



Zanim wyślesz na orbitę przetestuj radiacyjnie - kilka słów o testach komponentów COTS

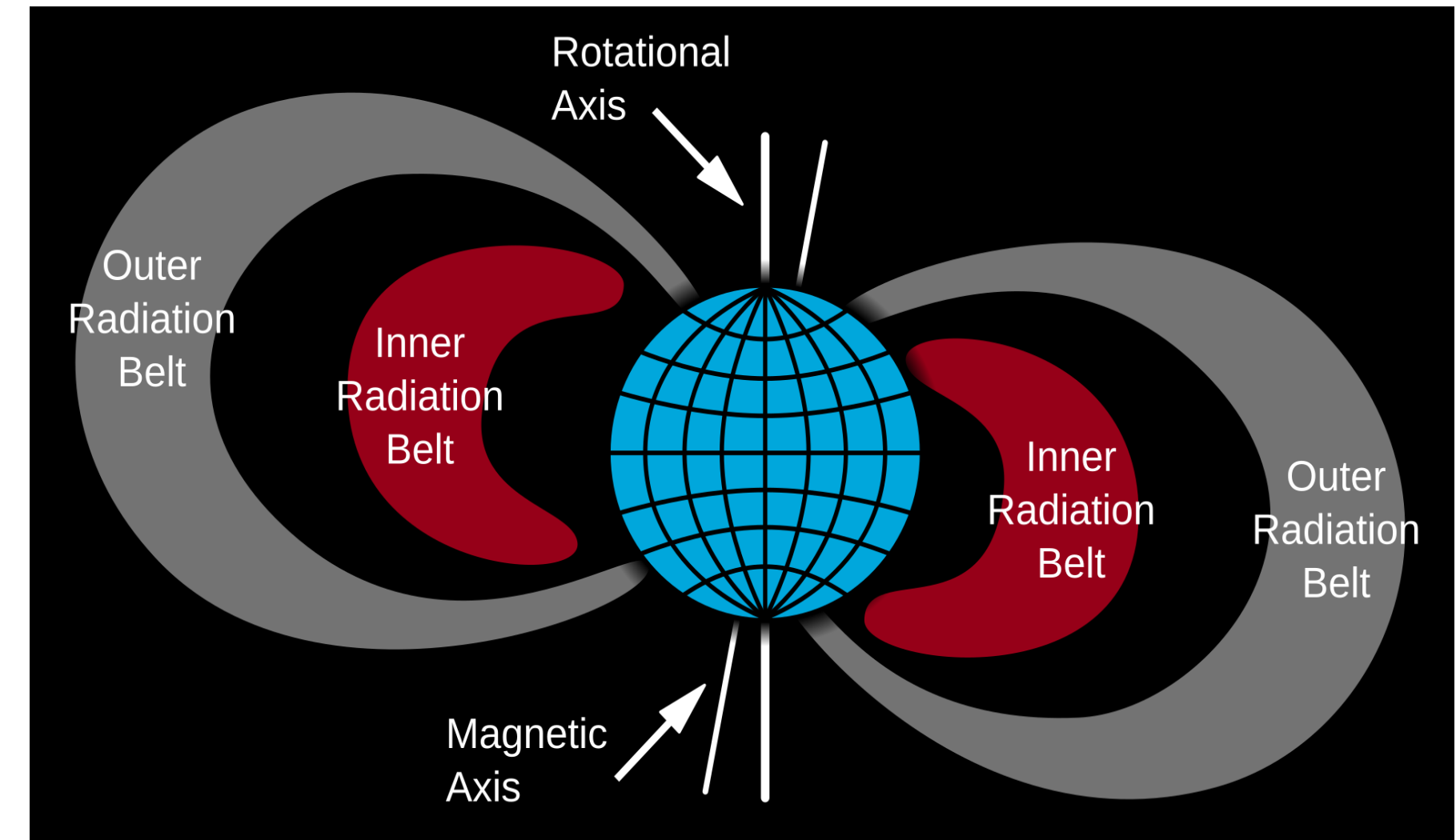
HARDWARE DESIGN MASTERCLASSES, WROCŁAW 2024

Hubert Graczyk, Hubert.graczyk@ilot.lukasiewicz.gov.pl

WARUNKI ŚRODOWISKOWE W KOSMOSIE

Źródła promieniowania:

- **Słońce**
 - Wiatr słoneczny – niskoenergetyczne cząstki, głównie fotony, w mniejszych ilościach elektrony i protony
 - Koronalne wyrzuty masy (CMEs), eksplozje, rozbłyski słoneczne
 - Wysokoenergetyczne cząstki – elektrony, protony oraz ciężkie jony
- **„Deep space”** (Galactic Cosmic Rays, GCR)
 - Wysokoenergetyczne cząstki ciężkich jonów
- **Pasy Van Allena**



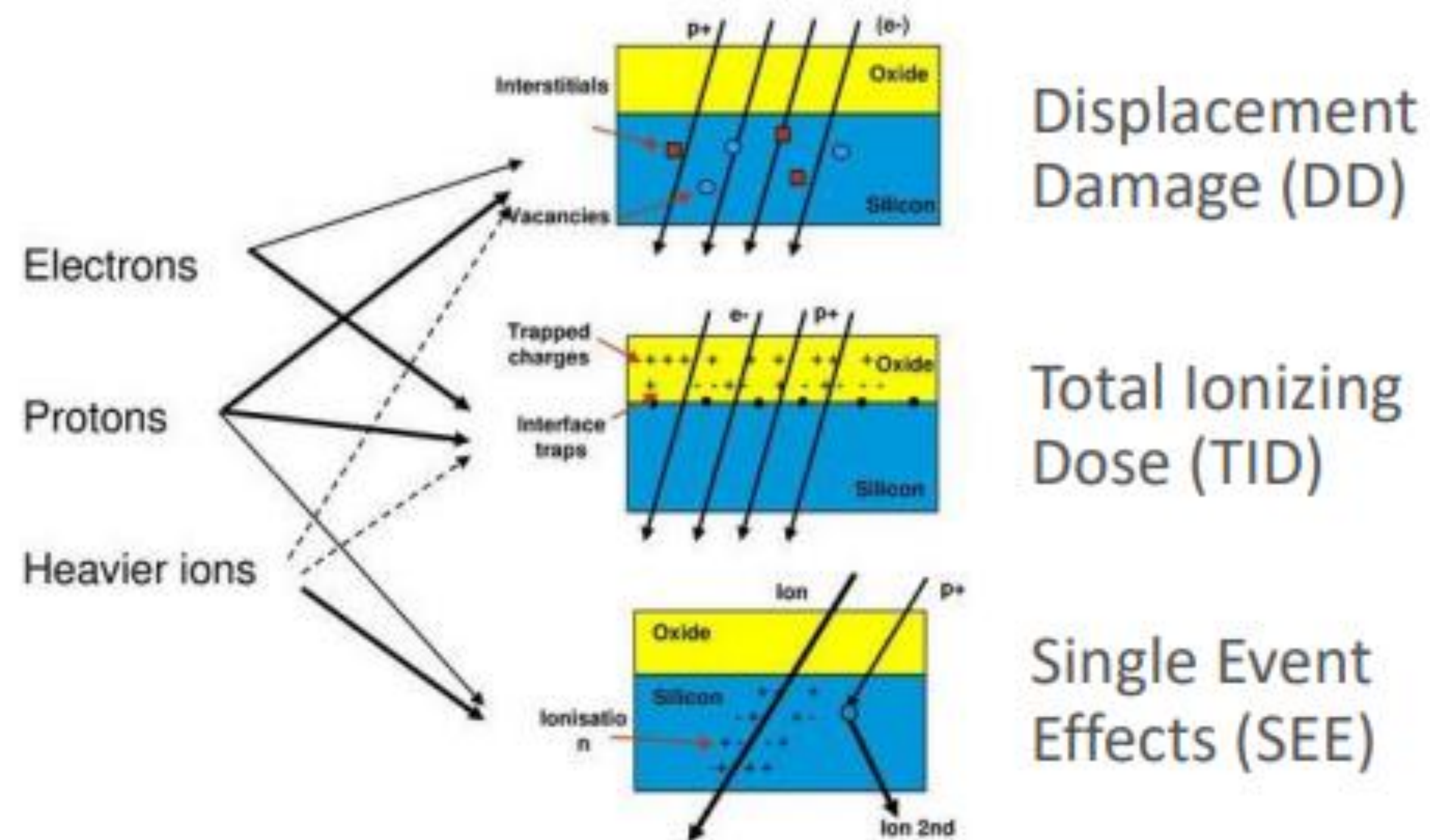
ZJAWISKA WYWOŁYWANE PRZEZ PROMIENIOWANIE

Efekty radiacyjne:

- **Kumulacyjne**

- Całkowita doza jonizująca - *Total Ionizing Dose* (TID)
- Uszkodzenia strukturalne - *Displacement Damage* (DD)

- **Pojedyncze zdarzenia** - *Single Event Effects* (SEE)



EFEKTY RADIACYJNE – KUMULACYJNE VS POJEDYNCZE ZDARZENIA



lato 2019



zima 2024

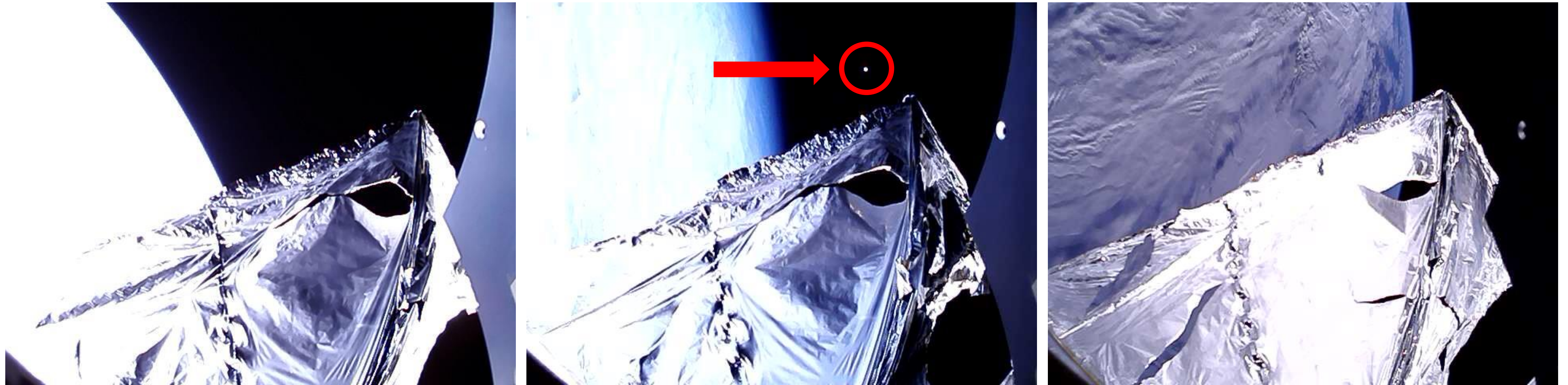
Kumulacyjne – TID/DD

Urządzenie: Lucky-7 CubeSat, wystrzelony na orbitę w 2019 roku

Problem: po ok. 2 latach zauważalnie obniżona jakość zdjęć, problemy z ostrością obrazu

Prawdopodobna przyczyna: Matowienie szkła obiektywu oraz uszkodzenia struktury matrycy od promieniowania gamma

EFEKTY RADIACYJNE – KUMULACYJNE VS POJEDYNCZE ZDARZENIA



Seria zdjęć wykonanych w okresie kilku sekund

Single Event Effect - SEE

Urządzenie: PW-Sat2 CubeSat, wystrzelony na orbitę w 2018 roku

Problem: Pojedyncze prześwietlone zdjęcia, zauważalne pojedyncze białe „punkty”/zakłócenia

Prawdopodobna przyczyna: uderzenie wysokoenergetycznych cząstek przez sensor kamery

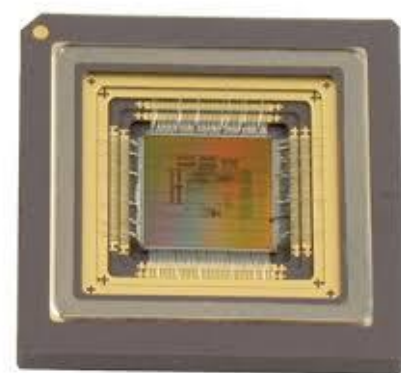
MITYGACJA PROBLEMÓW Z PROMIENIOWANIEM

- Przemysłana architektura urządzenia (Kumulacyjne / SEE)
- Wykorzystanie elementów odpornych na promieniowanie – rad-hard/rad-tolerant (Kumulacyjne, częściowo SEE)
- Ekranowanie i zabudowa (Kumulacyjne)
- Elektroniczne obwody zabezpieczające (SEE)
- Oprogramowanie i rozbudowane testy funkcjonalne (SEE)
- **Testy radiacyjne (Kumulacyjne, rzadziej SEE)**



MITYGACJA PROBLEMÓW Z PROMIENIOWANIEM – DOBÓR KOMPONENTÓW

RAD-HARD / RAD-TOLERANT



ZALETY:

- Odporność na wysokie dawki promieniowania
- Wytrzymałość i długi cykl życia
- niezawodność (potwierdzona testowo oraz w wielu misjach)

WADY:

- Drogie (bardzo)
- Duże rozmiary
- Stosunkowo słabe parametry pracy
- Długie terminy dostaw
- Mała ilość producentów
- Ograniczony asortyment

INDUSTRIAL / COTS



ZALETY:

- Tanie
- Niewielkie rozmiary
- Krótkie terminy dostaw
- Szeroka gama zamienników
- Duży wybór wariantów
- Dobre parametry pracy
- Niektóre testowane w locie

WADY:

- Nieprzystosowane do pracy w środowisku radiacyjnym
- Brak oficjalnych informacji o odporności na promieniowanie
- Niewielka ilość danych o zastosowaniu w urządzeniach lotnych
- Wymagają testów

Baza testowanych komponentów: <https://pmpedia.space/>
<https://www.doeet.com/>

Źródło:

Electronics Weakly, Infineon shipping 2Mb rad hard FRAM, David Manners 19th April 2022
The Cpushack Museum, The other Atmel: Radiation Hardened Sparc CPU's, July 27th, 2009
IRHNA67260 (JANSR2N7583U2) Datasheet, An Infineon Technologies Company, PD-94342J
Rad Hard 256 Mb SDRAM 8-Meg X 8-Bit X 4-Banks Memory, powerdevicecorp.com, available 10th October 2024

SAMV71Q21RT, Microchip.com, available 10th October 2024
ADC128S102, ti.com, available 10th October 2024
STM32H7 series IC, en.wikipedia.org/wiki/STM32, available 10th October 2024
westfloridacomponents.com, TN28F020-150 EEPROM, available 10th October 2024

MITYGACJA PROBLEMÓW Z PROMIENIOWANIEM : TESTY SEE/DD



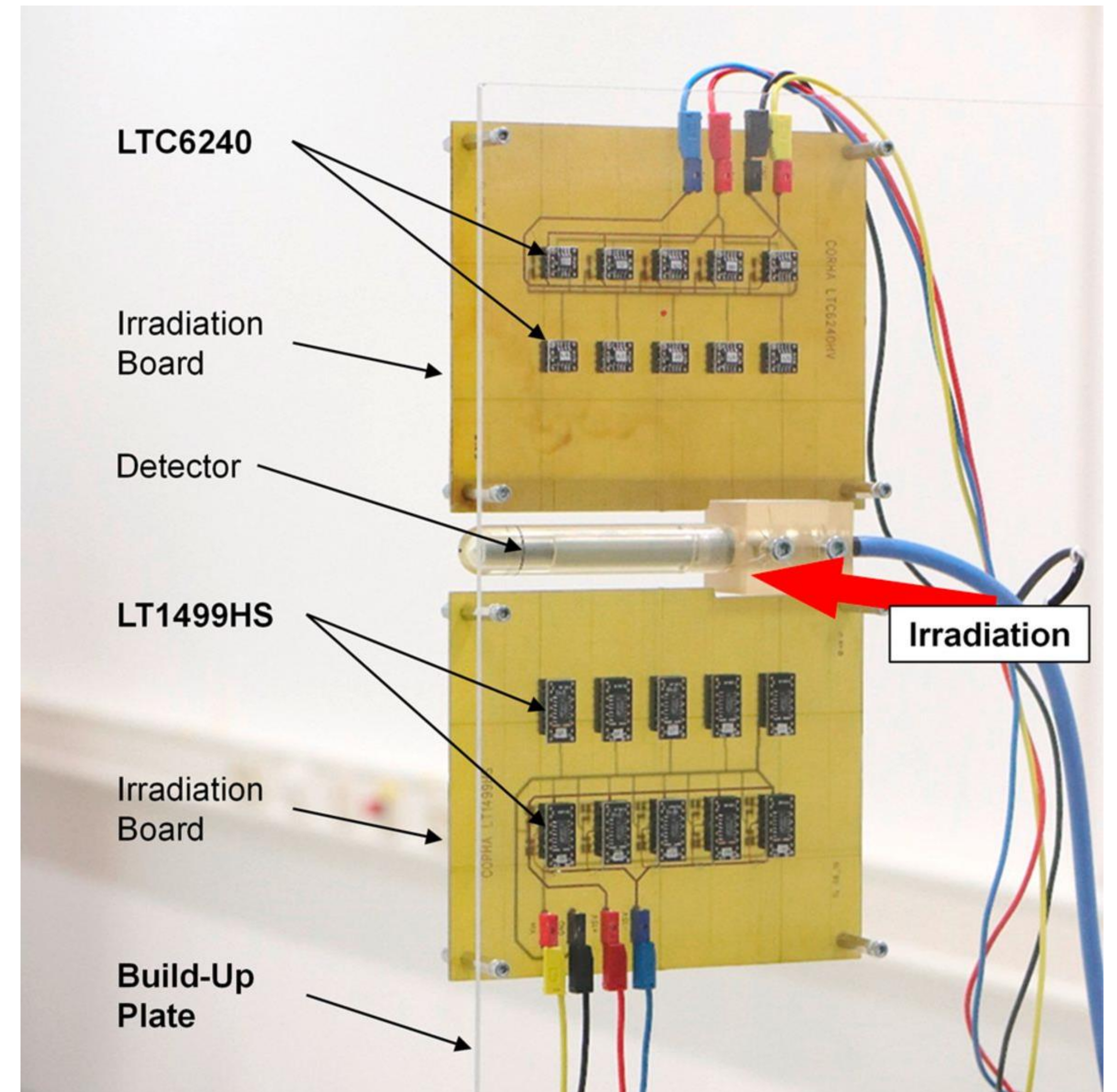
Testy SEE:

- Bardzo drogie testy i trudno dostępne ośrodki badawcze:
 - Polska: tylko Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie (źródło protonowe o energii do 230 MeV)
- Nisko opłacalne ze względu na możliwość systemowego łagodzenia skutków SEE.

MITYGACJA PROBLEMÓW Z PROMIENIOWANIEM : TESTY TID

Badania radiacyjne na poziomie komponentów

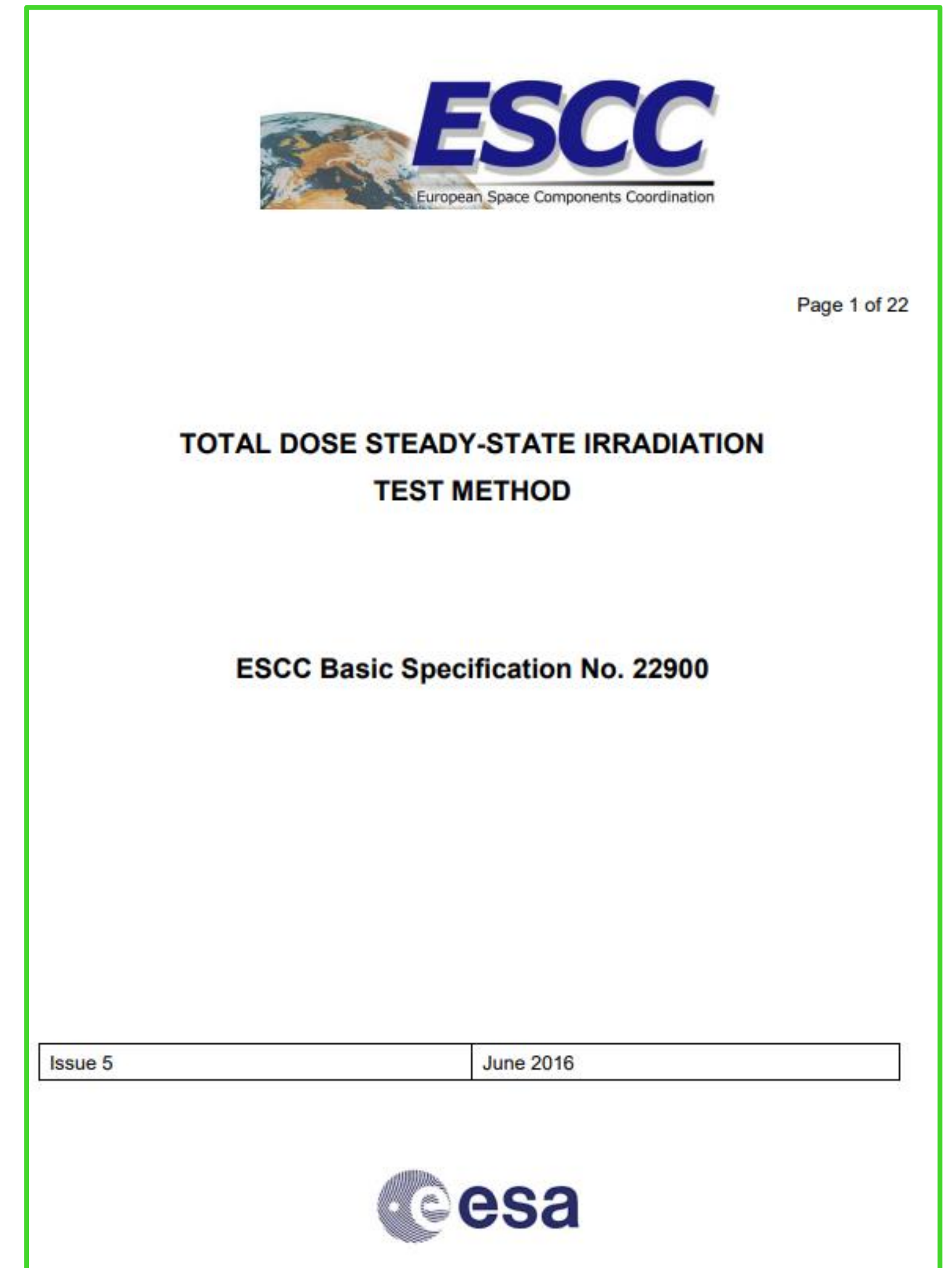
- Bardzo kosztowne:
 - Koszty przygotowania testów
 - Konieczność użycia dużej liczby komponentów
 - Dobór metody badania i źródła naświetlania zgodnie z przyjętymi standardami testów
 - Zaawansowana infrastruktura oraz aparatura pomiarowa
- Najbardziej dokładne i miarodajne badania:
 - „złoty standard” dla przemysłu kosmicznego
 - Największa wiarygodność określonej odporności na radiację testowanych komponentów
 - Potwierdzenie parametrów procesu produkcyjnego komponentów



STANDARD TESTÓW TID– ESCC 22900

Standard ESA przygotowany w oparciu o normę **MIL-STD-883, metoda 1019**:

- Standard Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych
- Pochodzący z czasów Zimnej Wojny
- Opracowany do testowania elektroniki pod kątem odporności na promieniowanie pochodzące z broni nuklearnej
- Zdefiniowane dla testów na poziomie komponentu



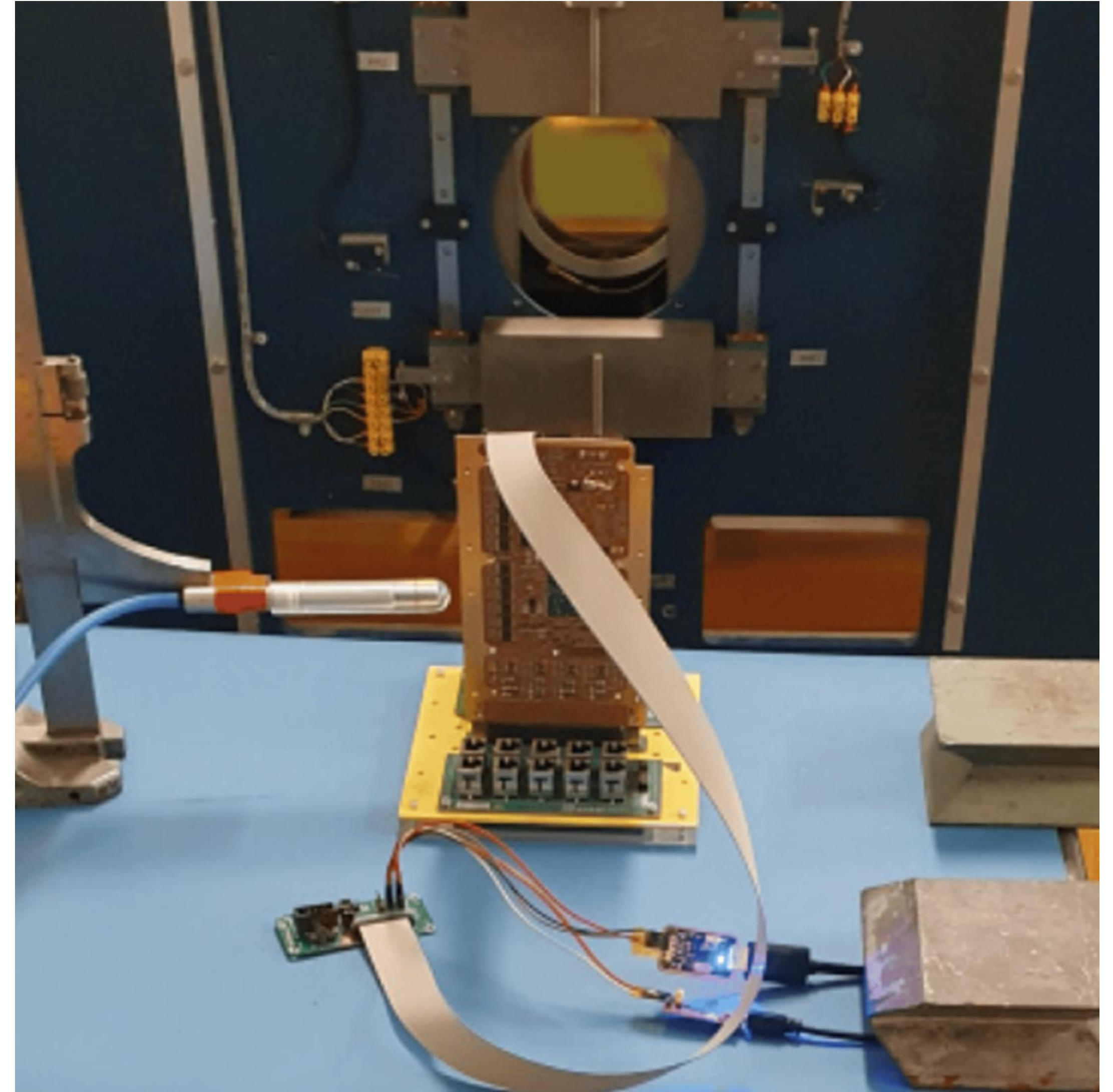
10

Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=Ffaylb3n6aQ>
<https://escies.org/escs-specs/published/22900.pdf>

MITYGACJA PROBLEMÓW Z PROMIENIOWANIEM : TESTY TID

Badania radiacyjne na poziomie systemu/podsystemu

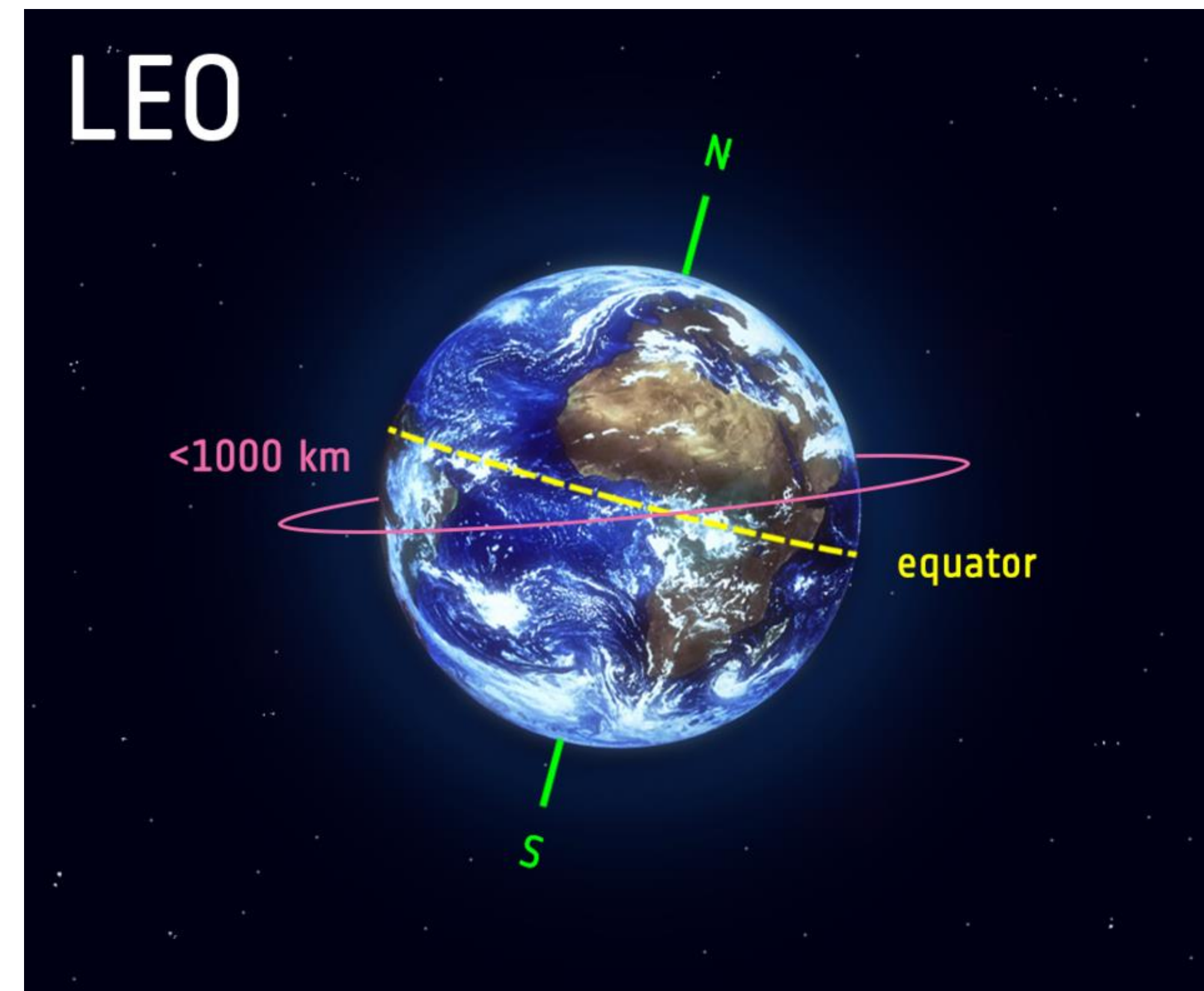
- Opłaczalne kosztowo*:
 - Testowanie wielu różnych komponentów jednocześnie
 - Mniej zaawansowana infrastruktura/aparatura pomiarowa
 - *Awaria jednego komponentów może zatrzymać proces badań – wymagane powtórzenie kampanii testowej
- Brak uniwersalnych standardów testowania
 - Standardy testów na poziomie komponentów jako punkt odniesienia
 - Testowane są tylko pojedyncze tryby pracy badanego systemu
- Badania nie dają konkretnego wyniku wytrzymałości na promieniowanie radiacyjne



TESTY TID, KROK I – ZDEFINIOWANIE MISJI

Środowisko radiacyjne i warunki misji

- Wyznaczenie orbity/orbit
- Analiza cyklu słonecznego i warunków na orbicie
- Oszacowanie warunków pracy urządzenia: cykle pracy, rodzaj wykonywanych zadań, całkowity czas pracy na orbicie, przybliżona data rozpoczęcia misji
- Wyznaczenie nietypowych cech misji
- Wstępne założenie architektury systemu
- Modelowanie i symulacja misji (SPENVIS)



TESTY TID, KROK II – PLAN TESTÓW

Testy funkcjonalne:

- Oczekiwane efekty i zakładana wytrzymałość
- Wyznaczenie punktów krytycznych
- „Test-as-you-fly” czy praca ograniczona?
- Ile próbek należy zbadać?

Parametry naświetlania:

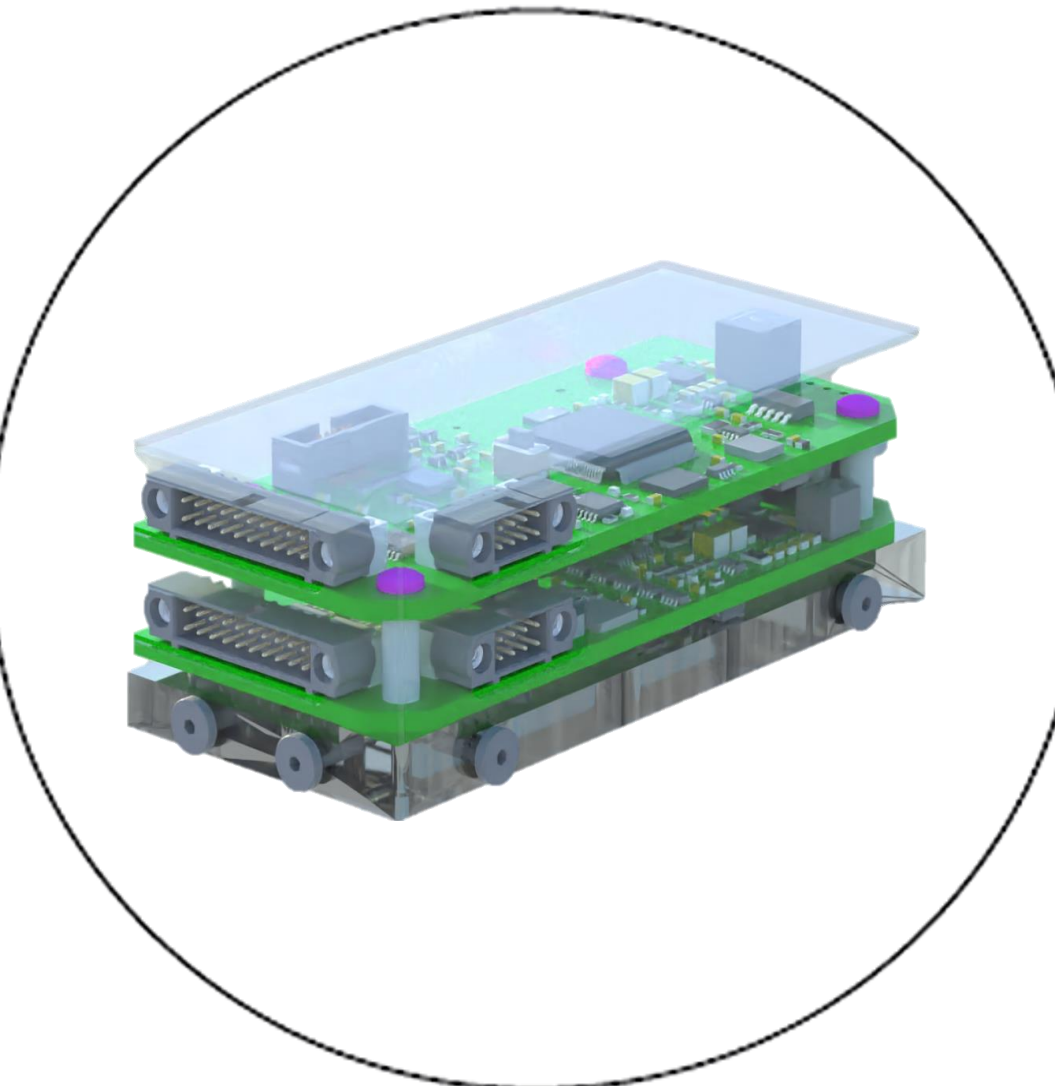
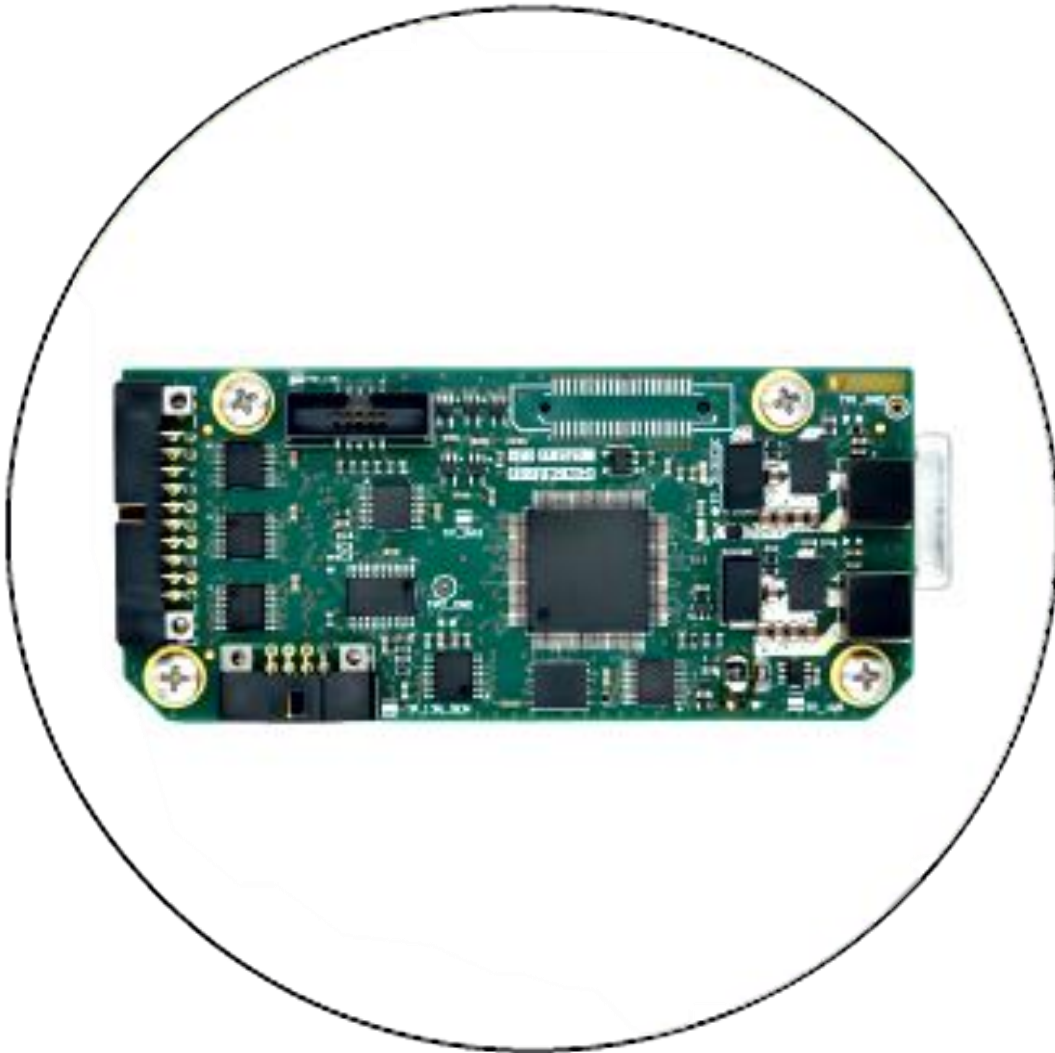
- Maksymalna dawka jonizująca
- Szybkość dawki (energia):
 - Długość kampanii vs „szok radiacyjny”
 - ELDRS- *Enhanced Low Dose Radiation Sensitivity*
 - Skok dawki naświetlania
- Rodzaj źródła promieniowania:
 - Modelowanie wybranych efektów radiacyjnych

Parametry wyżarzania:

- Czas wstępnego wyżarzania / wygrzewania
- Czas procesu starzenia
- Zakres temperatur
- Zakres funkcjonalnych testów weryfikacyjnych



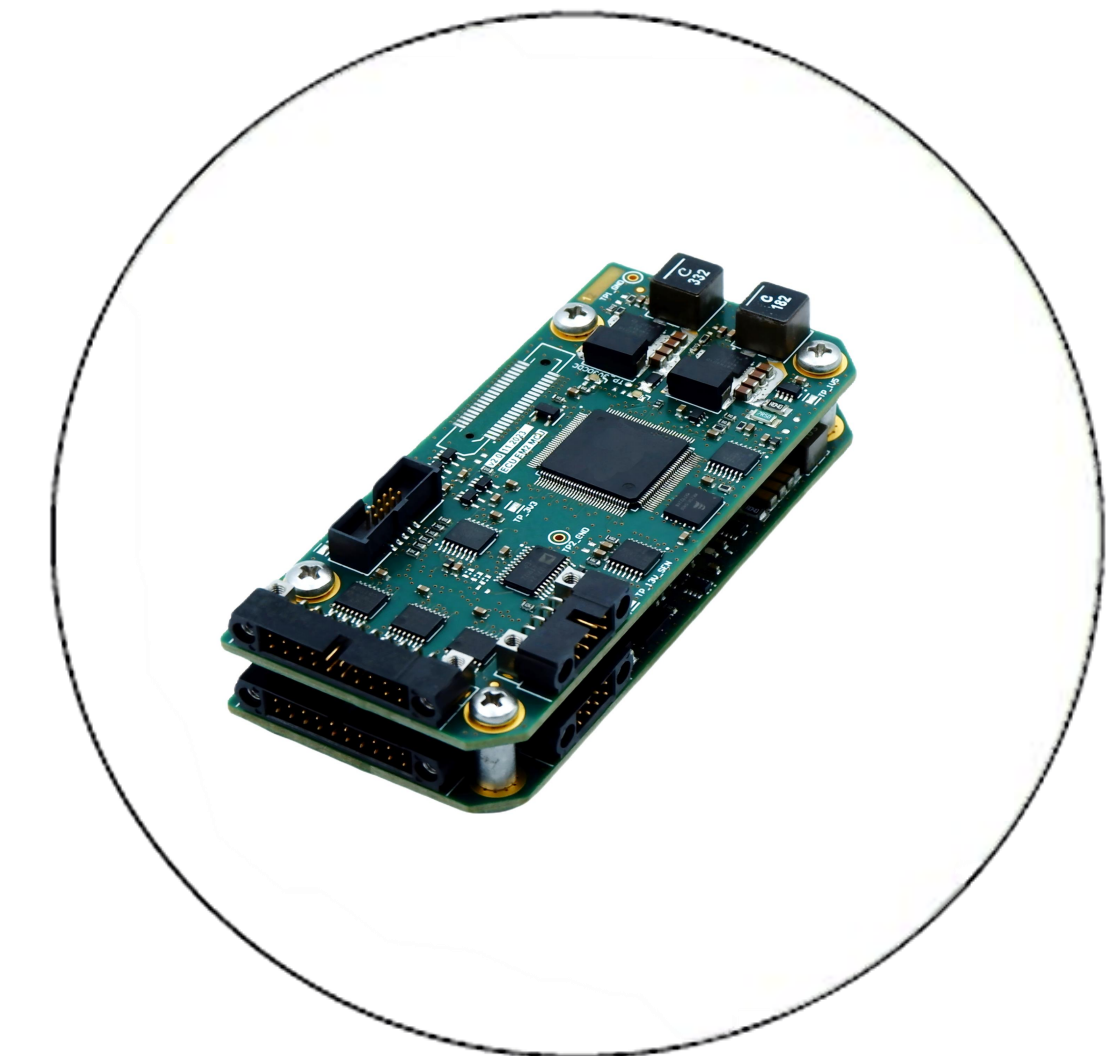
TESTY TID, KROK III – KAMPANIA TESTOWA (PRZYKŁAD)



ENGINE CONTROL UNIT (ECU)

Parameter	Value
Dimension	93 x 43 x 31 mm
Mass (without / with enclosure)	150 g / 300 g
Supply Voltage	26 to 32V
Power consumption	0.5 W in low power mode 40 W in full subsystem drive mode
Communication interfaces	1 x RS422 (with MODBUS) 2 x DI / TTL / 3.3V 2 x DO / TTL / 3.3V
Heater ports	6 x 10W / 28V / PWM controlled
Valve ports	2 x 15W / ±12V / Latching 1 x 7W / +28V / Standard
DAQ interfaces	10 x temperature input / PT1000 / 16 bit / 1 Hz 2 x pressure input / 4-20 mA / 16 bit / 100 Hz
Operating temperature	-20 to +50 C
Radiation tolerance (TID)	up to 10 krad
Standards compliance	SpaceX Rideshare Payload Users Guide v.9
Guaranteed orbital operation time	1 year

Parameters given for baseline configuration.



TID TESTING, STEP III – KAMPANIA TESTOWA (PRZYKŁAD)

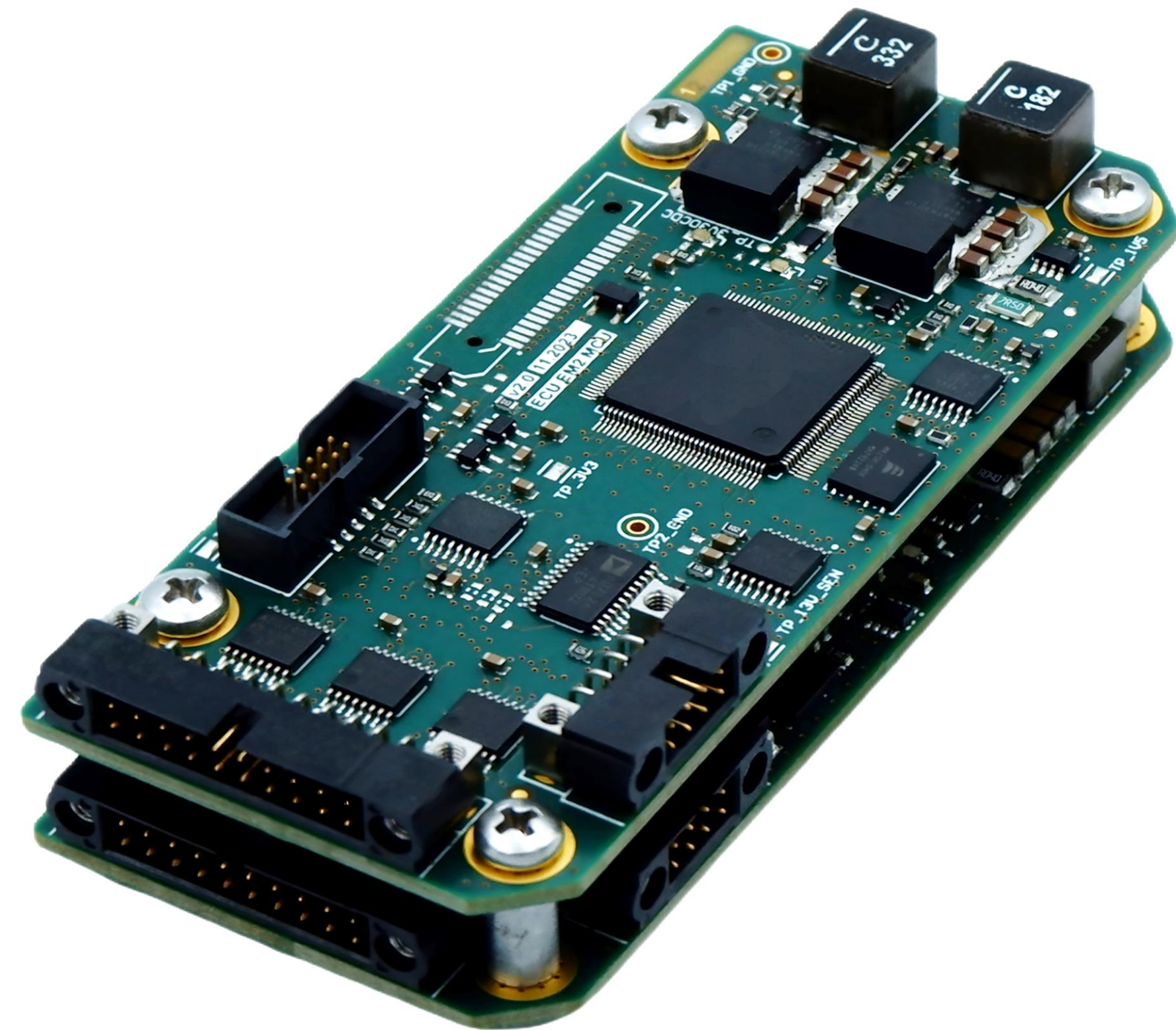
Cel: sprawdzenie i wykazanie odporności na promieniowanie urządzenia ECU

Badane obiekty: 3 szt. modelu inżynierskiego ECU

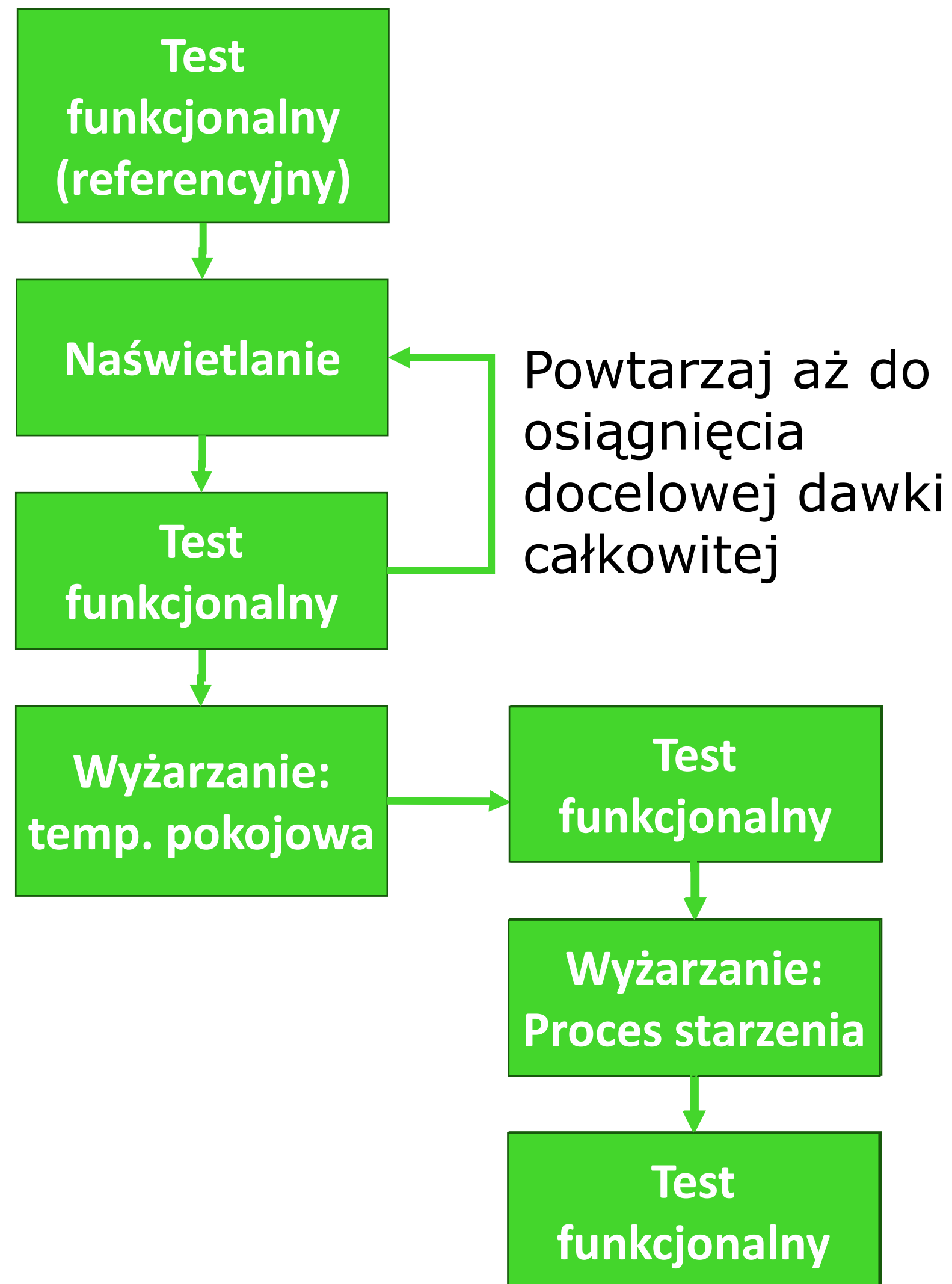
Parametry badania:

- testy TID
- fotony X z akceleratora (elektrony)
- krok 2,5 krad (do 15 krad)
- krok 5 krad (powyżej 15 krad) na godzinę

Norma badań: ESCC 22900, MIL-STD-883 1019.9



TID TESTING, STEP III – KAMPANIA TESTOWA (PRZYKŁAD)



Procedura testowa:

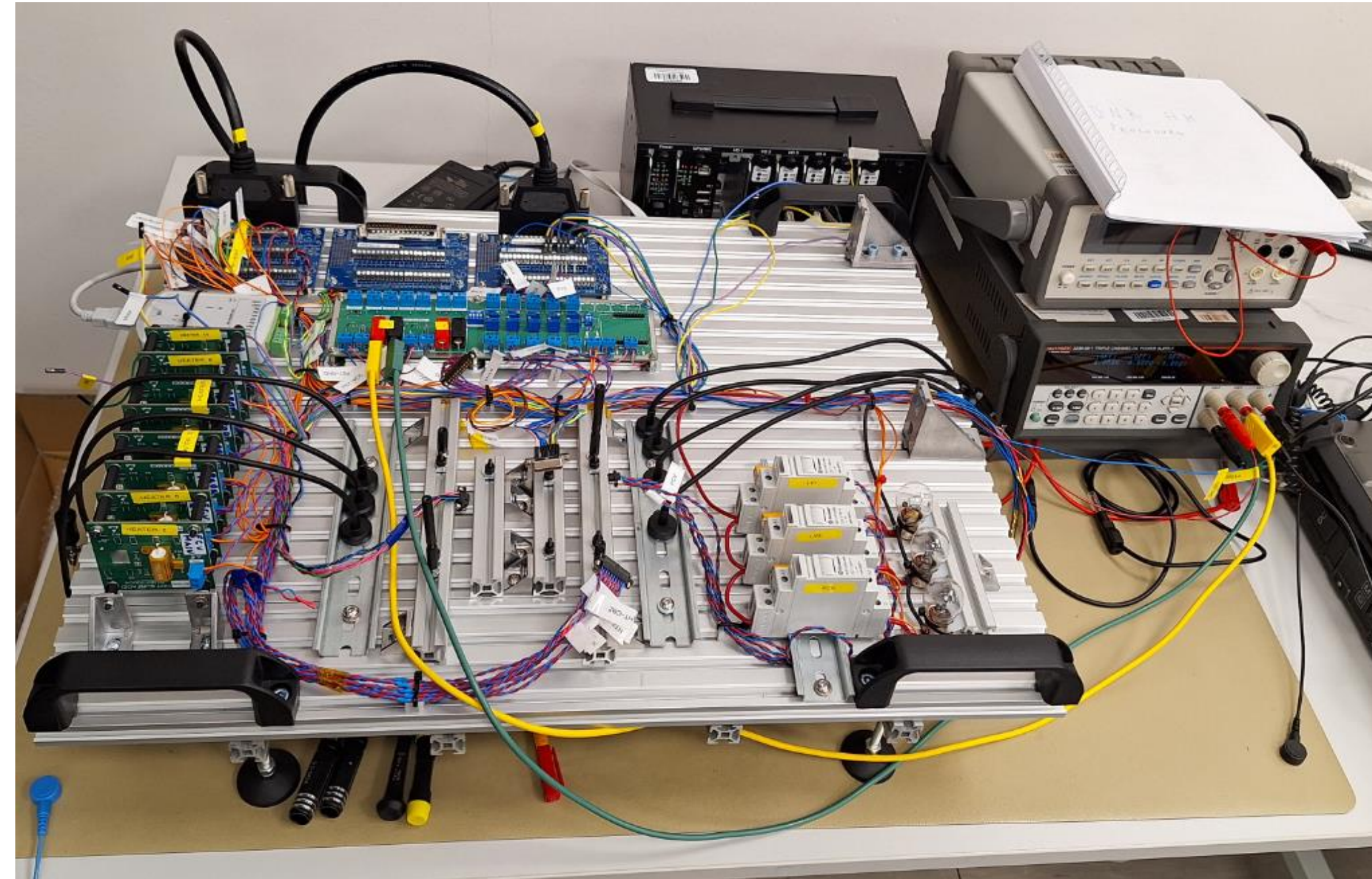
- Naświetlanie seriami do uzyskania pożądanej dawki: godzina naświetlania + sprawdzenie funkcjonalności urządzenia
- Wyżarzanie w temperaturze pokojowej: $(24h < t < 168h)$
- Wyżarzanie w wysokiej temperaturze (starzenie) przez 168h
- Kontrola funkcjonalności ECU i weryfikacja jego parametrów

TESTY RADIACYJNE ECU – TESTY FUNKCJONALNE

Zautomatyzowane stanowisko

testowe typu „flat-sat“:

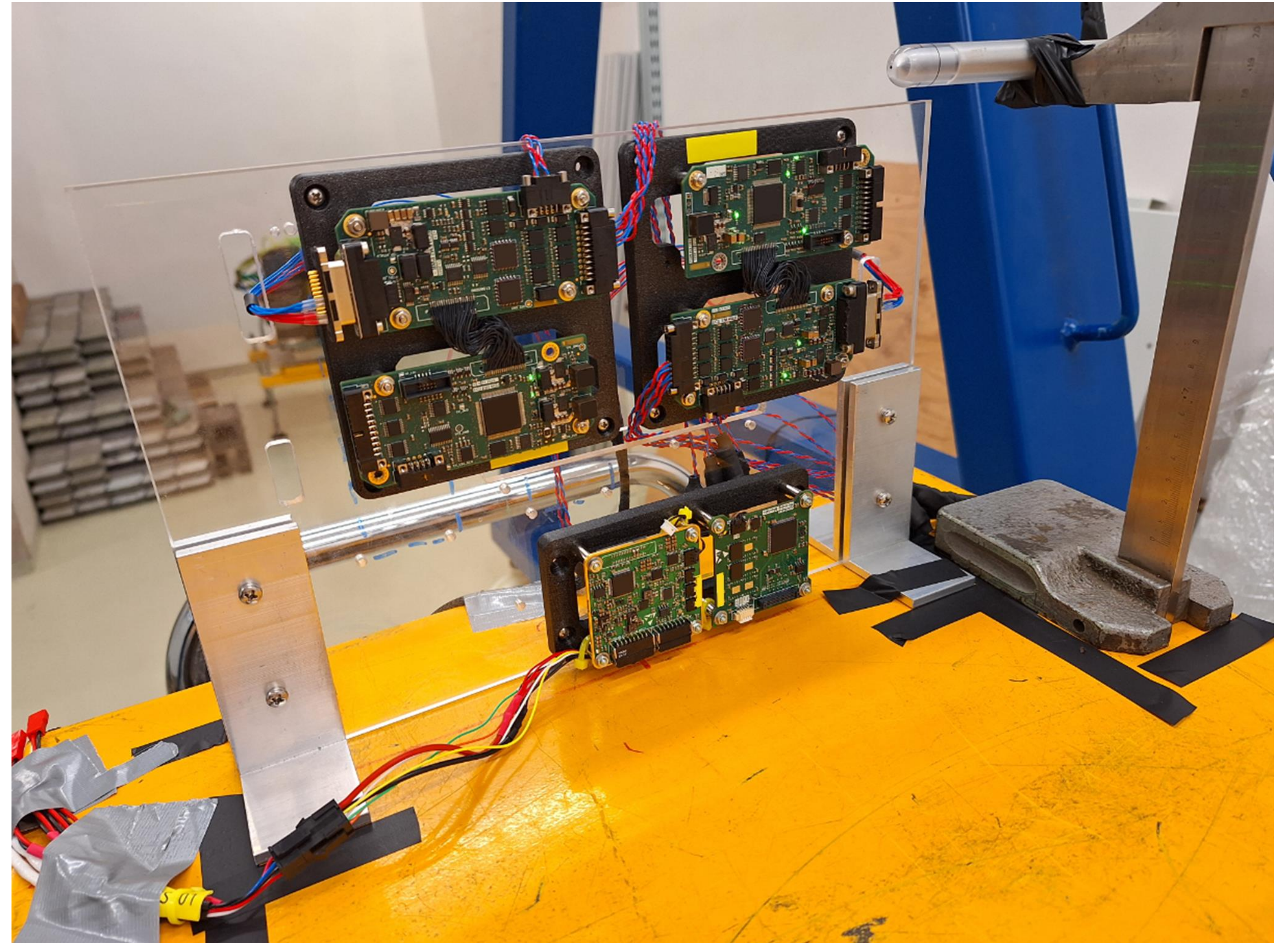
- Symulacja 2 czujników ciśnienia (prąd)
- Symulacja 10 czujników temperatury (rezystancyjnych)
- Symulacja 10 grzałek (obciążenia rezystancyjne)
- Symulacja 3 zaworów (obciążenie rezystancyjno-indukcyjne)
- Pomiar prądów i napięć na PCB – 36 dedykowanych punktów testowych
- Symulowany interfejs komunikacyjny SAT-OBC
- Scenariusze testowe napisane w Pythonie



TESTY RADIACYJNE ECU - NAŚWIETLANIE

Parametry naświetlania:

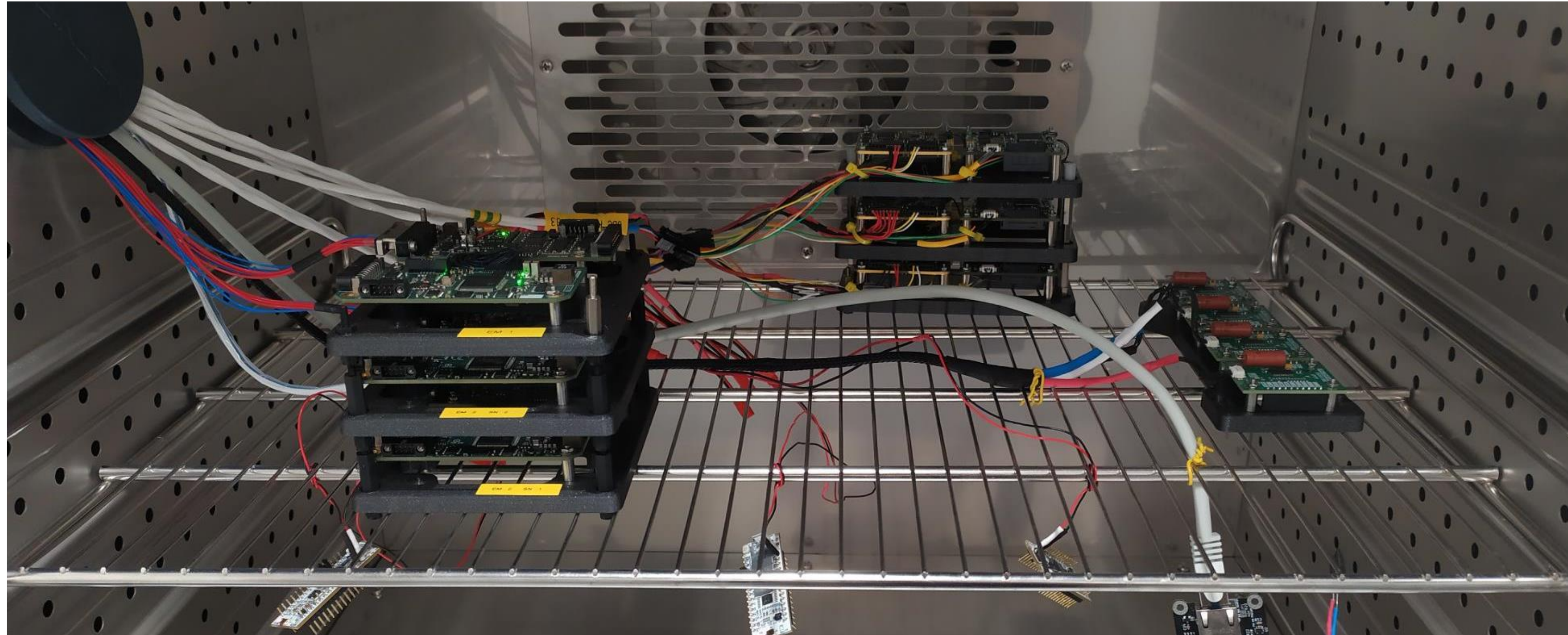
- Krok 2,5 krad/h
- Całkowita dawka:
 - 2 jednostki: 10 kradów (wymagane)
 - 1 jednostka: 25 kradów
- Brak ekranowania
- Dawka monitorowana za pomocą dozymetru
- Urządzenia włączone i obciążone nominalną wartością podczas promieniowania
- **Inne urządzenia były naświetlane w tym samym czasie**



TESTY RADIACYJNE ECU – WYŻARZANIE

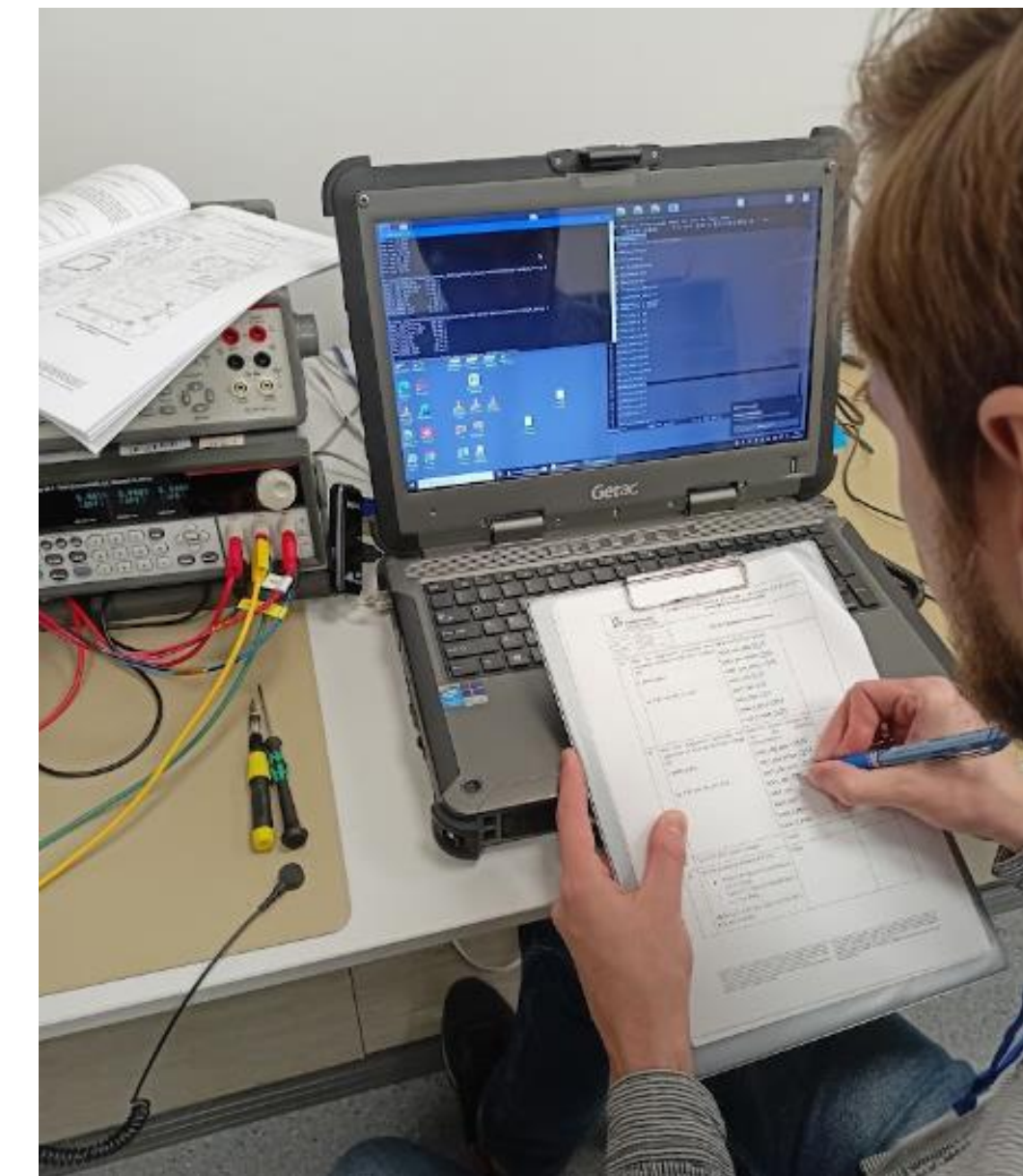
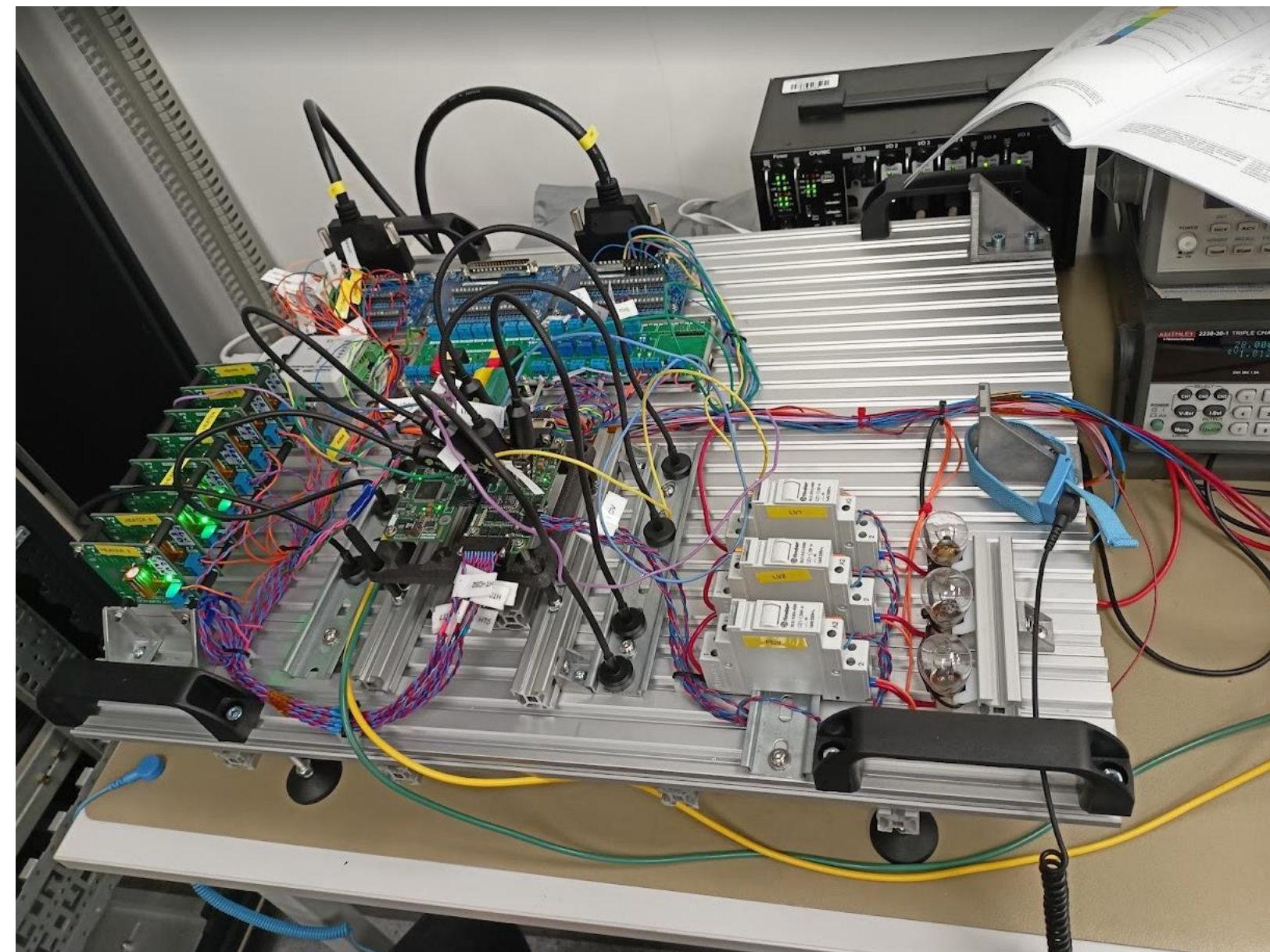
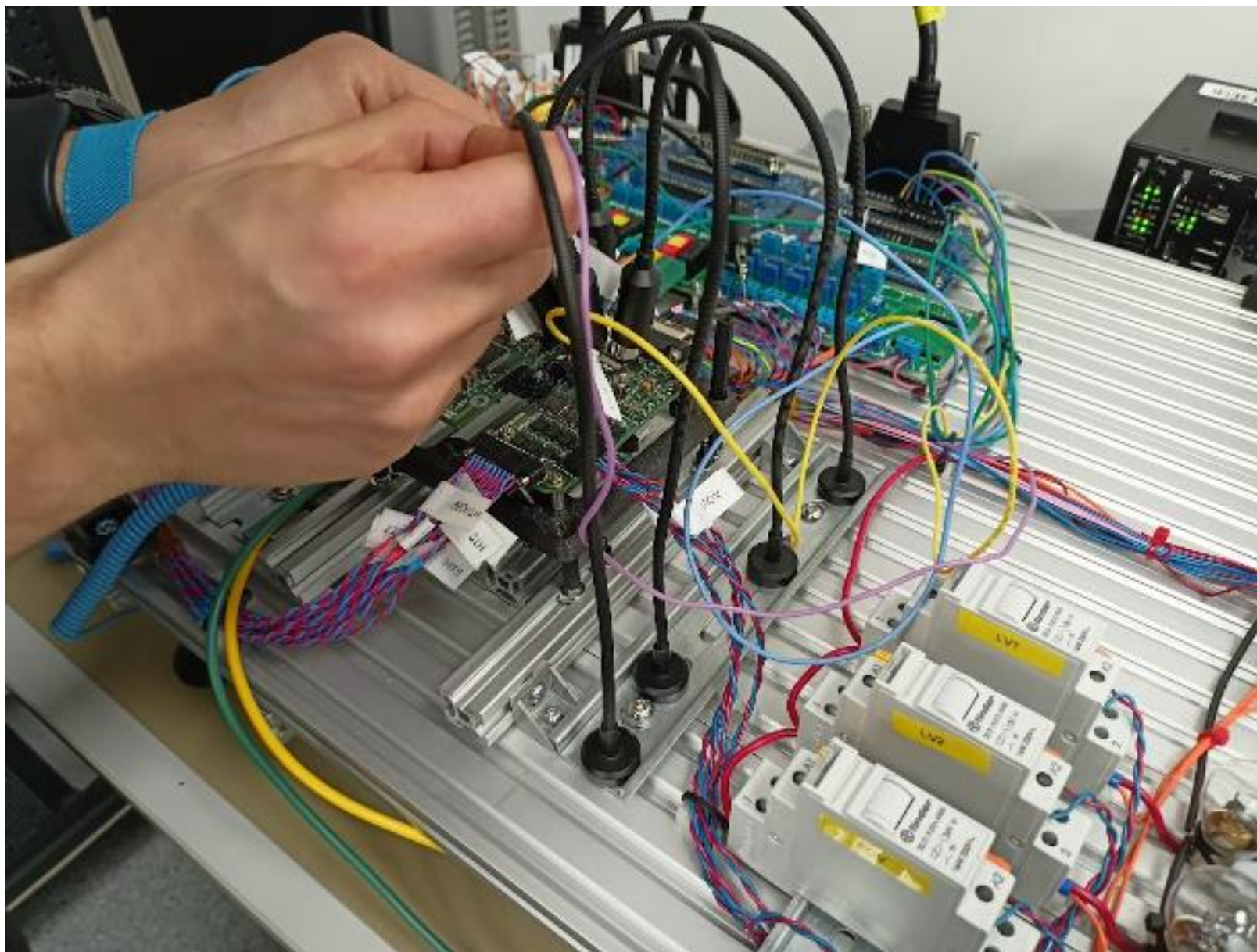
Faza wyżarzania:

- Urządzenia uruchomione i obciążone nominalną wartością
- Co najmniej 24 godziny w temperaturze pokojowej (w naszym przypadku niespełna 48h)
- 168 godzin w wysokiej temperaturze – przyspieszone starzenie



TESTY RADIACYJNE ECU - WYNIKI

- 2 jednostki testowane na 10 krad, 1 jednostka testowana na 25 krad
- Wszystkie jednostki pozostały sprawne
- Jedynym komponentem wyraźnie wrażliwym na promieniowanie okazały się multiplexery:
 - powyżej 2,5 krad zaobserwowano wzrost rezystancji w kanałach aktywnych multiplexera
 - powyżej 7,5 krada pojedyncze multiplexery utknęły na jednym kanale (nie można się przełączyć)



WNIOSKI

- Stosowanie przemysłowych komponentów COTS i przeprowadzanie testów TID na poziomie systemu może okazać się bardziej opłacalne niż stosowanie komponentów odpornych na promieniowanie i promieniowanie
- Wiele komponentów komercyjnych ma taką zbliżoną tolerancję na promieniowanie jak komponenty wojskowe i kosmiczne, ale nie zostało to potwierdzone oficjalnymi badaniami przez producenta
- Testy na poziomie systemu wymagają starannego planowania – więcej pracy niż same testy
- Dostosowanie i uproszczenie istniejących standardów może być konieczne, szczególnie w przypadku firm „New Space” o ograniczonym budżecie
- Problemem może być brak wiedzy specjalistycznej
- Znaleziono nieoczekiwane wyniki – zmianę rezystancji w multiplekserach (DD)
- Krytyczne obwody należy projektować z uwzględnieniem zjawisk SEE i TID
- Warto poznać nowatorskie materiały ekranujące
- Kompromis między masą, a możliwościami ekranowania – krytyczny dla małych satelitów

Pytania?



Łukasiewicz
Institute of Aviation

AL. KRAKOWSKA 110/114, 02-256 WARSZAWA, POLAND

+48 22 846 00 11 | ILOT.LUKASIEWICZ.GOV.PL

