2.0 (EPOS) - A Robotic-Based Rendezvous and Docking Simulator	NA	April 2017
RD-3	On ground validation of debris removal technologies	NA	May 2019
RD-4	Tomasz Rybusa, Karol Seweryna, Jakub Oleśa, Fatina Liliana Basmadja, Kamil Tarenkoa, Radosław Moczydłowska, Tomasz Barcińska, Jan Kindrackib, Łukasz Mężykb, Przemysław Paszkiewicz, Piotr Wolańskib; Application of a planar air-bearing microgravity simulator for demonstration of operations required for an orbital capture with a manipulator;	NA	NA
RD-5	ESA Technology Tree	STM-277	4.1 /Listopad 2023
RD-6	European Space Technology Master Plan	NA	NA
RD-7	IN-SPACE SERVICING, ASSEMBLY, AND MANUFACTURING NATIONAL	NA	April 2022
RD-8	NASA Space Technology Roadmaps and Priorities: Restoring NASA's Technological Edge and Paving the Way for a New Era in Space 2012 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2012. NASA Space Technology Roadmaps and Priorities: Restoring NASA's Technological Edge and Paving the Way for a New Era in Space. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/10952 .	NA	NA
RD-9	EU Space Strategy for Security and Defence, strona www: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/eu-space-strategy-security-and-defence_en	NA	NA
RD-10	Commercial Removal of Debris Demonstration- opis na	NA	NA
RD-11	About H-II Transfer Vehicle "KOUNOTORI" (HTV), strona www: https://global.jaxa.jp/projects/rockets/htv/	NA	NA
RD-12	Uchwała nr 6 Rady Ministrów z dnia 26 stycznia 2017 r. w sprawie przyjęcia Polskiej Strategii Kosmicznej	NA	2017-02-17
RD-13	Terrae Novae 2040 ESA Strategy Roadmap	NA	2022-06-01
RD-14	Wstępny opis propozycji Polskiej Misji Księżycowej.	NA	2025-11-16
RD-15	ESA Space Resources Strategy	NA	2019-05-23
RD-16	In-Situ Resource Utilization (ISRU) Overview	NA	2023-05-15
RD-17	Lunar market assessment: market trends and challenges in the development of a lunar economy	NA	2021-09-01

RD-18	M. Oda, K. Kibe, and F. Yamagata, "ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite," in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and	NA	NA
RD-19	B. Friend, "Orbital express program summary and mission overview," in Sensors and systems for space applications II, vol. 6958, p. 695803,	NA	NA
RD-20	Astroscale, "ELSA-d program," website. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: https://astroscale.com/missions/elsa-d/	NA	NA
RD-21	Northrop Grumman, "MEV mission," Northrop Grumman website. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available:	NA	NA
RD-22	R. Biesbroek, S. Aziz, A. Wolahan, S. Cipolla, M. Richard-Noca Clearspace team up to remove debris," in Proc. 8th Conference on Space Debris (virtual),	NA	NA
RD-23	https://www.thalesaleniaspace.com/it/press-releases/thales-alenia-space-alla-guida-del-progetto-eros-iod-servizi-orbita	NA	NA
RD-24	A. Saplana https://www.darpa.mil/program/robotic-servicing-of-geosynchronous-satellites	NA	NA
RD-25	NASA, "OSAM-1," NASA website. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/mission/on-orbit-servicing-assembly-and-	NA	NA
RD-26	NASA, "OSAM-2," NASA website. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/mission/on-orbit-servicing-assembly-and-	NA	NA
RD-27	ASI, "Firmato il contratto missione italiana di In Orbit-Servicing," ASI website. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: https://www.asi.it/2023/05/firmato-il-contratto-asi-thales-alenia-space-per-la-prima-missione-italiana-di-in-orbit-servicing/	NA	NA

1.2 Definicja nazw

Skrót	Wytłumaczenie
PIAPS	PIAP Space sp. z o. o.
SENER-PL	SENER Sp. z o. o.
ASTRONIKA	ASTRONIKA sp. z o. o.
ISRU	„In-situ Resource utilisation”, oznacza filozofię procesowania i przetwarzania lokalnych zasobów planetarnych poza Ziemią.
TRL	„Technology Readiness Review”, oznacza poziom dojrzałości technologicznej.

2 Streszczenie Wykonawcze

2.1 Cel ekspertyzy

Głównym celem dokumentu jest kompleksowa ocena krajowych możliwości technologicznych oraz identyfikacja nisz robotycznych, w których polski sektor kosmiczny ma największy potencjał rozwoju. Ekspertyza dąży do wskazania obszarów pozwalających polskim podmiotom na przejście z roli dostawców komponentów do roli integratorów kluczowych podsystemów w prestiżowych misjach międzynarodowych (ESA, NASA, JAXA). Dokument ma również służyć jako narzędzie zarządcze do optymalizacji alokacji składek do programów opcjonalnych ESA oraz konsolidacji rozproszonych dotąd krajowych kompetencji.

2.2 Najważniejsze wnioski

Technologie serwisu, montażu i produkcji na orbicie (ISAM) oraz operacji orbitalnych (OSAM) są uznawane za fundament suwerenności technologicznej i bezpieczeństwa państwa.

Silna baza technologiczna w Polsce: Polski przemysł posiada już ugruntowane kompetencje w niszach takich jak manipulatory orbitalne (PIAP Space), HDRM (Astronika), systemy dokujące (SENER) oraz elektronika sterująca (AROBS).

Rozproszenie kompetencji: Obecnie polskie firmy rozwijają zaawansowane technologie w sposób autonomiczny, co utrudnia budowanie kompleksowych, w pełni zintegrowanych systemów.

Potencjał rynkowy: Realizacja rekomendacji i udział w rodzącym się rynku usług serwisowania orbitalnego może wygenerować zwrot z inwestycji (ROI) na poziomie 5–7-krotności włożonego kapitału.

2.3 Rekomendacje strategiczne

Przyjęcie modelu „Krajowej Specjalizacji Systemowej”: Pozwoli to na optymalne wykorzystanie składek w programach ESA (takich jak GSTP, E3P, S2P) oraz budowę trwałej przewagi konkurencyjnej.

Uruchomienie narodowej misji demonstracyjnej dotyczącej zarówno ISAM/ OSAM jak i misji planetarnej. Wskazuje się na konieczność realizacji własnej misji (np. księżycowej [RD-14] lub orbitalnej), co umożliwi przetestowanie i certyfikację polskich technologii w warunkach rzeczywistych.

Rekomenduje się kierowanie funduszy (szczególnie w kontekście CM25) w technologie o najwyższym potencjale komercyjnym i strategicznym, takie jak systemy GNC, precyzyjne mechanizmy i autonomia systemów robotycznych.

Polska powinna dążyć do dostarczenia kluczowych podsystemów (np. manipulatorów do rozładunku) dla europejskiego ładownika księżycowego w ramach programu ARGONAUT.

3 Wprowadzenie

Wiodące dokumenty strategiczne, w tym ESA: Harmonization Paper on Automation and Robotic Technologies oraz NASA: Space Technology Roadmaps and Priorities, jednoznacznie klasyfikują systemy robotyczne jako kluczowe technologie. Stanowią one fundament odpowiedzi na złożone wyzwania techniczne współczesnej astronautyki jak i również rosnące potrzeby rynku komercyjnego, bezpośrednio adresując potrzeby zdefiniowane w ESA Technology Tree [RD-5], w szczególności w ramach domeny TD 13 (Automation, Telepresence and Robotics).

Technologie te są kluczowe dla realizacji procesów takich jak przede wszystkim operacje zbliżania i dokowania (Rendez-vous & Docking): powiązane z poddomeną TD 13A (Robotics Systems) oraz technologiami GNC (Guidance, Navigation, and Control). Zaawansowana analiza na miejscu (ang. in-situ) oraz percepcja: wpisująca się w TD 13B (Robot Perceptions), obejmująca rozpoznawanie i manipulację obiektami w warunkach orbitalnych i planetarnych jest kluczowym ogniwem niezbędnym do możliwości przeprowadzania zaawansowanych operacji w trybie autonomicznym lub nawet automatycznym.

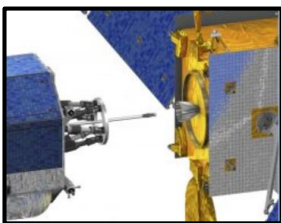
Zgodnie z założeniami EU Space Strategy for Security and Defence [RD-9], rozwój tych zdolności jest niezbędny dla budowy suwerenności technologicznej państw członkowskich. Zapewnienie niezależnego dostępu do zaawansowanych systemów robotycznych pozwala na wzmocnienie odporności infrastruktury kosmicznej, która w większości przypadków jest infrastrukturą krytyczną.

Systemy robotyczne pełnią centralną rolę w realizacji paradygmatu operacji in-orbit (ISAM - In-Space Assembly and Manufacturing), obejmując następujące grupy technologiczne:

- manipulatory i chwytaki (TD 13C - Robot Manipulators): Niezbędne do serwisowania, wymiany modułów oraz produkcji struktur wielkogabarytowych.
- mechanizmy dokowania i interfejsy (TD 15B - Deployment and Refurling Mechanisms): Kluczowe dla tankowania paliwa (refuelling) oraz sztywnego łączenia serwisantów z obiektami docelowymi.
- mobilność planetarna (TD 13D - Surface Mobility): Wsparcie funkcji wydobywczych (ISRU) oraz logistyki powierzchniowej na Księżycu i Marsie.

Zaawansowane możliwości oferowane przez robotykę pozwalają na integrację usług orbitalnych z zastosowaniami podstawowymi, takimi jak:

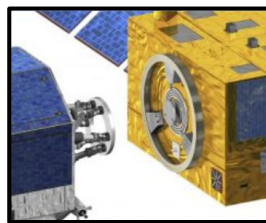
- Active Debris Removal (ADR) & Deorbitacja: Wykorzystanie technologii TD 13A do przechwytywania obiektów niesprawnych (non-cooperative targets).
- Life Extension & Repurposing: Przedłużanie żywotności satelitów poprzez modernizację instrumentów przy użyciu precyzyjnych mechanizmów z domeny TD 15.
- End-of-Life Management: Transfer obiektów na orbity cementarne, co zapewnia zrównoważone wykorzystanie przestrzeni kosmicznej.



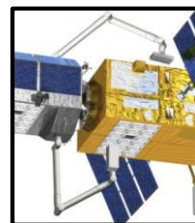
Przejęcie kontroli nad położeniem i orbitą



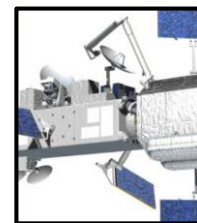
Tankowanie



Usuwanie



Naprawa



Produkcja i montaż

Rysunek 3-1 Wizualizacje możliwych operacji na orbicie (źródło: PIAP Space sp. z o.o.)

3.1 Uzasadnienie potrzeby ekspertyzy

Krytyczne znaczenie technologii z obszaru ISAM/OSAM (In-Space Servicing, Assembly, and Manufacturing / On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing) dla zapewnienia suwerenności technologicznej oraz bezpieczeństwa państwa determinuje konieczność intensywnego rozwoju krajowych kompetencji w dziedzinie robotyki kosmicznej. Polska, dążąc do realizacji celów zdefiniowanych w Polskiej Strategii Kosmicznej, musi aktywnie współtworzyć ten strategiczny obszar technologiczny, budując własny wkład w globalne łańcuchy dostaw.

Rozwój robotyki orbitalnej i planetarnej bezpośrednio wpisuje się w priorytety PSK [RD-12], w tym w szczególności w cel dotyczący zwiększenia konkurencyjności polskiego sektora kosmicznego oraz zapewnienia dostępu do danych i technologii niezbędnych dla bezpieczeństwa i obronności. W obliczu nowej perspektywy finansowej ESA na rok 2025, Polska staje przed szansą wzmocnienia swojej obecności w programach opcjonalnych, takich jak GSTP oraz programach eksploracyjnych, gdzie robotyka odgrywa rolę kluczową.

Warunkiem sine qua non efektywnego wykorzystania tych możliwości jest przeprowadzenie rzetelnej i kompleksowej inwentaryzacji aktualnego stanu techniki oraz bazy technologicznej w Polsce. Niezbędne jest precyzyjne sprofilowanie krajowych podmiotów pod kątem systemów robotycznych oraz wytyczenie spójnej mapy drogowej, która skonsoliduje rozproszone dotąd kompetencje i zorientuje je na wspólne cele strategiczne, zgodne z europejskimi trendami ISAM.

Niniejsza ekspertyza stanowi kluczowe narzędzie zarządcze i analityczne, realizujące powyższe założenia poprzez:

- Weryfikację Poziomów Gotowości Technologicznej (TRL): szczegółową ocenę zaawansowania komponentów w ramach domen TD 13 (Robotyka) i TD 15 (Mechanizmy) opracowywanych w kraju.
- Mapowanie Ekosystemu: identyfikację wiodących podmiotów przemysłowych i naukowych oraz określenie ich roli w łańcuchu wartości operacji orbitalnych i planetarnych.
- Sformułowanie Rekomendacji Strategicznych: wskazanie optymalnych ścieżek certyfikacji i kwalifikacji technologii, co pozwoli na efektywną alokację środków publicznych (w tym subskrypcji do programów ESA) oraz zwiększenie udziału polskiego przemysłu w misjach międzynarodowych.

Opracowanie to jest niezbędnym fundamentem do budowy trwałej przewagi technologicznej Polski w jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się segmentów nowoczesnej gospodarki kosmicznej, umożliwiając transformację z dostawcy komponentów w stronę dostawcy kompletnych rozwiązań systemowych.

3.2 Robotyka orbitalna w Europie

3.2.1 Komisja Europejska

Komisja Europejska postrzega rozwój operacji kosmicznych jako kluczowy element obrony europejskiej suwerenności, niezależności i swobody działania w obliczu globalnej konkurencji.

Jak ogłosił Komisarz Kubilius w czerwcu 2025 r. przy okazji uruchomienia Europejskiej Ustawy Kosmicznej (EU Space Act): „Stoimy u progu rewolucji kosmicznej”. W czasach niepokoju i nadwyrężenia tradycyjnych sojuszy, Europa musi zabezpieczyć swoją rolę jako potęga kosmiczna, wzmacniając autonomię w zakresie zdolności do „działania w kosmosie” (*Act in Space*). Zdolność do „wdrażania i wykonywania operacji oraz świadczenia usług w kosmosie” stała się priorytetem strategicznym i motorem politycznym.

Jest to szczególnie istotne w okresie, gdy Chiny, USA, Rosja i inne państwa wyraźnie manifestują własne ambicje, czasami poprzez ledwie zawołowane prowokacje i pokazy siły.

Dążenie do zaawansowania zdolności technologicznych i operacyjnych oraz wzmocnienia europejskiego łańcucha wartości w tej dziedzinie skłoniło Komisję Europejską (KE) do zdefiniowania koncepcji Operacji i Usług Kosmicznych (**In-Space Operations and Services – ISOS**) [RD-1]. KE uruchomiła mapę drogową, której celem jest ustanowienie Europy jako lidera w Nowym Ekosystemie Kosmicznym. Kluczowym elementem tej strategii jest wdrożenie Misji Pilotażowej (ISOS for Infrastructure – ISOS4I). Misja ta ma stanowić załączek kompleksowego, zamkniętego ekosystemu i gospodarki. Misja ISOS4I opiera się na czterech komponentach, które zademonstrują możliwości technologiczne i operacyjne niezbędne do autonomicznego przenoszenia zapasów, paliwa i innych materiałów eksploatacyjnych, również w znacznych ilościach, między różnymi punktami i aktywnymi w przestrzeni kosmicznej. Cztery komponenty operacyjne (robocze) misji ISOS4I to:

1. HOST (*Hub for Operational Services and Testing*): Serce przewidywanego ekosystemu, zapewniające zapasy i wsparcie pozostałym komponentom (pełni rolę bazy/hubu).
2. SatApp components: Elementy funkcjonalne, które mają być przenoszone lub relokowane, działające na zasadzie podobnej do AppStore (wymienialne moduły).
3. Servicing components: Komponenty świadczące usługi docelowym klientom (np. tankowanie, inspekcja, naprawa – kluczowy obszar dla robotyki orbitalnej).
4. Logistic component: Komponent logistyczny, który będzie zajmował się uzupełnianiem zapasów HOST-a.

Misja ISOS4I jest wdrażana poprzez konkretne tematy badawcze i innowacyjne w programie Horizon Europe, które szczegółowo opisują wymagane komponenty (HOST, Servicing, Logistics, SatApp).

3.2.2 Europejska Agencja Kosmiczna (ESA)

Zaktualizowana strategia rozwoju technologii, zawarta w European Space Technology Master Plan (ESTMP)[RD-6] i przygotowana na Radę Ministrów ESA w 2025 roku (CM25), definiuje robotykę jako jeden z filarów europejskiej autonomii strategicznej. ESA zakłada przejście od fazy eksperymentalnych projektów badawczych do pełnej operacjonalizacji i komercjalizacji systemów robotycznych w dwóch kluczowych domenach: orbitalnej oraz planetarnej.

Głównym założeniem planu CM25 jest budowa zrównoważonej gospodarki orbitalnej opartej na koncepcji ISAM (In-Space Assembly and Manufacturing). ESA wyznacza następujące priorytety:

- standaryzacja Interfejsów: Dążenie do upowszechnienia uniwersalnych złączy do tankowania paliwa oraz interfejsów serwisowych, co umożliwi modułową budowę i naprawę satelitów (TD 15B).
- aktywne Usuwanie Śmieci Kosmicznych (ang. Active Debris Removal): Implementacja technologii chwytania obiektów niewspółpracujących jako standardowego narzędzia w strategii Zero Debris.
- Produkcja Orbitalna: Rozwój systemów robotycznych zdolnych do montażu wielkogabarytowych struktur (np. anten, paneli słonecznych) bezpośrednio w przestrzeni kosmicznej, co znosi ograniczenia wynikające z objętości owiewek rakiet nośnych (TD 13C).

W planach CM25 kładzie się szczególnie nacisk na zwiększenie poziomu autonomii systemów robotycznych (TD 13B). Kluczowe cele obejmują:

- Autonomiczne GNC (Guidance, Navigation, and Control): Zmniejszenie zależności od kontroli naziemnej poprzez wykorzystanie zaawansowanej percepcji wizyjnej i uczenia maszynowego w czasie rzeczywistym.
- Edge Computing: Przetwarzanie danych sensorycznych bezpośrednio na jednostkach pokładowych, co jest niezbędne w operacjach krytycznych wymagających natychmiastowej reakcji.

Robotyka planetarna w perspektywie 2025 roku jest ściśle powiązana z przygotowaniem do trwałej obecności człowieka na Księżycu. Kluczowe obszary inwestycji to:

- Logistyka Powierzchniowa: Rozwój manipulatorów dla europejskiego lądowika Argonaut (dawniej EL3), dedykowanych do precyzyjnego rozładunku ładunków i instrumentów naukowych (TD 13D).
- Technologie ISRU (In-Situ Resource Utilization): Automatyzacja procesów wydobywczych i przetwórczych surowców księżycowych, wymagająca innowacyjnych mechanizmów wiertniczych i kopiących (TD 15A).

Strategia ESTMP CM25 zakłada wzmocnienie europejskiego łańcucha dostaw poprzez eliminację zależności od dostawców spoza państw członkowskich. Kluczowe znaczenie ma rozwój krytycznych komponentów, takich jak:

- Precyzyjne siłowniki i przekładnie kosmiczne.
- Europejskie układy FPGA dedykowane do sterowania robotami.
- Zaawansowane materiały i smary próżniowe zapewniające długowieczność mechanizmów.

3.3 Robotyka orbitalna globalnie

3.3.1 NASA

W 2022 roku administracja USA opublikowała dokument *Interagency ISAM National Strategy [RD-7]*, w którym

NASA zaadaptowała jako swój główny plan działania (ISAM State of the Play). Strategia ta opiera się na trzech filarach:

- serwisowanie (ang. Servicing): Prace nad przedłużaniem życia satelitów, które nie były do tego pierwotnie zaprojektowane (np. misja OSAM-1). Obejmuje to inspekcję, naprawę, tankowanie i modernizację.
- montaż (ang. Assembly): Łączenie prefabrykowanych elementów w celu budowy struktur zbyt dużych, by mogły zostać wyniesione w całości w owiewce rakiety (np. wielkie teleskopy kosmiczne, stacje paliw).
- produkcja (ang. Manufacturing): Wytwarzanie komponentów bezpośrednio w kosmosie z surowców dostarczonych z Ziemi lub pozyskanych *in-situ* (np. druk 3D metali, produkcja światłowodów w mikrograwitacji).

NASA realizuje strategię ISAM poprzez biuro STMD (Space Technology Mission Directorate), skupiając się na następujących misjach demonstracyjnych:

- OSAM-1 (On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 1): Flagowa misja (choć poddana restrukturyzacji), której celem było udowodnienie możliwości tankowania satelity Landsat 7 oraz autonomicznego montażu anteny (robotyczne ramię SPIDER).
- OSAM-2 (Archinaut One): Projekt demonstrujący druk 3D belek konstrukcyjnych w próżni i ich późniejsze wykorzystanie do rozwijania paneli słonecznych.
- Program RSGS (Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites) stanowi kluczowy element strategii ISAM w odniesieniu do krytycznej infrastruktury znajdującej się na orbicie geostacjonarnej (GEO). Celem tej aktywności jest: inspekcja i diagnostyka, korekta anomalii, modernizacja i rozbudowa czy też wsparcie manewrowe.

3.3.2 JAXA

Japonia jako pierwszy kraj na świecie sformalizowała program [RD-9] komercyjnego **usuwania śmieci kosmicznych**. Strategia ta zakłada, że technologie niezbędne do przechwycenia niesprawnych satelitów są tożsame z technologiami potrzebnymi do zaawansowanego **serwisowania orbitalnego**. CDR2 to flagowy projekt realizowany w partnerstwie publiczno-prywatnym (np. z firmą Astroscale), mający na celu inspekcję i późniejsze usunięcie dużych fragmentów rakiet z orbity LEO.

JAXA kładzie ogromny nacisk na **technologię RPO** (*Rendezvous and Proximity Operations*) i jej dalszy rozwój na bazie zdobytej już doświadczenia podczas misji transportowych HTV (Kounotori) [RD-11] do Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, które jest teraz transferowane do systemów autonomicznego dokowania bez udziału człowieka.

JAXA pełni rolę "klienta kotwicznego" dla innowacyjnych firm. Strategia zakłada, że agencja finansuje rozwój technologii o wysokim ryzyku, które następnie są komercjalizowane przez japońskie startupy, takie jak Astroscale (usuwanie śmieci) czy GITAI (robotyka operacyjna).

3.4 Robotyka orbitalna w Polsce

Polska robotyka orbitalna rozwija się od samego początku wejścia Polski do ESA, przechodząc ewolucję od fazy badawczej do dostarczania gotowych modeli lotnych dla najbardziej prestiżowych misji kosmicznych. Specjalizacja polskich podmiotów koncentruje się wokół nisz technologicznych zdefiniowanych w ESA Technology Tree jako TD 13 (Robotics) oraz TD 15 (Mechanisms), ze szczególnym uwzględnieniem operacji typu ISAM/OSAM (*In-Space Servicing, Assembly, and Manufacturing*).

Polski przemysł robotyki kosmicznej opiera się na kilku kluczowych podmiotach, wymienionych poniżej:

- **Astronika Sp. z o.o.**: Światowej klasy ekspert w dziedzinie mechanizmów penetrujących i HDRM (*Hold-Down and Release Mechanisms*). Ich rozwiązania (np. penetrator kret misji InSight czy anteny misji JUICE) są przykładem najwyższej precyzji mechanicznej. W robotyce orbitalnej Astronika dostarcza lekkie struktury rozwijalne oraz systemy chwytające. Opracowuje również systemy ramp i rozładunku do platform mobilnych.
- **AROBS Polska** (dawniej Syderal Polska): Kluczowy dostawca „inteligencji” dla robotyki. Firma specjalizuje się w elektronice sterującej i oprogramowaniu wbudowanym (Embedded Software), które zarządza pracą silników i siłowników w manipulatorach i instrumentach badawczych.

- **Creotech Instruments S.A.:** Jako największa polska firma produkująca systemy kosmiczne, Creotech odgrywa fundamentalną rolę w dostarczaniu platform satelitarnych (rodzina HyperSat), które są w przyszłości mają być dostosowane do misji serwisowych. Firma intensywnie rozwija technologie RPO (Rendezvous and Proximity Operations), czyli precyzyjnego zbliżania się i manewrowania w bliskiej odległości od innych obiektów. Jest to kompetencja krytyczna dla autonomicznego dokowania i serwisowania satelitów.
- **PIAP Space sp. z o.o.:** Spółka jest niekwestionowanym liderem w obszarze manipulatorów orbitalnych. Specjalizuje się w projektowaniu ramion robotycznych do serwisowania satelitów (np. projekt TITAN) oraz systemów dokowania (chwytak LARIS). Firma odgrywa kluczową rolę w rozwoju europejskiej autonomii w zakresie usuwania śmieci kosmicznych (*Active Debris Removal*). Spółka jest również liderem konsorcjum, którego celem jest dostarczenie wielozadaniowego pojazdu transportowego: RAVEN, którego zadaniem będzie przeprowadzanie szeregu różnego rodzaju misji od inspekcji i monitorowania obiektów na orbicie przez zmianę orbity. W ramach tego projektu spółka rozwija również technologię RPO (z ang. Rendezvous and Proximity Operations), która jest niezbędna do procesu dokowania.
- **ScanWay S.A.:** Choć kojarzony głównie z optyką, ScanWay dostarcza systemy wizyjnej kontroli satelitów i instrumentów. Systemy te są niezbędne w robotyce orbitalnej do autonomicznego naprowadzania ramion robotycznych i inspekcji uszkodzeń w obiektach na orbicie.
- **SENER Sp. z o. o.:** Kluczowy podmiot w obszarze zaawansowanej inżynierii mechanicznej. Firma specjalizuje się w projektowaniu i produkcji różnego rodzaju mechanizmów oraz systemów cumowniczych i dokujących (tzw. *docking & berthing mechanisms*).

3.5 Metodyka użyta w ekspertyzie

Ekspertyza została oparta na bazie dokumentów ogólnodostępnych jak i również na bazie wywiadów środowiskowych z firmami z polskiego przemysłu kosmicznego. Referencje do materiałów źródłowych znajdują się a paragrafie 1.1.

4 Cel Ekspertyzy

Głównym celem niniejszej ekspertyzy jest kompleksowa ocena krajowych możliwości technologicznych oraz identyfikacja nisz robotycznych, w których polski sektor kosmiczny posiada największy potencjał do wzmocnienia udziału w prestiżowych misjach ESA/NASA/JAXA. Dokument ma na celu wskazanie obszarów, w których polskie podmioty mogą przejść z roli dostawców komponentów do roli integratorów kluczowych podsystemów.

Ekspertyza koncentruje się na systemach robotyki orbitalnej i planetarnej, ze szczególnym uwzględnieniem technologii:

- **ISAM/OSAM:** serwisowanie, montaż i produkcja na orbicie,
- **RPO:** precyzyjne zbliżanie i manewrowanie orbitalne,
- **Mechanizmów robotycznych:** systemy chwytaków, interfejsy dokujące, manipulatory/ ramiona robotyczne,
- **Mobilności powierzchniowej:** systemy jezdne i autonomia łazików.

Analiza obejmuje weryfikację poziomów gotowości technologicznej (TRL) kluczowych komponentów rozwijanych przez czołowe polskie podmioty przemysłowe i naukowo-badawcze.

Ekspertyza stanowi odpowiedź na problem rozproszenia kompetencji oraz braku jednolitej mapy drogowej dla polskiej robotyki kosmicznej. Obecnie polskie firmy rozwijają zaawansowane technologie w sposób autonomiczny, co utrudnia budowanie kompleksowych, zintegrowanych systemów. Brak rzetelnej oceny barier technologicznych i certyfikacyjnych uniemożliwia pełne wykorzystanie funduszy z programów opcjonalnych ESA oraz ogranicza konkurencyjność Polski w globalnym łańcuchu dostaw ISAM.

Wyniki ekspertyzy zostaną wykorzystane jako strategiczne narzędzie wsparcia dla:

- Instytucji publicznych (Ministerstwa, POLSA): Do optymalizacji planowania składek do programów opcjonalnych ESA (podczas Rady Ministrów CM25) oraz precyzyjnego kierowania krajowych programów wsparcia (KPK) czy też programów bilateralnych.
- Sektora przemysłowego: Jako wytyczne do budowy konsorcjów i klastrów technologicznych, umożliwiających wspólne oferowanie złożonych systemów robotycznych w międzynarodowych przetargach.
- Jednostek naukowych: Do ukierunkowania prac badawczo-rozwojowych na technologie o najwyższym potencjale komercyjnym i strategicznym (zgodnie z ESA Technology Tree).

5 Zakres Ekspertyzy

5.1 Globalne trendy rozwoju robotyki kosmicznej

Możliwości operacyjne IOS (z ang. In Orbit Service), ADR (z ang. Active Debris Removal) i IOM (z ang. In Orbit Manufacturing) mogą przynieść prawdziwą zmianę paradygmatu wykorzystania przestrzeni kosmicznej. Dlatego też agencje, firmy i środowiska akademickie podejmowały i podejmują znaczne wysiłki w celu zademonstrowania możliwości operacji na orbicie, takich jak autonomiczne rendez-vous, dokowanie, teleoperacja, tankowanie, wymiana i zadania serwisowe, w ramach różnych zakończonych lub trwających misji, takich jak Experimental Test Satellite VII przez JAXA w 1997 r. [RD-18], Orbital Express przez US DARPA w 2007 r. [RD-19], Aolong-1 przez Cina w 2016 r., ELSA-d przez Astroscale w 2021 r. [RD-20]. Prowadzono już działania komercyjne, takie jak misja Northrop Grumman Mission Extension Vehicle 1 (MEV-1) w 2019 r. i MEV-2 w 2020 r., które przedłużyły żywotność aktywnych satelitów na orbicie geostacjonarnej [RD-21]. Na nadchodzące lata zaplanowano również kilka innych misji demonstracyjnych, w tym Clearspace-1 Europejskiej Agencji Kosmicznej, która wystartuje w 2027 roku [RD-22], EU Orbital Demonstration Mission z konsorcjum EROSS IOD [RD-23], Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites¹⁶ [RD-24], NASA OSAM-1 [RD-25] i OSAM-2 [RD-26]. Ponadto Włoska Agencja Kosmiczna (ASI) przyznała niedawno konsorcjum włoskich firm kontrakt o łącznej wartości 235 mln euro na zaprojektowanie, opracowanie i kwalifikację pojazdu do dedykowanej misji serwisowania na orbicie [RD-27].

Tabela 5-1 Lista głównych trendów w robotyce kosmicznej

Nazwa trendu	Opis trendu	Cel
ISAM jak kluczowy element rozwoju ekosystemu kosmicznego	Robotyka przestaje być jedynie narzędziem badawczym, a staje się niezbędnym elementem ekosystemu komercyjnego, zapewniającym maksymalny wzrost i optymalne wykorzystanie zasobów.	Wydłużenie czasu eksploatacji aktywów kosmicznych i redukcja kosztów.
Przestrzeń kosmiczna jest kluczowym elementem bezpieczeństwa i suwerenności.	Przestrzeń kosmiczna wraz z obiektami satelitarnymi dostarczającymi dane satelitarne oraz zapewniającymi komunikację jest kluczowym elementem bezpieczeństwa narodowego. Kluczowe również staje się monitorowanie obiektów na orbicie nie tylko w celu unikania kolizji ale również w celu ochrony tych obiektów.	Zapewnienie ochrony i dostarczanie precyzyjnych informacji co do stanu obiektów na orbicie.
Modularyzacja platform satelitarnych	Budowa satelitów modułowych, które mogą być naprawiane, tankowane i modernizowane na orbicie.	Wydłużenie czasu eksploatacji aktywów kosmicznych i redukcja kosztów.
Wzrost odpowiedzialności za przestrzeń orbitalną	Nowoczesny trend, wspierany przez inicjatywy takie jak ESA Zero Debris Charter, zakłada, że każdy nowy satelita musi być „przyjazny dla usuwania” (removal-friendly).	Głównym celem jest minimalizacja ryzyka kaskady Kesslera – scenariusza, w którym zagęszczenie śmieci prowadzi do serii niekontrolowanych zderzeń, czyniąc orbity (szczególnie LEO) bezużytecznymi dla przyszłych pokoleń.
Standaryzacja i interoperacyjność	Główni gracze instytucjonalni oraz komercyjni pracują nad standaryzacją interfejsów mechanicznych i elektrycznych w opracowywanych przyszłych platformach satelitarnych.	Głównym celem jest umożliwienie współpracy systemów pochodzących od różnych dostawców co pozwala uniknąć monopolu technologicznego i utworzenie otwartego rynku.
Rozwój autonomii i Inteligencji Robotów	Implementacja algorytmów uczenia maszynowego bezpośrednio na pokładzie robotów.	Umożliwienie robotom nawigacji w nieznanym terenie (np. jaskinie lawowe na Księżycu) oraz wykonywania precyzyjnych manipulacji bez ingerencji człowieka w czasie rzeczywistym.
Od „stacycznej” do „dynamicznej” eksploracji.	Trend przesuwania środka ciężkości na autonomię pokładową i zaawansowaną mechanikę systemu zawieszenia . Wymaga to opracowania autonomii w czasie rzeczywistym do której potrzebne są m.in. wydajne jednostki obliczeniowe jak i również niezawodne systemy sensoryczne. Niezbędnym elementem są również adaptacyjne systemy zawieszonych platform mobilnych będące w stanie dostosować się do zmieniających warunków terenu i zapewniające niski poziom drgań transferowany na platformę.	Skrócenie czasu potrzebnego do przemieszczania się, zwiększenie efektywności i obszaru eksploracji. Zmniejszenie udziału operatora.
Wykorzystanie Zasobów In-Situ	Rozwój robotów potrafiących wydobywać lód wodny oraz przetwarzać regolit na materiały budowlane (druk 3D struktur na Księżycu).	Samowystarczalność przyszłych baz księżycowych i marsjańskich.
Robotyka Współpracująca i Teleobecność	Systemy zapewniające sprzężenie zwrotne, pozwalające operatorom sterować robotami na powierzchni ciał niebieskich z odczuciem oporu materii.	Zwiększenie efektywności prac geologicznych i budowlanych przy zachowaniu bezpieczeństwa ludzi.

5.2 Planowane misje kosmiczne

Potwierdzeniem zdefiniowanych trendów w robotyce kosmicznej są harmonogramy kluczowych misji operacyjnych, które bezpośrednio wykorzystują zaawansowane systemy zautomatyzowane. W poniższych zestawieniach ujęto misje skoncentrowane na operacjach orbitalnych (Tabela 5-2) oraz misje wykorzystujące platformy mobilne (Tabela 5-3).

Mnogość projektów oraz zbieżność celów strategicznych – zarówno w przypadku dużych agencji międzynarodowych, jak i ich krajowych odpowiedników – jasno sygnalizują, że robotyka kosmiczna, autonomia oraz zaawansowane systemy manipulacyjne stanowią filary dalszej eksploracji i ekspansji człowieka w kosmosie. Rozwiązania te są również nieodzownym elementem procesów komercjalizacji przestrzeni orbitalnej oraz budowy zdolności w zakresie wydobycia i wykorzystania zasobów lokalnych (ISRU).

Tabela 5-2 Lista głównych planowanych misji ISOS

Nazwa misji	Organizator	Cel misji	Planowane wystrzelenie
MRV (Mission Robotic Vehicle) / RSGS	Northrop Grumman (SpaceLogistics) / DARPA	Pierwsza komercyjna platforma serwisująca na GEO; instalacja modułów MEP (Mission Extension Pods), inspekcja i naprawy satelitów.	2025 / 2026
ADRAS-J2	Astroscale / JAXA	Faza II programu CRD2; pierwsze w historii aktywne usunięcie dużego śmiecia kosmicznego (górnego stopnia rakiety H-IIA) z orbity.	2026
ClearSpace-1	ClearSpace / ESA	Pierwsza misja usunięcia nieaktywnego, niespółpracującego satelity (PROBA-1) w celu demonstracji technologii czyszczenia orbity.	2029
OSAM-1 (Hardware Partnership)	NASA	Demonstracja tankowania satelity Landsat 7 i montażu anteny (obecnie NASA poszukuje partnerów komercyjnych do wykorzystania sprzętu).	2027 (TBD)
ETS-IX (Engineering Test Satellite-9)	JAXA	Satelita demonstracyjny do testowania zaawansowanej komunikacji oraz technologii robotycznego serwisowania na orbicie GEO.	2025 / 2026
In-Orbit Servicing (IOS) Mission	ASI/ Leonardo / Telespazio/ D-orbit	Demonstracja pełnego cyklu serwisowania: zbliżanie, dokowanie, tankowanie i wymiana modułów na orbicie LEO.	2026/2027
OTV (Orbital Transfer Vehicle)	CNES/ Exotrail	Rozwój inteligentnych holowników kosmicznych do precyzyjnego umieszczania ładunków i logistyki orbitalnej.	2026
ERASE	ESA	Demonstracja technologii Active Debris Removal (ADR) . Przechwycenie i bezpieczna deorbitacja niekooperatywnego satelity z niskiej orbity okołoziemskiej (LEO).	2030+
CAT-IOD	ESA	Demonstracja technologii Active Debris Removal (ADR) . Przechwycenie i bezpieczna deorbitacja kooperatywnego i przygotowanego satelity z niskiej orbity okołoziemskiej (LEO).	2030
ENCORE	ESA	Rozwój i weryfikacja na orbicie technologii refuellingu (tankowania) oraz wymiany modułów serwisowych w celu przedłużenia żywotności satelitów.	2030+

Nazwa misji	Organizator	Cel misji	Planowane wystrzelenie
RISE	ESA	Misja typu In-Orbit Servicing . Pierwsza europejska komercyjna próba zadokowania do klienta (satelity telekomunikacyjnego na orbicie GEO) w celu przejęcia kontroli nad jego pozycjonowaniem.	2028

Tabela 5-3 Lista głównych planowanych misji planetarnych

Nazwa misji	Organizator	Cel misji	Planowane wystrzelenie
LUPEX (Lunar Polar Exploration)	JAXA & ISRO (udział DLR)	Japońsko-indyjska misja na Księżyc; testowanie technologii mobilnych i wiertniczych w regionach polarnych. DLR dostarcza instrumenty i wspiera technologie wiertnicze oraz analizy lodu wodnego dla łazika.	2026/2028
MMX (Martian Moons eXploration)	JAXA (udział DLR i CNES)	Misja na Fobosa; Francja i Niemcy wspólnie budują łazika (IDEFIX), który przeprowadzi pierwszą mobilną eksplorację księżycza Marsa.	2026
ExoMars (Rosalind Franklin)	ESA	Poszukiwanie śladów życia na Marsie; unikalna zdolność wiercenia do 2 metrów pod powierzchnię.	2028
Argonaut (Medium Rover)	ESA	Dostarczenie europejskiego łazika naukowo-logistycznego na Księżyc w ramach misji lądownika Argonaut.	2030+
Lunar Terrain Vehicle (LTV)	NASA	Zaawansowany, załogowy i bezzałogowy pojazd transportowy dla misji Artemis; wysoka prędkość i autonomia.	2029/2030
Rashid 2	ZEA (MBRSC)	Emiracki łazik księżycowy mający badać właściwości regolitu i geologię powierzchniową.	2025/2026
Chang'e 7 & 8 (Rovers)	CNSA (Chiny)	Zaawansowane łaziki do poszukiwania lodu oraz demonstracji technologii druku 3D z regolitu księżycowego.	2026 / 2028

5.3 Ocena stanu polskich technologii

Polska posiada ugruntowaną, światową pozycję w obszarze mechanizmów kosmicznych oraz infrastruktury testowej. Nastąpiło przejście od dostarczania pojedynczych komponentów do budowy kompletnych platform i inteligentnych podsystemów. Polska intensywnie inwestuje w technologie przyszłości, które będą kluczowe dla gospodarki księżycowej i serwisowania orbitalnego. Polski sektor robotyki kosmicznej jest obecnie jednym z najbardziej konkurencyjnych w Europie Środkowej. Największym wyzwaniem pozostaje pokonanie tzw. "doliny śmierci" dla zaawansowanych algorytmów autonomii i ramion robotycznych (przejście z TRL 6 na TRL 9 poprzez misje IOD). Szczegółowa analiza i ocena poziomu technologii jest zawarta w Tabeli 5-4.

Tabela 5-4 Ocena stanu polskich technologii robotycznych w odniesieniu do domen technologicznych

Domena	Kluczowe kompetencje	Kluczowe Polskie Podmioty	Projekt/ Produkt i poziom TRL	Zastosowanie
TD13BI <i>Manipulatory, chwytaki, Narzędzia</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kinematyka i Dynamika Manipulatorów. • Dynamika i mechanika orbitalna. • Projektowanie Chwytek i Narzędzi. • Mechatronika Przegubów i Napędów. 	PIAPS SENER-PL KOSMOK ASTRONIKA	<ul style="list-style-type: none"> • TITAN (TRL6/ PIAPS) ramię o 7 stopniach swobody • LARIS (TRL6/ PIAPS) chwytak do łapania przygotowanych i nieprzygotowanych satelit. • MULTIS (TRL5/ PIAPS) uniwersalny chwytak. • TED (TRL4/ PIAPS) Planetarny System wymiany narzędzi • HCS (TRL-8/ SENER-PL) podsystem w systemie cumowanie IBDM. • CIRI (TRL3/ KOSMOK) interfejs do tankowania przygotowanych satelit. • MANUS (TRL4¹/ PIAPS) planetarne ramię robotyczne na misję Argonaut (ESA). • CLAMPING Mechanizm (TRL-3/ SENER-PL) chwytak do łapania nieprzygotowanych satelit. 	ISOS
TD13BII <i>Układy zawieszenia platform mobilnych</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Inżynieria Mechaniczna i Układy Jezdne. • Terramechanika i Dynamika Ruchu. • Inżynieria Materiałowa i Środowiskowa. • Integracja i Testowanie (AIT/AIV). 	ASTRONIKA PIAPS CBK PAN	<ul style="list-style-type: none"> • GALEON (TRL3/ PIAPS) projekt układu zawieszenia do łazika w ramach inicjatywy GBARD (ESA). • DISTANT (TRL4²/ PIAPS) system ochrony przed pyłem i kurzem do układu zawieszenia łazika. • KALMAN (TRL4³/ AGH Space Systems) system zawieszenia do platformy mobilnej. • LEGENDARY (TRL4⁴/ Politechnika Rzeszowska) system zawieszenia do platformy mobilnej. • BUCKET DRUM (TRL5/ CBK PAN) zintegrowany system koła i urządzenia kopiacego. • GALAGO (TRL4/ ASTRONIKA) skaczący robot eksploracyjny. • MOLE (TRL9/ ASTRONIKA) penetrator młotkujący. 	ISRU
TD13AI <i>Planetarna eksploracja robotyczna</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Inżynieria Systemowa Misji Robotycznych. • Projektowanie Architektury Robotycznych. • Analizowanie i symulowanie środowiska pracy. • Modelowanie i Symulacje Cyfrowe (Digital Twins). 	ASTRONIKA PIAPS ASYNCHRONICS	<ul style="list-style-type: none"> • GALAGO (TRL4/ ASTRONIKA) skaczący robot eksploracyjny. • PRO-ACT (TRL4/ PIAPS) system demonstrujący zdolności współpracy grupy robotów w celu budowy i rozbudowy infrastruktury na Księżycu. • RACER (TRL4/ PIAPS) system autonomicznej nawigacji dla platformy mobilnej do aplikacji na księżycu. • SAVIOR (TRL6/ ASYNCHRONICS) środowisko symulacyjne do symulowania czujników i całych systemów GNC 	ISRU

¹ Projekt w realizacji, TRL planowany na Q1/2026

² Projekt w realizacji, TRL planowany na Q2/2026

³ Jest to projekt studencki

⁴ Jest to projekt studencki

Domena	Kluczowe kompetencje	Kluczowe Polskie Podmioty	Projekt/ Produkt i poziom TRL	Zastosowanie
TD13AII <i>Orbitalne systemy robotyczne</i>	<ul style="list-style-type: none"> Inżynieria Systemowa i Koncepcyjna. Zaawansowana Kontrola i Autonomia. Manipulacja i Interfejsy Mechaniczne. 	PIAPS GMV PL CREOTECH AROB CBK PAN PUT WAT	<ul style="list-style-type: none"> RAVEN (TRL2/ PIAPS) rozwój uniwersalnej platformy satelitarnej do wykonywania operacji na orbicie. 	ISOS
TD13CI <i>Systemy sensoryczne robotów</i>	<ul style="list-style-type: none"> Wizja Komputerowa i Przetwarzanie Obrazu. Aktywne Metody Skanowania. Percepcja Stanu Procesu. 	PIAPS SCANWAY KP LABS	<ul style="list-style-type: none"> ORBITA-V (TRL4/ PIAPS) system analizy chmury punktów z kamer TOF i lokalizowanie pozycji interfejsu na potrzeby łapania obiektów na orbicie. SCS (TRL9/ SCANWAY) seria systemów wizyjnych zaprojektowanych głównie w celu wspierania różnych misji i procesów decyzyjnych. LION (TRL7/ KP LABS) platforma sprzętowa do przetwarzania danych na platformie. 	ISOS
TD13CII <i>Sterowanie robotami</i>	<ul style="list-style-type: none"> Wizja komputerowa i percepcja otoczenia. Teoria sterowania. Kinematyka i Dynamika Manipulatorów. Dynamika i mechanika orbitalna. 	PUT PIAPS CBK PAN	<ul style="list-style-type: none"> TITAN (TRL6/ PIAPS) ramię o 7 stopniach swobody który wykonuje proces łapania interfejsu przy wykorzystaniu chwytaka LARIS i informacji z systemu ORBITA-V. OPTIM (TRL4/ CBK PAN) opracowanie algorytmów planowania trajektorii i sterowania adaptacyjnego. SR-DRL (TRL4/ CBK PAN) opracowanie efektywnej metodologii uczenia na bazie zdobytej wiedzy w głębokim uczeniu maszynowym. PUT Rover (TRL4/ PUT) system analizy chmury punktów z kamer TOF i lokalizowanie pozycji interfejsu na potrzeby łapania obiektów na orbicie. 	ISOS
TD13CIII <i>Aktuatory i napędy robotów</i>	<ul style="list-style-type: none"> Inżynieria Elektromechaniczna Napędów. Przekładnie i Mechanika Precyzyjna. Sensoryka Wewnętrzna. Elektronika Sterująca Napędami. 	PIAPS ASTRONIKA	<ul style="list-style-type: none"> TITAN (TRL6/ PIAPS) ramię o 7 stopniach swobody z przegubami robotycznymi opracowanymi przez PIAPS. LARIS (TRL6/ PIAPS) chwytak z napędem liniowym i elektroniką sterującą a paca silnika BLDC. Liniowy aktuator do misji ATHENA (TRL4/ ASTRONIKA) chwytak z napędem liniowym. MOLE (TRL9/ ASTRONIKA) penetrator młotkujący. MANUS (TRL4⁵/ PIAPS) planetarne ramię robotyczne na misję Argonaut (ESA) wyposażone w przeguby opracowane przez PIAPS. 	ISOS/ ISRU

⁵ Projekt w realizacji, TRL planowany na Q1/2026

Domena	Kluczowe kompetencje	Kluczowe Polskie Podmioty	Projekt/ Produkt i poziom TRL	Zastosowanie
TD13CIV <i>Interfejsy sterujące</i>	<ul style="list-style-type: none"> Architektura Oprogramowania. Technologie Teleobecności i Teleoperacji. Projektowanie Interfejsów Człowiek-Komputer. Autonomia Współdzielona. 	CLEVERHIVE	<ul style="list-style-type: none"> RCC (TRL4/ CLEVERHIVE) system do zarządzania misją planetarną z wykorzystaniem jedno lub wielo-agentowego systemu robotycznego.. 	ISRU
TD13CV <i>Infrastruktura testowa</i>	<ul style="list-style-type: none"> Inżynieria Naziemnego Sprzętu Wspomagającego (GSE). Tworzenie i Zarządzanie Środowiskami Analogowymi. Modelowanie i Symulacje Cyfrowe (Digital Twins). Metrologia i Kwalifikacja. 	CBK PAN PUT ASTRONIKA AGH	<p>Detaliczny opis wymienionej poniżej infrastruktury testowej jest zawarta w paragrafie 7.2.3.</p> <ul style="list-style-type: none"> Infrastruktura do Testowania Platform mobilnych (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska) Wielkowymiarowe Laboratorium mikro grawitacji (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska) Stanowisko do symulowania mikro grawitacji z planarnym manipulatorem (CBK PAN) Stanowisko robotyczne: KUBE (Politechnika Łódzka) Stanowisko do Testów eksperymentów powierzchniowych (ASTRONIKA SP. z o. o.) Stanowisko do Testów Systemów Jeźdnych i Interakcji z Podłożem (CBK PAN) Zewnętrzny poligon testowy do platform mobilnych (AGH) 	ISRU
TD5BII <i>GNC</i>	<ul style="list-style-type: none"> Inżynieria Sensorów Nawigacyjnych (Sensors). Technologie Aktuatorów Sterujących. Fuzja Danych i Przetwarzanie Sygnałów. Implementacja Sprzętowa i AIT. Dynamika i mechanika orbitalna. Modelowanie i Symulacje Cyfrowe. 	GMV PL CBK PAN CREOTECH	<ul style="list-style-type: none"> HyperSat (TRL9/ CREOTECH) platforma satelitarna zawierająca w sobie własne algorytmy i jednostki GNC. EagleEye (TRL9/ CBK PAN) opracowanie układu utrzymywania pozycji i orientacji satelity. HERa GNC (TRL7/ GMV PL) opracowanie układu utrzymywania pozycji i orientacji satelity. Modular ADCS (TRL6-7/ GMV PL) Rozwój uniwersalnego oprogramowania ADCS dla małych satelitów. Walidacja MiL/SiL w środowisku symulacyjnym ASTRA. CREAM-IOD (TRL5/ GMV PL) system automatycznej oceny ryzyka kolizji i projektowanie manewrów unikania (CAM) w celu zwiększenia autonomii misji. COMET INTERCEPTOR (TRL6-7/ GMV PL) podsystem GNC oraz analizę misji (Mission Analysis) dla przechwycenia komety LPC/DNC. 	ISAM/OSAM

Domena	Kluczowe kompetencje	Kluczowe Polskie Podmioty	Projekt/ Produkt i poziom TRL	Zastosowanie
TD14BIII <i>ISRU</i> <i>procesowanie i produkcja</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Terramechanika. • Umiejętności symulacji i modelowania. • Separacja i Oczyszczanie Surowców. • Mechaniczne Przetwarzanie i Transport Materiałów. 	CBK PAN ASTRONIKA AGH	<ul style="list-style-type: none"> • RCE (TRL6/ CBK PAN) narzędzie do kopania i pobierania regolitu. • PACKMOON (TRL4/ CBK PAN) narzędzie do pobierania próbek materiałów w warunkach mikro grawitacji. • BUCKET DRUM (TRL5/ CBK PAN) skalowalny system kopiący do wykorzystania na platformie mobilnej. • COMPACTOR (TRL4/ ASTRONIKA) narzędzie do ubijania sypek powierzchni regolitu księżycowego. • DISTOBEE (TRL4/ AGH) system zbierania i przesiewania regolitu księżycowego. • MOON HARVESTING (TRL2/ CBK PAN) opracowanie koncepcji kopalni wydobywającej regolit na Księżycu w warunkach obniżonej grawitacji. • PETER (TRL6/ CBK PAN) kampania testowa procesu kopania regolitu księżycowego w warunkach mikro grawitacji pod kątem modelowania i korelacji modeli. 	ISRU
TD15AIV <i>Czujniki sił i momentów</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Projektowanie mechaniczne i materiałowe. • Elektronika i Kondycjonowanie Sygnałów. • Metrologia, Kalibracja i Testowanie. • Technologie sensorów. 	PIAPS	<ul style="list-style-type: none"> • eFTS (TRL8⁶/ PIAPS) w pełni polska technologia budowy czujników sił i momentów do zastosowań planetarnych. 	ISAM/OSAM/ ISRU

⁶ Projekt w realizacji, TRL planowany w Q2/2027

6 Analiza konkurencji i poziomów TRL w odniesieniu do rynku Europejskiego

W obszarze robotyki kosmicznej oprócz konkurencji występuje zjawisko kooperacji. Podczas gdy w niektórych obszarach firmy ze sobą konkurują, to niejednokrotnie ze sobą współpracują, zarówno w projektach Komisji Europejskiej jak i misjach Agencji Kosmicznych (ESA, NASA). Nie mniej jednak poniższa tabela przedstawia najważniejsze domeny technologiczne zdefiniowane pod kątem robotyki kosmicznej wraz z identyfikacją poziomu TRL. Do porównania użyto największych firm w europejskim sektorze kosmicznym, zaznaczając iż ta analiza nie uwzględnia startupów i małych firm, których liczba rośnie w dużym tempie. Jest to głównie spowodowane zmianą podejścia do zarządzania ryzykiem i kształtowaniem się rynku komercyjnego który rządzi się innymi prawami niż rynek instytucjonalny.

Tabela 5-5 Analiza konkurencji i poziomów TRL

Domena	Konkurencja Europejska	KINETIK/DLR	AIRBUS	THALES	REDWIRE	LEONARDO	ALMATECH	SENER	GMV SPAIN	ISPACE	IBOSS	POLSKA
TD13BI- Manipulatory, chwytki, Narzędzia	Chwytki LAR	-	-	-	-	-	TRL5	TRL4	-	-	-	TRL6
	Chwytki uniwersalne dedykowane do ISOS	TRL7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Chwytki uniwersalne planetarne	-	-	-	-	TRL7	-	-	-	-	-	TRL5
	Ramiona Robotyczne dedykowane do ISOS	TRL7	TRL9	-	TRL7	-	-	-	-	TRL6	-	TRL6
	Systemy dokowania	-	TRL6	-	-	-	-	-	-	-	-	TRL3
	Robotyczna jednostka sterująca (SW + HW)	TRL7	TRL9	TRL7	TRL7	TRL6	-	-	TRL6	-	-	TRL3
	Planetarne systemy wymiany narzędzi	-	-	-	-	TRL4	-	-	-	-	-	TRL4
	Orbitalne systemy wymiany narzędzi	-	-	-	-	-	-	TRL7	-	-	TRL7	-
	Interfejsy do tankowania	-	-	-	-	-	-	TRL7	-	-	TRL6	TRL4
	Systemy Wizyjne	-	TRL8	TRL6	-	-	-	-	-	TRL6	-	-
TD13BII Układy zawieszania platform mobilnych	Systemy lokomocji	TRL7	TRL8	TRL8	-	-	-	-	TRL6	-	-	TRL3
TD13AI Planetarna eksploracja robotyczna	TD13AI Planetarna eksploracja robotyczna	TRL8										TRL5
TD5BII GNC RPO	TD5BII GNC RPO	-	-	TRL6	-	-	-	-	-	-	-	TRL6
TD14BIII ISRU procesowanie i produkcja	TD14BIII ISRU procesowanie i produkcja	TRL7	-	-	-	-	TRL5	-	-	TRL6	-	TRL6

Dane w Tabeli 5-5 pokazują jednoznacznie iż technologia w Polsce w większości wypadków nie odbiega znacząco od poziomów europejskich. W szczególności widać to w przypadku specjalistycznych chwytaków do łapania nieprzygotowanych obiektów poprzez LAR (poziom TRL w Polsce jest wyższy niż u Europejskiej konkurencji). Polska dominuje w specyficznych niszach mechanicznych. Projekt ExoMars Ramps (Astronika) czy mechanizmy zwalniające SENER Polska to technologie o najwyższym TRL (9), bez których europejskie misje by się nie odbyły. Główną różnicą jest Flight Heritage dla całych systemów. Podczas gdy Airbus ma ramię ERA pracujące na ISS od lat, polskie ramię TITAN (PIAP Space) dopiero przygotowuje się do misji operacyjnych. Europa (DLR, Ispace) ma również przewagę w gotowych platformach lądowików i łazików, podczas gdy Polska skupia się na dostarczaniu podsystemów do tych platform.

7 Analiza Kompetencji i Potencjału w Polsce

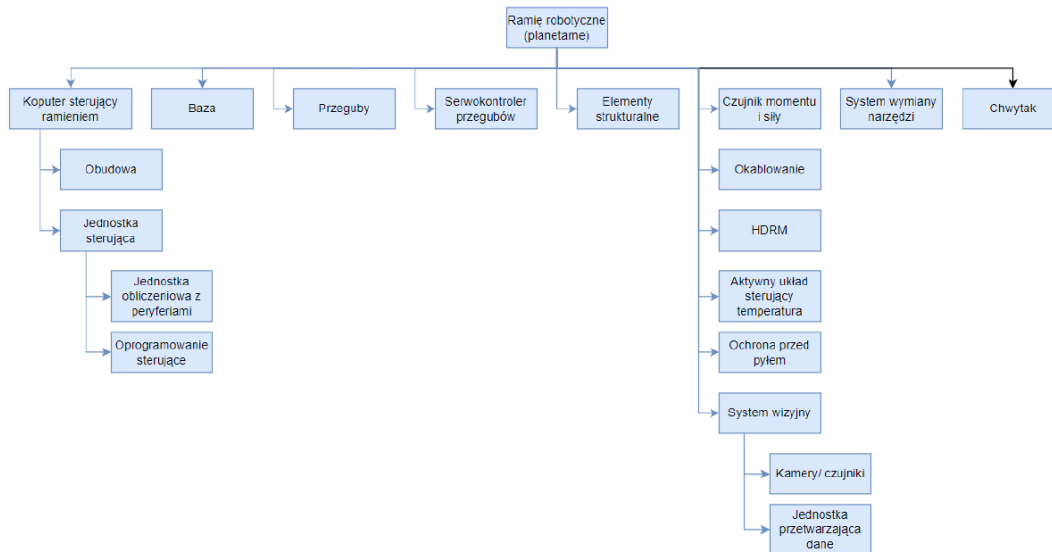
7.1 Identyfikacja istniejących technologii

Zgodnie z przyjętą klasyfikacją domen technologicznych opisaną w [RD-5] w ESA, robotyka planetarna i orbitalna wchodzi w skład dwóch głównych domen:

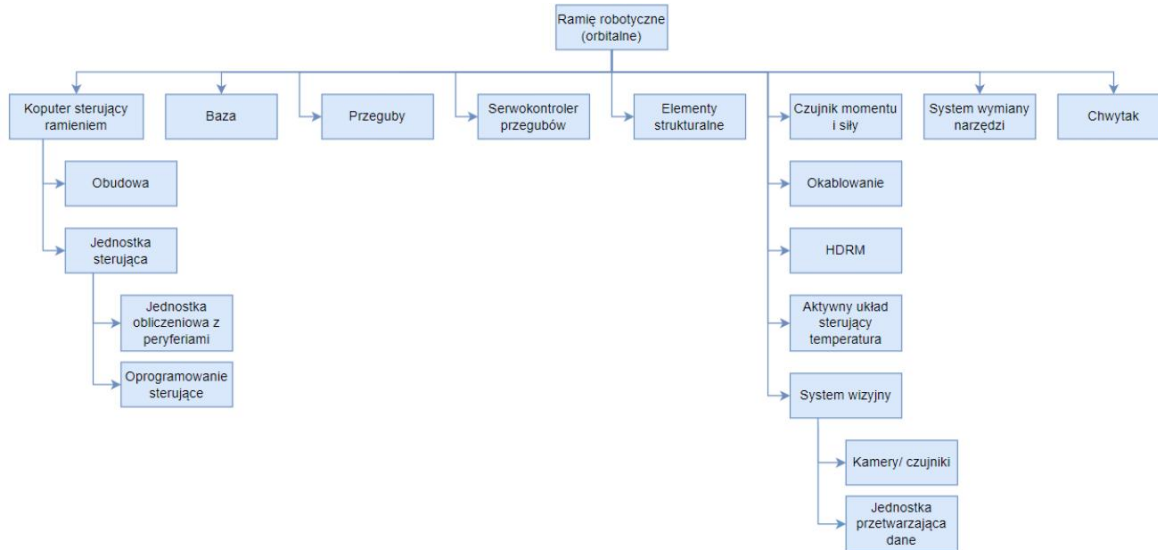
- TD 13: Automation, Telepresence and Robotics (ATR). To tutaj znajdują się manipulatory, systemy mobilności łazików, autonomiczna nawigacja oraz technologie ISAM (In-Space Assembly and Manufacturing).
- TD 15: Mechanisms. Ten obszar obejmuje serwonapędu (ang. actuators), przeguby, systemy separacji oraz urządzenia do dokowania i chwytania.

W celu identyfikacji technologii i elementów składowych, zostały opracowane na potrzeby ekspertyzy następujące drzewa produktów:

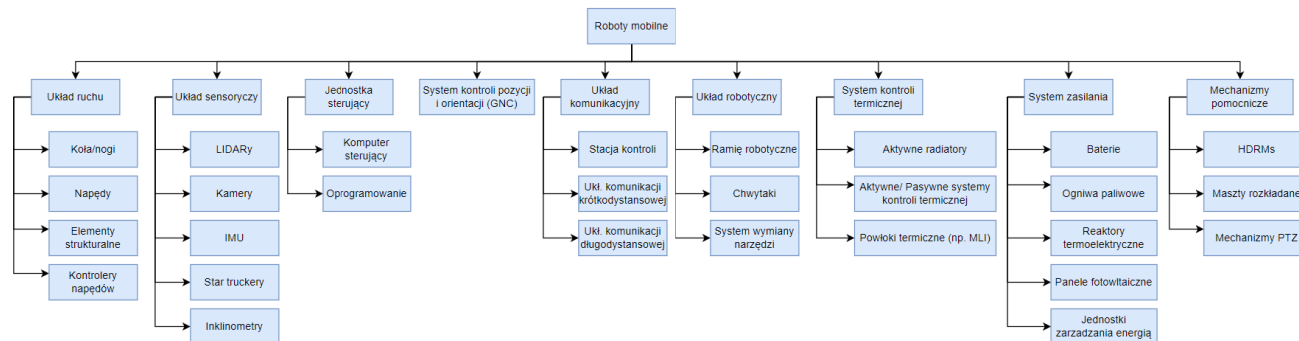
- drzewo manipulatora do zastosowań planetarnych, przedstawione na Rysunek 7-1,
- drzewo manipulatora do zastosowań planetarnych, przedstawione na Rysunek 7-2
- drzewo platformy mobilnej do zastosowań planetarnych, przedstawione na Rysunek 7-3



Rysunek 7-1 Drzewo produktu: manipulator do zastosowań planetarnych



Rysunek 7-2 Drzewo produktu: manipulator do zastosowań orbitalnych



Rysunek 7-3 Drzewo produktu: platforma mobilna (tazik)

7.2 Identyfikacja polskich podmiotów zajmujących się robotyką kosmiczną

Poniższe zestawienie zawiera listę zidentyfikowanych podmiotów zajmujących się robotyką kosmiczną. Identyfikacja została przeprowadzona na bazie wywiadów oraz informacji publicznych.

7.2.1 Instytuty naukowe

Instytuty Naukowe zajmujące się w Polsce robotyką kosmiczną:

- i. CBK PAN- Laboratorium Mechatroniki i Robotyki Satelitarnej

Laboratorium Mechatroniki i Robotyki Satelitarnej (LMRS) działające w strukturach Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN) stanowi wiodący w Polsce ośrodek badawczo-rozwojowy w obszarze zaawansowanych systemów mechanicznych i robotycznych przeznaczonych do pracy w środowisku kosmicznym. Jednostka ta odgrywa kluczową rolę w budowaniu krajowych kompetencji w ramach domeny TD 13 (Automation, Telepresence and Robotics) oraz TD 15 (Mechanisms) według klasyfikacji ESA Technology Tree.

- ii. Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej (IRIM) na Politechnice Poznańskiej

Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej (IRIM) na Politechnice Poznańskiej (PP) od ponad 20 lat prowadzi aktywną działalność w obszarze autonomii robotów mobilnych. Nasze główne kierunki badań obejmują lokalizację i mapowanie, percepcję oraz metody uczenia maszynowego w dziedzinie uczenia się robotów (robot learning).

Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej jest częścią Wydziału Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej. Kadra Instytutu składa się z 25 pracowników naukowo-dydaktycznych, 24 doktorantów oraz 9 pracowników administracyjnych i technicznych. Badania w zakresie robotyki kosmicznej prowadzone są w Zakładzie Robotyki, który skupia 12 pracowników naukowo-dydaktycznych oraz 14 doktorantów.

Od marca 2022 roku Politechnika Poznańska jest członkiem sieci ESA_Labs. Działalność ESA_lab@PUT koncentruje się na robotyce, radiokomunikacji, systemach raketowych oraz obserwacji satelitarnej. Relacje z Europejską Agencją Kosmiczną (ESA) budowane są również poprzez realizację projektów badawczych, w których zespół Politechniki Poznańskiej występował jako partner konsorcjum.

7.2.2 Firmy

Firmy z sektora kosmicznego zajmujące się w Polsce robotyką kosmiczną:

i. ASTRONIKA sp. z o.o.

Astronika Sp. z o.o. to jedna z czołowych polskich firm sektora kosmicznego, założona w 2013 roku przez grupę inżynierów z Centrum Badań Kosmicznych PAN. Firma specjalizuje się w projektowaniu, budowie, testowaniu i integracji zaawansowanych mechanizmów kosmicznych oraz instrumentów badawczych.

iii. PIAP Space sp. z o.o.

PIAP Space jest jedną z najważniejszych polskich spółek inżynierskich w sektorze kosmicznym, specjalizującą się w robotyce orbitalnej, mechanizmach satelitarnych oraz urządzeniach wspomagających testy i integrację satelitów (MGSE). Spółka została powołana w 2017 roku przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, przejmując i rozwijając jego wieloletnie doświadczenie w budowie systemów robotycznych.

ii. SENER sp. z o.o.

SENER sp. z o.o. (SENER Polska) to jeden z kluczowych podmiotów polskiego sektora kosmicznego, będący częścią międzynarodowej grupy inżynierskiej SENER. Firma specjalizuje się w zaawansowanej inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem mechanizmów precyzyjnych i robotyki orbitalnej.

iii. GMV Innovating Solutions Sp z o.o.

GMV Innovating Solutions Sp. z o.o. (GMV Polska) to polski oddział hiszpańskiej grupy technologicznej GMV, który od 2008 roku wyrósł na jednego z najważniejszych graczy w polskim sektorze kosmicznym. Choć grupa kojarzona jest głównie z oprogramowaniem, polski zespół wyspecjalizował się w dostarczaniu algorytmów nawigacji, sterowania i autonomii.

iv. KP LABS Sp. z o.o.

KP Labs definiuje nową paradygmatykę w europejskim sektorze NewSpace, koncentrując się na dostarczaniu zaawansowanych rozwiązań w obszarze pokładowego przetwarzania danych (On-Board Data Processing – OBDP) oraz implementacji algorytmów Sztucznej Inteligencji (AI/ML) w architekturach systemów krytycznych. W kontekście robotyki kosmicznej, podmiot ten pełni rolę dostawcy inteligentnej warstwy sterowania i percepcji, odpowiadając za implementację funkcji autonomii poziomów E3 i E4 (zgodnie ze standardem ECSS-E-ST-70-11C).

v. AROBS Polska Sp. z o.o.

Działalność AROBS Polska koncentruje się na technologiach wspierających kontrolę i zarządzanie instrumentami satelitarnymi, wpisując się w domeny TD 6 (Data Handling), TD 13 (Automation and Robotics) oraz TD 15 (Mechanisms) według klasyfikacji ESA:

- Oprogramowanie Wbudowane Krytyczne dla Misji: Rozwój oprogramowania niskiego poziomu (Bootloaders, Drivers) oraz aplikacji pokładowych zgodnych z rygorystycznymi standardami jakości ECSS (European Cooperation for Space Standardization).
- Systemy Sterowania Instrumentami: Projektowanie i implementacja układów sterowania dla

zaawansowanych instrumentów badawczych i robotycznych.

- Elektronika Satelitarna: Rozwój sterowników silników (Motor Controllers), modułów zarządzania zasilaniem oraz jednostek kontrolnych dla mechanizmów chwytających i pozycjonujących.
- Systemy FPGA: Projektowanie logiki cyfrowej na potrzeby szybkiego przetwarzania danych oraz sterowania w czasie rzeczywistym.

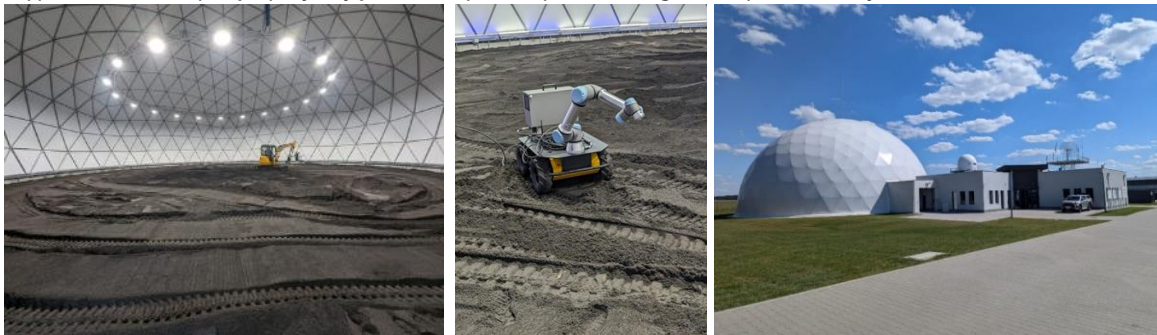
7.2.3 Laboratoria

Laboratoria specjalizujące się w badaniach i testach potrzebnych w rozwoju i walidacji systemów robotycznych. W tym paragrafie postawiono nacisk na specjalistyczne infrastruktury testowe niezbędne do walidacji i testowania systemów robotycznych. Przedstawiona poniżej lista zawiera opis stanowiska/ infrastruktury wraz z oznaczeniem do jakich celów dane stanowisko może być użyte. Dokładniejsze opisy są przedstawione w dalszych paragrafach.

LP.	Nazwa	Możliwe zastosowanie
1	Infrastruktura do Testowania Platform mobilnych (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska)	Platformy mobilne- testy systemów lokomocji i nawigacji
2	Wielkowymiarowe Laboratorium mikrogravitacji (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska)	Systemy robotyczne wyposażone w ramiona i pracujące w warunkach mikrogravitacji.
3	Stanowisko do symulowania mikrogravitacji z planarnym manipulatorem (CBK PAN)	Systemy robotyczne wyposażone w ramiona i pracujące w warunkach mikrogravitacji.
4	KUBE (Politechnika Łódzka)	Systemy robotyczne wyposażone w ramiona i pracujące w warunkach mikrogravitacji. Testy systemów wizyjnych.
5	Stanowisko do Testów eksperymentów powierzchniowych (ATSRONIKA SP. z o. o.)	Platformy mobilne- testy systemów lokomocji i nawigacji
6	Stanowisko do Testów Systemów Jezdnych i Interakcji z Podłożem (CBK PAN)	Podsystemy platform mobilnych- testy podsystemów lokomocji

i. Infrastruktura do Testowania Platform mobilnych (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska)

Hala testowa o powierzchni 700 m² do testów mobilnych robotów eksploracyjnych i latających, wyposażona w kopułę z projekcją 360° horyzontu planetarnego i sfery niebieskiej.



Rysunek 7-4. Infrastruktura do Testowania Platform mobilnych (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska)

Pole symulacyjne odzwierciedla powierzchnię ciał niebieskich wraz z systemem śledzenia pozycji oraz orientacji/samoorientacji. Obiekt obejmuje następujące udogodnienia umożliwiające prototypowanie i testowanie algorytmów nawigacji, mapowania, autonomii i innych:

W pełni konfigurowalne środowisko: Możliwość kształtowania terenu poprzez przemieszczanie gleby i skał wewnątrz kopuły, co pozwala na testy w realistycznych konfiguracjach topograficznych (regolit, skały, krater). Dedykowana minikoparka wspomaga szybką zmianę i rekonfigurację terenu.

Kontrolowane oświetlenie: Dowolna regulacja natężenia, kierunku i barwy światła, wraz z możliwością

projekcji konstelacji gwiazd na powierzchni kopuły. Pozwala to na testowanie nawigacji wizyjnej w różnych warunkach oraz ocenę nawigacji opartej na śledzeniu gwiazd (star tracking). Zmienne warunki oświetleniowe są również cenne przy testowaniu percepcji i rozumienia sceny w oparciu o inne czujniki.

Wielokamerowy system zamontowany pod sufitem generuje dane referencyjne dla każdego robota wewnątrz kopuły. Śledzi on wiele obiektów jednocześnie i odtwarza ich pozę z wysoką precyzją i częstotliwością próbkowania. Umożliwia to dokładne wyznaczanie pozycji i ocenę trajektorii. Informacje te mogą być również wykorzystywane jako sygnał zwrotny w systemach sterowania.

Skanowanie 3D powierzchni: Możliwość pozyskania chmury punktów 3D aktualnej konfiguracji środowiska testowego (gleba, skały) przy użyciu precyzyjnego skanera 3D klasy geodezyjnej. Gęste chmury punktów odzwierciedlające ukształtowanie terenu są kluczowe dla oceny algorytmów mapowania oraz eksperymentów związanych z formowaniem terenu (budowa, wykopaliska itp.).

Centrum Kontroli Misji: Połączone ze środowiskiem symulacyjnym, umożliwia testowanie algorytmów zdalnego sterowania, w tym symulację opóźnień, шумów i zakłóceń. Odzwierciedla to realistyczne warunki komunikacji dalekosiężnej z łazikami, pozwalając na weryfikację algorytmów sterowania i nadzoru odpornych na opóźnienia.

ii. Wielkowymiarowe Laboratorium mikrogravitacji (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska)

Stanowisko umożliwia symulowanie warunków mikro grawitacji w dwóch wymiarach. Jest to stanowisko wielkoformatowe o wymiarach: 5x5m, którego zasada działania opiera się na wytworzeniu poduszki powietrznej pod platformami testowymi, które wyposażone są w specjalne pady. Jest to koncepcja odwrotna do klasycznych łożysk powietrznych, ponieważ w tym stanowisku powietrze wdmuchiwane jest pod obiekty testowe przez szereg otworów umieszczonych w stanowisku. Pozwala to na wyeliminowanie konieczności wyposażenia platform testowych w systemy sprężonego powietrza, jednak wadą jest ograniczona nośność systemu.



Rysunek 7-5 ii. Wielkowymiarowe Laboratorium mikrogravitacji (Kampus Kąkolewo- Politechnika Poznańska)

iii. Stanowisko do symulowania mikrogravitacji z planarnym manipulatorem (CBK PAN)

Kluczowym elementem stanowiska jest wysokoprecyzyjny stół granitowy o dużej masie i powierzchni roboczej charakteryzującej się ekstremalnie niską chropowatością. Dzięki zastosowaniu granitu jako bazy, stanowisko zapewnia doskonałą stabilność termiczną oraz tłumienie drgań, co jest niezbędne do precyzyjnych pomiarów fizycznych.



Rysunek 7-6 iv. Stanowisko do symulowania mikrogravitacji z planarnym manipulatorem (CBK PAN)

Podstawowym elementem stanowiska jest płyta granitowa wykonana w wysokiej klasie dokładności płaskości (zgodnie z normą DIN 876/00). Gładka powierzchnia służy jako płaszczyzna odniesienia dla obiektów poruszających się na poduszkach powietrznych. Obiekty testowe (np. makiety satelitów, chwytaki, manipulatory) są osadzone na specjalnych stopach zasilanych sprężonym powietrzem. Tworzy to cienki film powietrzny (mikronowej grubości) między stołem a obiektem, niemal całkowicie eliminując tarcie powierzchniowe.

Stanowisko służy do emulacji warunków panujących na orbicie w układzie 2D (trzy stopnie swobody: dwa translacyjne i jeden rotacyjny). Jest to kluczowe narzędzie w domenach TD 13 i TD 15 (wg ESA Technology Tree) do następujących zadań:

- Badanie Dynamiki Kontaktowej: Symulacja fizycznego kontaktu między dwoma obiektami na orbicie (np. podczas dokowania systemu LARIS lub przechwytywania satelity przez ramię robotyczne). Pozwala na badanie zjawisk odbicia i transferu pędu bez wpływu tarcia.
- Weryfikacja Algorytmów Sterowania: Testowanie algorytmów AOCS (Attitude and Orbit Control System) oraz systemów GNC (Guidance, Navigation, and Control) w warunkach swobodnego ruchu.
- Testy Systemów Chwytających: Walidacja mechanizmów chwytających w fazie przechwytywania, gdzie minimalna siła tarcia mogłaby zafałszować wynik testu wydajności mechanizmu.
- Eksperymenty z Napędami Gazowymi: Testowanie małych silników gazowych (cold gas thrusters) używanych do manewrowania makietami satelitów na płaszczyźnie stołu.

iv. KUBE (Politechnika Łódzka)

KUBE to zaawansowane, mobilne stanowisko dydaktyczno-badawcze oparte na robotach sześćoosiowych firmy KUKA (seria KR AGILUS). W kontekście sektora kosmicznego, system ten może służyć jako stanowisko do symulowania warunków mikrogravitacji w przestrzeni. Podobne stanowiska pracują już i są wykorzystywane w Niemczech (DLR, opis stanowiska zawarty jest w: [RD-2]) oraz Hiszpani (GMV, opis stanowiska wraz z przykładem jego aplikacji zawarty jest w: [RD-3]).



Rysunek 7-7.KUBE (Politechnika Łódzka)

v. Stanowisko do Testów eksperymentów powierzchniowych (ASTRONIKA SP. z o. o.)

Astronika dysponuje własną infrastrukturą badawczą typu MoonYard, która jest wyposażona w: piaskownicę z możliwością zastosowania różnych rodzajów symulantów regolitu księżycowego, system odpylania regolitu (regolith blower) oraz napęd suwnicowy w osi X, umożliwiający odciążenie testowanego urządzenia (offloading), jeśli wymagają tego warunki eksperymentu.



Rysunek 7-8 Moonyard w Astronice

vi. Stanowisko do Testów Systemów Jezdnych i Interakcji z Podłożem (CBK PAN)

Stanowisko testowe kół (**WTS – Wheel Test Stand**) wraz z jednostką przygotowania podłoża (**SPS – Sample Preparation Stand**) stanowi zaawansowaną infrastrukturę badawczą służącą do walidacji systemów jezdnych łazików planetarnych. System ten umożliwia precyzyjne badanie interakcji koła z regolitem w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych.

Stanowisko posiada dwa liniowe stopnie swobody (2-DoF), które pozwalają na realistyczną symulację ruchu pojazdu:

- Ruch wzdłużny: Symuluje przemieszczanie się łazika nad podłożem.
- Ruch pionowy: Służy do monitorowania dynamiki zawieszenia oraz rejestracji parametrów takich jak sinkage (głębokość zapadania się koła w gruncie).



Rysunek 7-9 Stanowisko testowe kół

Konstrukcja stanowiska została zaprojektowana tak, aby umożliwić testowanie urządzeń w warunkach odpowiadających grawitacji księżycowej:

- 6-osiowy czujnik sił i momentów (Load Cell): Łączy testowane urządzenie (UUT – Unit Under Test) ze strukturą wsporczą, pozwalając na precyzyjny pomiar wszystkich sił reakcji oddziałujących na łazik podczas jazdy.
- System kompensacji grawitacji: Poziomy element wsporczy jest połączony z balanserem sprężynowym, który zapewnia stałą siłę naciągu skierowaną ku górze. Dzięki temu możliwe jest zredukowanie nacisku pionowego koła na podłoże do wartości odpowiadających ciężarowi na Księżycu (ok. 1/6 grawitacji ziemskiej).
- Zintegrowany enkoder liniowy: Zamontowany w bloku prowadzącym, pozwala na zautomatyzowany i bardzo dokładny pomiar przemieszczeń pionowych.

7.2.4 Zespoły

W tej kategorii, główny nacisk został położony na zespoły studenckie i akademickie, które realizują projekty związane z robotyką kosmiczną na potrzeby projektów wewnętrznych uczelni lub też na potrzeby uczestnictwa w konkursach międzynarodowych dotyczących budowy i testów platform mobilnych.

W Polsce funkcjonuje kilkanaście elitarnych zespołów studenckich (kół naukowych), które projektują zaawansowane systemy robotyczne, głównie w formie analogów łazików marsjańskich. Zespoły te regularnie zajmują czołowe miejsca w międzynarodowych zawodach, takich jak University Rover Challenge (URC) w USA oraz European Rover Challenge (ERC) w Polsce.

Poniżej znajduje się identyfikacja kluczowych zespołów studenckich wraz z ich najważniejszymi osiągnięciami w latach 2024–2025.

Tabela 7-1 Zestawienie zespołów akademickich

Zespół	Uczelnia	Nazwa łazika	Główne osiągnięcia
AGH Space Systems	Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie	Kalman	1. miejsce w Australian Rover Challenge 2025; czołowe miejsca w ERC 2024.
Legendary Rover Team	Politechnika Rzeszowska	Legendary	1. miejsce wśród europejskich drużyn na URC 2025 (najwyżej sklasyfikowany zespół z Europy w USA).
SKA Robotics	Politechnika Warszawska (SKA)	Sirius II	8. miejsce na ERC 2025; udział w finale URC 2025; 3. miejsce na Anatolian Rover Challenge 2024.
KNR Rover Team	Politechnika Warszawska (KNR)	HAL-062	9. miejsce na ERC 2025; finalista URC 2025 (USA).

Zespół	Uczelnia	Nazwa łazika	Główne osiągnięcia
Raptors	Politechnika Łódzka	Raptors	Sukcesy w zawodach robotyki ratunkowej (ERL Emergency) oraz stała obecność w finałach ERC.
Rover Team PB	Politechnika Białostocka	Polones / 126Spirit	1. miejsce w konkurencji Freestyle (XV Robotic Tournament 2025); rozwój modułowej platformy Polones.
PWr Aerospace	Politechnika Wrocławska	Scorpio	Wielokrotny finalista URC i ERC; rozwój zaawansowanych systemów wizyjnych i wiertniczych.
Impuls	Politechnika Świętokrzyska	Impuls	Zwycięzca światowych edycji URC w ubiegłych latach; stała obecność w czołówce ERC.

Zespoły wymienione w Tabeli 7-1 nie tylko budują platformy mobilne, ale rozwijają pełny stos technologiczny wymagany w domenie robotyki kosmicznej:

- Autonomiczna Nawigacja: Wykorzystanie systemów SLAM, kamer 3D oraz fuzji danych z GPS/GNSS i IMU do poruszania się w nieznanym terenie bez pomocy operatora.
- Manipulatory (6 DoF): Projektowanie ramion robotycznych o 6 stopniach swobody, zdolnych do obsługi paneli operatorskich, przełączania włączników i operowania narzędziami.
- Astrobiologia i Geologia: Budowa modułów naukowych do pobierania próbek regolitu i ich analizy in-situ (np. wykrywanie metanu, analiza pH, poszukiwanie mikroorganizmów).
- Systemy Łączności: Tworzenie mostów radiowych o wysokiej przepustowości, zdolnych do transmisji wizji HD i telemetrii na dystansie kilku kilometrów w trudnym terenie.

Działalność tych kół naukowych stanowi bezpośrednie zaplecze kadrowe dla firm takich jak PIAP Space, Astronika czy KP Labs, dostarczając inżynierów z praktycznym doświadczeniem w budowie kompletnych systemów robotycznych.

7.3 Identyfikacja luk kompetencyjnych i infrastrukturalnych

Mimo bardzo silnej kadry inżynierskiej, deficyty pojawiają się w obszarach wymagających wieloletniego doświadczenia operacyjnego (Flight Heritage) oraz specyficznych niszach systemowych.

Poniżej zdefiniowano największe luki kompetencyjne w obszarze robotyki kosmicznej:

- Inżynieria Systemowa misji typu End-to-End: Brakuje doświadczonych architektów systemowych, którzy przeprowadzili pełny cykl życia złożonej misji robotycznej (od Fazy A do operacji na orbicie). Większość polskiej kadry specjalizuje się w podsystemach, a nie w integracji całego pojazdu kosmicznego.
- Kontrola i zapewnienie jakości: Brakuje doświadczonych inżynierów kontroli jakości, którzy zapewnią odpowiedni poziom kontroli zgodny z normami ECSS.

Oprócz luk kompetencyjnych można zdefiniować również luki infrastrukturalne, do których należeć będą:

- Wielkoskalowe Komory Termo-Próżniowe (TVC): Polska posiada wiele małych i średnich komór, ale brakuje infrastruktury pozwalającej na testowanie całych lądowików lub dużych ramion robotycznych (np. TITAN w pełnej skali) w warunkach próżni i ekstremalnych temperatur jednocześnie.
- Brudne Komory Termo-Próżniowe (DTV): Polska nie posiada dużych i specjalistycznych komór próżniowych w których można byłoby testować mechanizmy w warunkach próżniowych przy ekstremalnych temperaturach i przy obecności analogów regolitu księżycowego czy marsjańskiego.

7.4 Mapowanie polskiego potencjału technologicznego w misjach ESA

Zgodnie z paragrafem 5.3 polskie technologie robotyczne dotyczące w szczególności domeny TD13BI związane bezpośrednio z rynkiem ISAM są tuż przed „dolina śmierci” i wymagają przejścia do kolejnego etapu rozwoju a mianowicie do demonstracji technologicznej. W związku z aktualnymi trendami technologicznymi pojawia się szereg misji demonstracyjnych w których te technologie mógłby osiągnąć TRL9. Tabela 7-2 przedstawia propozycję

polskiego wkładu do głównych misji związanych z ISOS organizowanych przez ESA i narodowe agencje kosmiczne.

Tabela 7-2 Lista głównych planowanych misji ISOS wraz z możliwym polskim wkładem

Nazwa misji	Organizator	Aktualny wkład	Możliwy wkład polskiej technologii	Start
ClearSpace-1	ClearSpace / ESA	BRAK	Dostarczenie sterowników silników BLDC w oparciu o technologię opracowaną w ramach chwytaka LARIS przez PIAPS do sterowania pozycją i orientacją chwytak CAT.	2029
ERASE	ESA	BRAK	Dostarczenie chwytaka LARIS (PIAPS) wraz z manipulatorem oraz czujnikiem sił i momentów FTS (PIAPS) oraz systemem sterowania (CBK PAN). System może być uzupełniony o system wizyjny SCS (SCANWAY) oraz oparty o jednostkę obliczeniową dostarczoną przez KP Labs lub AROBS. Użycie infrastruktury testowej do symulacji warunków mikro grawitacji w CBK PAN lub PUT i przeprowadzenie walidacji poprawności działania systemu robotycznego.	2030+
CAT-IOD	ESA	W obecnej fazie projektu zaangażowane są już podmioty z Polski w tym: GMV PL.	Dostarczenie sterowników silników BLDC w oparciu o technologię opracowaną w ramach chwytaka LARIS przez PIAPS do sterowania pozycją i orientacją chwytak CAT.	2030
ENCORE	ESA	BRAK	Dostarczenie chwytaka LARIS (PIAPS) wraz z manipulatorem oraz czujnikiem sił i momentów FTS (PIAPS) oraz systemem sterowania (CBK PAN). System może być uzupełniony o system wizyjny SCS (SCANWAY) oraz oparty o jednostkę obliczeniową dostarczoną przez KP Labs lub AROBS.	2030+
RISE	ESA	BRAK	Dostarczenie chwytaka LARIS (PIAPS) wraz z manipulatorem oraz czujnikiem sił i momentów FTS (PIAPS) oraz systemem sterowania (CBK PAN). System może być uzupełniony o system wizyjny SCS (SCANWAY) oraz oparty o jednostkę obliczeniową dostarczoną przez KP Labs lub AROBS.	2028
ENDURANCE	CNES	W obecnej fazie projektu zaangażowane są już podmioty z Polski w tym: PIAPS dostarczający chwytak LARIS oraz ASYNCHRONICS dostarczający środowisko symulacyjne.	W kolejnych etapach misji ENDURANCE polskie podmioty powinny walczyć o zwiększenie swojego wkładu np. poprzez dostarczenie ramienia robotycznego (PIAPS), mechanizmów zwalniających HDRM (ASTRONIKA, SENER).	2027
RAVEN	ESA	Projekt aktualnie jest w fazie B2 pod kierownictwem PIAPS, w ten projekt zaangażowane są liczne firmy z Polski (CREOTECH, Ł-ILOT, AROBS, GMV-PL, KP LABS, WAT, CBK PAN, PUT) i z Europy wschodniej (ZAITRA, SPACE SCAVENGERS)		2030

Oprócz rozwoju technologii robotyki orbitalnej, pojawiają się również na horyzoncie liczne możliwości demonstracyjne technologii związanej z robotyką planetarną. Zgodnie z zaktualizowaną strategią ESA podąża w kierunku wspierania „małych” i szybkich misji księżycowych, w których budżet całej misji nie przekraczałby 80 mln Euro. Na chwilę obecną Polska ma swój istotny wkład w misję ExoMars w postaci:

- Budowa rampy zjazdowej (Astronika)
- System "Pępowiny" i Mechanizmy Zwalniające (SENER Polska)
- Wysięgnik anteny (Astronika)
- Detektory podczerwieni (Vigo Photonics)
- System lądowania (SENER PL)

ESA postawiła również bardzo ambitny plan związany z opracowaniem lądownika: ARGONAUT, który ma być podstawowym elementem transportowym w kolejnej fazie eksploracji Księżyca. Lądownik Argonaut będzie wnoszony przez raketę Ariane 6 i jest zaprojektowany tak, aby dostarczać ciężkie ładunki (do ok. 2100 kg) w dowolne miejsce na powierzchni Księżyca – od równika po bieguny, w tym na jego niewidoczną stronę. Konstrukcja opiera się na trzech modułach: platformie lądującej, adapterze ładunku oraz samym ładunku użytecznym (np. łożyska, zapasy lub instrumentach naukowych). Istotnym elementem lądownika ma być system rozładunku, który nominalnie ma składać się z dwóch podsystemów: ramienia robotycznego i dźwigu. Ramię robotyczne ma zapewniać pewne i precyzyjne manipulowanie ładunkami i posiadać możliwość połączenia się z przesuwanymi elementami przez specjalny interfejs. W obecnej fazie projektu ESA wybrała dwa konsorcja do opracowania i testów systemu roboczego. PIAPS koordynuje pracę jednego z tych konsorcjów w którym to zaangażowane są też inne firmy takie jak: Astronika czy GMV. Aktualna faza zakłada osiągnięcie TRL4. Najbliższe miesiące są szczególnie ważne pod kątem tej aktywności, ponieważ będą ważyć się losy dalszej kontynuacji tego projektu. Z uwagi na anulowanie wkładu ESA w misję MSR istnieje ryzyko iż z uwagi na niski TRL konsorcjum PIAPS zostanie ono odsunięte od misji na poczet Leonardo, które to było odpowiedzialne za ramię robotyczne na misję MSR.

Tabela 7-3 Lista głównych planowanych misji planetarych

Nazwa misji	Organizator	Aktualny wkład	Możliwy wkład polskiej technologii	Planowane wystąpienie
ExoMars (Rosalind Franklin)	ESA	Budowa rampy zjazdowej (Astronika). System "Pępowiny" i Mechanizmy Zwalniające (SENER Polska). Wysięgnik anteny (Astronika). Detektory podczerwieni (Vigo Photonics). System lądowania (SENER PL).		2028
Argonaut	ESA	Opracowywanie prototypu systemu robotycznego MANUS, wyposażonego w ramię robotyczne, system wizyjny, komputer sterujący oraz system wymiany narzędzi (PIAPS jako lider, ASTRONIKA, GMV Hiszpania, Leonardo jako konsorcjanci).	Polskie konsorcjum może być odpowiedzialnym za opracowanie systemu zawieszenia do lądownika: - ASTRONIKA (mechanizm rozkładania i stabilizacji), - PIAPS (elektronika sterująca silnikami skokowymi oraz zbierająca dane z czujników siły) - SENER PL (lider konsorcjum odpowiedzialny za cały system zawieszenia wraz z SENER Hiszpańskim)	2030+

8 Propozycja Kierunku Rozwoju

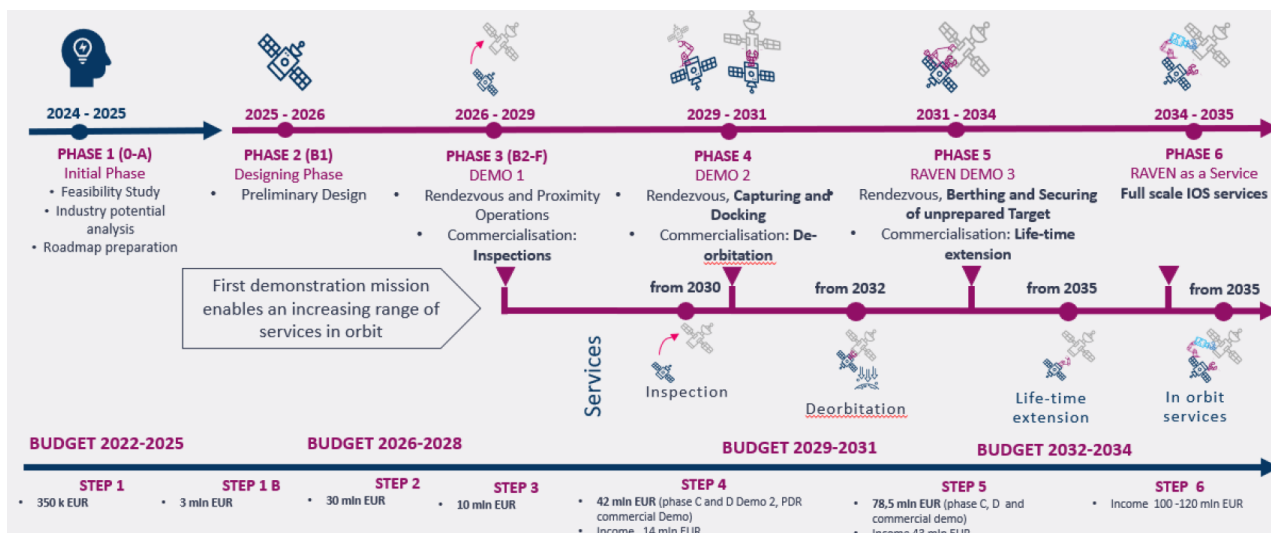
Rzeczywistość kosmicznej w Polsce wkracza w fazę dojrzałości strategicznej. Aby do 2030 roku polski sektor kosmiczny mógł skutecznie konkurować na rynku europejskim (osiągając cel 3% obrotów rynku UE), rekomenduje się koncentrację na trzech filarach rozwoju, które wykorzystują obecne przewagi oraz adresują zidentyfikowane luki. Kierunki rozwoju zostały zdefiniowane w dwóch perspektywach czasowych:

- długofalowe, tzn. w perspektywie do 2040
- Średniofalowe, tzn. w perspektywie do 2031
- Krótkofalowe, tzn. w perspektywie do 2028

8.1 Kierunki długofalowe:

8.1.1 Specjalizacja w Logistyce i Serwisowaniu (ISAM)

Polska powinna dążyć do pozycji dostawcy usług w obszarze In-Orbit Servicing a w tym: Montaż i Produkcja aby zapewnić udział w rosnącym i budującym się rynku komercyjnym ISOS oraz zapewnić suwerenność technologiczną i bezpieczeństwo. Jest to istotnie ważne ponieważ ta technologia jest technologia podwójnego zastosowania i może być wykorzystana przez Polskie Wojsko.



Rysunek 7-10 Wstępna mapa rozwoju programu RAVEN (Materiały PIAP Space)

Kierunek: Rozwój kompletnych wielozadaniowych platform orbitalnych wraz z usługą przeprowadzenia operacji na orbicie.

Cel: Opracowanie orbitalnej robotycznej platformy wielozadaniowej (np. RAVEN), która będzie w stanie wykonywać różne operacje na orbicie. Platforma będzie wyposażona w system robotyczny dedykowany do operacji RPO, dokowania, tankowania i naprawy obiektów na orbicie.

Inwestycja: Wsparcie polskich podmiotów w uzyskiwaniu i kontynuacji kontraktów z ESA ramach programu RAVEN i przeprowadzenie szeregu misji demonstracyjnych (Rysunek 7-10).

8.1.2 Specjalizacja w pozyskiwaniu i przygotowaniu surowców planetarnych (ISRU)

Rzeczywistość technologii ISRU (z ang. In-Situ Resource Utilization) w Polsce, zintegrowany z robotyką planetarną, powinien opierać się na unikalnych kompetencjach mechanicznych i systemowych, które polskie firmy (np. Astronika, PIAP Space, Creotech, Scanway) już posiadają. Rok 2025 i 2026 to kluczowy czas dla polskich misji księżycowych (Faza A misji Twardowski i Mani), co stanowi idealny fundament dla strategii ISRU.

Kierunek: Rozwój kompletnego ekosystemu robotycznych składających się z **robotów mobilnych** (PIAPS+ ASTRONIKA+ AGH) wyposażonych w **systemy pozyskiwania regolitu** (CBKPAN+ AGH) oraz zaawansowane algorytmy planowania i ruchu platform (PUT+ PIAPS), uzupełnione **robotami rekonesansowymi** (np. HOPPER od ASTRONIKI) oraz systemem zarządzania rojem robotów (CLEVERHIVE+ PUT+ PIAPS), pozwoli na zapewnienie możliwości mapowania, pozyskiwania i transportu regolitu w celu dalszego przetwarzania. System ten mógłby być również uzupełniony mapowaniem globalnym wykonanym z orbity Księżyca (CREOTECH+ SCANWAY+ KP LABS).

Cel: Przeprowadzenie misji demonstracyjnej na której Polskie podmioty mógłby umieścić swoje demonstratory technologii związane z procesem pozyskiwania, transportu i przygotowania regolitu do obróbki. Ponad to, taki demonstrator mógłby dostarczyć dane na potrzeby symulacji i modelowania terramechaniki regolitu, która będzie istotnym elementem rozwoju tej technologii.

Inwestycja: Przygotowanie narodowej misji (np. w ramach umowy bilateralnej z dostawcą technologii transportującej ładunki na Księżyc) w ramach której Polska przygotowałaby swoje demonstratory technologii w postaci ładunku badawczego. Na bazie wstępnych szacunków [RD-14] do realizacji tego celu potrzebny byłby budżet na poziomie 80 mln Euro. Biorąc pod uwagę szacowaną wielkość rynku ISRU [RD-15] na kwotę 73-170B€, organizacja takiej misji przyniesie wymierne korzyści i pozwoli na dużą stopę zwrotu.

8.2 Kierunki średniofalowe:

8.2.1 Specjalizacja w Orbitalnych Systemach Robotycznych

Polska powinna dążyć do pozycji dostawcy podsystemów w obszarze In-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing.

Kierunek: Rozwój kompletnych systemów robotycznych (jak TITAN od PIAPS) zintegrowanych z polskimi systemami wizyjnymi (SCANWAY) i zaawansowanymi układami sterowania wykorzystującymi uczenie maszynowe oraz chwytakami do łapania nieprzygotowanych i przygotowanych celów (LARIS od PIAPS).

Cel: Stanie się głównym dostawcą systemu robotycznego na misję ERASE/ENCORE/ORUM dla misji usuwania śmieci kosmicznych (ADR) i przejście przez „dolinę śmierci” i osiągnięcie poziomu TRL9.

Inwestycja: Wsparcie polskich podmiotów w uzyskiwaniu kontraktów z ESA w wymienionych powyżej misjach poprzez np. odpowiednie alokowanie składki ESA na CM28.

8.2.2 DEMO-1 programu RAVEN (ISAM)

Polska powinna dążyć do wystrzelenia i operacji na orbicie pierwszej misji demonstracyjnej w programie RAVEN. Pozwoli to uzyskać doświadczenie lotne i walidacja technologii, która później może być użyta do monitorowania i inspekcji polskich satelit na LEO.

Kierunek: Rozwój technologii i platformy zdolnej do monitorowania i inspekcji obiektów na orbicie.

Cel: Przeprowadzenie demonstracji orbitalnej misji RAVEN DEMO-I, w ramach której platforma RAVEN wykona operacje RPO do kooperatywnego celu i wykona jego inspekcję.

Inwestycja: Inwestycje celowe w finansowanie misji demonstracyjnej DEMO-I.

8.2.3 Rozwój planetarnego ramienia robotycznego na TRL6

Kontynuacja rozwoju planetarnego ramienia robotycznego (MANUS) do uzyskania TRL6. System powinien być wyposażony w system wymiany narzędzi, czujnik sił i momentów oraz systemy pomocnicze.

Kierunek: Rozwój ramienia robotycznego (MANUS od PIAPS) zintegrowanego z systemem wymiany narzędzi (TED od PIAPS), elementami strukturalnymi i mechanizmami przytrzymującymi (HDRM od ASTRONIKI) oraz czujnikiem siły FTS (od PIAPS) na poziomie TRL6.

Cel: Stanie się głównym dostawcą systemu robotycznego na misję ARGONAUT i osiągnięcie poziomu TRL6.

Inwestycja: Wsparcie polskich podmiotów w uzyskiwaniu kontraktów z ESA w wymienionych powyżej misjach

poprzez np. odpowiednie alokowanie składki ESA na CM25.

8.3 Kierunki krótkofalowe:

8.3.1 Specjalizacja w Planetarnych Systemach Robotycznych

Polska powinna dążyć do pozycji dostawcy podsystemów w obszarze robotyki planetarnej pod kątem manipulatorów księżycowych czy marsjańskich. Na chwilę obecną analizując rynek Europejski największym konkurentem Polski jest firma Leonardo, która opracowywała ramię robotyczne na misję MSR. Jest to zatem duża szansa dla polskiego przemysłu aby odpowiednio wykorzystać swój moment.

Kierunek: Rozwój ramienia robotycznego (MANUS od PIAPS) zintegrowanego z systemem wymiany narzędzi (TED od PIAPS), elementami strukturalnymi i mechanizmami przytrzymującymi (HDRM od ASTRONIKI) oraz czujnikiem siły FTS (od PIAPS).

Cel: Stanie się głównym dostawcą systemu robotycznego na misję ARGONAUT i przejście przez „dolinę śmierci” i osiągnięcie poziomu TRL8.

Inwestycja: Wsparcie polskich podmiotów w uzyskiwaniu kontraktów z ESA w wymienionych powyżej misjach poprzez np. odpowiednie alokowanie składki ESA na CM25. Wykorzystanie programu GSTP do rozwoju kluczowych elementów ramienia robotycznego takich jak: hamulec, osłona przeciwpływowa, system wymiany narzędzi TED z ładowaniem bezprzewodowym.

8.3.2 Specjalizacja w Orbitalnych Systemach Robotycznych

Polska powinna dążyć do pozycji dostawcy podsystemów/ elementów w obszarze In-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing.

Kierunek: Rozwój kompletnych systemów robotycznych (jak TITAN od PIAPS) zintegrowanych z polskimi systemami wizyjnymi (SCANWAY) i zaawansowanymi układami sterowania wykorzystującymi uczenie maszynowe oraz chwytakami do łapania nieprzygotowanych i przygotowanych celów (LARIS od PIAPS).

Cel: Stanie się głównym dostawcą systemu robotycznego na misję ERASE/ENCORE/ORUM dla misji usuwania śmieci kosmicznych (ADR) i przejście przez „dolinę śmierci” i osiągnięcie poziomu TRL8.

Inwestycja: Wsparcie polskich podmiotów w uzyskiwaniu kontraktów z ESA w wymienionych powyżej misjach poprzez np. odpowiednie alokowanie składki ESA na CM25.

8.3.3 Rozwoju układów jezdnych platform mobilnych

Fundamentem tego obszaru jest wieloletnie doświadczenie Sieci Badawczej Łukasiewicz – PIAP, która od dekad specjalizuje się w budowie zaawansowanych platform mobilnych do zastosowań ziemskich (m.in. roboty pirotechniczne IBIS, GRYF czy HUNTeR). Transfer tej wiedzy do sektora kosmicznego opiera się na unikalnych projektach rozwojowych realizowanych przez spółkę PIAPS (GALEON i DISTANT). W projekcie GALEON, rozwijany jest przez PIAPS system zaawansowanego zawieszenia dedykowany dla szybkich platform mobilnych. Pozwala on na stabilizację i tłumienie drgań przy poruszaniu się z dużą prędkością w trudnym, nieustrukturyzowanym terenie. W kontekście księżycowym technologia ta jest kluczowa dla misji logistycznych wymagających szybkiego transportu surowców na duże odległości (np. między kopalnią a bazą). Natomiast projekt DISTANT skupia się na kluczowym wyzwaniu eksploracji planetarnej – ochronie układów jezdnych przed pyłem (regolitem). PIAPS rozwija w nim innowacyjne systemy uszczelnień (w trakcie zapewnienia ochrony patentowej) i osłon zabezpieczających krytyczne elementy zawieszenia, co drastycznie zwiększa żywotność i niezawodność łazików w warunkach wysokiej ścieralności pyłu księżycowego.

Dzięki tym kompetencjom Polska może oferować nie tylko pasywne konstrukcje, ale adaptacyjne układy jezdne, zdolne do dynamicznej zmiany parametrów pracy w zależności od prędkości i stopnia zanieczyszczenia środowiska.

Kierunek: Rozwój układów jezdnych o zmiennej geometrii, które pozwalają na zmianę prześwitu oraz kąta natarcia w zależności od nachylenia terenu oraz są wyposażone w podatne koła.

Cel: Zwiększenie zdolności pokonywania przeszkód przy jednoczesnym obniżeniu masy strukturalnej i zwiększenie dopuszczalnej prędkości poruszania się platformy.

Inwestycja: Wsparcie polskich podmiotów w kontynuacji programu ESA: GBARD (w ramach EXPERTA) poprzez np. odpowiednie alokowanie składki ESA na CM25. Wykorzystanie programu GSTP/E3P do rozwoju kluczowych elementów systemu zawieszenia takich jak: aktywny układ tłumienia drgań, projekt niepneumatycznego koła, system zabezpieczenia przed pyłem.

8.3.4 Rozwoju systemów GNC do platform mobilnych

Strategia rozwoju systemów GNC w Polsce zakłada unikalną synergię między dojrzałym przemysłem, jednostkami badawczymi a elitarnymi kadrami inżynierskimi wywodzącymi się z konkursów łazikowych. Strategiczny kierunek opiera się na synergii trzech filarów: komercyjnego doświadczenia GMV+ Ł-PIAPS, potencjału badawczego polskich uczelni i instytutów (PUT, AGH, CBK PAN) oraz inżynierii systemowej i doświadczenia w projektach łazikowych PIAPS (RACER, PRO-ACT, GALEON).

Kierunek: Przejście z prostych algorytmów reaktywnych na zaawansowaną autonomię decyzyjną, pozwalającą na bezpieczne poruszanie się łazika w warunkach braku łączności z Ziemią. Wymaga to opracowania technologii fuzji danych w czasie rzeczywistym z sensorów i optymalizacji oprogramowania.

Cel: Osiągnięcie demonstratora technologii bedacego w stanie poruszać się ciągle z predkością większą od 1 cm/s.

Inwestycja: Celowane dotacje związane z narodowym programem budowy kompetencji GNC i budowy demonstratora ziemskiego technologii GNC. Możliwe jest również wsparcie podmiotów Polskich w udziale w inicjatywie GBARD organizowanej przez ESA.

9 Plan Rozwoju Technologii / Ścieżka TRL

Na bazie przeprowadzonej analizy poziomów technologii opisanej w rozdziale 5.3 oraz proponowanych kierunków rozwoju z paragrafu 8 został przygotowana mapa drogowa rozwoju robotyki kosmicznej w Polsce (graficzne przedstawienie mapy na Rysunek 7-11). Poszczególne kroki pomiędzy poszczególnymi poziomami TRL zostały opisane w Tabeli 7-4. Tabela zawiera również potrzebne finansowanie oraz możliwe programy/ źródła finansowania. Połączenia pomiędzy rozwijanymi technologiami zostało przedstawione poprzez odwołania do tej samej misji demonstracyjnej.

Zaproponowana mapa drogowa dąży do realizacji kilku demonstracji technologicznych połączonych w 4 misje:

- ISOS DEMO I, której celem jest walidacja na orbicie technologii RPO.
- ISOS DEMO II, której celem jest przetestowanie technologii dokowania do przygotowanego i kooperatywnego celu i przeprowadzenie procesu deorbitacji.
- ISOS DEMO III, którego celem jest przetestowanie technologii dokowania do nieprzygotowanego i kooperatywnego celu i przeprowadzenie procesu wydłużenia życia.
- TWARDOWSKI II, którego celem jest wystanie ładunku w postaci demonstratora technologii związane z ISRU na powierzchni Księżyca.

Rysunek 7-11 Propozycja mapy drogowej rozwoju robotyki w Polsce



Domena	Podsystem	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	
TD13BI- Manipulatory, chwytaki, Narzędzia	Chwytaki LAR	TRL6	1	TRL7	2	TRL8			TRL9			
	Chwytaki uniwersalne dedykowane do ISOS	TRL5	3		TRL6	4		TRL7	5	TRL8	TRL9	
	Chwytaki uniwersalne planetarne	TRL5	6		TRL6	7	TRL7	8	TRL8	TRL9		
	Ramiona Robotyczne dedykowane do ISOS	TRL6	9		TRL7	10		TRL8	TRL9			
	Systemy dokowania	TRL3	11		TRL6	12	TRL7	13	TRL8	TRL9		
	Robotyczna jednostka sterująca (SW + HW) Ramieniem	TRL3	14		TRL6	15	TRL7	16	TRL8	TRL9		
	Planetarne systemy wymiany narzędzi	TRL4	17		TRL6	18		TRL7	19	TRL8	TRL9	
	Interfejsy do tankowania	TRL4	20		TRL6	21			TRL7	22	TRL8	TRL9
	Robotyczne Systemy Wizyjne	TRL6	23		TRL7	24	TRL8			TRL9		
TD13BII Układy zawieszenia platform mobilnych	Układ lokomocji	TRL3	25		TRL6	26	TRL7	27	TRL8	TRL9		
	Nie pneumatyczne koła	TRL3	28		TRL6	29	TRL7	30	TRL8	TRL9		
	Aktuatory zawieszenia wraz z jednostkami sterującymi	TRL5	31		TRL6	32	TRL7	33	TRL8	TRL9		
TD13AI Planetarna eksploracja robotyczna	Planetarna eksploracja robotyczna	TRL5	34		TRL6	35	TRL7	36	TRL8	TRL9		
	Planetarne Ramiona Robotyczne	TRL4	37		TRL6	38	TRL7	39	TRL8	TRL9		
TD13CII Sterowanie robotami mobilnymi	GNC i układ sterowania platformami mobilnymi	TRL4	40		TRL6	41	TRL7	42	TRL8	TRL9		
TD5BII GNC RPO	GNC RPO	TRL6	43		TRL7	44	TRL8	TRL9				
TD14BIII ISRU procesowanie i produkcja	ISRU pobieranie i procesowanie	TRL6		45			TRL7	46	TRL8	TRL9		
	Technologia mapowania powierzchni	TRL2	47		TRL6	48	TRL7	49	TRL8	TRL9		

Tabela 7-4 Opis kroków aktywności związanej z rozwojem robotyki

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
1	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego chwytaka. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego w warunkach ekstremalnych: wibracje (start rakiety), udary pirotechniczne, testy TVC (termo-próżnia) w pełnym zakresie temperatur.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 1 600 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	ESA-RPA	ENDURANCE C
2	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza chwytaka z certyfikowanych materiałów space-grade, montaż w cleanroomie (ISO 8/7) i testy akceptacyjne (Acceptance Tests).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 1 000 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	ESA-RPA	ENDURANCE C
3	Wstępny Projekt (PDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego chwytaka. MAI modelu EM. Kampania Testowa EM: Testy w warunkach ekstremalnych: wibracje (start rakiety), testy TVC, testy funkcjonalne.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 1 100 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	FLPP/ Space Safety/ EC/ GSTP	ORUM/ RAVEN DEMO II
4	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego chwytaka. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego w warunkach ekstremalnych: wibracje (start rakiety), udary pirotechniczne, testy TVC (termo-próżnia) w pełnym zakresie temperatur.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 1 500 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	FLPP/ Space Safety/ EC	ORUM/ RAVEN DEMO II
5	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza chwytaka z certyfikowanych materiałów space-grade, montaż w cleanroomie (ISO 8/7) i testy akceptacyjne (Acceptance Tests). Integracja i montaż chwytaka w systemie robotycznym. Testy na poziomie systemu. Start misji.	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 800 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	FLPP/ Space Safety/ EC	ORUM/ RAVEN DEMO II
6	Wstępny projekt (PDR): Projektu mechanicznego i elektronicznego chwytaka. MAI modelu EM. Kampania Testowa EM: Testy w warunkach ekstremalnych: wibracje (start rakiety), testy TVC, testy funkcjonalne, testy w brudnej komorze termicznej (DTVC).	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 1 100 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	E3P/ GSTP	ORUM/ RAVEN DEMO II

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
7	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego chwytaka. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego w warunkach ekstremalnych: wibracje, udary pirotechniczne, testy TVC w pełnym zakresie temperatur, EMC, ESD, testy w DTVC.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 1 500 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	E3P/ NCBIR	ARGONAUT/ TWARDOWSKI II
8	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza chwytaka z certyfikowanych materiałów space-grade, montaż w cleanroomie (ISO 8/7) i testy akceptacyjne (Acceptance Tests). Integracja i montaż chwytaka w systemie robotycznym. Testy na poziomie systemu. Start misji. Lądowanie i praca na Księżycu.	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 800 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader)	E3P/ NCBIR	ARGONAUT/ TWARDOWSKI II
9	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego ramienia. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego w warunkach ekstremalnych: wibracje, udary pirotechniczne, testy TVC w pełnym zakresie temperatur, EMC, ESD.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 5 000 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PIAPS (SW sterujący), ASTRONIKA (mechanizmy zwalniające i trzymające, boomy), Ł-ILOT (produkcja kompozytów), SPACIVE (układ kontroli temperatury, MLI).	GSTP/NCBIR/ FLPP/ EC	ENCORE/ERASE/OR UM/ RAVEN DEMO II
10	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza ramienia z certyfikowanych materiałów space-grade, montaż w cleanroomie (ISO 8/7) i testy akceptacyjne (Acceptance Tests).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 4 500 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PIAPS (SW sterujący), ASTRONIKA (mechanizmy zwalniające i trzymające, boomy), Ł-ILOT (produkcja kompozytów), SPACIVE (układ kontroli temperatury, MLI).	GSTP/NCBIR/ FLPP/ EC	ENCORE/ERASE/OR UM/ RAVEN DEMO II
11	Wstępny projekt (PDR): Projektu mechanicznego i elektronicznego systemu dokowania. MAI modelu EM. Kampania Testowa EM: Testy w warunkach ekstremalnych: wibracje (start rakiety), testy TVC, testy funkcjonalne, testy w brudnej komorze termicznej (DTVC).	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 2 000 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader), SKANWAY (produkcja czujników optycznych)	GSTP/NCBIR/ FLPP/ EC	RAVEN DEMO II
12	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego systemu dokowania. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego w warunkach ekstremalnych: wibracje, udary pirotechniczne, testy TVC w pełnym zakresie temperatur, EMC, ESD, testy w DTVC.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 3 500 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikrogravitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader), SKANWAY (produkcja czujników optycznych)	GSTP/NCBIR/ FLPP/ EC	RAVEN DEMO II

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
13	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza systemu dokowania, testy akceptacyjne. Integracja i montaż chwytaka w systemie robotycznym. Testy na poziomie systemu. Start misji demonstracyjnej	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 3 200 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), N7 (dostawca oprogramowania: Bootloader), SKANWAY (produkcja czujników optycznych)	GSTP/NCBIR/ FLPP/ EC	RAVEN DEMO II
14	Budowa Modelu Inżynierskiego (EM) przy użyciu komponentów o architekturze docelowej (np. FPGA/SoC), ale niekoniecznie w pełnej klasie Space-Grade. Integracja interfejsów komunikacyjnych. Implementacja stosu FSW na systemie czasu rzeczywistego (RTOS). Opracowanie algorytmów kinematyki odwrotnej i sterowania siłowego w pętli zamkniętej. Kwalifikacja kodu zgodnie z ECSS-E-ST-40C. Testy funkcjonalne na rzeczywistym ramieniu robotycznym (np. TITAN). Przeprowadzenie wstępnych testów środowiskowych: wibracje i praca w próżni (TVC) dla modelu EM.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 1 500 000	PIAPS (Lider konsorcjum), CBK PAN (dostawca układu sterowania ramieniem wraz z generatorem trajektorii), AROBS/KP LABS (dostawca jednostki sterującej i systemu czasu rzeczywistego).	GSTP/NCBIR/EC / FLPP/Space Safety	IOSHEX/ SPACERIDER/ RAVEN DEMO II lub III
15	Produkcja Modelu Kwalifikacyjnego (QM) o ile wybrana platforma nie jest już przekwalifikowana. Poprawki do kodu i Implementacja na docelowej platformie sprzętowej. Przeprowadzenie kwalifikacji kodu zgodnie z ECSS-E-ST-40C.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 1 200 000	PIAPS (Lider konsorcjum), CBK PAN (dostawca układu sterowania ramieniem wraz z generatorem trajektorii), AROBS/KP LABS (dostawca jednostki sterującej i systemu czasu rzeczywistego).	GSTP/NCBIR/EC / FLPP/Space Safety	IOSHEX/ SPACERIDER/ RAVEN DEMO II lub III
16	Optymalizacja kodu pod kątem wydajności procesorów klasy kosmicznej. Pełna weryfikacja i walidacja zgodnie ze standardem ECSS-E-ST-40C (Software Engineering) oraz ECSS-Q-ST-80C (Software Product Assurance).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 1 200 000	PIAPS (Lider konsorcjum), CBK PAN (dostawca układu sterowania ramieniem wraz z generatorem trajektorii), AROBS/KP LABS (dostawca jednostki sterującej i systemu czasu rzeczywistego).	GSTP/NCBIR/EC / FLPP/Space Safety	IOSHEX/ SPACERIDER/ RAVEN DEMO II lub III
17	Wstępny projekt (PDR): Projektu mechaniczny i elektroniczny systemu wymiany narzędzia. MAI modelu EM. Kampania Testowa EM: Testy w warunkach ekstremalnych: wibracje, testy TVC, testy funkcjonalne, testy w brudnej komorze termicznej (DTVC), EMC.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 2 200 000	PIAPS(Lider konsorcjum), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), ASTRONIKA (aspekty trybologiczne), SKANWAY (produkcja czujników optycznych)	E3P/ NCBIR	ARGONAUT/ TWARDOWSKI II
18	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego systemu wymiany narzędzia. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego: wibracje, udary pirotechniczne, testy TVC w pełnym zakresie temperatur, EMC, ESD, testy w DTVC.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 2 500 000	PIAPS(Lider konsorcjum), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), ASTRONIKA (aspekty trybologiczne), SCANWAY (produkcja czujników optycznych)	E3P/ NCBIR	ARGONAUT/ TWARDOWSKI II

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
19	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza systemu dokowania, testy akceptacyjne. Integracja i montaż systemu wymiany narzędzia w systemie robotycznym. Testy na poziomie systemu. Start misji demonstracyjnej	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 2 200 000	PIAPS(Lider konsorcjum), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), ASTRONIKA (aspekty trybologiczne), SCANWAY (produkcja czujników optycznych)	E3P/ NCBIR	ARGONAUT/ TWARDOWSKI II
20	Budowa modelu EQM (Engineering Qualification Model). Testy środowiskowe: wibracje, TVC. Testy funkcjonalne z przetaczaniem analogów paliw, testy szczelności.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 1 800 000	KOSMOK, Ł-ILOT	GSTP/ S2P	
21	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego interfejsu do tankowania. MAI modelu QM. Kampania Testowa Qma.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 2 200 000	KOSMOK, Ł-ILOT	GSTP/ S2P/ FLPP	IOSHEX/ RAVEN DEMO II lub III
22	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza interfejsu do tankowania, testy akceptacyjne. Integracja i montaż interfejsu. Testy na poziomie systemu. Start misji demonstracyjnej	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 2 200 000	KOSMOK, Ł-ILOT	GSTP/ S2P/ FLPP	IOSHEX/ RAVEN DEMO II lub III
23	Modyfikacja optyki kamer na bazie wymaganych parametrów. Opracowanie systemu analizy obrazu i lokalizacji markerów. Budowa modelu EQM (Engineering Qualification Model) kamer i implementacja i testy oprogramowania do analizy obrazu. Kwalifikacja kodu zgodnie z ECSS-E-ST-40C. Testy środowiskowe: wibracje, TVC. Testy funkcjonalne do określenia dokładności, szumu i niezawodności systemu.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 2 500 000	SCANWAY (dostawca kamer), PIAPS (dostawca algorytmów analizy obrazu), KP LABS/AROBS (dostawca platformy sprzętowej do obróbki danych)	GSTP/ NCBIR/ EC	IOSHEX/ RAVEN DEMO II lub III
24	Optymalizacja kodu pod kątem wydajności procesorów klasy kosmicznej. Pełna weryfikacja i walidacja zgodnie ze standardem ECSS-E-ST-40C (Software Engineering) oraz ECSS-Q-ST-80C (Software Product Assurance).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 3 200 000	SCANWAY (dostawca kamer), PIAPS (dostawca algorytmów analizy obrazu), KP LABS/AROBS (dostawca platformy sprzętowej do obróbki danych)	GSTP/ NCBIR/ EC	IOSHEX/ RAVEN DEMO II lub III
25	Projekt systemu zawieszenia na poziomie PDR. Budowa modelu EM/BB. Testy środowiskowe pojedynczych podsystemów: wibracje, TVC. Testy funkcjonalne całego zawieszenia w warunkach atmosferycznych na lunar yard.	Przetestowane podsystemy w postaci EMów, Przetestowany BB pod kątem funkcjonalnym.	€ 6 500 000	PIAPS(Lider konsorcjum), PUT (oprogramowanie zarządzające pracą zawieszenia w ROS2), AGH (projekt gondoli), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PW (modelowanie kinematyki), CBK PAN (testy terramechaniki i modelowanie), SPACIVE (modelowanie termiczne i projekt termiki), ASTRONIKA (elementy spężyste układu zawieszenia)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	GBARD

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
26	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego systemu zawieszenia. Uproszczenie konstrukcji i skalowanie. MAI modelu QM. Kampania Testowa QMa.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 5 500 000	PIAPS(Lider konsorcjum), PUT (oprogramowanie zarządzające pracą zawieszenia w ROS2), AGH (projekt gondoli), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PW (modelowanie kinematyki), CBK PAN (testy terramechaniki i modelowanie), SPACIVE (modelowanie termiczne i projekt termiki), ASTRONIKA (elementy sprężyste układu zawieszenia)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
27	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM), testy akceptacyjne.	FM gotowy do startu	€ 6 000 000	PIAPS(Lider konsorcjum), PUT (oprogramowanie zarządzające pracą zawieszenia w ROS2), AGH (projekt gondoli), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PW (modelowanie kinematyki), CBK PAN (testy terramechaniki i modelowanie), SPACIVE (modelowanie termiczne i projekt termiki), ASTRONIKA (elementy sprężyste układu zawieszenia)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
28	Projekt koła na poziomie PDR. Budowa modelu EM/BB. Testy środowiskowe: wibracje, TVC, testy funkcjonalne.	BB + EM Przetestowany BB/EM pod kątem funkcjonalnym. I środowiskowym	€ 1 100 000	ASTRONIKA (projekt koła), CBK PAN (testy funkcjonalne)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	GBARD
29	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego kół. Uproszczenie konstrukcji i skalowanie. MAI modelu QM. Kampania Testowa QMa.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 3 500 000	ASTRONIKA (projekt koła), CBK PAN (testy funkcjonalne)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
30	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM), testy akceptacyjne.	FM gotowy do startu	€ 2 500 000	ASTRONIKA (projekt koła), CBK PAN (testy funkcjonalne)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
31	Delta dewelopment nad aktuatorami opracowanymi na potrzeby ramion robotycznych pod kątem mechaniki jak i elektroniki. Dostosowanie kontrolera serwonapędu do wymagań. Budowa EQMa aktuatora do napędu koła i zawieszenia aktywnego. Testy funkcjonalne i środowiskowe, life test.	BB + EM Przetestowany BB/EM pod kątem funkcjonalnym. I środowiskowym	€ 2 000 000	PIAPS(Lider konsorcjum), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	GBARD

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
32	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego rodziny aktuatorów. Uproszczenie konstrukcji i skalowanie. MAI modelu QM. Kampania Testowa QMa.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 2 500 000	PIAPS(Lider konsorcjum), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
33	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM), testy akceptacyjne.	FM gotowy do startu	€ 6 000 000	PIAPS(Lider konsorcjum), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
34	Wstępny projekt (PDR): Projektu pełnej platformy GALAGO. MAI modelu EM. Kampania Testowa EM: Testy: wibracje, TVC, testy funkcjonalne, testy w brudnej komorze termicznej (DTVC).	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 2 200 000	ASTRONIKA (lider), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	
35	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego: wibracje, udary pirotechniczne, testy TVC w pełnym zakresie temperatur, EMC, ESD, testy w DTVC.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 4 500 000	ASTRONIKA (lider), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
36	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM), testy akceptacyjne. Przygotowanie na integrację do misji demonstracyjnej.	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 4 200 000	ASTRONIKA (lider), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej)	E3P/ GSTP/ NCBIR/ EC	TWARDOWSKI II
37	Dokończenie projektu i budowa modelu EQM ramienia robotycznego w skali 1:1. MAI modelu EQM. Przeprowadzenie testów środowiskowych i funkcjonalnych. Projekt systemu GSE (systemu odciążenia).	Przetestowany EQM.	€ 4 000 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PIAPS (SW sterujący), ASTRONIKA (mechanizmy zwalniające i trzymające, boomy), Ł-ILOT (produkcja kompozytów), SPACIVE (układ kontroli temperatury, MLI).	E3P	ARGONAUT/ TWARDOWSKI II
38	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego ramienia. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego w warunkach ekstremalnych: wibracje, udary pirotechniczne, testy TVC w pełnym zakresie temperatur, EMC, ESD.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 5 000 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PIAPS (SW sterujący), ASTRONIKA (mechanizmy zwalniające i trzymające, boomy), Ł-ILOT (produkcja kompozytów), SPACIVE (układ kontroli temperatury, MLI).	GSTP/NCBIR/ FLPP/ EC	ENCORE/ERASE/OR UM/ RAVEN DEMO II

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
39	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza ramienia z certyfikowanych materiałów space-grade, montaż w cleanroomie (ISO 8/7) i testy akceptacyjne (Acceptance Tests).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 4 500 000	PIAPS, CBK PAN (testy w mikro grawitacji), CREOTECH (produkcja i montaż elektroniki sterującej), PIAPS (SW sterujący), ASTRONIKA (mechanizmy zwalniające i trzymające, boomy), Ł-ILOT (produkcja kompozytów), SPACIVE (układ kontroli temperatury, MLI).	GSTP/NCBIR/FLPP/ EC	ENCORE/ERASE/ORUM/ RAVEN DEMO II
40	Integracja Breadboard i Testy HIL: Przeniesienie algorytmów z PC na procesor docelowy (np. FPGA/ARM). Walidacja fuzji danych z sensorów (LiDAR, kamery) w pętli Hardware-in-the-loop. Walidacja w Środowisku Reprezentatywnym: Testy terenowe na analogu łoża w warunkach zbliżonych do planetarnych (np. OTRK w Kąkolewie). Kwalifikacja kodu zgodnie z ECSS-E-ST-40C.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 2 000 000	PUT (algorytmy nawigacji i planowania ruchu, fuzja sensoryczna), KP LABS/AROBS (dostawca platformy sprzętowej do obróbki danych)	E3P/ GSTP	GBARD
41	Produkcja Modelu Kwalifikacyjnego (QM) o ile wybrana platforma nie jest już przekwalifikowana. Poprawki do kodu i Implementacja na docelowej platformie sprzętowej. Przeprowadzenie kwalifikacji kodu zgodnie z ECSS-E-ST-40C. Zakup docelowych sensorów. Bazowanie na technologii automotive i new space.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 8 000 000	PUT (algorytmy nawigacji i planowania ruchu, fuzja sensoryczna), KP LABS/AROBS (dostawca platformy sprzętowej do obróbki danych)	E3P/ GSTP	TWARDOWSKI II
42	Optymalizacja kodu pod kątem wydajności procesorów klasy kosmicznej. Pełna weryfikacja i walidacja zgodnie ze standardem ECSS-E-ST-40C (Software Engineering) oraz ECSS-Q-ST-80C (Software Product Assurance).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 7 200 000	PUT (algorytmy nawigacji i planowania ruchu, fuzja sensoryczna), KP LABS/AROBS (dostawca platformy sprzętowej do obróbki danych)	E3P/ GSTP	TWARDOWSKI II
43	Modyfikacja algorytmów na bazie wymaganych parametrów misji i funkcji. Opracowanie systemu GNC do RPO. Implementacja i testy oprogramowania do GNC. Kwalifikacja kodu zgodnie z ECSS-E-ST-40C.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 2 500 000	GMP PL (architekt i twórca algorytmów), KP LABS/AROBS (dostawca platformy sprzętowej do obróbki danych)	FLPP	RAVEN DEMO I
44	Optymalizacja kodu pod kątem wydajności procesorów klasy kosmicznej. Pełna weryfikacja i walidacja zgodnie ze standardem ECSS-E-ST-40C (Software Engineering) oraz ECSS-Q-ST-80C (Software Product Assurance).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 3 200 000	GMP PL (architekt i twórca algorytmów), KP LABS/AROBS (dostawca platformy sprzętowej do obróbki danych)	FLPP	RAVEN DEMO I
45	Finalizacja Projektu i Krytyczny Przegląd (CDR): Zamrożenie projektu mechanicznego i elektronicznego ramienia. MAI modelu QM. Kampania Testowa QM: Testy Modelu Kwalifikacyjnego w warunkach ekstremalnych: wibracje, udary pirotechniczne, testy TVC w pełnym zakresie temperatur, EMC, ESD, DTVC.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 2 500 000	PIAP (Lider konsorcjum), CBK PAN (dostawca licencji na RCE)	GSTP/E3P/NBIR	TWARDOWSKI II

Nr. kroku	Opis	Efekt wyjściowy	Szacowany budżet	Zaangażowani	Finansowanie	Misja demonstracyjna
46	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza RCE z certyfikowanych materiałów space-grade, montaż w cleanroomie (ISO 8/7) i testy akceptacyjne (Acceptance Tests).	FM gotowy do integracji z systemem robotycznym.	€ 2 300 000	PIAP (Lider konsorcjum), CBK PAN (dostawca licencji na RCE)	GSTP/E3P/NBIR	TWARDOWSKI II
47	Definicja metod teledetekcyjnych (np. spektroskopia gamma/neutronowa, radar, hiperspektralność). Symulacje zdolności rozdzielczej sensorów dla specyficznych minerałów. Budowa prototypów instrumentów (np. matrycy detektora). Testy w komorach próżniowych z wykorzystaniem symulantów regolitu w celu kalibracji odczytów. Przystosowanie systemów satelitarnych Creotech do warunków głębokiego kosmosu (Radiation Hardening). Walidacja zasilania i termiki instrumentów mapujących. Budowa i testy modeli EM krytycznych podsystemów.	Przetestowany EM, osiągnięty poziom TRL6	€ 7 500 000	CREOTECH (lider konsorcjum, dostawca platformy), CBK PAN (dostawca spektroskopu), SCANWAY	E3P	TWARDOWSKI I
48	Budowa wymaganych modeli kwalifikacyjnych od strony instrumentów mapujących i platformy HyperSat. Testy kwalifikacyjne.	Projekt i kampania kwalifikacyjna QMa.	€ 8 500 000	CREOTECH (lider konsorcjum, dostawca platformy), CBK PAN (dostawca spektroskopu), SCANWAY	E3P	TWARDOWSKI I
49	Produkcja Modelu Lotnego (Flight Model - FM): Wytworzenie egzemplarza ramienia z certyfikowanych materiałów space-grade, montaż w cleanroomie (ISO 8/7) i testy akceptacyjne (Acceptance Tests). Koszty wyniesienia i operacji.	FM	€ 20 000 000	CREOTECH (lider konsorcjum, dostawca platformy), CBK PAN (dostawca spektroskopu), SCANWAY	E3P	TWARDOWSKI I

10 Możliwości Współpracy Międzynarodowej

W paragrafie 7.4 przeprowadzono proces mapowania aktualnie ogłoszonych misji ESA oraz rynku komercyjnego związanych z obszarem robotyki orbitalnej i planetarnej. Została również przeprowadzona analiza możliwego wkładu polskich podmiotów do tych misji. Ponadto Polska powinna wziąć udział w poniższych programach i inicjatywach:

- GBARD w ramach programu EXPERT.

11 Analiza Ryzyk i Bariery

Poniższe tabele zawierają analizę ryzyk i barier dotyczących rozwoju robotyki kosmicznej w Polsce.

Tabela 7-5 Zestawienie Ryzyk

Numer	Domena	Opis	Akcje mitygacyjne
R-1	Technologiczne	„Dolina Śmierci” TRL: Największe ryzyko dotyczy przejścia z poziomu prototypu laboratoryjnego (TRL 4/5) do modelu lotnego (TRL 8/9). Brak tzw. doświadczenia lotnego jest barierą przy ubieganiu się o kontrakty jako główny wykonawca.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Zapewnienie stabilnego finansowania oraz możliwości wliczenia ryzyka technologicznego w budżety projektów. 2. Wsparcie ekspertów zewnętrznych (od strony ESA) w formie konsultacji, którzy wesprą firmy w procesie przekraczania „doliny śmierci”. 3. Uruchomienie Narodowego Programu Misji Demonstracyjnych (IOD/IOV): Finansowanie małych, szybkich misji orbitalnych dedykowanych wyłącznie walidacji polskich podzespołów. 4. Partnerstwa strategiczne z integratorami. Wykorzystanie programów ESA do wymuszenia udziału polskich firm jako dostawców kluczowych podsystemów w dużych misjach (np. Argonaut), co pozwoli na zdobycie referencji lotnych pod nadzorem doświadczonych partnerów.
R-2	Technologiczne	Brak efektywnych technologii i elementów zabezpieczających mechanizmy przed interakcją z regolitem księżycowym dyskwalifikują polskie technologie w kontekście misji planetarnych.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rozszerzenie i dofinansowanie projektu DISTANT: Nadanie priorytetu pracom nad uszczelnieniami i osłonami dynamicznymi w ramach programów GSTP/E3P. 2. Budowa dedykowanego laboratorium testowego "Dust Lab": Stworzenie infrastruktury do testowania mechanizmów w warunkach wysokiego zapylenia symulantem regolitu księżycowego/ marsjańskiego w próżni, aby zapewnić przewagę technologiczną w ofertach dla ESA i NASA.
R-3	Technologiczne	Brak dedykowanego systemu wspierającego testowanie manipulatorów na ziemi w warunkach zmniejszonej grawitacji w trzech wymiarach, znacząco utrudnia przeprowadzenie prawidłowej walidacji systemu i znacząco zwiększa ryzyko niepoprawnej pracy systemu.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Inwestycja w infrastrukturę testową: Budowa aktywnego systemu odciążania opartego na serwomechanizmach i śledzeniu ruchu, umożliwiającego symulację pracy w środowisku o zmniejszonej lub przy braku grawitacji w przestrzeni 3d.
R-4	Ryzyka Organizacyjne i Zarządcze	Z uwagi na silne połączenie polityki z strukturami państwowymi istnieje ryzyko ponownych zmian delegatów co może spowodować ponownie chaos informacyjny i decyzyjny po stronie Polski.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ustanowienie Międzyresortowego Zespołu ds. Kosmosu o charakterze eksperckim: Stworzenie stałego sekretariatu technicznego (np. przy POLSA), który zachowuje ciągłość wiedzy i relacji z ESA niezależnie od zmian politycznych. 2. Sformalizowanie ścieżki nominacji delegatów: Wprowadzenie kryteriów merytorycznych i kadencyjności, co ograniczy wpływ doraźnej polityki na obsadę kluczowych stanowisk w komitetach doradczych ESA.

Numer	Domena	Opis	Akcje mitygacyjne
R-5	Ryzyka Organizacyjne i Zarządcze	Istnieje ryzyko, że kierunki rozwoju polskiej robotyki będą dyktowane doraźnymi potrzebami ESA lub partnerów zagranicznych, zamiast wynikać z głębokiej analizy rodzimego potencjału technologicznego oraz jasno zdefiniowanej, długofalowej strategii kosmicznej Polski	<ol style="list-style-type: none"> Opracowanie "Krajowej Mapy Rozwoju" (KMR): Audyt polskiej myśli technicznej i wybór nisz, w których Polska chce być liderem. Inwestowanie składki ESA celowo w te obszary, zamiast reagowania na rozproszone zapytania. Stworzenie Funduszu Suwerennych Misji: Rezerwacja i alokowanie części budżetu na rozwój wewnętrzny przemysłu kosmicznego na projekty realizujące wyłącznie polskie cele strategiczne (np. misja Twardowski II), co wymusi na partnerach zewnętrznych dostosowanie się do naszych standardów, a nie odwrotnie.

Tabela 7-6 Zestawienie Barrier

Bariera	Domena	Opis
B-1	Organizacyjne i Zarządcze	Brak jednolitego „Narodowego Programu Rozwoju Robotyki” może prowadzić do dublowania prac R&D i nie efektywnego wykorzystania zasobów.
B-2	Organizacyjne i Zarządcze	Zarządzanie projektami klasy ESA Argonaut wymaga rygorystycznych procesów Product Assurance (PA) i Quality Assurance (QA), które dla mniejszych podmiotów są kosztowne i trudne do wdrożenia.
B-3	Organizacyjne i Zarządcze	Brak jasnej i zaakceptowanej polityki w kontekście rozwoju technologii robotycznych. Powoduje to paraliż decydentów po stronie Ministerstw i brak chęci wzięcia ryzyka na swoje barki.
B-4	Organizacyjne i Zarządcze	Mimo zwiększonej składki do ESA w CM22, budżet w programie związanej z eksploracją nie został w znacznej mierze wykorzystany. To spowodowało znaczne obniżenie składki w CM25 na eksplorację, mimo iż najbliższe lata powiązana są z szeregiem misji ESA.
B-5	Organizacyjne i Zarządcze	Brak jasno zdefiniowanych punktów kontaktowych i decyzyjnych po stronie Polskiej delegacji.
B-6	Rynkowe i Ekonomiczne	Rozwój zależy od wysokości polskiej składki opcjonalnej (GSTP, E3P) oraz od wyników rozdysponowania poszczególnych budżetów pomiędzy poszczególne aktywności. Istotne jest aby Polska delegacja miała jasne informacje od polskiego przemysłu w jakich inicjatywach/ misjach i programach Polska może i chce uczestniczyć. Warto tutaj podkreślić że polscy delegaci muszą walczyć o miejsce Polski w kluczowych misjach na dostawę głównych systemów, które przyniosą Polsce wymierne korzyści w przyszłości i możliwość zdobycia doświadczenia lotnego.
B-7	Rynkowe i Ekonomiczne	Olbrzymia konkurencja ze strony firm takich jak Leonardo, Airbus, RedWire czy Thales, które posiadają dekady doświadczenia i gotowe, certyfikowane łańcuchy dostaw i produkty.
B-8	Infrastrukturalne	Mimo zwiększonej liczby centrów testowych, wciąż brakuje w Polsce zaawansowanych i efektywnych kosztowo czystych i brudnych komór termo-próżniowych, stanowisk do testów radiacyjnych, certyfikowanych zgodnie z ECSS laboratoriów do testów ESD i EMC.
B-9	Regulacyjne i Prawne	Brak polskiej ustawy o działalności kosmicznej utrudnia kwestie ubezpieczeń misji, odpowiedzialności za obiekty wysłane w kosmos oraz procedury uzyskiwania pozwoleń na starty.
B-10	Kadrowe	Najzdolniejsi inżynierowie są przejmowani przez zagraniczne koncerny (SpaceX, NASA, ESA) oferujące lepsze warunki finansowe i ciekawsze projekty.
B-11	Kadrowe	Brak jest oparcia systemu dydaktycznego w Polsce o faktyczne potrzeby i wymagania od strony przemysłu kosmicznego.
B-12	Kadrowe	Brakuje kierunków studiów szkolących inżynierów Systemowych z doświadczeniem w prowadzeniu kompletnych cykli życia misji kosmicznych według standardów ECSS.
B-13	Organizacyjne i Zarządcze	Brak jest jasno określonych punktów kontaktowych od strony Polskiego Wojska co ma szczególne znaczenie w kontekście rozwoju technologii podwójnego zastosowania.

12 Rekomendacje Strategiczne

12.1 Wytyczne dla Instytucji Administracji Publicznej (MRiT, POLSA, NCBR)

Kluczowym zadaniem administracji państwowej jest zapewnienie stabilnego otoczenia regulacyjno-finansowego oraz redukcja ryzyk wejścia na rynek wysokich technologii. Poniżej sformułowano cztery rekomendacje dla zdefiniowanych Interesariuszy:

- Optymalizacja i szczegółowa dystrybucja subskrypcji w programach opcjonalnych i obowiązkowych ESA w ramach CM25.

Należy dokonać strategicznej alokacji środków w ramach CM25, ze szczególnym uwzględnieniem programów E3P oraz GSTP. Inwestycje powinny być ukierunkowane na polskie specjalizacje technologiczne, co umożliwi krajowym podmiotom pełnienie roli dostawców systemowych (Tier-1/Tier-2) w misjach takich jak Argonaut.

- Wdrożenie Narodowego Programu Walidacji Technologii (IOD/IOV).

Rekomenduje się ustanowienie mechanizmu finansowania misji demonstracyjnych typu *In-Orbit Demonstration*. Uzyskanie potwierdzonego dziedzictwa lotnego (*Flight Heritage*) jest warunkiem koniecznym do przetamania barier rynkowych i uzyskania statusu głównego wykonawcy (*Prime*) w międzynarodowych przetargach. Organizowanie małych i szybkich misji skoncentrowanych na rozwoju konkretnej technologii przy wykorzystaniu współpracy bilateralnej wydaje się również dobrym pomysłem.

- Rozbudowa Infrastruktury Badawczo-Testowej.

Konieczna jest rozbudowa krajowych ośrodków badawczych o specjalistyczne instalacje do kompensacji grawitacji (systemy odciążania 3D) oraz komory do testów w środowisku zapylenia. Infrastruktura ta jest niezbędna do przeprowadzania procesów weryfikacji i walidacji (V&V) zgodnie z rygorystycznymi normami ECSS.

- Zapewnienie Ciągłości Kompetencyjnej Organów Doradczych. Wprowadzenie mechanizmów gwarantujących stabilność składu delegacji krajowych w strukturach ESA. Ciągłość ekspercka jest niezbędna dla budowania długofalowych relacji międzynarodowych oraz skutecznego lobbingu na rzecz polskich interesów technologicznych.

12.2 Wytyczne dla Sektora Przemysłowego i Badawczego

Podmioty komercyjne oraz jednostki naukowe powinny dążyć do konsolidacji potencjału w celu oferowania zintegrowanych rozwiązań systemowych.

- Formowanie Konsorcjów Celowych i Integracja Pionowa.

Zaleca się odchodzenie od rozproszonych działań jednostkowych na rzecz budowy silnych konsorcjów przemysłowych. Synergia kompetencji w zakresie platform satelitarnych, manipulatorów robotycznych oraz systemów wizyjnych pozwoli na oferowanie kompleksowych systemów do serwisowania orbitalnego (ISAM) oraz eksploracji planetarnej (ISRU).

- Profesjonalizacja w Zakresie Inżynierii Systemowej i Zapewnienia Jakości.

Niezbędne jest podniesienie kompetencji w obszarach *Systems Engineering* oraz *Product Assurance* (PA). Ścisłe przestrzeganie standardów lotnych jest kluczowe dla minimalizacji ryzyka technicznego i zwiększenia wiarygodności polskich podmiotów w łańcuchu dostaw globalnych integratorów.

- Komerccjalizacja Wyników Prac Badawczo-Rozwojowych.

Należy zintensyfikować procesy transferu zaawansowanych algorytmów (np. SLAM, autonomiczne GNC) ze środowisk akademickich do przemysłu. Rekomenduje się adaptację innowacyjnych rozwiązań opracowanych w ramach projektów studenckich do standardów przemysłowych i lotnych.

- Koncentracja na Technologiach Krytycznych i Niszowych.

Strategiczna przewaga powinna być budowana w oparciu o unikalne kompetencje, takie jak zaawansowane układy jezdne, systemy ochrony przed pyłem księżycowym oraz autonomiczne systemy nawigacji relatywnej. Specjalizacja w tych obszarach umożliwi polskim firmom zajęcie pozycji kluczowego ogniwa w międzynarodowych programach eksploracyjnych.

13 Podsumowanie

13.1 Najważniejsze ustalenia

Niniejsza ekspertyza potwierdza, że polski sektor kosmiczny dysponuje unikalnymi w skali europejskiej kompetencjami w obszarach robotyki kosmicznej (chwytaaki LARIS) oraz GNC, jak również precyzyjnych mechanizmów robotycznych. Kluczowym wnioskiem jest stwierdzenie, że Polska znajduje się w fazie przejścia od dostawcy komponentów do integratora zaawansowanych podsystemów robotycznych. Zidentyfikowano synergię między doświadczeniami przemysłowym (GMV, PIAP Space), naukowym (Politechnika Poznańska, AGH) oraz innowacyjnym potencjałem kadr wywodzących się z zawodów łazikowych. Największym wyzwaniem pozostaje pokonanie bariery „doliny śmierci” TRL poprzez uzyskanie Flight Heritage dla kluczowych algorytmów i mechanizmów.

13.2 Znaczenie ekspertyzy dla Polskiej Strategii Kosmicznej

Opracowanie stanowi merytoryczny fundament dla aktualizacji Polskiej Strategii Kosmicznej w zakresie robotyki orbitalnej i planetarnej. Wskazuje ono na konieczność przyjęcia modelu „Krajowej Specjalizacji Systemowej”, który pozwoli na optymalne wykorzystanie składki opcjonalnej w programach ESA (GSTP, E3P, S2P). Ekspertyza definiuje priorytetowe kierunki rozwoju, które umożliwią Polsce osiągnięcie celu 3% udziału w obrotach rynku kosmicznego UE do 2030 roku. Dokument ten jest również wytyczną dla decydentów w kontekście procesowania dalszych alokacji środków w ramach CM25, sugerując celowaną alokację środków w technologii o najwyższym potencjale komercyjnym i strategicznym dla suwerenności technologicznej państwa.

13.3 Szacunkowa wartość wdrożenia wyników

Wstępna analiza ekonomiczna wskazuje, podział inwestycji pomiędzy trzy główne filary: ISOS (38 mln Euro), ISRU (82mln Euro, uwzględniając misję demonstracyjną) i ARGONAUT (18.7 mln Euro uwzględniając dalszy udział Polski w projekcie MANUS). Inwestycja ta ma potencjał wygenerowania zwrotu na poziomie 5–7-krotności włożonego kapitału (ROI), wynikającego z kontraktów wysokomarżowych, eksportu gotowych systemów GNC oraz udziału w rodzącym się rynku usług serwisowania orbitalnego (ISAM) i wydobycia surowców (ISRU), którego globalna wartość szacowana jest na miliardy euro w nadchodzącej dekadzie.