



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



WYDZIAŁ
ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Marcin Jasiukowicz

Nr albumu: 176214

Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Automatyka i Systemy Sterowania

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Tytuł pracy w języku polskim: Stardust - Stratosferyczna platforma eksperymentalna

Tytuł pracy w języku angielskim: Stardust - Stratospheric experiment platform

Opiekun pracy: dr inż. Daniel Wachowiak

OŚWIADCZENIE dotyczące pracy dyplomowej zatytułowanej: **Stardust - Stratosferyczna platforma eksperymentalna**

Imię i nazwisko studenta: Marcin Jasiukowicz

Data i miejsce urodzenia: 19.04.1999, Iława

Nr albumu: 176214

Wydział: Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Kierunek: automatyka i robotyka

Poziom kształcenia: pierwszy

Forma studiów: stacjonarne

Typ pracy: praca dyplomowa inżynierska

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz. U. z 2019 r. poz. 1231, z późn. zm.) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.),¹ a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

04.01.2022, Marcin Jasiukowicz

Data i podpis lub uwierzytelnienie w portalu uczelnianym Moja PG

**) Dokument został sporządzony w systemie teleinformatycznym, na podstawie §15 ust. 3b Rozporządzenia MNiSW z dnia 12 maja 2020 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie studiów (Dz.U. z 2020 r. poz. 853). Nie wymaga podpisu ani stempla.*

¹ Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce:

Art. 312. ust. 3. W przypadku podejrzenia popełnienia przez studenta czynu, o którym mowa w art. 287 ust. 2 pkt 1–5, rektor niezwłocznie poleca przeprowadzenie postępowania wyjaśniającego.

Art. 312. ust. 4. Jeżeli w wyniku postępowania wyjaśniającego zebrany materiał potwierdza popełnienie czynu, o którym mowa w ust. 5, rektor wstrzymuje postępowanie o nadanie tytułu zawodowego do czasu wydania orzeczenia przez komisję dyscyplinarną oraz składa zawiadomienie o podejrzeniu popełnienia przestępstwa.

STRESZCZENIE

Poniższa praca opisuje konstrukcję układu elektronicznego kontrolującego eksperyment mikrobiologiczny w trakcie misji balonu stratosferycznego. Misja była elementem programu REXUS/BEXUS organizowanego przez Szwedzką, Niemiecką i Europejską agencję kosmiczną. Start misji odbył się 30 września 2021 roku z Kosmodromu Esrange w Szwecji na pokładzie balonu BEXUS 30. Praca była zorganizowana w ramach Międzywydziałowego Koła Naukowego SimLE Politechniki Gdańskiej. Dokument przybliża koncepcję mikrobiologicznych badań stratosfery oraz instytucje biorące udział w realizacji eksperymentu.

Słowa kluczowe: **balon stratosferyczny, mikrobiologia, eksperyment naukowy, elektronika**

ABSTRACT

The purpose of this document is to describe the process of designing an electronics module controlling a microbiological experiment during a stratospheric balloon mission. The mission has been a part of the REXUS/BEXUS programme organized by the Swedish, German and European Space Agency. Start of the mission occurred on September 30th 2021 from Esrange Space Center in Sweden on board BEXUS 30 balloon. Work on the project has been conducted within SimLE Science Club of Gdańsk University of Technology. This document summarizes the concept of microbiological investigation of the stratosphere and the organizations involved in conducting the experiment.

Keywords: **stratospheric balloon, microbiology, scientific experiment, electronics**

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	1
SPIS TREŚCI	2
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	4
1. WSTĘP	5
1.1. Cel i Zakres Pracy	5
2. OPIS MISJI	6
2.1. Koncepcja Misji Stardust	6
2.2. Koło Naukowe SimLE	7
2.3. Projekt REXUS/BEXUS	9
3. KONSTRUKCJA PLATFORMY BADAWCZEJ	12
3.1. Mikrobiologia	12
3.2. Mechanika	14
3.3. Elektronika	15
3.3.1. Mikrokontroler	15
3.3.2. System komunikacyjny	15
3.3.3. Pamięć	15
3.3.4. Sensory	16
3.3.5. Zasilanie	17
3.3.6. Kontrola Pomp oraz Grzania	18
3.3.7. Pomiar prądu	19
3.3.8. Kontrola serwomechanizmów	20
3.3.9. Grzanie	22
3.3.10. Połączenia między płytka	22
3.4. Oprogramowanie	23
4. PROJEKT PŁYTKI DRUKOWANEJ	25
4.1. Schemat	26
4.2. Projekt PCB	27
4.2.1. Płytnica zasilania	27
4.2.2. Płytnica logiki	28
4.2.3. Płytnica eksperymentu	29
4.2.4. Płytnica sensorowa	30
4.3. Wykonanie PCB	31
4.3.1. Fabrykacja	31
4.3.2. Lutowanie	32
4.3.3. Montaż	34
4.3.4. Testowanie	34
5. WYKORZYSTANIE PLATFORMY BADAWCZEJ	36
5.1. Misja testowa (2020)	36
5.2. Misja właściwa kampanii BEXUS (2021)	41

5.3. Wstępna analiza danych z misji	47
6. PODSUMOWANIE	50
WYKAZ LITERATURY	51
WYKAZ TABEL I RYSUNKÓW	52
ZAŁĄCZNIKI	53

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- 1Wire - Protokół komunikacyjny wykorzystujący 1 przewód.
- DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Niemiecka Agencja Kosmiczna)
- ECSS - European Cooperation for Space Standardization
- ESA - European Space Agency (Europejska Agencja Kosmiczna)
- Esrage - Esrange Space Center (współcześnie)
- ESRANGE - ESRO Sounding Rocket Launching Range (1964)
- EuroLaunch - konsorcjum DLR i SSC realizujące loty z Esrange Space Center
- GPIO - General Purpose Input Output
- GSE - Ground Support Equipment (Aparatura Naziemna)
- I2C - Protokół komunikacji szeregowej oparty na 2 przewodach
- NOTAM - NOTice to AirMen
- PCB - Printed Circuit Board
- PWM - Pulse Width Modulation
- REXUS/BEXUS - Rocket/Balloon EXperiments for University Students
- SD - Secure Digital; format pamięci flash
- SMT - Surface Mount Technology
- SNSA - Swedish National Space Agency (Szwedzka Agencja Kosmiczna)
- SSC - Swedish Space Corporation (Szwedzka Korporacja Kosmiczna)
- TCP - Transmission Control Protocol
- THT - Through Hole Technology
- UART - Universal Asynchronous Receiver-Transceiver
- UDP - User Datagram Protocol
- UV - Promieniowanie Ultrafioletowe
- ZARM - Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (Centrum Stosowanej Technologii Kosmicznej i Mikrograwitacji, Uniwersytet w Bremie)

1. WSTĘP

Stardust jest jednym z projektów realizowanym w ramach koła naukowego SimLE na Politechnice Gdańskiej. Od momentu rozpoczęcia projektu w 2016 roku przeprowadzono 3 misje balonów stratosferycznych. Celem lotów jest wyniesienie platformy badawczej do stratosfery oraz przeprowadzenie badań mikrobiologicznych pod kątem występowania bakterii w filtrowanym powietrzu. Eksperyment działa na zasadzie filtracji powietrza i osadzaniu się materiału mikrobiologicznego na filtrach strzykawkowych. Po sprowadzeniu platformy na ziemię, filtry są poddawane badaniom w laboratorium.

W Listopadzie 2019 roku projekt Stardust dostał się do międzynarodowego projektu REXUS/BEXUS (Rocket/Balloon EXperiments for University Students), umożliwiając umieszczenie platformy badawczej na pokładzie pojazdu oferowanego przez Szwedzką i Niemiecką agencję kosmiczną. W kontraste do poprzednich misji realizowanych w ramach koła naukowego, pozwoliło to na skupienie się nad samym eksperymentem, oddając całość organizacji kampanii lotu balonu agencji kosmicznej.

Proces realizacji projektu trwał 2 lata od momentu prezentacji konceptu misji w ośrodku badawczym Estec w Noordwijk, Holandii, do startu balonu 30 Września 2021 z Kosmodromu Esrange w Szwecji. Realizacja odbywała się w rygorze typowym dla misji kosmicznych, jednak odpowiednio uproszczonym na potrzeby projektu studenckiego.

Członkami zespołu Stardust są: Agnieszka Kurdyn, Bartosz Rybacki, Dawid Rekowski, Dominika Tomaszewska, Jakub Pawłowski, Kacper Loret, Karol Pelzner, Marcin Jasiukowicz, Mateusz Grzybowski, Natalia Czortek, Paulina Podpirko, Remigiusz Galikowski, Szymon Magrian.

1.1. Cel i Zakres Pracy

Celem pracy dyplomowej jest zapoznanie się z wymogami misji balonu stratosferycznego od strony eksperymentu badawczego oraz platformy balonowej, na której zostanie zamontowany eksperyment. Efektem jest projekt oraz implementacja urządzenia elektronicznego realizującego zadanie przeprowadzenia badania naukowego w trakcie lotu platformy. Zakres pracy autora obejmuje dobór komponentów elektronicznych, projekt i konstrukcję płyt drukowanych PCB (ang. Printed Circuit Board) oraz przeprowadzenie testów zaprojektowanego układu elektronicznego. Gotowy układ następnie jest zintegrowany z eksperymentem mikrobiologicznym i platformą balonową. Autor również dokonuje w pracy analizy danych otrzymanych z sensorów układu pomiarowego.

2. OPIS MISJI

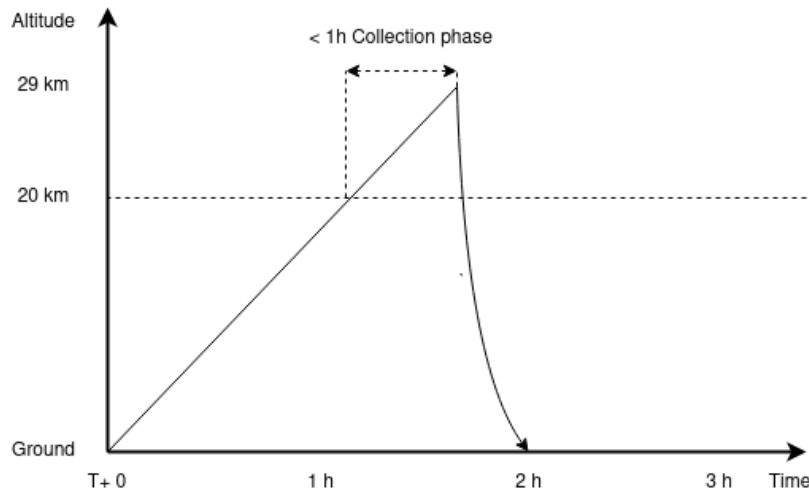
2.1. Koncepcja Misji Stardust

Balon stratosferyczny jest jednym z rodzajów pojazdów umożliwiających poruszanie się w atmosferze. Jego konstrukcja polega na wykorzystaniu praw gazowych do konstrukcji pojazdu, który jest lżejszy od powietrza. W szczególności w tej pracy skupiamy się nad balonem stratosferycznym, znanym również jako balon meteorologiczny. Jego konstrukcja wykorzystuje gaz nośny, typowo wodór bądź hel, zamknięty w powłoce wykonanej z elastycznego materiału jak lateks bądź mniej elastycznego, lecz bardziej wytrzymałe, plastiku. Konstrukcja takiego pojazdu umożliwia wyniesienie ładunku, tutaj platformy badawczej, na wysokość niedostępna dla innych metod transportu [1].

Interesującą dla badań warstwą atmosfery jest stratosfera, czyli powłoka powietrza na wysokości od 15 do 50 km nad poziomem morza. Region ten charakteryzuje się niską temperaturą otoczenia (około -50°C) oraz ciśnienia (poniżej 100 hPa). W stratosferze znajduje się również warstwa ozonowa, z najwyższym stężeniem ozonu na wysokościach od 15 do 32 km. Gaz ten z racji swoich właściwości zatrzymuje promieniowanie UV pochodzące ze słońca i nie pozwala na jego przejście do niższych warstw atmosfery [2]. Z racji zmniejszonej gęstości powietrza obserwuje się również zwiększone poziomy promieniowania kosmicznego, czyli wolnych protonów i jąder atomowych pochodzących min. z wiatru słonecznego [3].

Projekt Stardust w szczególności skupia się na charakterystyce stratosfery jako biomu mikrobiologicznego. W odróżnieniu od innych obszarów ziemi takich jak oceany, kontynenty czy powietrze troposferyczne, stratosfera jest jednym z najslabiej zbadanych miejsc, szczególnie pod kątem zamieszkania przez żywe organizmy. Dotychczasowe badania sugerują występowanie nietrywialnych ilości mikroorganizmów takich jak bakterie [4]. Celem badań misji Stardust jest przechwycenie tychże organizmów oraz poddanie ich jakościowym oraz ilościowym badaniom mającym na celu poznanie ich składu genetycznego. W szczególności interesującym aspektem są mutacje powstałe w wyniku zwiększonej ekspozycji na promieniowanie kosmiczne i ultrafioletowe, które odróżniają stratosferyczne organizmy od ich ziemskich odpowiedników. Wyniki badań pozwolą na zaklasyfikowanie nowych i nieznanych rodzin bakterii. Odkryte sposoby mutacji mogą być przydatne w zrozumieniu sposobów przeżycia organizmów w ciężkich warunkach na innych obszarach ziemii oraz potencjalnie w warunkach kosmicznych innych planet, pogłębiając wiedzę w obszarze astrobiologii [5].

Chociaż stratosfera może być badana przy pomocy innych pojazdów niż balony, np. samoloty komercyjne na pułapie około 15 km, czy samoloty myśliwskie i szpiegowskie nawet do 40km, wiążałoby się to dodatkowymi zanieczyszczeniami wpływającymi na jakość badań mikrobiologicznych. Balon stratosferyczny oferuje tani sposób na przeprowadzenie badań w możliwie najbardziej sterylnym mikrobiologicznie środowisku. Typowy przelot balonu stratosferycznego z zaznaczeniem interesującego obszaru badań został przedstawiony na Rysunku 2.1.



Rys. 2.1: Typowy przelot misji Stardust

2.2. Koło Naukowe SimLE



Rys. 2.2: Identyfikacja graficzna Projektu Stardust [6]

Celem tego rozdziału jest opisanie instytucji międzywydziałowego koła naukowego SimLE działającego na Politechnice Gdańskiej, oraz jego rolę w mikrobiologicznych badaniach stratosfery. Koło naukowe od lat realizuje serię interesujących projektów, ostatnimi latami wkraczając na arenę międzynarodową z ambitnymi projektami aeronautycznymi.

SimLE istnieje od 2013 roku jako zrzeszenie studentów wielu wydziałów Politechniki Gdańskiej. Organizacja łączy w sobie aspekty biznesowe, zarządzania oraz techniczne w celu zdobycia środków i realizacji projektów. Pierwszym przedsięwzięciem organizacji była konstrukcja symulatora lotów Skyhawk, oraz konferencje "Poszerz Horyzonty". Współcześnie projekty studenckie rozwinięły się w kierunkach związanych z technologiami kosmicznymi.

Prace nad Projektem Stardust rozpoczęły się w 2016 roku. Pierwsza misja miała miejsce w 2017 roku z kolejnymi badaniami w 2018 i 2020 roku. Badania były prowadzone przy pomocy własnej konstrukcji balonu stratosferycznego, zaprojektowanego i operowanego w ramach koła (Rys. 2.3).



Rys. 2.3: Misja balonu stratosferycznego koła naukowego SimLE w 2017 roku [6]

Start balonu wiąże się ze spełnieniem wymogów prawnych względem Urzędu Lotnictwa Cywilnego co do konstrukcji i całkowitej masy balonu. Lot wiąże się z potrzebą namierzania balonu, zapewnieniem bezpieczeństwa przelotu oraz zebraniem ładunku po zakończeniu misji. Szczegóły konstrukcji poprzednich misji stratosferycznych zostały opisane w pracy inżynierskiej "Układ pobierający próbki mikrobiologiczne w warunkach stratosferycznych" autorstwa Szymona Magriana oraz Karola Pelznera [7].

Koło Naukowe SimLE oferuje strukturę oraz finansowanie projektu we współpracy z Politechniką Gdańską, Samorządem Studentów Politechniki Gdańskiej oraz sektorem prywatnym na zasadzie sponsoringu, mentoringu oraz wymianie sprzętu i wiedzy. W 2019 roku Projekt Stardust zdobył finansowanie Ministerstwa Edukacji i Nauki pt. "Najlepsi z Najlepszych 4.0" w wysokości 225 000 zł. Środki zostały przeznaczone na konstrukcję platformy badawczej, uczestnictwo w programie REXUS/BEXUS oraz prezentację rozwiązania na konferencjach.

Instytucja koła naukowego SimLE jest kluczowa do realizacji badań poprzez zaoferowane wsparcie oraz możliwości rozwoju dla członków projektów. Całość pracy nad pracą inżynierską została sfinansowana dzięki działalności w ramach koła naukowego.

2.3. Projekt REXUS/BEXUS

W 2019 roku Projekt Stardust oraz koncept misji mikrobiologicznych został zgłoszony do realizacji w ramach programu REXUS/BEXUS (Rocket/Balloon EXperiments for University Students) organizowanego przez Europejską (ESA), Szwedzką (SNSA) i Niemiecką (DLR) agencję kosmiczną. Lot był organizowany przez konsorcjum Euro Launch - kooperację Szwedzkiej Korporacji Kosmicznej (SSC) oraz ośrodka badawczego ZARM DLR.

Jest to jeden z wielu programów oferowanych w ramach Europejskiej kooperacji na płaszczyźnie technologii kosmicznych. Dwoma głównymi filarami aktywności studenckich w ramach ESA są programy treningowe i wykłady oraz praktyczne programy pozwalające na zdobycie kompleksowej wiedzy od A do Z, z zakresu realizowania misji kosmicznych [8]. Oferowane programy w tej konwencji to:

1. *Fly your Thesis!* - Lot paraboliczny samolotem umożliwiający przeprowadzenie badań w środowisku mikrogravitacji. Lot umożliwia stworzenie warunków obniżonej grawitacji do 20 sekund w każdej z 90 paraboli lotu.
2. *Drop your Thesis!* - Seria rzutów eksperymentu z wieży zrzutowej w ośrodku naukowym ZARM w Bremen. Pozwala na odwzorowanie warunków mikrogravitacji wysokiej jakości do 9 sekund lotu.
3. *Orbit your Thesis!* - Możliwość umieszczenia ładunku na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) do 4 miesięcy wraz z pełną możliwością zdalnej kontroli eksperymentu przez czas trwania misji.
4. *Spin your Thesis!* - Kilkudniowy dostęp do wirówki, umożliwiający odwzorowanie warunków zwiększonej grawitacji do 20 krotności ciążenia ziemskiego.
5. *Fly a Rocket!* - Tygodniowy program konstrukcji rakiety sondażowej z kosmodromu Andøya w Norwegii.
6. *REXUS/BEXUS* - Program umożliwiający start eksperymentu na pokładzie rakiety sondażowej lub balonu stratosferycznego z kosmodromu Esrange w Szwecji.

Programy są skierowane do grup studentów z uniwersytetów technicznych z krajów członkowskich Europejskiej Agencji Kosmicznej. Uczestnictwo w każdym z programów oferuje unikalną możliwość przeprowadzenia eksperymentów w rygorze typowym dla misji kosmicznych na dużą skalę. Wymagania co do studentów są nieco obniżone, jednak każdy z zespołów uczestniczących w programie musi przejść przez szereg etapów, w których przekonuje ekspertów o wartości naukowej swojego eksperymentu, a po zakwalifikowaniu się do projektu informuje o postępie konstrukcji eksperymentu i jego gotowości do lotu. Prace nad projektem są prowadzone pod okiem ekspertów z agencji kosmicznej oraz partnerów.

Typowa oś czasu w przypadku programu REXUS/BEXUS prezentuje się następująco:

1. Selection - Prezentacja konceptu misji naukowej wykorzystującej możliwości urządzenia/pojazdu w danym programie przed panelem ekspertów.

2. Preliminary Design Review (PDR) - Prezentacja projektu eksperymentu, który zostanie umieszczony na pokładzie wybranego pojazdu.
3. Critical Design Review (CDR) - Ocena konstrukcji eksperymentu i gotowości do integracji z pojazdem.
4. Integration Progress Reviews (IPR) - Ocena integracji eksperymentu z pojazdem oraz wpływu na inne eksperymenty znajdujące się na pokładzie.
5. Experiment Acceptance Reviews (EAR) - Finalna akceptacja gotowego eksperymentu do lotu.
6. Flight Readiness Review (FRR) - Podsumowanie i certyfikacja eksperymentu do lotu, podpisanie umowy z operatorem pojazdu.

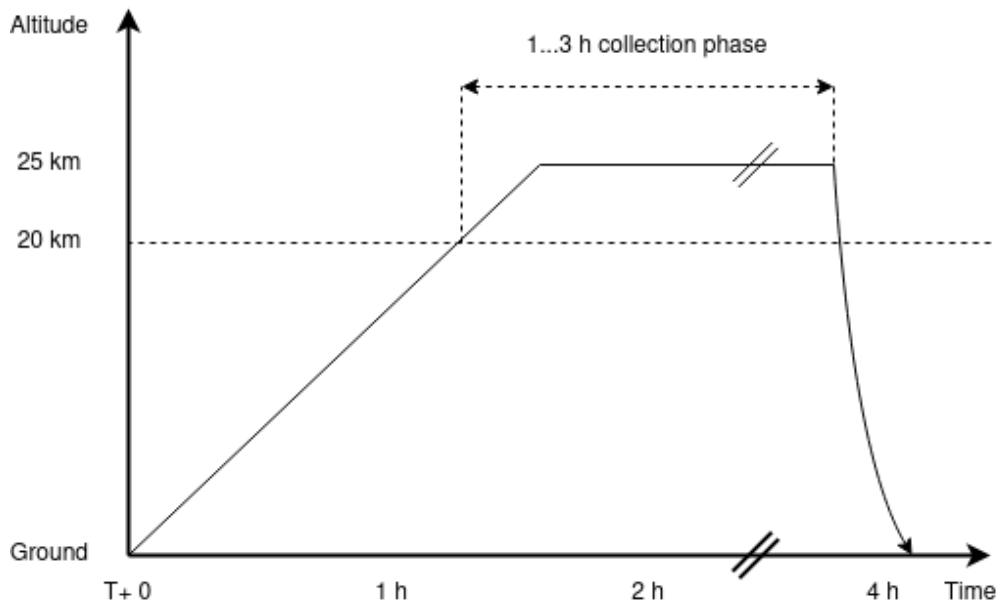
Na każdym etapie zespół realizujący projekt musi spełnić wymogi stawiane przez ekspertów. Oprócz fizycznej pracy nad projektem należy również wypełnić obowiązki organizacji pracy zespołowej, prowadzenia dokumentacji oraz aktywności medialnych związanych z promocją swojego eksperymentu i programu. Te aspekty również podlegają ocenie organizatorów. Główne koszty programu takie jak opłata za wykorzystanie sprzętu czy transport do ośrodków badawczych są pokryte w ramach sponsoringu agencji, jednak zespół musi wykazać wkład własny. Zespół pokrywa koszt budowy eksperymentu i testów, które muszą zostać na nim przeprowadzone. Spełnienie wszystkich wymogów skutkuje przejściem do kampanii startowej i realizacja misji.

Projekt Stardust jest zainteresowany wyniesieniem swojego eksperymentu z pokładu balonu stratosferycznego zgodnie z ustalonymi założeniami badawczymi. Po zgłoszeniu i wstępnej akceptacji eksperymentu, w Listopadzie 2019 została wygłoszona prezentacja przed panelem ekspertów w ośrodku badawczym Estec Europejskiej Agencji Kosmicznej w Noordwijk, Holandii (Rys. 2.4). Po ocenie ekspertów, eksperyment został zakwalifikowany do realizacji.



Rys. 2.4: Zespoły biorące udział w REXUS/BEXUS Selection Workshop w 2019 roku

W stosunku do misji przeprowadzanych w ramach koła naukowego SimLE, kampania BEXUS pozwala na zwiększenie jakości przeprowadzanych badań poprzez wydłużenie czasu lotu eksperymentu w stratosferze. Typowy przelot misji własnej zamyka się w 2h wedle wcześniejszej przedstawionego *Rysunku 2.1*. W przypadku misji BEXUS możemy spodziewać się minimalnego czasu misji wynoszącego 2 h, a mogącego wydłużyć się nawet do 4-6 godzin. Charakterystyka przelotu misji BEXUS jest przedstawiona na *Rysunku 2.4*. Ponadto, zespół nie musi przejmować się odnalezieniem balonu po zakończeniu misji jako, że wszelkie aspekty logistyczne (w tym powrót eksperymentu do miejsca startu) są pokryte przez organizatorów kampanii.



Rys. 2.5: Typowy przelotu misji BEXUS

Dodatkowy czas przelotu misji pozwala na zebranie większej ilości materiału mikrobiologicznego, zwiększając jakość badań. Dodatkowo pojazd BEXUS posiada szereg udogodnień opisanych w dokumencie “BEXUS User Manual” [9], min. zintegrowane systemy komunikacji oraz zasilania eksperymentów. Zwiększa to możliwości dostępne dla naukowców oraz pozwala na skupienie się nad konstrukcją platformy badawczej lepszej jakości.

System E-Link daje możliwość komunikacji radiowej z eksperymentem oferowanej w postaci zwykłego połączenia Ethernet. Umożliwia to na łatwą implementację komunikacji po stronie eksperymentu. Taka możliwość umożliwia nadzorowanie misji w czasie rzeczywistym oraz pozwala na modyfikację momentu rozpoczęcia i zakończenia próbkowania w zależności od faktycznych warunków stratosferycznych.

Przy realizacji badań z platformy BEXUS zespół musi liczyć się z ograniczeniami oraz wytycznymi bezpieczeństwa opisanymi w takich dokumentach jak “Esrang Safety Manual” [10]. Odnoszą się one do materiałów które mogą zostać wykorzystane, a w szczególności ogranicza wykorzystanie materiałów pirotechnicznych bądź w inny sposób niebezpiecznych dla osób biorących udział w kampanii startowej.

3. KONSTRUKCJA PLATFORMY BADAWCZEJ

Projekt Stardust jest realizowany w grupie studentów kilku wydziałów Politechniki Gdańskiej: Chemicznego, Mechanicznego (obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa), Elektrotechniki i Automatyki oraz Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki. Podział pracy w ramach zespołu dzieli się na 4 charakterystyczne części:

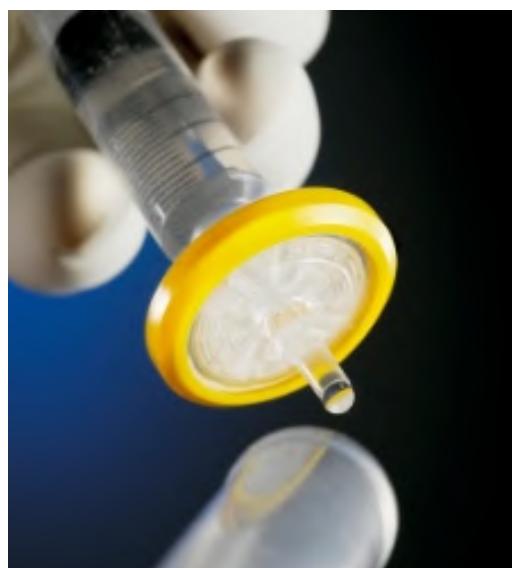
1. mikrobiologiczna,
2. mechaniczna,
3. elektroniczna,
4. oprogramowania.

Autor pracy w projekcie jest odpowiedzialny za część elektroniczną, część oprogramowania związanego z kontrolą komponentów elektronicznych i logiki lotu oraz koordynację techniczną całego projektu. Niniejsza praca skupia się na opisaniu w detalu konstrukcji platformy badawczej w ujęciu części elektronicznej. Do pełnego zrozumienia działania projektu wymagany jest opis całej konstrukcji platformy badawczej oraz bazowych faktów z nią związanych.

3.1. *Mikrobiologia*

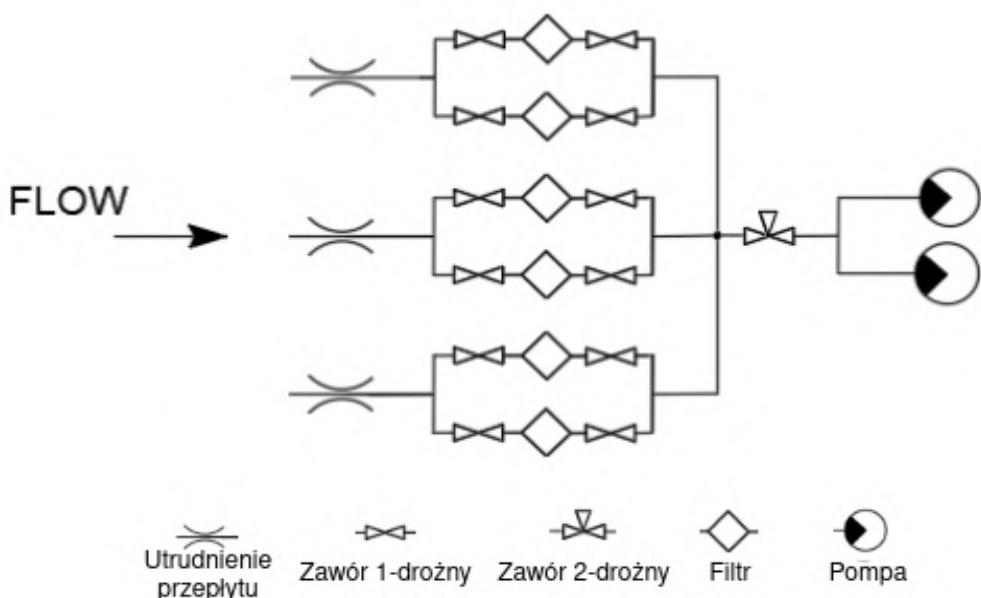
Członkowie części mikrobiologicznej odpowiedzialni za konstrukcję i obsługę układu biologicznego oraz badania to: Bartosz Rybacki, Agnieszka Kurdyn, Dawid Rekowski, Mateusz Grzybowski, Paulina Podpirko, będący studentami Wydziału Chemicznego oraz Jakub Pawłowski z Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego.

Główny koncept badawczy misji opiera się na filtracji powietrza stratosferycznego przez filtry strzykawkowe (Rys. 3.1). Charakteryzują się one niską ceną oraz łatwą dostępnością. Głównym parametrem jest rozmiar porów filtra, który w przypadku przeprowadzanych badań wynosi $0,22 \mu\text{m}$. Jest to rozmiar umożliwiający przepływ powietrza przez układ, przy jednoczesnej filtracji obiektów o rozmiarze większym niż szerokość porów. Rozmiar bakterii zawiera się w przedziale od $0,5 \mu\text{m}$ do $5 \mu\text{m}$. Warto zaznaczyć, że w filtracji nie ulegną min. wirusy, które mają rozmiar $20-300 \text{ nm}$.



Rys. 3.1: Filtr strzykawkowy [11]

Same filtry mogą zostać zastosowane do filtracji medium po nałożeniu na strzykawkę, jednak w przypadku misji Stardust zostały wykorzystane w konstrukcji układu filtracyjnego. Składa się on, oprócz filtrów, z zaworów i pomp połączonych elastycznymi węzykami. Każdy z filtrów jest obustronnie zamknięty za pomocą dwóch zaworów. Sześć zaworów jest kontrolowanych przez serwomechanizmy (Hitec HS-755MG) podczas gdy dwa pozostały zamknięte przez cały przebieg misji stanowiąc próbę kontrolną. Każdy z zestawów filtrów i zaworów jest podłączony do dwóch pomp próżniowych (Boxer 3KD) działających równolegle i tworzących 8 L/minutę przepływu. Dodatkowy zawór trójdrożny umożliwia uruchomienie pomp bez potrzeby otwierania zaworów przy filtrach badawczych. Schemat ideowy układu filtracyjnego jest widoczny na Rysunku 3.2. Faktyczna konstrukcja części układu oraz połączenia przy pomocy oruowania są widoczne na Rysunku 3.3.



Rys. 3.2: Schemat ideowy układu filtracyjnego (autor: Mateusz Grzybowski)

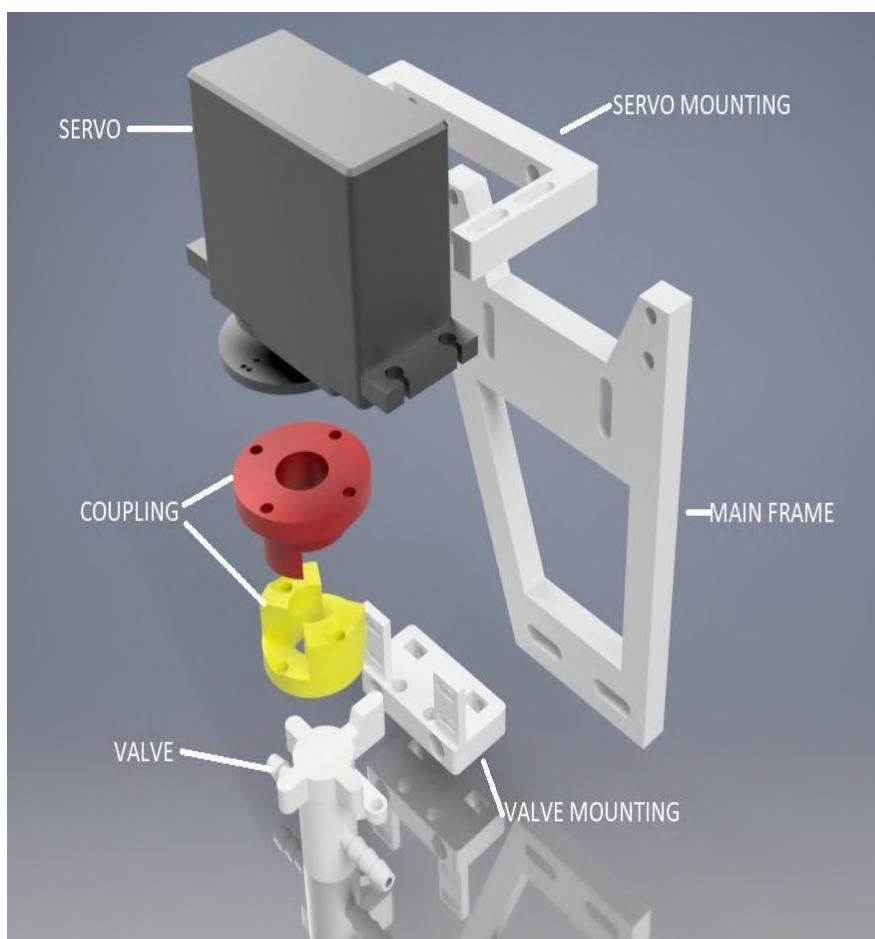


Rys. 3.3: Wykonanie fragmentu układu filtracyjnego (autor: Mateusz Grzybowski)

3.2. Mechanika

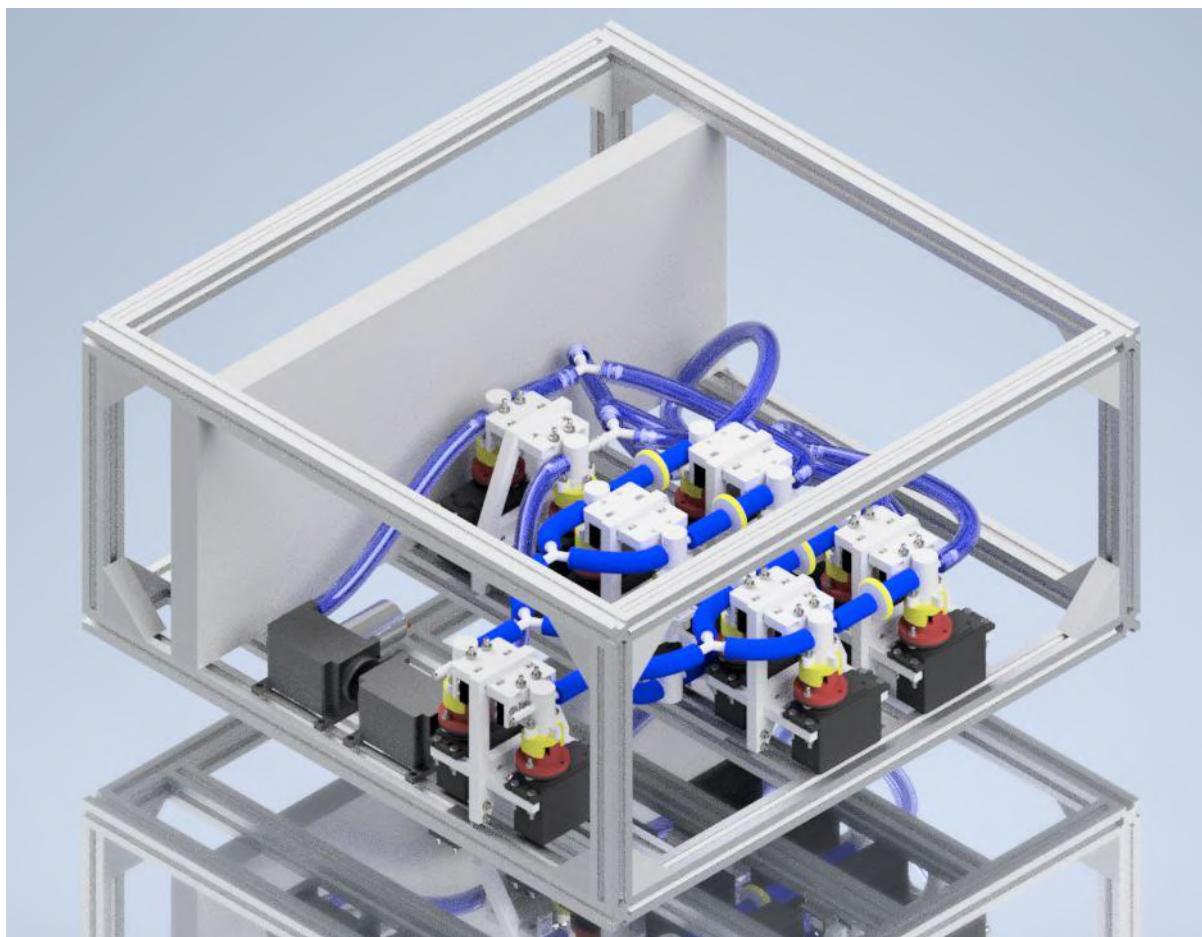
Członkami części mechanicznej zespołu są Kacper Loret oraz Natalia Czortek (Wydział Mechaniczny). Zespół był odpowiedzialny za konstrukcję elementów odpowiedzialnych za kontrolowanie przepływu w układzie filtracyjnym oraz za całościowe połączenie wszystkich podzespołów w jedną obudowę eksperymentu. Prace projektowe nad układem filtracyjnym zostały opisane w pracy inżynierskiej K. Loret "Projekt układu podciśnieniowego do pobierania próbek biologicznych w wysokich partiach stratosfery" [12].

Głównym podzespołem jest Jednostka Kontrolująca Zawór (ang. VCU - Valve Control Unit) przedstawiona na *Rysunku 3.4*. Jest to ramka wykonana w technologii druku 3D trzymająca serwomechanizm oraz zawór w pozycji umożliwiającej jego obracanie. Do pasowania komponentów jest wykorzystane sprzęgło kłowe które niweluje niedokładności powstałe przy montażu układu oraz umożliwia łatwe wymontowanie układu filtracyjnego w celu przeprowadzenia badań.



Rys. 3.4: Jednostka kontroli zaworu - Valve Control Unit (autor: Kacper Loret)

Całość układu badawczego oraz elektroniki jest zamontowana w obudowie eksperymentu zamontowanego w gondoli balonu stratosferycznego BEXUS 30. Obudowa wykonana jest z profili aluminiowych V-SLOT oraz pokryta materiałem izolacyjnym Basotect. Konstrukcja bez pokrycia jest widoczna na *Rysunku 3.5*.



Rys. 3.5: Obudowa eksperymentu wraz z układem filtracyjnym (autor: Kacper Loret)

3.3. Elektronika

Projekt elektroniki był samodzielnym zadaniem autora pracy inżynierskiej, jednak dobór komponentów oraz rozwiązań był zaopiniowany doświadczeniami z poprzednich misji badawczych w ramach zespołu.

Rolą projektowanego układu elektronicznego jest kontrola eksperymentu w trakcie lotu w sposób, który umożliwi rozpoczęcie filtrowania powietrza stratosferycznego na znanej wysokości. Dodatkowo system musi zbierać informacje o warunkach atmosferycznych wewnętrz i na zewnątrz eksperymentu. W razie potrzeby, musi istnieć potrzeba zwiększenia temperatury wewnętrznej w celu ochrony pomp i serwomechanizmów od niskiej temperatury. Całość kontroli nad platformą musi odbywać się autonomicznie na podstawie danych z sensorów bądź przy pomocy komend wysyłanych z stacji naziemnej, jeżeli istnieje taka możliwość.

Dobór serwomechanizmów Hitec HS-755MG oraz pomp Boxer 3KD został dokonany w ramach pracy zespołu mikrobiologicznego i mechanicznego. Wybór reszty komponentów sterujących leży w gestii autora pracy.

3.3.1. Mikrokontroler

Celem mikrokontrolera jest przetwarzanie komend otrzymanych z systemu komunikacyjnego oraz przetwarzanie ich na odpowiedni sygnał sterujący dla serwomechanizmów oraz pomp. Równolegle mikrokontroler zajmuje się zbieraniem danych z sensorów i informacji o stanie eksperymentu wraz zapisem do pamięci Flash.

Biorąc pod uwagę wymagania projektu, oraz kontrastując je z dostępnymi rozwiązaniami na rynku, wybór padł na platformę Arduino. W szczególności został wytypowany mikrokontroler Atmega2560 [13] jako posiadający wystarczającą i nie ograniczającą moc obliczeniową oraz liczbę wejść/wyjść zapewniającą wsparcie dla dobranych podzespołów. Mikrokontroler obsługuje linie sygnałowe I2C, SPI, posiada 4 interfejsy portu szeregowego UART (ang. Universal Asynchronous Receiver-Transceiver) oraz 54 porty GPIO (ang. General Purpose Input-Output, porty uniwersalne wejścia-wyjścia) pozwalających na generowanie sygnału PWM (ang. Pulse Width Modulation, modulacja szerokością sygnału) czy obsługę protokołu 1Wire. Płytki posiada również wejścia analogowe pozwalające na pomiar sygnałów czy poziomów napięć.

Niewątpliwym atutem Arduino jest liczba bibliotek i rozwiązań udostępnionych na wolno-źródłowych licencjach, co przyśpiesza implementację logiki potrzebnej do obsługi sensorów czy komunikacji.

Przy projektowaniu układu elektronicznego zdecydowano się na zastosowanie gotowych płyt ekspansyjnych z mikrokontrolerem dostępnego z sklepu Arduino. Pozwoliło to na uproszczenie konstrukcji przy jednoczesnym umożliwieniu wymiany podzespołów np. w przypadku awarii. Płytki PCB zostały zaprojektowane w sposób umożliwiający montaż do mikrokontrolera typowym dla płyt rozszerzeń typu "Shield".

3.3.2. System komunikacyjny

Rolą systemu komunikacyjnego jest przetwarzanie sygnałów z linii Ethernet systemu E-LINK na format zrozumiały przez mikrokontroler. Dobór mikrokontrolera oraz systemu komunikacyjnego został dokonany wspólnie, zwracając uwagę na gotowe rozwiązania w ramach ekosystemu Arduino. Produkt spełniający wymagania to Arduino Ethernet Shield 2 zbudowany w oparciu na chipie Wiznet W5500 [14]. Urządzenie posiada w sobie również wbudowane gniazdo na kartę SD, którego obecność upraszcza konstrukcję płytki drukowanej.

3.3.3. Pamięć

Jako, że wybrany system komunikacji umożliwia montaż karty SD, nie ma potrzeby implementacji dodatkowego slotu bądź modułu pamięci. Dodatkowo karty SD wykorzystują prostą komunikację po linii SPI, nie wymagającą dodatkowego wsparcia z strony mikrokontrolera, bądź prowadzenia dodatkowych magistral w ramach płytki PCB.

Do projektu zastosowano kartę o pojemności 16GB, jednak nie z powodu na zapotrzebowanie na taką ilość miejsca, a łatwej dostępności na rynku. Moduł pamięci o pojemności poniżej 100MB byłby wystarczający do pomieszczenia danych z sensorów przy zastosowanej częstotliwości zapisu danych.

3.3.4. Sensory

W celu realizacji misji badawczej musimy znać podstawowe fakty na temat otoczenia eksperymentu. Są to: ciśnienie, temperatura oraz wilgotność. Na rynku dostępne są gotowe paczki sensorów, np. BME280, jednak nie spełniają one wymogów co do rozdzielczości oraz wartości granicznych pomiarów. Szczególnie w przypadku ciśnienia, większość sensorów jest produkowanych z założeniem wykorzystania w troposferze i nie działają poniżej 300 hPa (powyżej ~10 km). Z tego powodu zastosowano układ przemysłowy pozwalający na pomiar ciśnienia praktycznie do poziomu próżni z zadowalającą na potrzeby eksperymentu rozdzielczością [15].

Dodatkowo na potrzeby programu sterującego misją, potrzebujemy informacji o wysokości platformy badawczej w atmosferze. O ile pomiar wysokości jest możliwy na podstawie gradientu ciśnienia w troposferze, pomiar w stratosferze wymaga zastosowania dodatkowych założeń, m.in. o temperaturze i ciśnieniu najwyższej warstwy powietrza stratosferycznego, które nie są znane w momencie startu eksperymentu z ziemi. Pomiar jest również zależny od temperatury oraz prędkości wiatru. Z tego powodu zastosowanie układu GPS jest prostszym rozwiązaniem dającym dokładniejszą информацию o wysokości.

Sensory (oprócz modułu GPS) zostały podwojone i umieszczone wewnętrz oraz na zewnątrz eksperymentu w celu pomiaru warunków wewnętrz układu filtrującego oraz warunków atmosferycznych. Dokładny wybór komponentów został przedstawiony w *Tabeli 3.1*.

Tabela 3.1: Listing sensorów, modeli, poboru prądu oraz protokołu komunikacyjnego

Pomiar	Sensor	Pobór prądu	Protokół
Czas	DS3231 [16]	1,5 mA	I ² C [16]
Ciśnienie	SSCDRNN015PASA5	3,7 mA	SPI [15]
Wilgotność	DHT22	1,5 mA	1Wire [17]
Pozycja	uBlox NEO-6	50 mA	UART [18]

3.3.5. Zasilanie

Z racji zastosowanej technologii zasilania baterijnego po stronie gondoli BEXUS, wymagana jest konwersja napięć na potrzeby zasilenia elektroniki (5 V) oraz pomp (12 V). Oferowany przez organizatorów interfejs elektryczny oferuje niestabilizowane napięcie 28 V, którego wartość wahę się od 24 do 32 V. Zmiana wartości napięcia w trakcie trwania misji spowodowana jest zmianą źródła zasilania z wsparcia naziemnego GSE na zasilanie wewnętrzne gondoli (32-28 V) oraz rozładowywaniem się baterii w trakcie lotu (28-24V).

Dobrane rozwiązanie musi spełniać rolę konwersji energii oraz stabilizacji napięcia do poziomów potrzebnych aby zasilić podzespoły. Kategorią komponentów, które spełniają te postulaty są przekształtniki DC/DC typu buck. Przetwornice DC/DC z wbudowaną pętlą sprzężenia zwrotnego pozwalają na stabilizowanie napięcia wyjściowego, nawet jeżeli napięcie wejściowe wahę się w dużym zakresie. Zastosowane przetworniki nie posiadają separacji galwanicznej, jednak w ramach projektu nie jest ona wymagana. Projekt układu zasilania jasno definiuje punkt uziemienia elektroniki

i nie ma obaw o powstanie nieznanych pętli prądowych. Zakłócenia pochodzące z lub generowane na linię zasilania również nie są problemem, z racji zastosowania dedykowanej baterii na każdy z eksperymentów w ramach jednej gondoli BEXUS.

Przy wyborze odpowiedniego przetwornika kierowano się warunkami termicznymi panującymi w trakcie lotu gondoli. Jedną z obaw jest generowanie ciepła przez komponenty w warunkach bliskich próżni. Może to grozić przegrzaniem i zmianą parametrów pracy. Aby uniknąć nadmiernego nagrzewania się komponentów, zastosowano przewymiarowane przetwornice, z dużym zapasem mocy.

Moc pobierana przez poszczególne komponenty została przedstawiona w *Tabeli 3.2*.

Tabela 3.2: Pobór mocy przez komponenty platformy

Część	Liczba	Napięcie	Prąd	Moc	Suma Mocy
Arduino	1	5 V	200 mA	1 W	1 W
Sensory	3	5 V	10 mA	0,05 W	0,5 W
GPS	1	5 V	50 mA	0,25 W	0,25 W
Pompy	2	12 V	1.3 A	15,6 W	31,2 W
Serwa	7	5 V	2.5 A	15 W	15 W
Ogrzewanie	9	28 V	40 mA	1,12 W	10 W

Dla podsystemu 12 V pobór prądu to 1,3 A w pracy ciągłej oraz 2 A przy rozruchu pompy. Podsystem 5 V zużywa sumarycznie około 250 mA w pracy ciągłej, z wyjątkiem momentu, w którym wykorzystywane są serwomechanizmy. W najgorszym przypadku pobierany prąd to 2,75 A przez około 1 s w czasie trwania ruchu serwa.

Finalny wybór padł na 2 sztuki przetwornicy CUI P7812-2000-S [19] o mocy 24 W dla każdej z wykorzystanych pomp oraz CUI P7805-2000-S o mocy 10 W dla systemu 5 V (Serwa i reszta elektroniki).

3.3.6. Kontrola pomp oraz grzania

Kolejnym etapem po doborze źródła zasilania było rozwiązywanie problemu rozpoczęcia pracy pomp oraz sterowaniem grzania. W trakcie projektowania zostały przetestowane 2 rozwiązania:

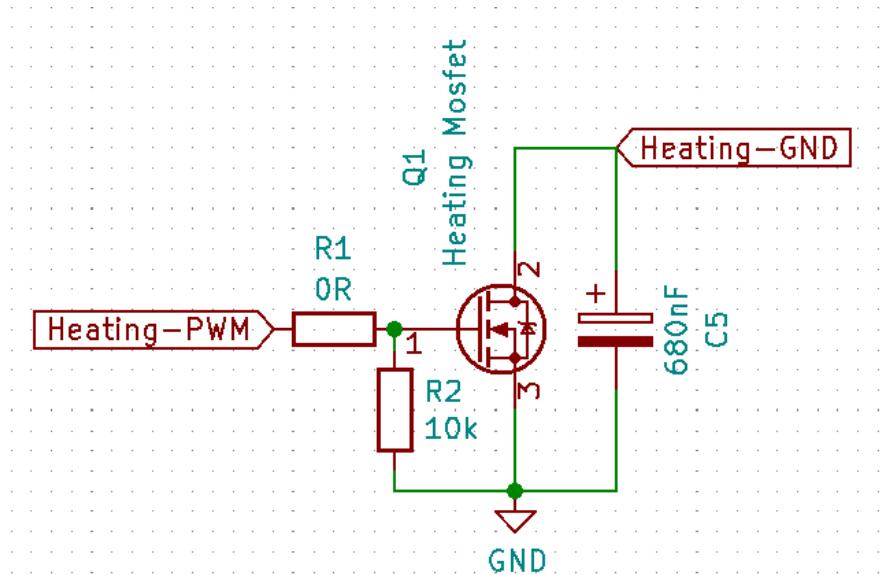
1. sterowanie dwustanowe (włącz/wyłącz) przy pomocy nóżki "Enable" przetwornicy,
2. płynne sterowanie napięciem przy pomocy tranzystora Mosfet.

Rozwiązanie Ad.1 jest proste i możliwe w przypadku wykorzystania modelu przetwornicy z dodatkowym wyprowadzeniem nóżki pozwalającej na jej włączenie/wyłączenie. Odbywa to się poprzez wysłanie sygnału o poziomie 5 V, np. z mikrokontrolera i skutkuje wyłączeniem przetwornicy. Zanik napięcia powoduje ponowne włączenie komponentu. Podczas implementacji układu można zastosować rezistor "pull-up", który odwróci logikę sterowania. Wtedy połączenie nóżki "Enable" do masy skutkuje włączeniem przetwornicy. Takie rozwiązanie zostało zastosowane w pierwszej iteracji

doboru komponentów. Biorąc pod uwagę dodatkowe wymagania projektowe wymagające sterowania przepływem pomp, oraz inny finalny dobór przetwornic, które nie posiadają takowej nóżki, problem został rozwiązany w inny sposób.

Sposób Ad.2 w takiej sytuacji okazał się prostszym rozwiązaniem. Zastosowano tranzystor Mosfet z kanałem typu N, do sterowania komponentów od strony "niskiej" - podłączenia do masy. Jest to najbardziej przystępna metoda, pozwalająca na kluczowanie tranzystora sygnałem PWM z mikrokontrolera. Dodatkowo zastosowano kondensator wygładzający sygnał na kontrolowanej linii napięcia. Implementacja układu jest widoczna na *Rysunku 3.6*.

Wartość kondensatora została dobrana doświadczalnie metodą inżynierską przy użyciu oscyloskopu dla faktycznej impedancji układu pompy i grzania. Dodatkowo zastosowano rezystor pull-down, który domyślnie zamyka przepływ prądu do pompy w momencie załączenia zasilania układu.



Rys. 3.6: Schemat układu kontrola napięcia linii zasilania pomp oraz grzania

3.3.7. Pomiar prądu

W ramach układu zasilania kolejną ważną funkcjonalnością jest możliwość pomiaru pobieranego przez układ prądu. Do tego został zastosowany układ INA181-A1 [20] czyli komparator ze stałym 20-krotnym wzmacnieniem różnicy napięcia. Pomiar prądu odbywa się przez pomiar spadku napięcia na znanej rezystancji, wedle prawa Ohma:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

Przy znanej stałej rezystancji, przepływ prądu jest wprost proporcjonalny do spadku napięcia na nim. Rezystancja na linii zasilania została dobrana tak, aby nie przekroczyć maksymalnego napięcia wejściowego U_o mikrokontrolera wynoszącego 5 V. Maksymalny przewidywany prąd I_{max} na linii 12 to 2,5 A. Współczynnik wzmacnienia α wynosi 20.

Na tej podstawie możemy dobrać odpowiedni rezystor:

$$U_o = 5 [V], I_{max} = 2,5 [A], \alpha = 20 \quad (2)$$

$$U_o = \alpha * U_{Diff} \rightarrow U_{Diff} = \frac{U_o}{\alpha} \quad (3)$$

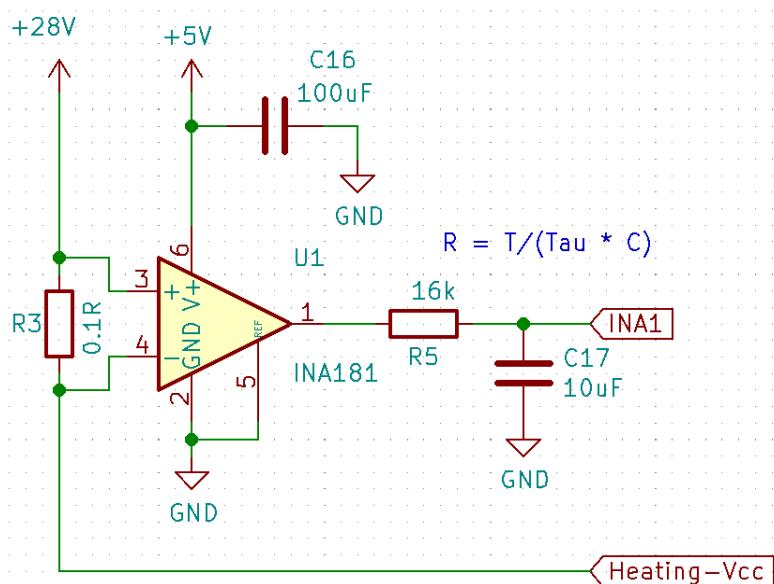
$$U_{Diff} = R_{Sens} * I_{max} \rightarrow R_{Sens} = \frac{U_{Diff}}{I_{max}} \quad (4)$$

$$R_{Sens} = \frac{U_o}{\alpha * I_{max}} = \frac{5 V}{20 * 2.5 A} \quad (5)$$

$$R_{Sens} = 0.1 [\Omega] \quad (6)$$

Wedle takich obliczeń, w układzie zastosowano rezystor o wartości 0.1Ω . Komponent został umieszczony wedle *Rysunku 3.7* w pozycji R3. Dodatkowe elementy towarzyszące komponentowi INA181 to kondensator (C16) o wartości $100 \mu F$ filtrujący napięcie zasilania oraz układ RC (R5-C17) do filtracji dolnoprzepustowej zanieczyszczeń sygnału. Komponenty zostały dobrane dla stałej czasowej około $T \approx 1$ sekundy (czasu odświeżania informacji z mikrokontrolera) oraz kondensatora $C_{RC} = 10 \mu F$, wedle wzoru:

$$R_{RC} = \frac{T}{2\pi * C_{RC}} = \frac{1}{6.28 * 10 * 10^{-6}} \approx 16 [k \Omega] \quad (7)$$



Rys. 3.7: Schemat układu pomiaru prądu

3.3.8. Kontrola serwomechanizmów

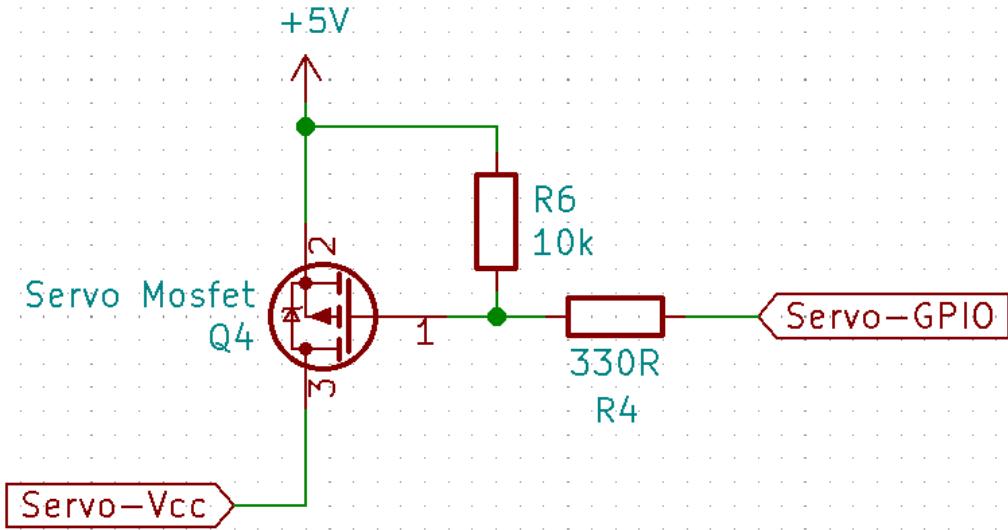
Kontrola zaworów w układzie filtrującym eksperymentu mikrobiologicznego odbywa się poprzez wystosowanie odpowiedniego sygnału PWM do serwomechanizmu połączonego z zaworem w ramach jednostki kontrolującej zawór (VCU opisane w sekcji mechanicznej). Procent wypełnienia sygnału odpowiada kątowi przekręcenia zaworu. Pozwala to na dokładną kontrolę i kalibrację układu w celu zapewnienia maksymalnego otwarcia zaworu, a za tym maksymalnego przepływu powietrza. Pierwotnie planowano zastosowanie wyjść bezpośrednio z portów mikrokontrolera pozwalających na generowanie sygnału PWM, jednak z powodów praktycznych (prowadzenia kilkunastu wyprowadzeń PWM z mikrokontrolera do serw w postaci ścieżek sygnałów szybkich na płytce PCB) zdecydowano się na wykorzystanie dedykowanego układu PCA9865 (Rys. 3.9).

Jest to zintegrowany, 16 kanałowy generator sygnału PWM, umożliwiający kontrolę poszczególnych portów przez linię sygnałową I²C [21]. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwoliło na maksymalne uproszczenie połączeń między płytami, oraz skrócenie linii sygnałowych PWM do minimum, niwelując ewentualne zakłócenia generowane w liniach długich.

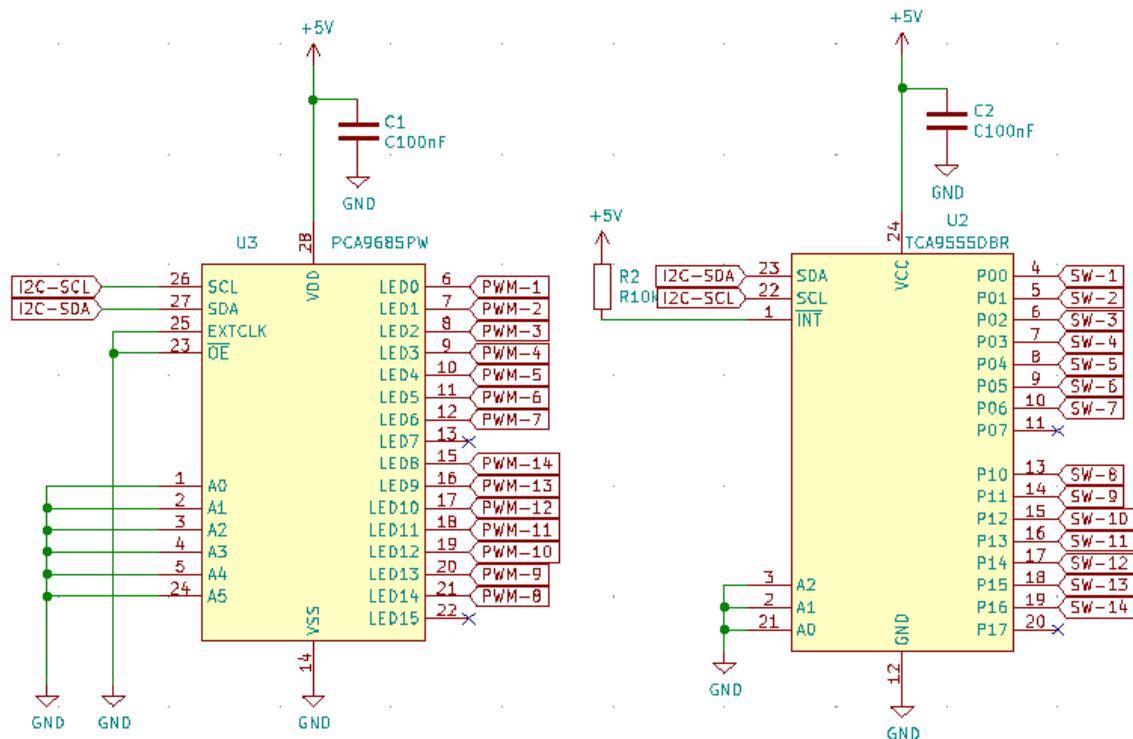
W trakcie testów rozwiązania zaobserwowano pewną charakterystykę, której wykorzystanie pomogło w zmniejszeniu zużycia energii przez całą platformę eksperymentalną. W momencie podłączenia zasilania do serwomechanizmów wewnętrzny układ regulacji pozycji serwa nie pracuje, a układ pobiera minimalną ilość energii. W momencie wystosowania sygnału PWM i wybrania pozycji zaworu, układ zaczyna pobierać nominalną ilość energii niezbędną do utrzymania tej pozycji. Jako, że zawory charakteryzują się dużym oporem własnym, a do ich otwarcia potrzeba dużego momentu, ciągłe utrzymanie pozycji przez serwo jest nie potrzebne. Ryzyko, że zawory zamkną się same w wyniku np. wstrząsu jest minimalne.

W związku z tym odkryciem dodano dodatkowy komponent pozwalający na zresetowanie wewnętrznego układu sterowania poprzez chwilowe wyłączenie zasilania na linii 5 V dochodzącej do serwomechanizmów. W tym celu zastosowano Mosfet typu P, sterujący kanałem zasilania od strony wysokiej źródła energii (Rys. 3.8). Dodano rezystor pull-up w celu domyślnego załączenia tranzystora do stanu przewodzenia. Reset serwomechanizmów odbywa się przez chwilowe połączenie bramki tranzystora z masą układu za pomocą linii GPIO z Mikrokontrolera.

W układzie sterowania serwami oraz w ramach konstrukcji mechanicznej jednostki kontroli zaworu (Valve Control Unit) zastosowano również przełączniki krańcowe które pozwalają na wykrycie czy zawory zostały otwarte. Informacja z przełączników do wykorzystania w programie mikrokontrolera jest zbierana przy pomocy ekspandera GPIO TCA9555 [22] działającego w trybie wejścia, komunikującego się z mikrokontrolerem po linii I²C (Rys. 3.9).



Rys. 3.8: Schemat układu resetu napięcia serwomechanizmów



Rys. 3.9: Układ TCA9685 oraz PCA9555

3.3.9. Grzanie

W celu zapewnienia optymalnej temperatury otoczenia dla próbek oraz ochrony elementów mechanicznych (w szczególności pomp i serwomechanizmów) przed zamarznięciem, zdecydowano się na wykorzystanie ceramicznych rezystorów grzejnych (Rys. 3.10). Do pokrycia wszystkich wrażliwych komponentów wykorzystano połączenie szeregowe 9 rezystorów o oporze $14,4 \Omega$ każdy. Po podłączeniu w obwód 28 V generowane ciepło wynosiło około 6 W co odpowiadało temperaturze około 30°C przy testach w temperaturze pokojowej. Nie jest to wiele, jednak gwarantowało minimum generacji ciepła w chłodnych warunkach miejsca startowego i podwyższenie temperatury eksperymentu przed odlotem. System grzania był wykorzystywany wyłącznie przed startem, kiedy eksperyment jest zasilany z zasilania naziemnego. Z racji ograniczonego budżetu energetycznego baterii grzanie nie jest wykorzystane w trakcie lotu platformy.



Rys. 3.10: Rezystor grzejny 40 W (autor: Telpod)

3.3.10. Połączenia między płytowe

Do realizacji połączeń wymagających wyjście sygnałów elektrycznych z płytki drukowanej do serwomechanizmów, pomp oraz grzania zastosowano złącza WR-TBL serii 381 firmy Würth Elektronik przedstawione na Rysunku 3.11:



Rys. 3.11: Złącza międzypłytkowe (autor: Würth Elektronik)

3.4. Oprogramowanie

Za oprogramowanie są odpowiedzialni autor tej pracy dyplomowej oraz Szymon Magrian (Wydział ETI). Program na komputer PC realizujący zadanie stacji naziemnej obsługującej komunikację z balonem w trakcie lotu napisał Remigiusz Galikowski (Wyższa Szkoła Bankowa). Przedmiotem pracy jest implementacja części oprogramowania odpowiedzialnej za kontrolę układów elektronicznych oraz logiki odpowiedzialnej za przeprowadzenie misji. Oprogramowanie implementuje 2 podstawowe koncepcje:

1. tryb manualny - umożliwiający kontrolowanie eksperymentu przy pomocy komend wysyłanych z stacji naziemnej przy pomocy łącza E-LINK,
2. tryb autonomiczny - kontrolujący eksperiment w przypadku utraty połączenia z operatorami na ziemi.

Tryb autonomiczny bazuje na odczytach z sensorów, GPS oraz zegara RTC w celu podjęcia decyzji nad przejęciem kontroli nad eksperymentem oraz rozpoczęcia i zakończenia eksperymentu na odpowiedniej wysokości. Warunkiem koniecznym dla pracy trybu jest brak komunikacji z stacją naziemną w przeciągu 2 minut. Logika pracy trybu jest opisana maszyną stanu, przedstawioną na Rysunku 3.12:



Rys. 3.12: Maszyna stanów i warunki przejścia

Pomiary czasu bazują na odczytach z zewnętrznego zegara RTC, a obecny stan maszyny jest zapisywany i odczytywany z pamięci flash. Pozwala to wyeliminować możliwe problemy z resetowaniem się mikrokontrolera w locie jako, że eksperiment posiada informację ile minęło czasu od ostatniego uruchomienia i może odtworzyć odpowiedni stan maszyny stanów.

Dobrane warunki przejścia między stanami wprowadzają histerezę która zabezpieczała przed błędym zakończeniem próbkowania tuż po jego rozpoczęciu. Informacja o wysokości jest bazowana na odczytach z GPS, jednak jeżeli pomiar nie jest dostępny, wysokość zostaje estymowana na podstawie ciśnienia atmosferycznego z jednego z dwóch sensorów. Dodatkowo do każdego przejścia między stanami dodano 1 minutowe opóźnienie, aby zagwarantować minimalny czas na wykonanie wszelkich przypisanych operacji.

Stan 0 jest stanem deweloperskim, który resetuje wszelkie zmienne wewnętrzne oprogramowania do właściwych wartości przed rozpoczęciem lotu. Stan 1 “uzbraja” eksperiment do lotu i pozwala na rozpoczęcie próbkowania po osiągnięciu odpowiedniej wysokości. Nominalnie uzbrojenie powinno zostać przeprowadzone manualnie przy pomocy odpowiedniej komendy, lub przycisku na mikrokontrolerze, jednak istnieje awaryjny warunek uzbierający eksperiment w momencie przekroczenia wysokość około 500 m nad poziomem morza. Zabezpiecza to przed przypadkowym wypuszczeniem balonu stratosferycznego przed manualnym użbrojeniem układu. Najważniejsze operacje dla eksperymentu to sekwencja rozpoczęcia próbkowania (otwarcia zaworów

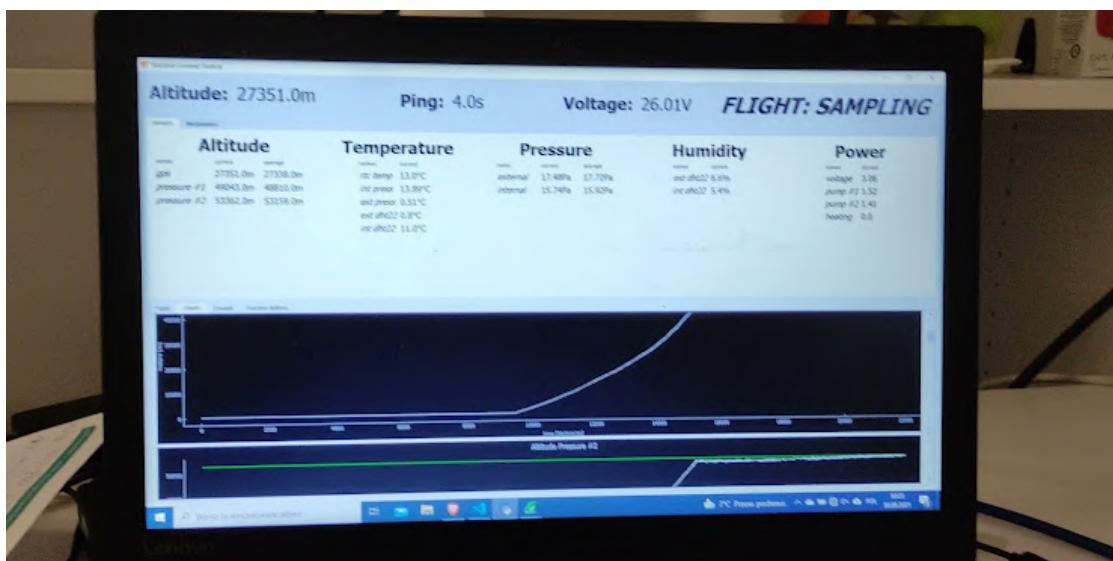
i uruchomienia pomp) w stanie 2 oraz komplementarna sekwencja zakończenia próbkowania w stanie 3. Stan 4 celowo nie posiada żadnych warunków wyjścia, aby uniknąć błędnego resetu eksperymentu i ponownego otwarcia zaworów doprowadzającego do zanieczyszczenia próbek.

W przypadku gdy komunikacja z eksperymentem jest możliwa, co kilka sekund zostaje wysłany pakiet o treści "ping", który nie pozwala na przejście układu elektronicznego w tryb autonomiczny. W trybie manualnym operator posiada możliwość dowolnego przejścia między stanami oraz bezpośredniej kontroli nad każdym z zaworów, pomp oraz grzania poprzez szereg zdefiniowanych komend.

Komunikacja z eksperymentem odbywa się przy pomocy protokołu UDP. Przez cały czas trwania misji eksperyment wysyła co sekundę informacje o swoim stanie wraz aktualnymi danymi z sensorów w postaci pojedynczego pakietu UDP. Analogicznie w kierunku eksperymentu wysyłane są komendy oraz pakiet "ping" informujący o obecności operatora i aktywnym połączeniu E-LINK. Każda komenda wysłana z stacji naziemnej powoduje reset wewnętrznego zegara platformy badawczej odliczającego do uruchomienia trybu autonomicznego.

Do komunikacji wykorzystano protokół UDP w celu zabezpieczenia przed zawieszeniem się komunikacji TCP w trakcie utraty ramek w trakcie transmisji radiowej przez system E-LINK. Testy sugerują wydłużenie czasu komunikacji, lub nawet zawieszenie pracy mikrokontrolera w przypadku niepełnego przesyłu ramek w ramach protokołu TCP. Wynika to prawdopodobnie z niepełnej implementacji stosu TCP w zastosowanej bibliotece Arduino. Najprostszym rozwiązaniem tego problemu było zastosowanie prostszej metody transportu, a ewentualną re-transmisję danych zaimplementować w warstwie aplikacji. W praktyce komendy z stacji naziemnej były wysyłane kilkakrotnie, do czasu otrzymania pakietu o treści "OK" z eksperymentu. W pewnym sensie został zaimplementowany własny, bardzo prosty protokół komunikacji na bazie metody transportu UDP.

Kontakt z eksperymentem po stronie ziemi w przypadku misji BEXUS był realizowany przez program graficzny napisany w języku Python uruchomiony na laptopie (Rys. 3.13). Jako, że system E-LINK jest w pełni kompatybilny z zwykłym połączeniem Ethernet, nie było potrzebne stosowanie bardziej skomplikowanych rozwiązań.



Rys. 3.13: Widok stacji naziemnej kontrolującej eksperyment

4. PROJEKT PŁYTKI DRUKOWANEJ

Po części analitycznej, doborze komponentów, wstępnych testach na płytach prototypowych, oraz zaprojektowaniu schematu połączeń, należy przystąpić do projektowania płytki PCB. Proces projektowania można sprowadzić do następujących punktów:

1. Projektu schematu elektrycznego
2. Wybór parametrów mechanicznych:
 - a. Rozmiaru płytki
 - b. Rozmieszczenie otworów montażowych
 - c. Zdefiniowanie ilości warstw płytki
3. Rozmieszczenie komponentów
4. Poprowadzenie ścieżek wedle schematu
5. Sprawdzenie poprawności wykonania wedle ustalonych zasad:
 - a. Zwracając uwagę na parametry termiczne (ciepło generowane przez komponenty).
 - b. Zwracając uwagę na dobre praktyki projektowania PCB, zmniejszające defekty przy produkcji.
 - c. Zwracając uwagę na wzajemny układ komponentów, który może utrudnić montaż płytki PCB
6. Iteracja (3-5) w celu optymalizacji parametrów płytki.
7. Wygenerowanie plików produkcyjnych
8. Zamówienie prototypu płytki z fabryki.
9. Iteracja (2-8) w celu usunięcia defektów, optymalizacji parametrów i poprawie błędów.

Głównym założeniem projektu było wykonanie płytki 2 warstwowej z zastosowaniem komponentów montowanych powierzchniowo (SMT) o rozmiarze 0603 w kodzie imperialnym (1608 w metrycznym). W trakcie realizacji projektu zostały wykonane 3 iteracje implementujące układ elektroniczny. Każda z iteracji owocowała dodatkowym doświadczeniem oraz problemami, które należało rozwiązać.

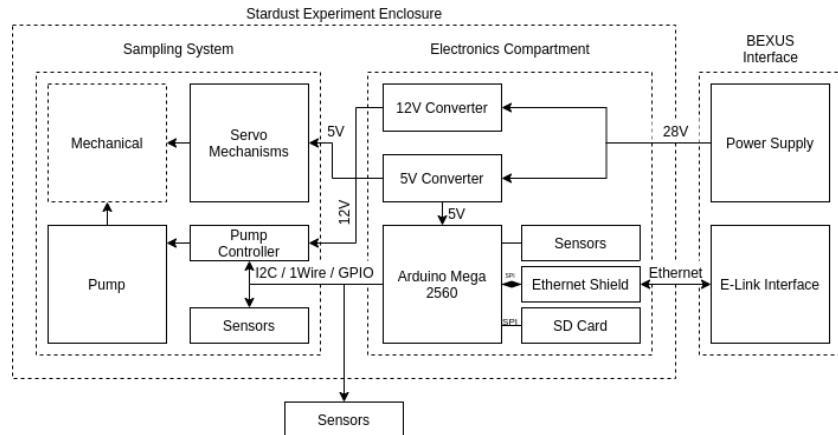
Pierwsza iteracja była również pierwszym projektem płyt drukowanych wykonanym przez autora. Ich produkcja nastąpiła w Kwieciu 2020 roku i została wykorzystana do przeprowadzenia misji testowej w Lipcu 2020 roku. Projekt był kluczowym etapem nauki pozwalającym wychwycić wiele błędów oraz zastosować zdobyte doświadczenie do projektu kolejnych wersji.

Wersja druga wprowadziła poprawki problemów wykrytych w trakcie misji testowej. Ta wersja została wykorzystana jedynie do testów, które doprowadziły, min. do zmiany przetwornic, dodanie sposobu sterowania pompami oraz dodanie metody pomiaru prądu.

Wersja trzecia jest ostatnią iteracją opisaną w tej pracy inżynierskiej. Dobór komponentów jest finalny, a sama płytka po montażu, lekkich poprawkach oraz testach stanowiła część misji BEXUS w Wrześniu 2021 roku.

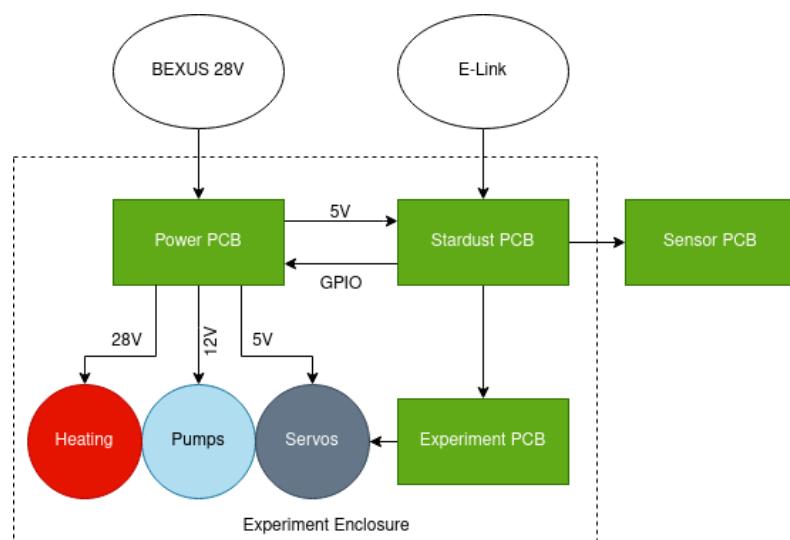
4.1. Schemat

Przed przystąpieniem do projektowania schematu elektrycznego należy usystematyzować dokonane wybory komponentów oraz uwzględnić fizyczną konstrukcję mechaniczną eksperymentu. Rys. 4.1 przedstawia diagram rozdzielający podzespoły na 4 główne grupy: Interfejs platformy BEXUS oraz obudowę eksperymentu podzieloną na przestrzeń elektryczną i przestrzeń układu filtrującego.



Rys. 4.1: Logiczne połączenie podzespołów eksperymentu

Przypisanie podzespołów do ich odpowiednich fizycznych przestrzeni pozwala na wizualizację wymaganych połączeń elektrycznych. Na tej podstawie możemy dokonać podziału układu elektrycznego na odpowiednią liczbę płyt PCB oraz definiowanie połączeń między płytowymi. Wynikiem tej operacji jest Rys. 4.2 przedstawiający wytypowane płytki PCB w wzajemnej relacji.



Rys. 4.2: Podział podzespołów między płytami PCB

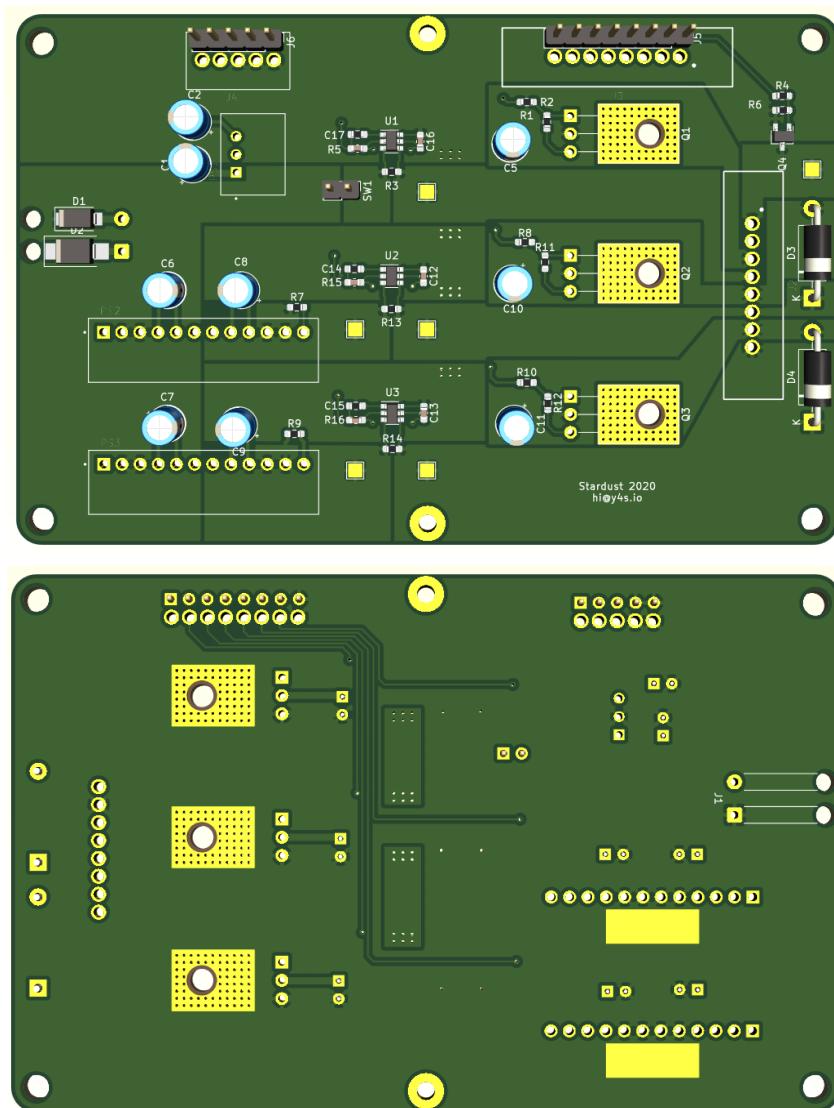
Dokładny schemat elektryczny płyt PCB jest zawarty w Załączniku A do pracy inżynierskiej.

4.2. Projekt PCB

Biorąc pod uwagę logiczny rozkład układów elektronicznych przystąpiono do projektowania płyt drukowanych. Do projektu wykorzystano oprogramowanie KiCAD.

4.2.1. Płytki zasilania

Płytki zasilania jest głównym komponentem eksperymentu umożliwiającym na kontrolowanie pomp układu filtracyjnego i grzania, oraz zapewnia zasilanie dla elementów logicznych, sensorów i serwomechanizmów. Na płytce (Rys. 4.3) znajdują się dwie przetwornice 12 V, jedna przetwornica 5 V, 3 pary układów pomiaru prądu i tranzystorów mosfet (po jednym dla każdej z pomp oraz linii grzania) oraz tranzystor mosfet do kontroli linii zasilania 5 V dla serwomechanizmów. Zasilanie 28 V z gondoli balonu jest dostarczane przy pomocy przylutowanego kabla po lewej stronie płytki. Płytki łączy się z otoczeniem przez 3 złącza. Odpowiednie napięcia oraz sygnały są przesyłane do płytki logiki przez dwa złącza goldpin u góry płytki. Zasilanie pomp, grzania oraz serwomechanizmów są wyprowadzone przy pomocy złącza po prawej stronie płytki.



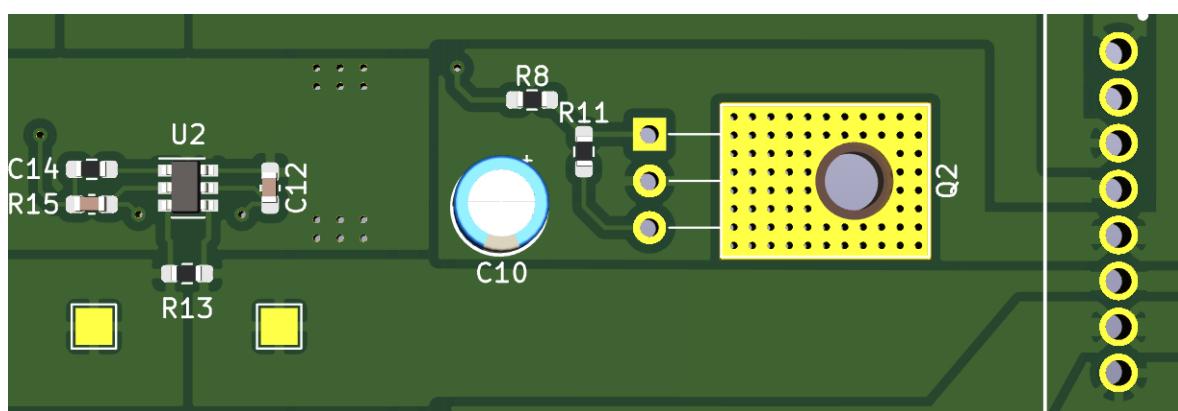
Rys. 4.3: Przód oraz tył płytki zasilania

Projekt płytki zasilania był najbardziej skomplikowany i wymagał największego nakładu pracy. Z racji wykorzystania komponentów generujących ciepło (przetwornic i mosfetów) oraz biorąc pod uwagę warunki stratosferyczne, należy zwrócić szczególną uwagę na aspekt rozprowadzania ciepła. Umieszczenie krytycznych komponentów na jednej płytce może spowodować ich przegrzanie oraz zmianę parametrów pracy. W typowym projekcie obwodu drukowanego, na przykład układu z tranzystorem mocy rozwiązaniem problemu byłoby zastosowanie radiatora i wyzbycie się nadmiaru ciepła przez kontakt z otaczającym powietrzem.

W przypadku misji stratosferycznej takie rozwiązanie jest niedostępne z racji rozrzedzonego powietrza i mniejszej przenikalności cieplnej do otoczenia. W celu rozwiązania tego problemu zdecydowano się na zastosowanie przewymiarowanych komponentów generujących możliwie najmniej ciepła oraz maksymalne wykorzystanie pojemności cieplnej miedzi na płytce PCB.

Konstrukcja komponentów przetwornicy oraz mosfetu przewiduje możliwość oddawania ciepła poprzez nóżkę masy. Wykorzystano tę właściwość optymalizując przepływ ciepła do płaszczyzny masy na spodzie płytki przy pomocy mostków termicznych. W efekcie praktycznie cały spód płytki pracuje jako magazyn energii cieplnej oraz radiator. Dodatkowo w projekcie przewidziano fragmenty odsłaniające miedź z możliwością dodania dodatkowego radiatora bądź kawałka metalu zwiększącego pojemność cieplną. Jednym z pomysłów było połączenie płytki bezpośrednio do aluminiowej konstrukcji eksperymentu, jednak okazało się to zbędne po otrzymaniu zadowalających wyników z testów termicznych opisanych w dalszym rozdziale.

Ta sama metodologia została zastosowana dla wszystkich ścieżek zasilania (Rys. 4.4), maksymalizując ilość miedzi pozostałą na płytce po procesie produkcyjnym. W efekcie płytki zasilania stosuje tradycyjne ścieżki wyłącznie dla torów sygnałowych z układów pomiaru prądu oraz do mosfetów. Poziomy zasilania 28 V, 12 V i 5 V oraz masa wykorzystują duże powierzchnie zamiast typowych ścieżek.



Rys. 4.4: Zbliżenie na układ pomiaru prądu oraz tranzystor mosfet

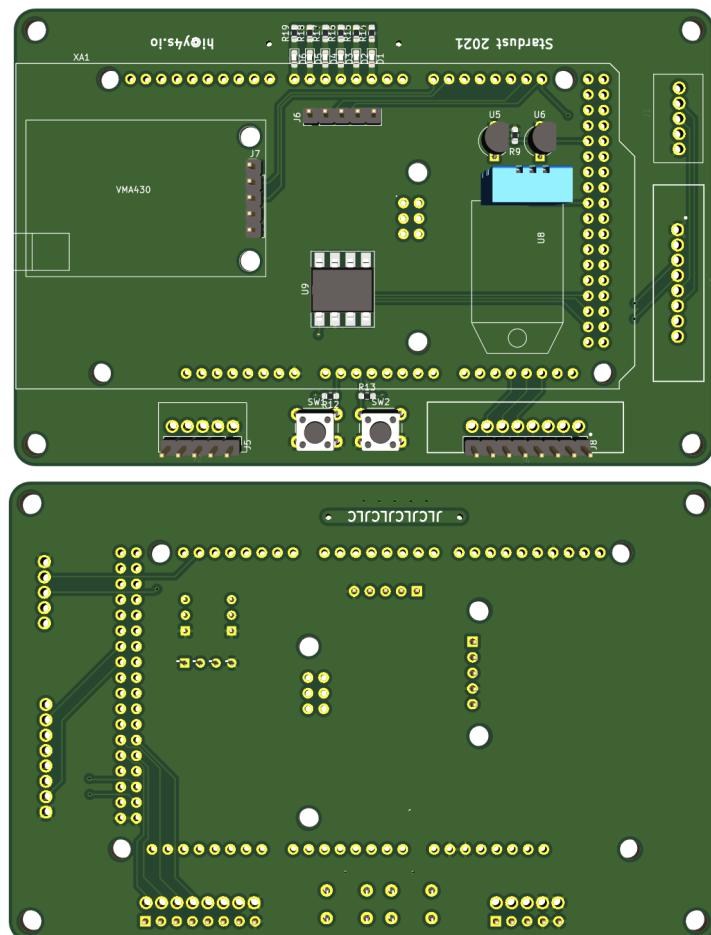
4.2.2. Płytki logiki

Komponenty logiczne oraz zestaw sensorów został umieszczony na osobnej płytce spełniającej głównie rolę mocowania mechanicznego oraz rozprowadzania sygnałów (Rys. 4.5). Zasilanie i sygnały z płytka zasilania przychodzą poprzez 2 złącza goldpin na dole płytki. Sygnały są doprowadzone do mikrokontrolera, który dokonuje pomiaru napięcia z układów pomiaru prądu oraz wysyła sygnał sterujący do tranzystorów mosfet. W ramach płytki przenoszone są sygnały od sensorów do mikrokontrolera za pomocą linii komunikacji szeregowej, I2C, 1Wire oraz GPIO. Dodano również diody sygnalizacyjne LED, jednak nie zdecydowano się na ich użycie z racji obecności płytki sensorowej.

Mikrokontroler jest zamocowany od spodu płytki przy pomocy długich nóżek goldpin. Moduł komunikacji Ethernet jest podłączony od góry w konwencji "Shield". Sygnały do pozostałych płyt (eksperymentalnej oraz sensorowej) są wyprowadzone przy pomocy 2 złącz po prawej stronie płytki.

Chociaż na tej płytce nie ma obaw o warunki termiczne, została zastosowana szczególna uwaga, aby płaszczyzna zasilania i masy nie została przerwana przez ścieżki sygnałowe. Zwrócono uwagę na ścieżkę powrotną prądów i w miarę możliwości poprowadzono je tak, aby nie przecinały siebie nawzajem.

Płytki jest dokładnie takich samych rozmiarów jak płytka zasilania. Połączenie płyt przy pomocy złącz goldpin (Rys. 4.10) w jedność pozwala na montaż w otworach montażowych pudełka Kradex Z4A.



Rys. 4.5: Przód oraz tył płytki logiki

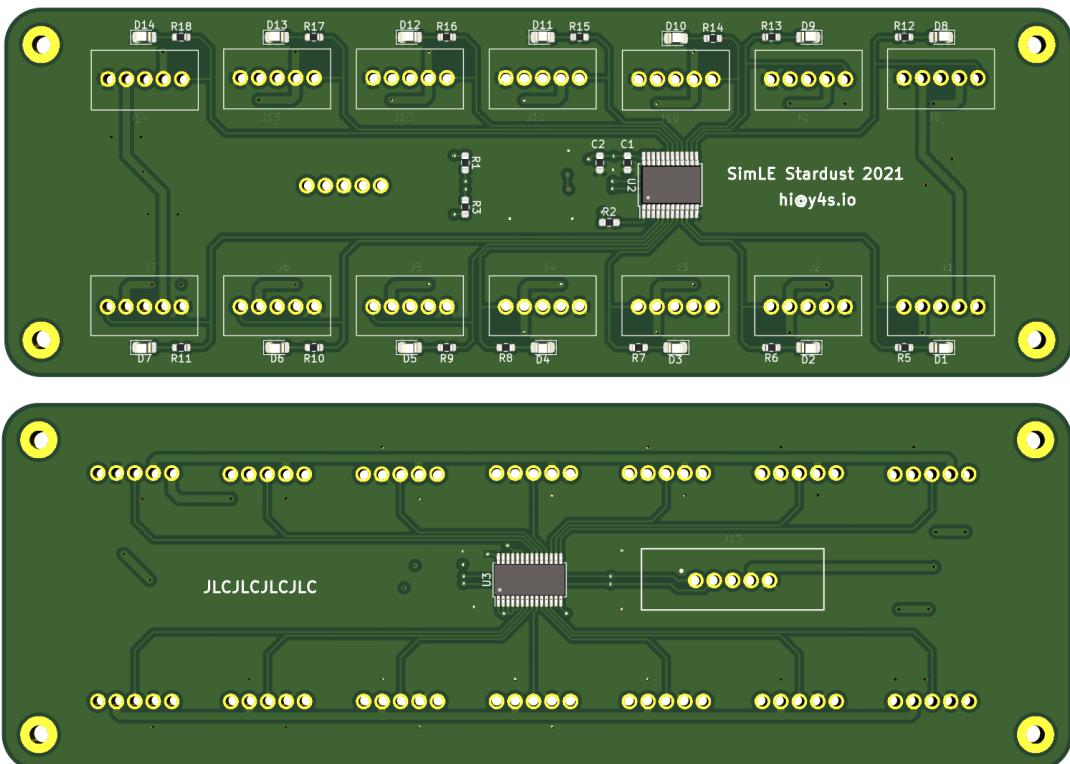
Powodem do podziału sekcji zasilania i logiki na dwie płytki była obawa, że potrzeba wprowadzenia poprawek w którejkolwiek z sekcji będzie wymagała zamówienia nowej (większej i droższej) płytki oraz przelutowania wszystkich komponentów. Podzielenie płytEK umożliwiło na zamówienie tylko tej płytki która wymagała poprawek. W praktyce podział dodał dodatkowy punkt awarii na łączeniu między płytEKOWYM, a sam projekt nie wymagał dużych poprawek które wymagały ponownego zamówienia płytki.

4.2.3. Płytkę eksperymentu

Płytkę eksperymentu (Rys. 4.6) odpowiada za generowanie sygnałów PWM do kontroli serwomechanizmów przy pomocy układu PCA9685 oraz zbieranie informacji o stanie przełączników krańcowych przy pomocy układu TCA9555. Ponadto dodano diody LED sygnalizujące stan załączenia obwodu przełącznika. Dane z układów są wysyłane do mikrokontrolera za pomocą linii I²C. Do płytki dochodzą dwie linie 5 V z płytki zasilania - jedna do zasilenia układów, druga (przerywana za pomocą tranzystora na płytCE zasilania) do zasilenia serwomechanizmów. Interfejs elektryczny stanowi 15 złączy pięcio pinowych. Jedno złącze komunikuje się z płytą logiki, a reszta odpowiada za połączenie par serw i przełączników krańcowych.

Pomimo, że układ filtrujący wykorzystuje tylko 7 serwomechanizmów, zdecydowano się na implementację 14 wyjść. Miało to zabezpieczyć przed ewentualnym uszkodzeniem złącz bądź potrzebą podłączenia dodatkowych filtrów w trakcie rozwoju programu.

Rozmiar płytki oraz przewidziane połączenia mechaniczne pozwalają na pionowy montaż w przedniej ścianie pudełka Kradex Z4A.

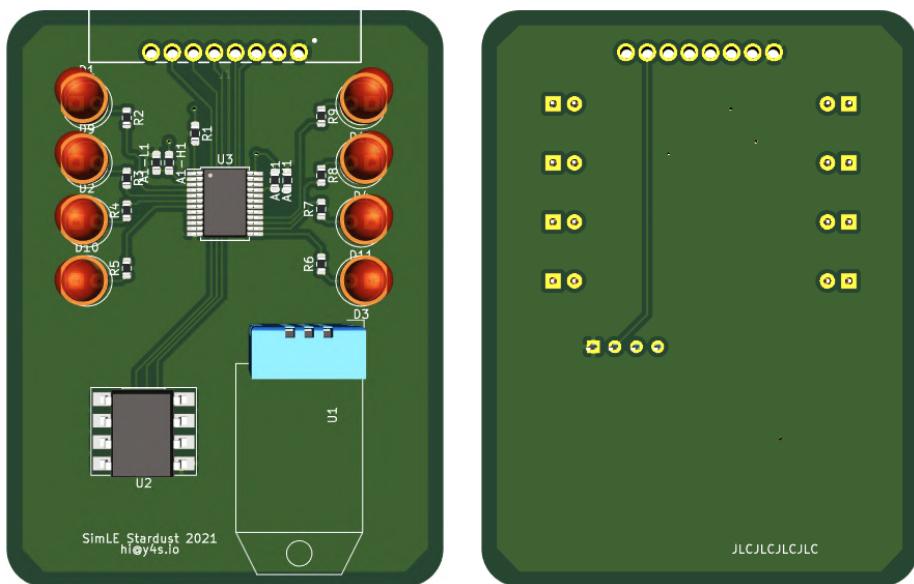


Rys. 4.6: Przód oraz tył płytki eksperymentu

4.2.4. Płytki sensorowa

Pozostałym elementem konstrukcji jest płytka pozwalająca na umieszczenie zestawu sensorów poza obudową eksperymentu (Rys. 4.7). Dodatkowo spełnia rolę informacyjną dla operatorów naziemnych przy pomocy diod LED informujących o stanie eksperymentu. Jest to jedna z prostszych płyt, jednak w wyniku zastosowanych protokołów komunikacyjnych wymaga aż 8 połączeń kablowych z płytą logiki. Zastosowano protokoły I²C (2 przewody), SPI (3 przewody) oraz 1Wire (1 przewód). Do sterowania diodami LED zastosowano ekspander GPIO TCA9555, analogicznie do płytki eksperymentu.

Płytki zostały zaprojektowane z myślą umieszczenia w obudowie Kradex Z-71.



Rys. 4.7: Przód oraz tył płytki sensorowej

4.3. Wykonanie PCB

4.3.1. Fabrykacja

Produkcja płytki PCB miała miejsce w Chinach w firmie JLC-PCB. Producent oferuje bardzo przystępny cennik produkcji prototypów w bardzo niskich ilościach. Koszt produkcji 5 sztuk każdej z płyt PCB wynosi około 5-10 USD. Przy takiej ofercie największym kosztem był transport, który kosztował około 20 USD. Całkowity koszt wraz z trzema iteracjami projektu zamknął się w 1000 złotych. Jest to cena, która byłaby bardzo trudna do pobicia na rynku rodzimym.

Powyższe warunki sprawiły, że oferta firmy JLC-PCB była bardzo atrakcyjna do realizacji projektu studenckiego. Jedyną wadą rozwiązania był relatywnie długi czas oczekiwania na transport. Chociaż średnio nie przekraczał 2 tygodni, to przy zamawianiu warto zwrócić uwagę na opóźnienia wynikające z różnic kulturowych. Jedno z zamówień okazało się problematyczne z powodu święta Chińskiego Nowego Roku, gdzie produkcja w fabryce została wstrzymana na prawie 3 tygodnie.

Z technicznego punktu widzenia produkcja płytki PCB sprowadza się do przesłania odpowiednich plików wykonawczych w formacie GERBER. Producent pozwala na wybór wykończenia pól lutowniczych oraz koloru warstwy maski. Dodatkową usługą w przystępnej cenie jest montaż komponentów pasywnych oraz popularnych układów logicznych wykonanych w technologii SMT. Za

niewielką opłatę możemy zamówić praktycznie złożoną płytę, szczególnie jeżeli wykorzystujemy komponenty dostępne w zbiorze producenta. Przed finalizacją dostępny jest wirtualny podgląd płytki pozwalający na zweryfikowanie kompletności składanego zamówienia (Rys. 4.8). W razie problemów z zamówieniem można spodziewać się kontaktu z stroną firmy w celu weryfikacji poprawności projektu.

The screenshot shows the JLCPCB website's Order History section. At the top, there is a message: "JLCPCB will have 2 day's holiday on Jan 1st and 2nd, orders placed during the holiday will be processed on Jan 3rd." Below this, the JLCPCB logo is displayed along with navigation links: Why JLCPCB?, Capabilities, Support, Resources, and Order now. The main content area shows a user profile for "Celia Li" with a picture, the message "Your account manager is here, any help?", and contact options: Email (celia@jlcpcb.com), Live Chat, and Change. It also displays office hours: Mon-Sat, 1pm-10pm, GMT+. Below this, a navigation bar includes tabs for Order History, File Manager, Parts Manager, Payments, Account Settings, and Messages. The Order History tab is selected. A table displays the details of an order: Product Detail (Order ID: 202103132217740), Product File (stardust_Y4), Price (Merchandise Total: \$24.01, Shipping Charge: \$19.02, Order Total: \$43.03), and Order Status (Shipped via DHL Express Economy with tracking available). The table also shows the order status as "Production Completed" and a "Quality Complaint" button.

Rys. 4.8: Panel zamówień firmy JLC-PCB

4.3.2. Lutowanie

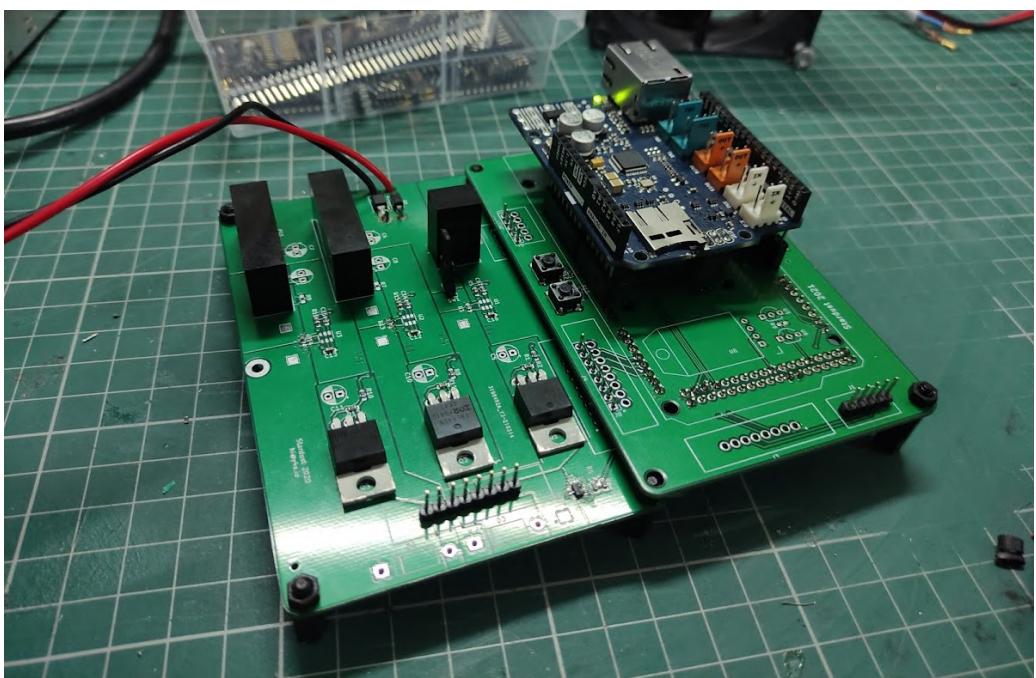
Komponenty potrzebne do złożenia układu elektronicznego pochodzą z sklepów Mouser oraz Botland. Większość komponentów zostało zamówionych jeszcze w fazie prototypowej i zostało wykorzystanych w pierwszej iteracji płytki. Dodatkowe zamówienia komponentów odbywały się równolegle do fabrykacji płyt PCBA na podstawie najnowszej wersji listy materiałów (ang. Bill of Materials).

Dużym ułatwieniem w składaniu gotowego układu elektronicznego było zamówienie płytki wraz z komponentami pasywnymi. Odpowiednie wartości rezystorów, kondensatorów oraz diod LED zostały przylutowane już w fabryce. Uprościło to konstrukcję nie tyle z powodu trudności lutowania tych komponentów, co poprzez uproszczenie procesu zamówień.

W trakcie realizacji projektu autor miał możliwość przejścia kursu IPC z techniki lutowania układów w technologii THT i SMT. Chociaż sama płytka nie przeszła certyfikacji, była lutowana z zachowaniem dobrych praktyk wedle norm IPC J-STD-001H [23] oraz ECSS-Q-ST-70-08C [24]. Proces lutowania został przedstawiony na Zdjęciach 4.9 i 4.10.



Rys. 4.9: Stanowisko robocze lutowania

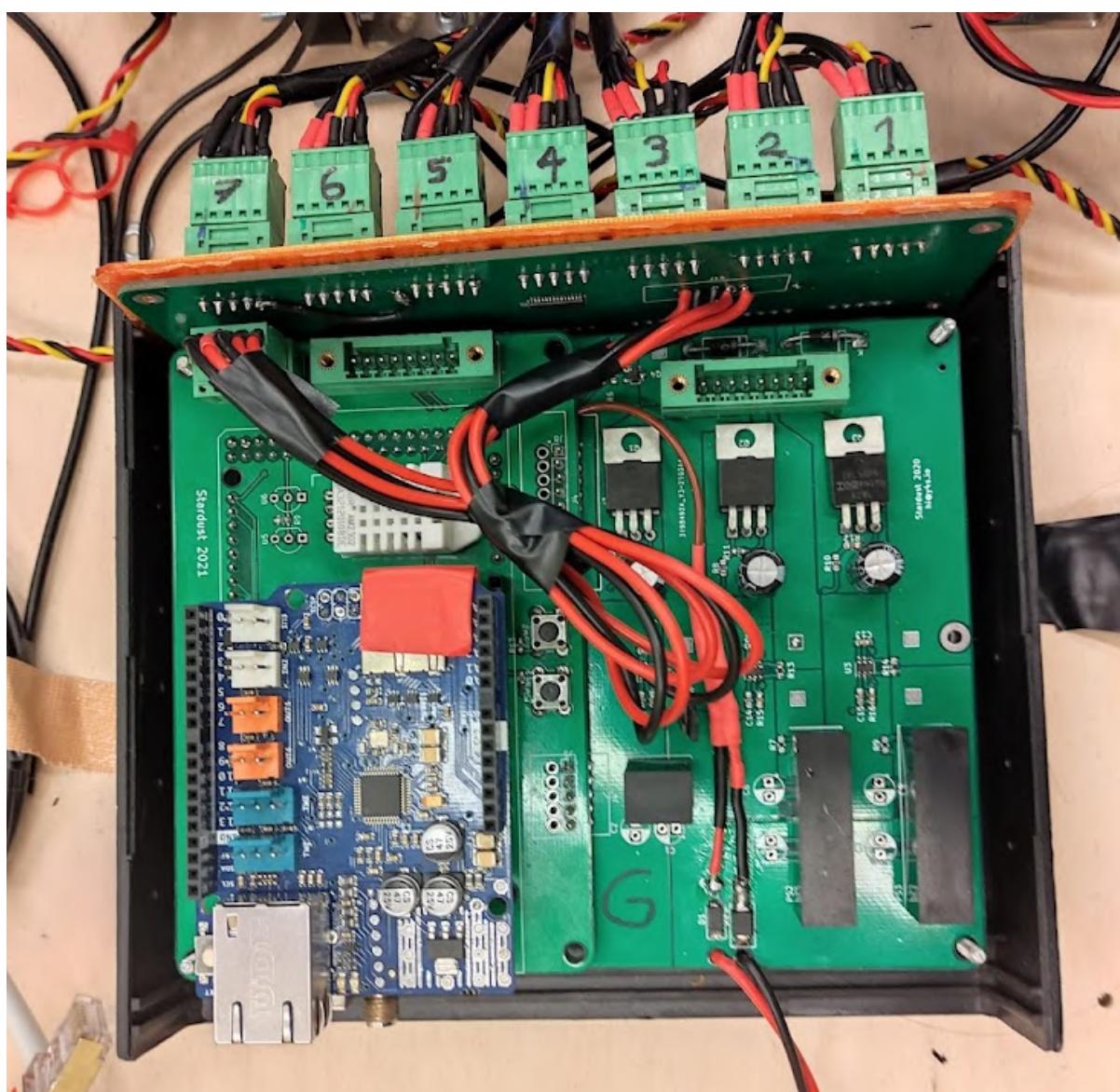


Rys. 4.10: Płytki PCB w trakcie konstrukcji

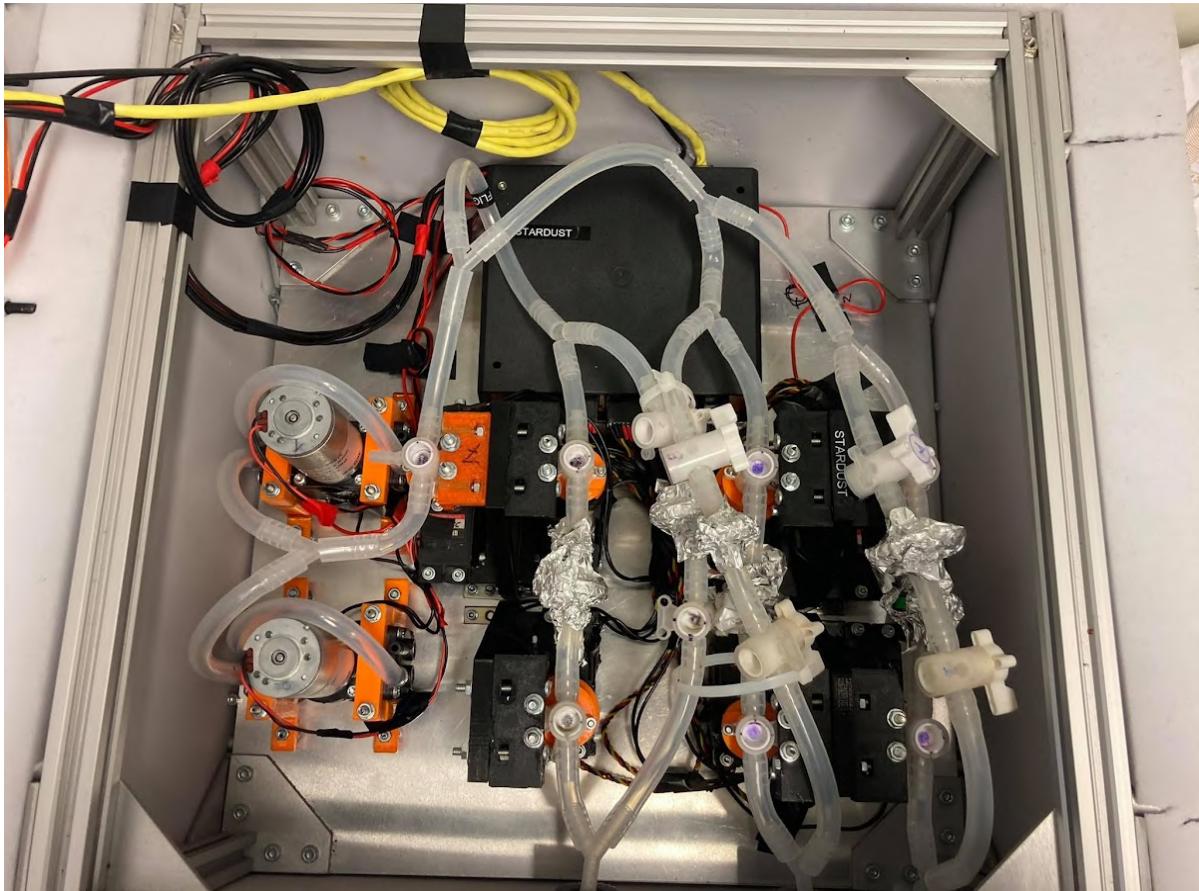
4.3.3. Montaż

Zaprojektowany układ elektroniczny mieści się w obudowie Kradex Z4A. Pudełko stanowi interfejs mechaniczny pomiędzy płytami PCB a konstrukcją mechaniczną platformy badawczej.

Rys. 4.11 przedstawia finalny montaż układu elektronicznego przed zamknięciem pudełka oraz podłączeniem ostatnich złącz. Płytki zasilania i logiki połączone są złączem między płytowym w celu przesyłania sygnałów. Płytki razem są zamontowane w otwory montażowe obudowy. Płytki eksperymentu została umieszczona zamiast przedniej pionowej ścianki obudowy przy pomocy wkładki wykonanej w Druku 3D. Rys. 4.12 przedstawia zamknięte pudełko montowane w gotowej konstrukcji platformy badawczej.



Rys. 4.11: Wnętrze obudowy Kradex Z4A



Rys. 4.12: Wnętrze eksperymentu Stardust

4.3.4. Testowanie

Jednym z najważniejszych etapów w projektowaniu platformy badawczej są testy. Testowanie działania układu można podzielić na podstawowe kategorie:

1. Testy jednostkowe poszczególnych sygnałów na płytce PCB.
2. Testy funkcjonalne zaimplementowanych funkcjonalności.
3. Testy "end-to-end" całości platformy.

Testy jednostkowe były przeprowadzane przez całokształt pracy nad układem elektronicznym. Miały one miejsce w trakcie montażu poszczególnych komponentów w celu weryfikacji ich działania oraz w trakcie rozwiązywania problemów z podzespołami. Do realizacji testów wykorzystano min. oscyloskop Digilent Analog Discovery oraz multimetr.

Po osiągnięciu zadowalających wyników testów jednostkowych kolejnym etapem jest weryfikacja poszczególnych funkcjonalności całej platformy, tj. komunikacji, pracy pomp, pracy grzania, pracy serwomechanizmów i działanie sensorów. Weryfikacja tych funkcjonalności jest krytyczna dla sukcesu eksperymentu. Specjalna uwaga została zwrócona na ścieżki krytyczne dla działania platformy, na przykład: łączne wykorzystanie zdalnej komunikacji do otwierania zaworów wraz z otrzymaniem informacji zwrotnej o wykonaniu działania z przełączników krańcowych. Pozwoliło to na weryfikację działania niezależnych systemów na siebie nawzajem. Wszelkie anomalie należało zrozumieć oraz nanieść należyte poprawki do konstrukcji eksperymentu.

Ostatnim etapem testów było testowanie "end-to-end" czyli finalne testowanie z dodatkiem symulowanych warunków atmosfery. Idealnym rozwiązaniem byłoby testowanie w zmiennych warunkach ciśnienia komory próżniowej, jednak jako zespół nie posiadaliśmy dostępu do odpowiednio dużej komory. Namiastką symulacji było wykorzystanie lodówki do preparatów biologicznych umożliwiającej testowanie w temperaturze do -80°C. Są to warunki o wiele cięższe niż te spotykane w stratosferze, jednak pozwalające zweryfikować graniczne założenia, na które platforma została zaprojektowana. Dostęp do urządzenia był możliwy dzięki współpracy koła naukowego z jednym z dostawców preparatów potrzebnych do przeprowadzenia badań mikrobiologicznych (Rys. 4.13).

Sensory wykorzystane w projekcie zostały zbadane w pierwszej iteracji projektu PCB, w ramach misji testowej balonu stratosferycznego, przeprowadzonej latem 2020 roku. Test został opisany w następnym rozdziale.



Rys. 4.13: Testy platformy naukowej w warunkach obniżonej temperatury

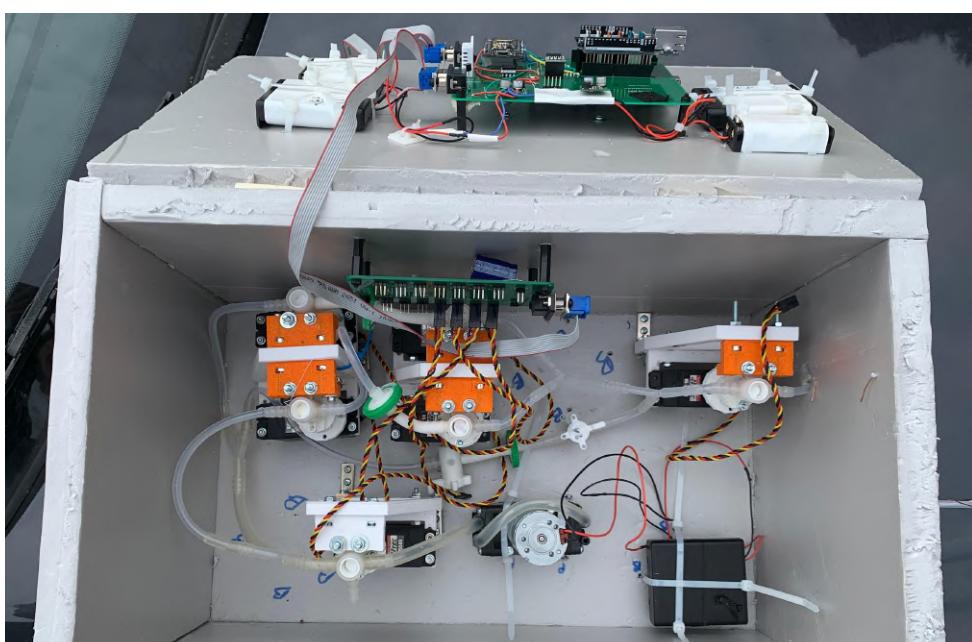
5. WYKORZYSTANIE PLATFORMY BADAWCZEJ

5.1. Misja testowa (2020)

Pierwszy test platformy eksperymentalnej miał miejsce latem 2020 roku jako demonstrator technologiczny przed misją BEXUS. W trakcie pełnej misji balonu stratosferycznego wysłanej w ramach koła naukowego przetestowano dobrane komponenty elektroniczne oraz oprogramowanie odpowiedzialne za autonomiczne sterowanie eksperymentem i uruchomienie pobierania na odpowiedniej wysokości. Wnioski z misji zostały wykorzystane w dalszych iteracjach projektowania układu elektronicznego i układu filtracyjnego. Balon stratosferyczny składał się z następujących komponentów:

1. lateksowej powłoki HWOYEE 1600 mieszczącej 6 m³ wodoru
2. spadochronu,
3. gondoli komunikacyjnej,
4. gondoli eksperymentalna.

Łączna masa pojazdu wyniosła około 4 kg. Konstrukcję pojazdu w locie można zobaczyć na Rysunku 5.2. Gondola komunikacyjna zawiera w sobie zestaw czujników, moduł GPS, system namierzania APRS (ang. Autonomous Packet Reporting System) oraz system komunikacji oparty na protokole LoRa (ang. Long-Range). Gondola eksperymentalna zawierała w sobie (Rys. 5.1) pierwszą iterację płytki logiki, eksperymentu oraz sensorów. Z powodu zastosowania zasilania baterijnego o innym poziomie napięcia niż zasilanie BEXUS, na pokładzie nie znajdowała się jeszcze płytki zasilania. Sam eksperiment zawierał połowę przewidywanej ilości filtrów, serwomechanizmów i pomp, z racji ograniczonego budżetu masy. Gondola komunikacyjna oraz eksperymentalna była połączona przy pomocy połączenia WiFi zaimplementowanego na mikrokontrolerach ESP8266, które miało symulować połączenie E-LINK. Niestety rozwiązanie nie sprawdziło się i nie zadziałało w trakcie lotu z nieznanych przyczyn. Z tego powodu w locie nie była dostępna informacja o wysokości na podstawie GPS, która była przesyłana drogą bezprzewodową z gondoli komunikacyjnej.



Rys. 5.1: Wnętrze gondoli eksperymentalnej przed odlotem

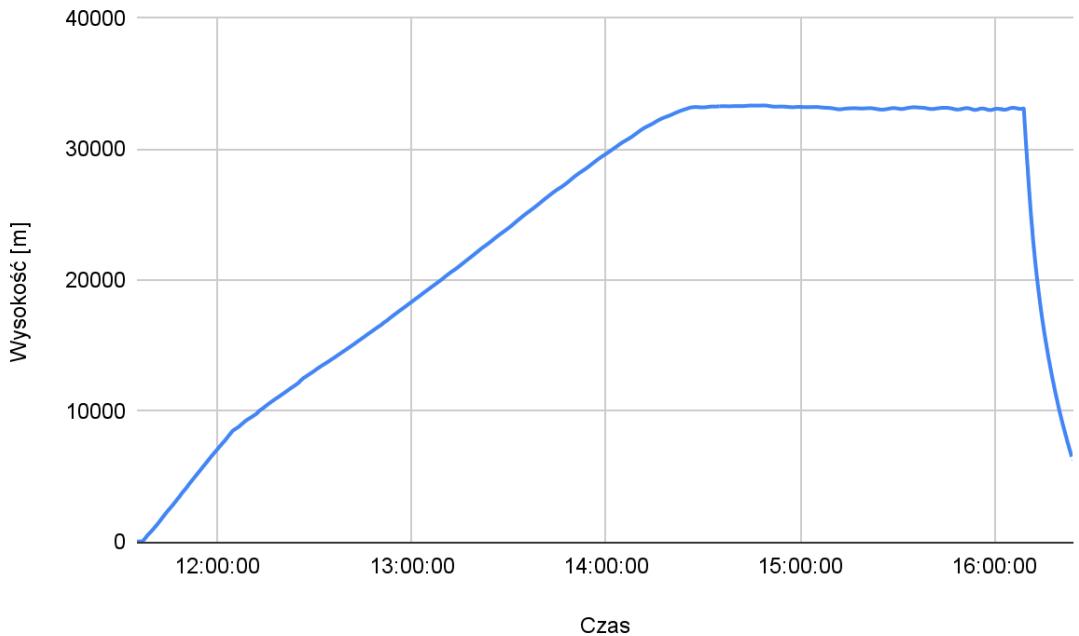


Rys. 5.2: Start misji Stardust z Torunia

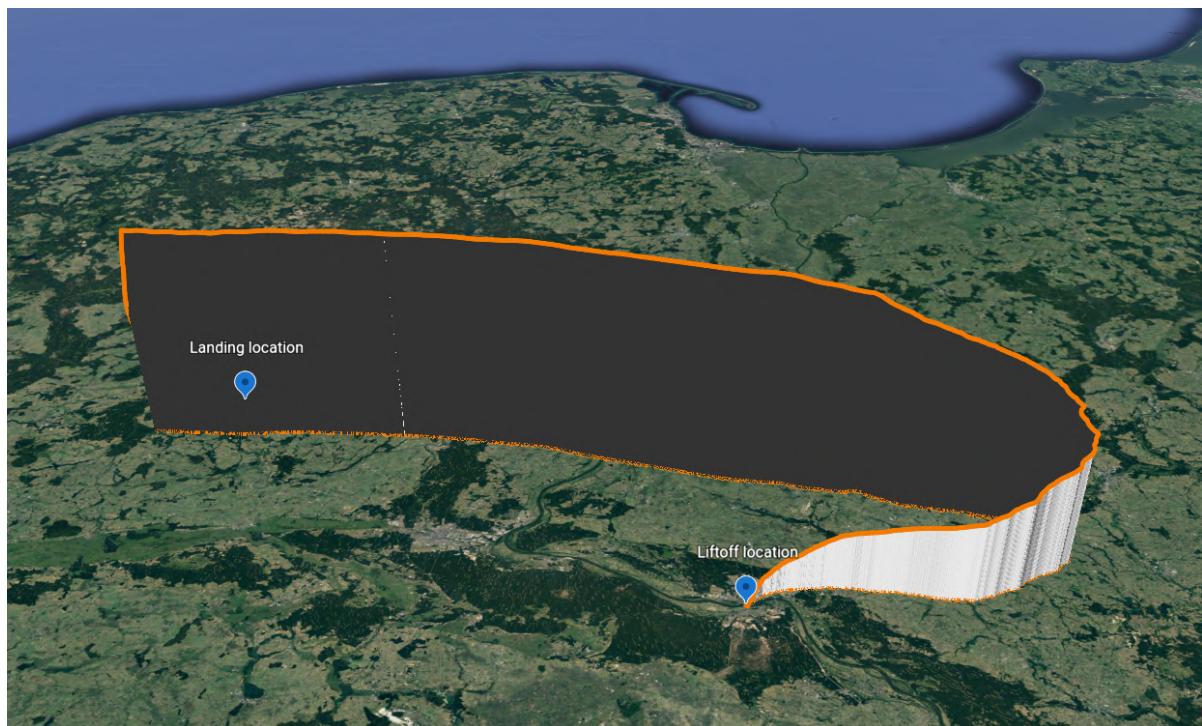
Start platformy badawczej miał miejsce z Torunia (Rys. 5.2). Miejsce zostało wytypowane na podstawie relatywnej bliskości do Trójmiasta, odległości od dużych lotnisk i dróg lotniczych oraz dogodnych warunków pogodowych (w szczególności wiatrów). Lot został zgłoszony do Urzędu Lotnictwa Cywilnego skąd został wystosowany komunikat NOTAM o startie balonu na dzień 20 Lipca 2020 w godzinach od 9:00 do 15:00.

Pojazd wystartował o godzinie 11:30. Po około godzinie osiągnął wysokość 11 km gdzie rozpoczęło się pobieranie próbek. Balon osiągnął wysokość 33 km po 3 h wznoszenia. Cała misja trwała 5h do godziny 16:30, kiedy nastąpiło pęknięcie balonu i spadek gondoli pod spadochronem. Próbkowanie trwało 4 h do momentu przekroczenia 11 km do zamknięciu zaworów na wysokości 8 km w trakcie spadku. Profil misji lotu został przedstawiony na Rysunku 5.3.

Czas trwania misji jest pewną niespodziewaną anomalią. Plan lotu przewidywał czas wznoszenia do stratosfery na około 1.5 h z prędkością około 6 m/s. Z wykresu lotu jednak widzimy spadek prędkości wznoszenia na wysokości około 9 km. Mogło to być spowodowane delikatnym rozszczelnieniem balonu, jednak dokładna przyczyna nie jest znana. W efekcie wydłużyło to czas wznoszenia oraz uniemożliwiło pęknięcie balonu na wysokości około 30km. Lot balonu ustabilizował się na wysokości 33 km i kontynuował lot z wiatrem. Rys. 5.4 przedstawia trasę lotu w widoku przestrzennym.



Rys. 5.3: Profil lotu misji Stardust z 2020 roku



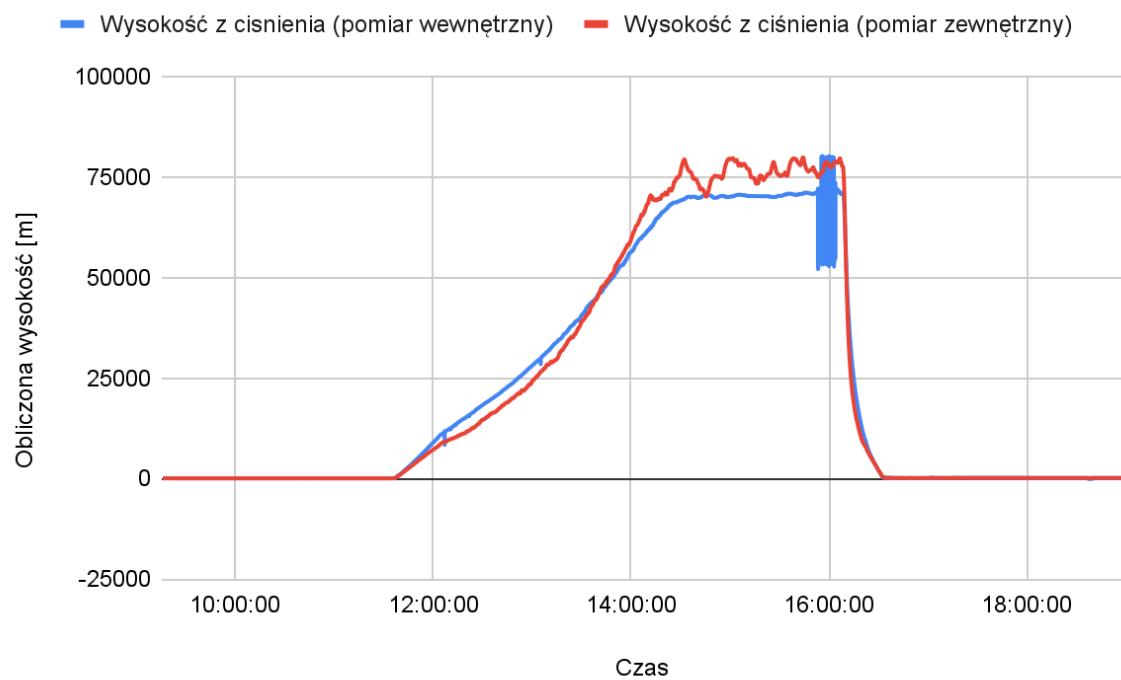
Rys. 5.4: Profil lotu w kontekście geograficznym (rzut pod kątem)

Dodatkowy czas spędzony w stratosferze skutkował niekontrolowanym lotem w kierunku zachodnim. Na pokładzie nie znajdował się system odcinający, który umożliwiłby wcześniejsze zakończenie misji. Na szczęście po przelocie balonu nad komórką burzową nastąpiło pęknięcie powłoki balonu i spadek eksperymentu nad terenem województwa Kujawsko-Pomorskiego. Na tym etapie balon pokonał drogę około 200 km licząc po ścieżce naziemnej. Zespół dojechał na miejsce lądowania po dwóch godzinach i odzyskał eksperyment (Rys. 5.8) oraz zabezpieczył materiał badawczy. Dane z sensorów zebrane przez platformę badawczą są widoczne na Rysunkach 5.6 i 5.7. Kolor niebieski oznacza sensor wewnętrzny, a czerwony na zewnątrz gondoli. Artefakty w okolicy

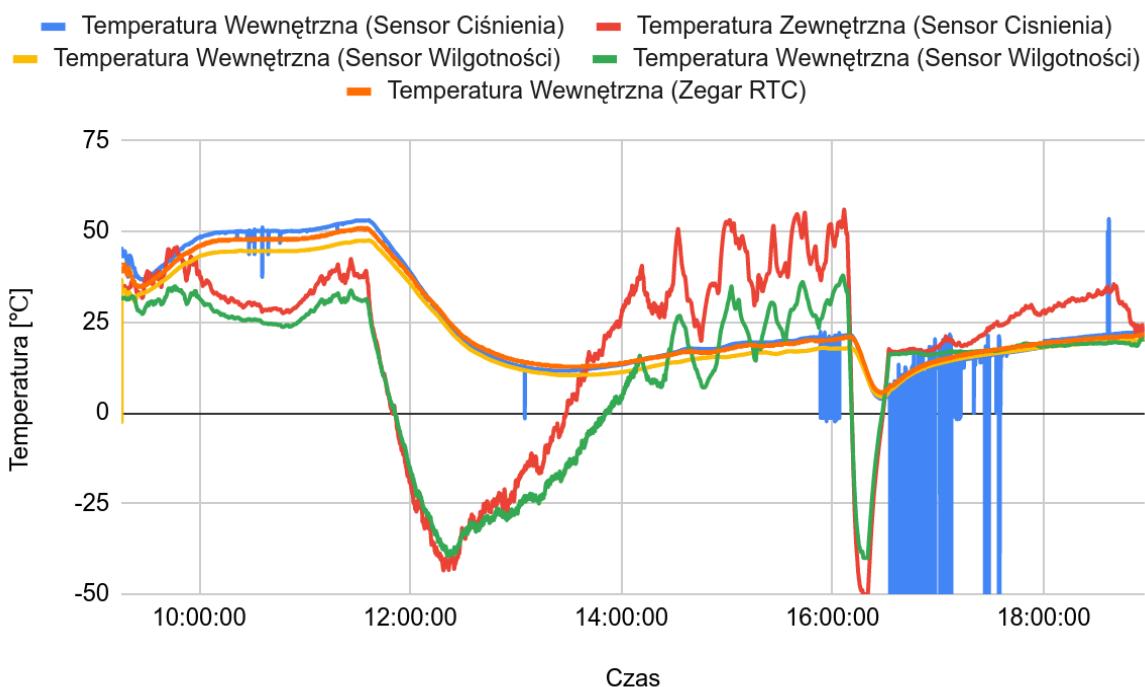
godziny 16:00-18:00 związane są z raportowaniem błędu przez czujnik temperatury zawartym w czujniku ciśnienia. W tym przypadku 0 oraz -50 powinny być traktowane jako kody błędów, jednak zostały zawarte w obliczeniach. Powód występowania błędów może być związany z uszkodzeniem sensora podczas lutowania, bądź pracą czujnika w warunkach wysokiej wilgotności (Rys. 5.7). Szczegółowa analiza danych nastąpi w Rozdziale 5.3.

Uruchomienie próbkowania na wysokości 11 km i zakończenie na 8 km również było anomalią wynikającą z działania platformy badawczej. W czasie lotu nie była dostępna informacja o pozycji GPS, a pomiar wysokości opierał się na estymacji wysokości z ciśnienia. Niestety zastosowany wzór sprawdza się jedynie w warunkach troposfery do około 10 km wysokości. Dla wyższych wysokości estymacja wprowadza duży błąd, który przesunął obszar próbkowania na niższą wysokość (Rys. 5.5). Maksymalna wartość wysokości obliczonej z ciśnienia dla wzoru skalibrowanego dla troposfery wyniosła około 75 km podczas gdy faktyczna wysokość wyniosła około 33 km.

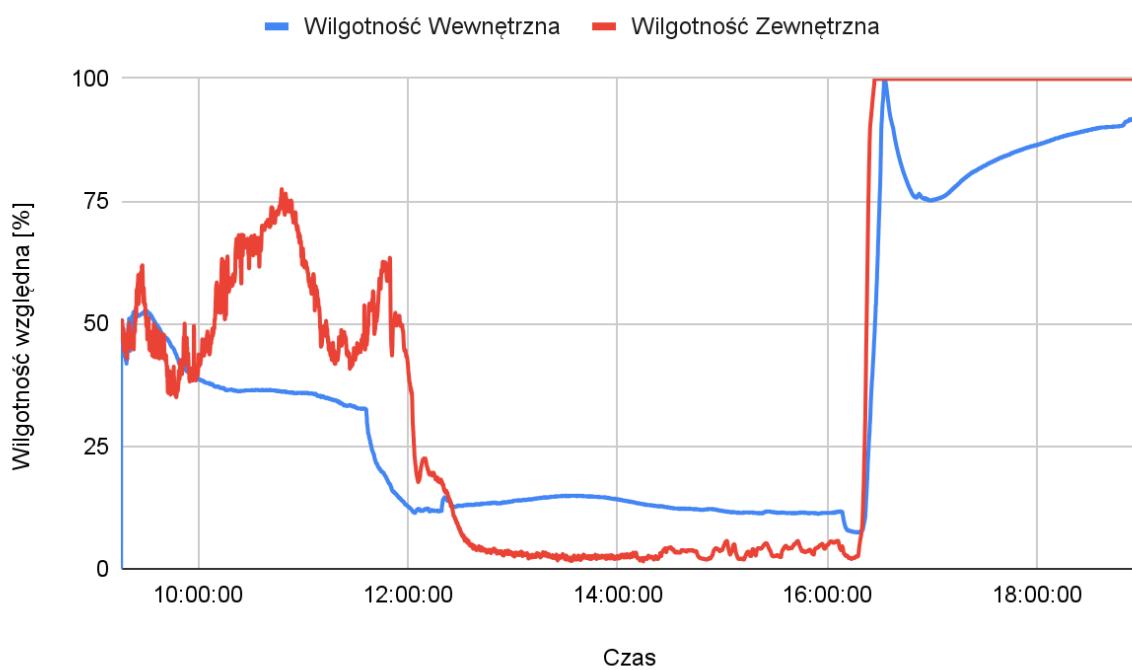
Trudności z realizacją misji podkreślają z czym wiąże się realizacja badań przy pomocy własnej konstrukcji balonu. Mimo wszystko misja została uznana za sukces i pozwoliła na lepsze przygotowanie systemów przed lotem w następnej misji.



Rys. 5.5: Pomiar wysokości na bazie ciśnienia w trakcie misji testowej



Rys. 5.6: Pomiar temperatury w trakcie misji testowej



Rys. 5.7: Pomiar wilgotności w trakcie misji testowej



Rys. 5.8: Zespół Stardust po przechwyceniu platformy naukowej

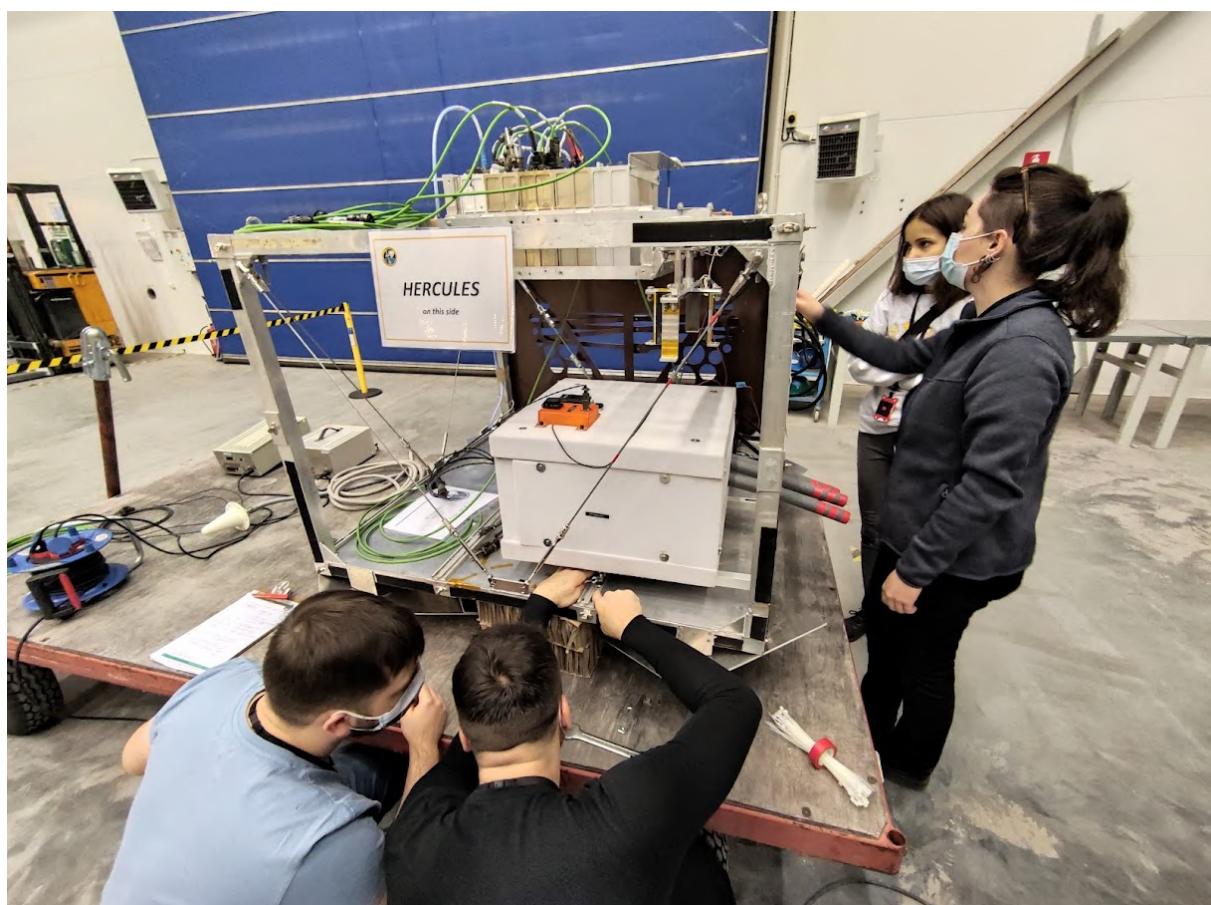


Rys. 5.9: Reprezentanci zespołu Stardust w na terenie kosmodromu Esrange

5.2. Misja właściwa kampanii BEXUS (2021)

Właściwy start zaprojektowanej platformy naukowej miał miejsce w Wrześniu 2021 roku z Kosmodromu Esrange w Szwecji. Zespół dotarł na miejsce 24 września (Rys. 5.9) podczas gdy eksperyment został przetransportowany drogą spedycji kilka dni wcześniej. Rozpoczęto to realizację planu zmierzającego ku startowi balonu BEXUS 30. Oprócz zespołu Stardust na miejscu znajdowało się 11 zespołów studenckich z całej Europy. W trakcie kampanii miały miejsce 2 starty identycznych balonów stratosferycznych - BEXUS 30 oraz BEXUS 31 - w odstępie jednego dnia.

Plan działania przed startem przewidywał rozpakowanie eksperymentu, przygotowanie laboratorium mikrobiologicznego i układu filtracyjnego oraz integrację platformy naukowej z gondolą balonu (Rys. 5.10). Przewidywany start został zaplanowany na 29 września.



Rys. 5.10: Montaż eksperymentu stardust w gondoli balonu BEXUS 30

Integracja wiązała się z mechanicznym zamontowaniem platformy do gondoli oraz przetestowaniem połączeń elektrycznych - zasilania oraz linii komunikacji E-LINK. Testy elektryczne przewidywały podłączenie wszystkich eksperymentów jednocześnie, uruchomienie oraz weryfikację poborów prądu. Nastąpiła również próba połączenia radiowego z gondolą i test połączenia urządzeń z odpowiadającymi im stacjami naziemnymi. Szczególna uwaga została zwrócona na interferencję pomiędzy eksperymentami. Wszelkie problemy były wyłapywane i rozwiązywane jeszcze przed startem. Ze strony zespołu Stardust nie były wymagane żadne zmiany w działaniu platformy.

Z powodu wydłużonego testowania po stronie zespołów przypisanych do gondoli BEXUS 30, start musiał zostać przeniesiony o jeden dzień. W tym czasie nastąpił start misji BEXUS 31, który zakończył się sukcesem 29 Września 2021. Wieczorem tego samego dnia nastąpił Flight Readiness Review oraz Mission Readiness Review, w trakcie których nastąpiła certyfikacja eksperymentów do lotu oraz podpisanie kontraktu startowego ze Szwedzką Korporacją Kosmiczną.

Procedura startowa rozpoczęła się o godzinie 3:00 dnia 30 Września 2021 roku gdy zespół zasiadł przy stanowisku operatorskim (Rys. 5.11). O godzinie 4:44 gondola z eksperymentami na pokładzie została podwieszona pod pojazd Hercules i przewieziona na plac startowy (Rys. 5.12). Hercules jest elementem platformy startowej BEXUS umożliwiającej tankowanie i bezpieczne wypuszczenie balonu w momencie startu. Pojazd przytrzymuje ładunek w stabilnej pozycji podczas gdy za pojazdem przeprowadzane jest rozłożenie oraz tankowanie balonu.



Rys. 5.11: Zespół Stardust na stanowisku operatorskim



Rys. 5.12: Gondola BEXUS 30 podwieszona pod pojazdem startowym "Hercules"



Rys. 5.13: Balon stratosferyczny BEXUS 30 uwolniony przez pojazd Hercules

Ostatni fizyczny kontakt z eksperymentem nastąpił o 5:28 (Rys. 5.12), kiedy mikrobiolodzy przeprowadzili dezynfekcję gondoli przed startem. Następnie została przeprowadzona procedura tankowania balonu i o 6:54 balon wzniósł się w powietrze (Rys. 5.13). Po około godzinie platforma osiągnęła wysokość 13 km, gdzie rozpoczęto filtrowanie powietrza. Balon kontynuował wznoszenie do 8:30, kiedy osiągnął maksymalną wysokość 27,3 km (Rys. 5.14). Od tego momentu rozpoczęła się faza pływu balonu w stratosferze która trwała do momentu kontrolowanego zakończenia misji o 11:53. Zespoły zostały poinformowane o tym fakcie 15 minut przed planowanym opuszczeniem gazu nośnego z balonu i rozpoczęciu spadku gondoli pod spadochronem. Na tym etapie próbowanie zakończyło się, a platforma znajdowała się w stanie bezpiecznym do lądowania. Połączenie telemetrii trwało przez cały czas spadania aż do wysokości 1138 metrów nad poziomem morza. Lądowanie na terenie Finlandii nastąpiło o godzinie 12:29, 6 godzin i 30 minut po startie, po pokonaniu drogi około 150 km (Rys. 5.16). Eksperyment kontynuował pracę na zasilaniu baterijnym jeszcze przez godzinę.



Rys. 5.14: Eksperyment Stardust (dolny prawy róg) na wysokości 27,3 km
(autor: Romain Giraud, bammsat.com)

Przyziemienie gondoli zakończyło misję BEXUS 30. Bezpośrednio po misji zespoły (Rys. 5.15) dokonały wstępnej analizy danych oraz zaprezentowały wstępne wyniki z swoich eksperymentów. Organizatorzy przystąpili do odzyskania gondoli z miejsca lądowania i już 4 godziny później eksperyment Stardust został przetransportowany drogą lotniczą do miejsca startu. Zespół mikrobiologiczny natychmiast przystąpił do zabezpieczenia zebranych danych i przygotowania ich do transportu do dalszych badań w laboratorium w Gdańsku.



Rys. 5.15: Zespoły BEXUS 30 oraz 31 po udanych lotach (autor: ESA Education Office)

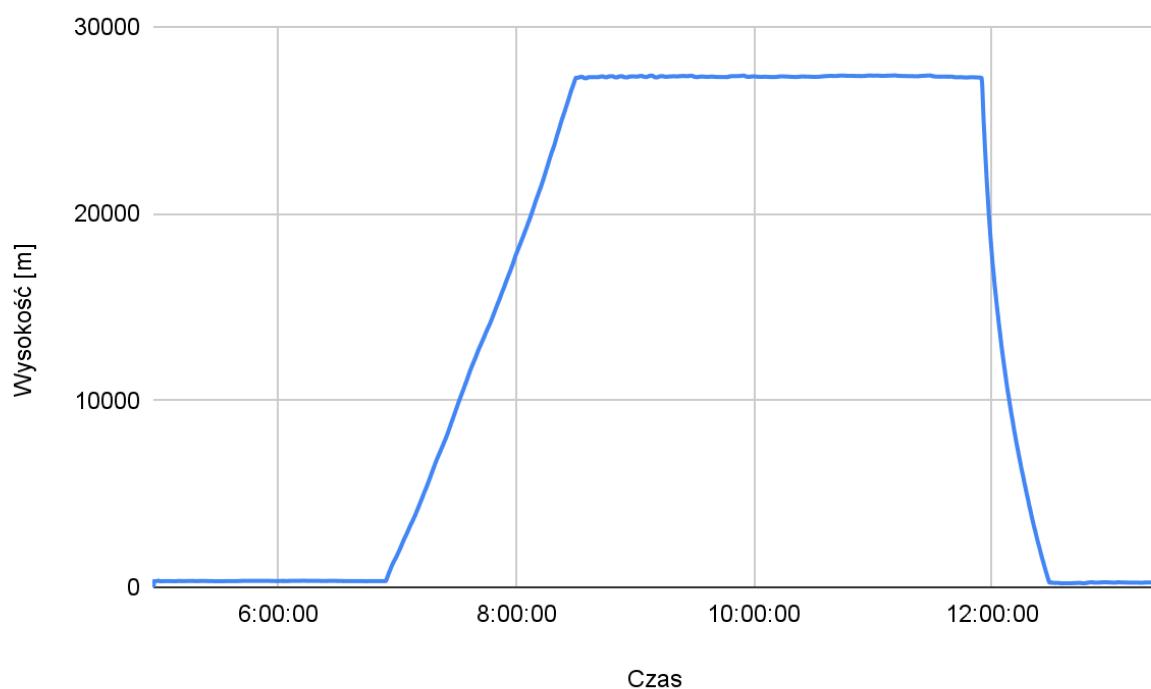


Rys. 5.16: Profil lotu misji BEXUS 30 w ujęciu geograficznym

5.3. Wstępna analiza danych z misji

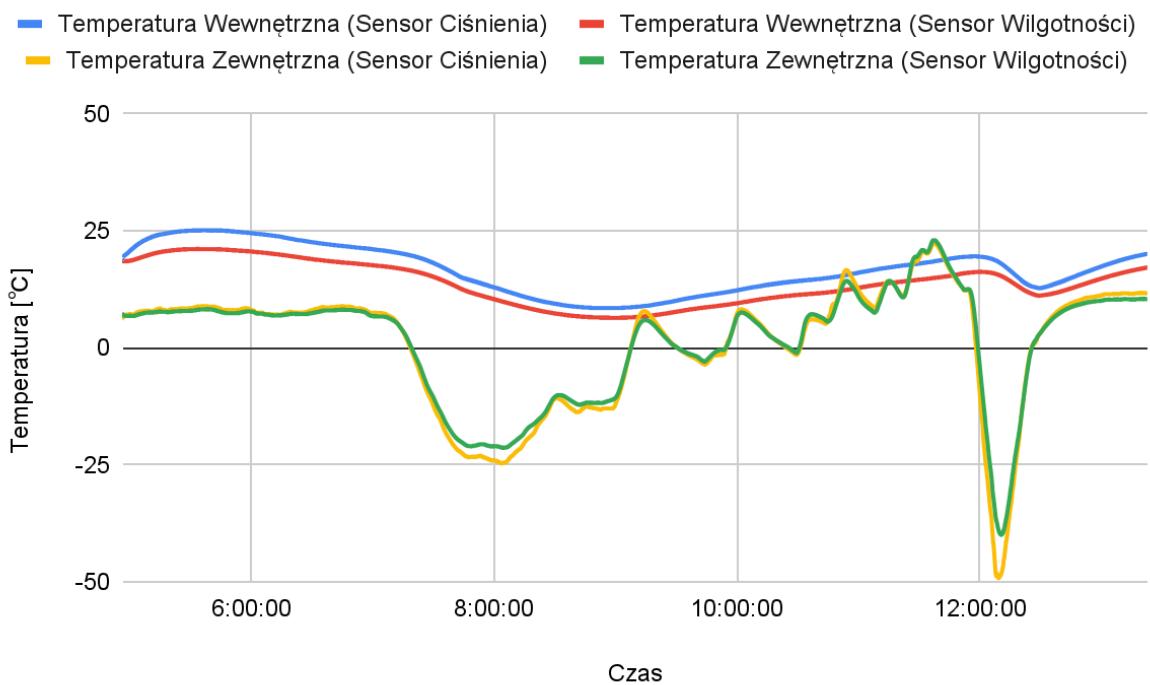
Próbki zebrane przez platformę są poddawane badaniom przez zespół mikrobiologiczny na wydziale Chemicznym, pod przewodnictwem prof. Beaty Krawczyk. W momencie pisania tej pracy inżynierskiej nie ma jeszcze bezpośrednich wyników które można zacytować. Wyniki będą przedmiotem pracy naukowej z planowaną datą publikacji w 2022 roku. Poniżej analizie zostaną poddane dane dostępne dla sensorów zaprojektowanego układu elektronicznego, czyli sensorów ciśnienia, wilgotności oraz temperatury. Częstotliwość pobierania próbek to 1 Hz dla wszystkich pomiarów.

Profil misji BEXUS (Rys. 5.17) pokazuje czego można oczekwać od lotu stratosferycznego w kontrolowanych warunkach. W odróżnieniu od misji testowej (Rys. 5.3), lot balonu charakteryzuje się stabilnym tempem wznoszenia oraz utrzymaniem wysokości przez długi czas, aż do momentu kontrolowanego zakończenia misji. Na podstawie takiego profilu lotu o wiele łatwiej zaplanować działania badawcze.



Rys. 5.17: Profil lotu misji BEXUS 30

Warunki termiczne we wnętrzu eksperymentu (Rys. 5.18) w trakcie lotu BEXUS zgadzały się z założeniami projektowymi. Warunki pogodowe były sprzyjające, a temperatura zewnętrzna w miejscu startu wynosiła około 8 °C. Do utrzymania temperatury przed startem użyto grzałek przez około 10 minut, co spowodowało zwiększenie temperatury wewnętrznej do 25 °C. Dalej temperatura spadała, jednak utrzymywała się w bezpiecznym zakresie, nigdy nie przekraczając 10 °C.



Rys. 5.18. Pomiary temperatury w trakcie misji BEXUS 30

Moment startu wiązał się z dużym spadkiem temperatury na zewnątrz eksperymentu aż do -25°C wedle sensorów, chociaż instrumenty pojazdu BEXUS zanotowały temperaturę -40°C . Dyskrepancja wartości wiąże się z innym montowaniem sensorów. Eksperyment zanotował faktyczną temperaturę płytka PCB które były lepiej zaizolowane od otoczenia przez obudowy w których się znajdująły.

Po przekroczeniu wysokości 10 km, charakterystyka temperatury odwróciła się i eksperyment zaczął rozgrzewać się, pomimo temperatury powietrza mierzonej przez pojazd BEXUS wynoszącej -60°C . Wiąże się to prawdopodobnie ze zmniejszonym ciśnieniem atmosferycznym i możliwością oddawania ciepła, oraz zwiększoną ekspozycją na światło słoneczne po przebiciu pokrywy chmur przez gondolę. Korelacja danych z nagraniem wideo (Załącznik D) z eksperymentu Bammsat wskazuje, że oscylacje temperatury są skorelowane z rotacją gondoli dookoła własnej osi. Wzrost temperatury odpowiada wystawieniu na działanie promieni słońca, a spadek temperatury - zaciemnieniu.

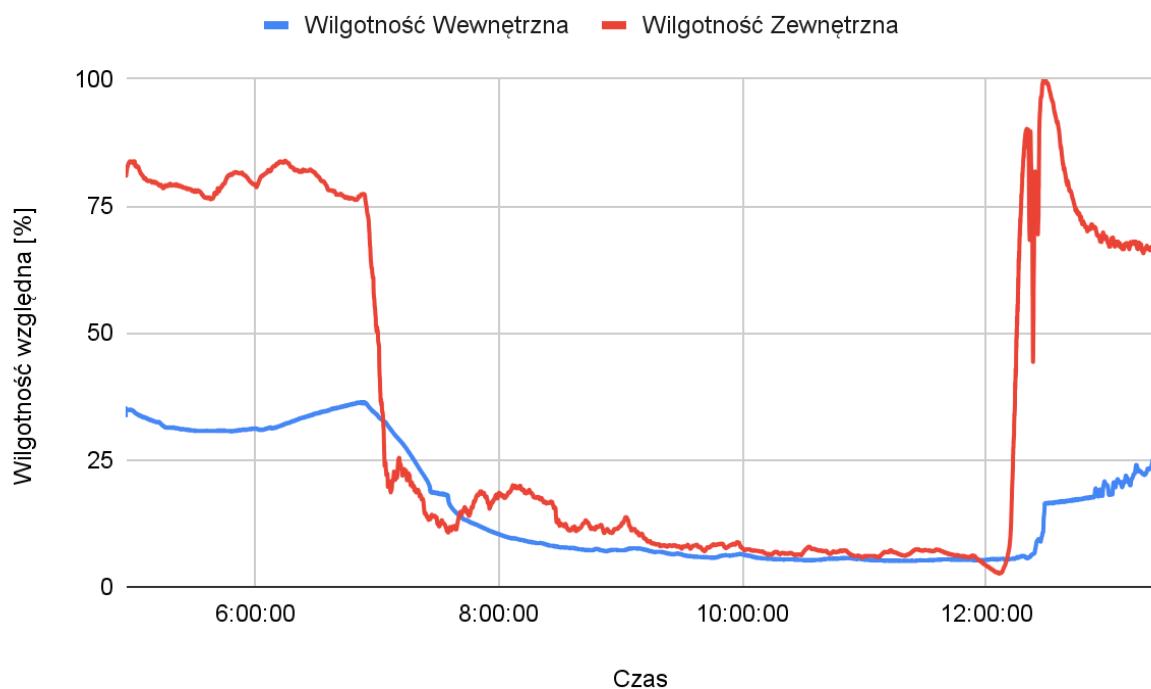
Największy spadek temperatury zanotowano w trakcie wolnego spadku gondoli po odłączeniu od balonu stratosferycznego, kiedy zarejestrowano minimalną temperaturę -50°C , na granicy możliwości pomiarowej sensora. Po wylądowaniu oziębiony eksperyment rozpoczął rozgrzewanie do temperatury otoczenia. Warto zwrócić uwagę na opóźnienie w spadku temperaturyewnętrznej dzięki zastosowanej izolacji termicznej.

Charakterystyki zaobserwowane w czasie misji BEXUS pokrywają się z wcześniejszymi danymi z misji testowej (Rysunki 5.6-7). Analiza zbiorcza danych pozwala na lepsze zrozumienie zjawisk które następują w trakcie lotu balonu stratosferycznego. W danych z misji testowej również można zaobserwować rozgrzewanie eksperymentu po wyjściu z troposfery (Rys. 5.6), jednak powód

oscylacji temperatury nie był znany z racji braku kamery na pokładzie. Pomimo, że eksperyment miał inną konstrukcję, temperatura również mogła być zależna od pozycji gondoli względem słońca.

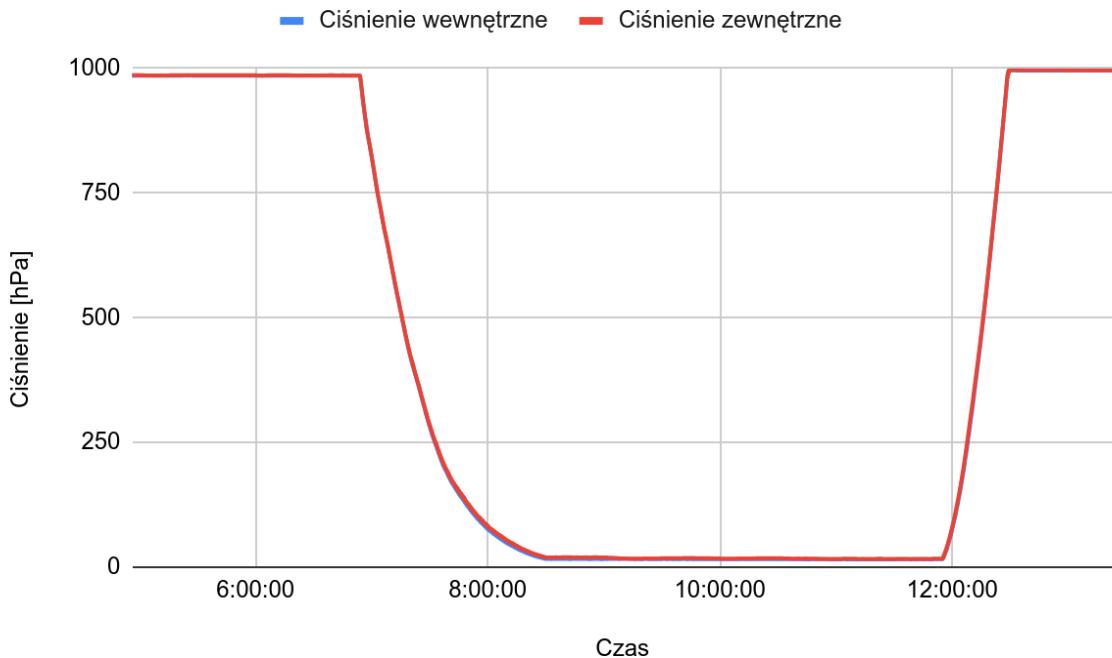
Główną różnicą między misjami są warunki termiczne otoczenia w momencie startu. Misja testowa miała miejsce w Lipcu z terytorium Polski. W tym przypadku sensory zanotowały temperaturę przekraczającą 50 °C we wnętrzu eksperymentu. Jest to związane z wykorzystaniem izolacji termicznej przy jednoczesnej ciągłej pracy pomp oraz nagrzewania się elektroniki.

Pomiar względnej wilgotności powietrza przedstawia charakterystykę związaną głównie z faktyczną temperaturą otoczenia i pojemnością wody w powietrzu. Na wykresie (Rys. 5.18) nie widać bezpośredniego wpływu na zmianę wilgotności skorelowanego ze zwiększeniem się temperatury samego sensora (Rys. 5.18, zielona linia). Sugeruje to, że faktyczne temperatura powietrza otaczającego eksperyment jest stała, a z tym ilość wody znajdującej się w powietrzu. Wahania wilgotności przed startem są zależne głównie od warunków atmosferycznych, ale również pozycji gondoli oraz obecności ludzi. Po startie wilgotność spada wraz z spadkiem temperatury powietrza. Najmniejszy pomiar wilgotności powietrza koreluje z najniższą temperaturą zarejestrowaną w trakcie wolnego spadku eksperymentu z stratosfery. Po wylądowaniu i rozpoczęciu rozgrzewania się eksperymentu do temperatury otoczenia wilgotność wzrasta, dochodząc nawet do 100%. Powód chwilowego spadku wilgotności do około 45% w trakcie ogrzewania się eksperymentu po wylądowaniu nie jest znany.

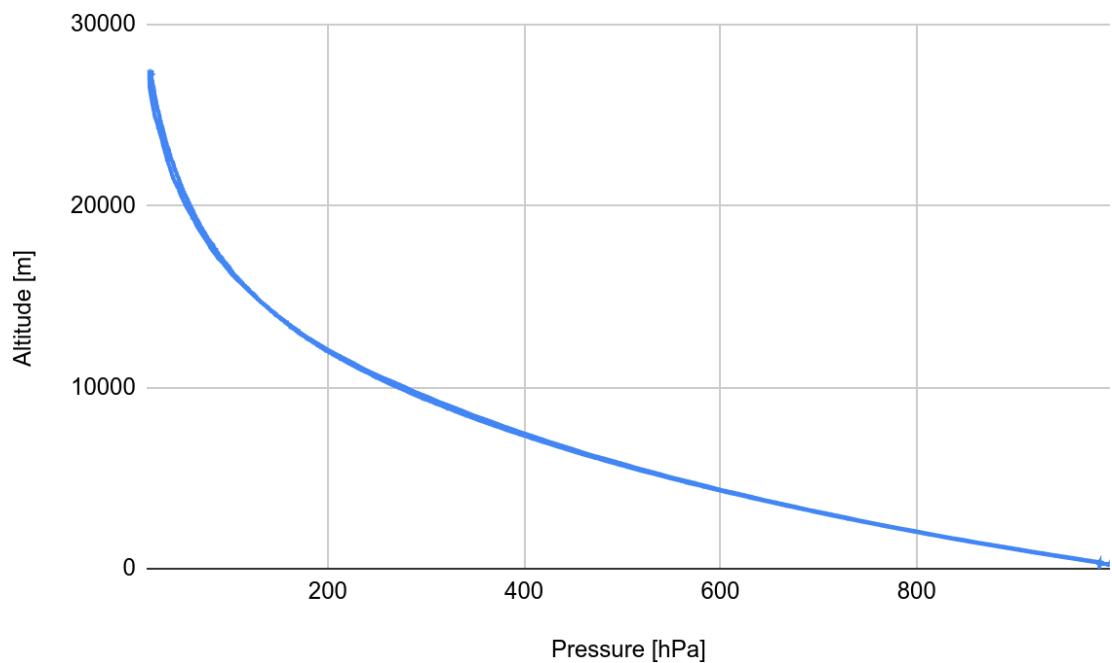


Rys. 5.19: Pomiary wilgotności w trakcie misji BEXUS 30

Pomiar ciśnienia atmosferycznego jest przydatny przy szacowaniu wysokości na której znajduje się eksperyment. Chociaż sam wykres ciśnienia zależnego od czasu (Rys. 5.20) przypomina kształtem sam profil lotu, to wykres ciśnienia od wysokości (Rys. 5.21) daje zrozumienie faktycznego rozkładu warstw powietrza w atmosferze. Wysoka liniowość charakterystyki do wysokości około 10 km jest podstawowym założeniem umożliwiającym działanie altimetrów ciśnieniowych. Zmiana ciśnienia wraz z wysokością powyżej 10km przestaje być liniowa i zastosowanie typowych obliczeń szacującego wysokość wiąże się z błędem, jak zaobserwowano w misji testowej (Rys. 5.5).

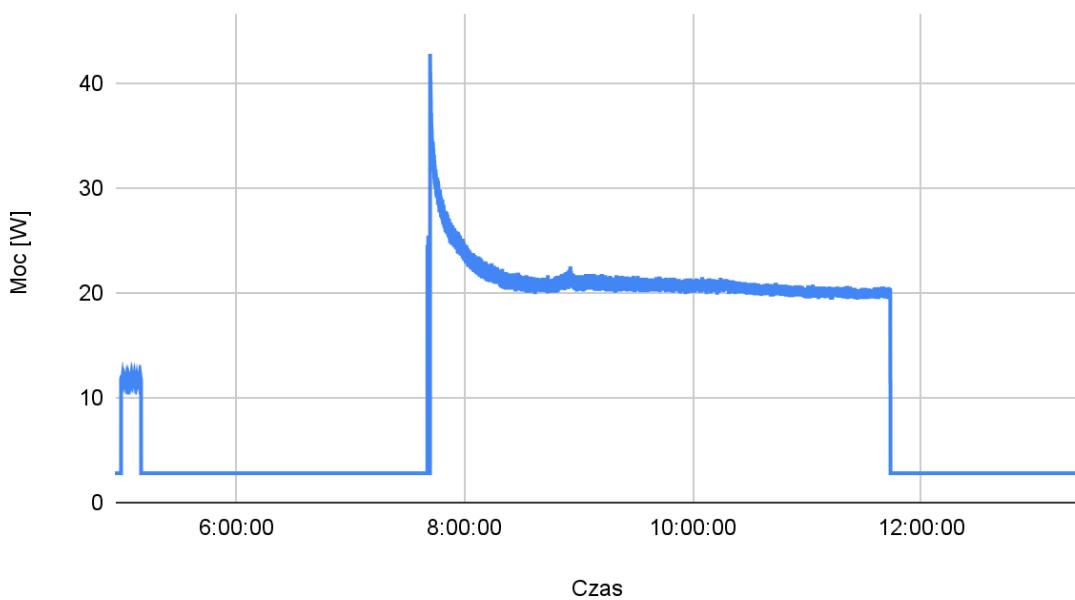


Rys. 5.20: Pomiar ciśnienia atmosferycznego w trakcie misji BEXUS 30

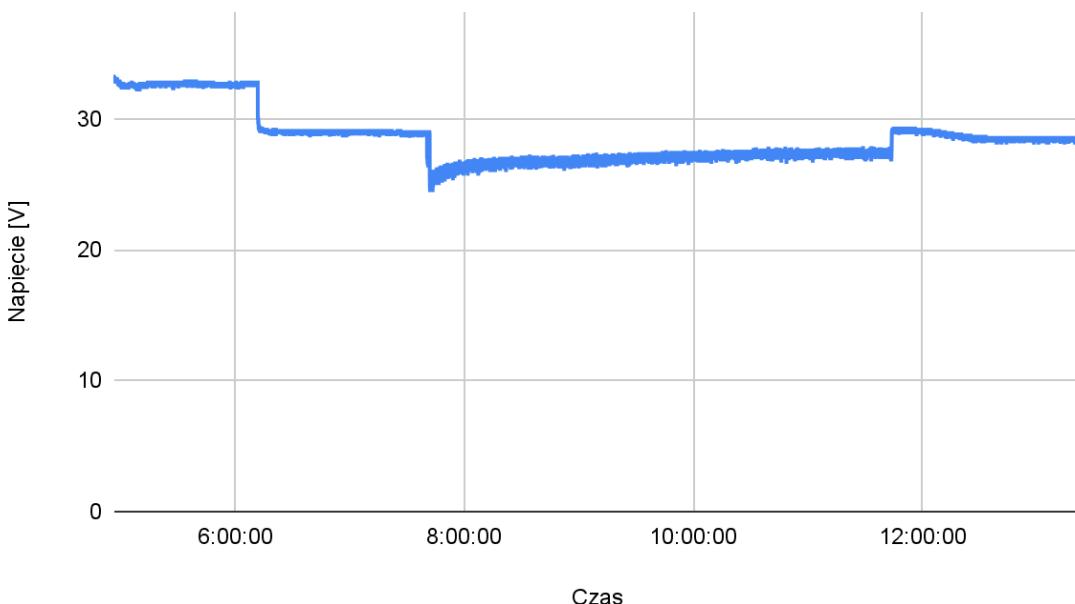


Rys. 5.21: Zależność ciśnienia atmosferycznego od wysokości dla misji BEXUS 30

Zbiorem danych, który nie był dostępny w trakcie misji testowej był pomiar mocy zużytej przez eksperyment (Rys. 5.22) oraz napięcie na linii zasilania (Rys. 5.23). Na początku wykresu mocy widzimy około 10 minutowy okres wykorzystania grzałek eksperymentu. O godzinie 6:12 następuje przejście z zasilania z pojazdu Hercules (33 V) na napięcie baterijne (około 28 V). Rozpoczęcie próbkowania o godzinie 7:42 wiąże się ze wzrostem pobieranej mocy, oraz spadkiem napięcia na baterii do 26 V. Charakterystyka wykorzystanych pomp (Boxer 3KD) wiąże się ze startem ze stanu zwarcia / maksymalnym jednostkowym poborem mocy (około 43W). W trakcie pracy pompy dochodzi do zmniejszenia tarć własnych i spadku pobieranej mocy do około 10 W na pompę. Zachowanie pomp jest identyczne do obserwacji wykonanych w trakcie testów naziemnych. Zdjęcie obciążenia z linii zasilania po wyłączeniu pomp wiąże się ze wzrostem napięcia. Spadek napięcia w czasie wiąże się prawdopodobnie ze zmniejszoną pojemnością baterii po pracy pomp oraz zmianą warunków termicznych w trakcie spadku swobodnego eksperymentu.



Rys. 5.22: Sumaryczna moc pobierana przez eksperyment w trakcie misji BEXUS 30



Rys. 5.23: Napięcie na linii zasilania eksperymentu z gondoli BEXUS 30

6. PODSUMOWANIE

Projekt Stardust stanowi symbol zarówno podróży do stratosfery, ale również podróży członków zespołu - zarówno geograficznej jak i życiowej. Co zaczęło się jako prosta chęć nauki elektroniki w Kole Naukowym SimLE skończyło się na tysiącach kilometrów podróży, poznaniu setek wartościowych ludzi oraz niezapomnianych doświadczeniach. Nauka wyniesiona z projektu wykracza poza zdobyte umiejętności projektowania układów elektronicznych, ale również poszerza horyzonty na zestaw umiejętności potrzebnych do przeprowadzenia misji na taką skalę. Uczestnictwo w programie REXUS/BEXUS momentami nie było przyjemne, jednak przeżycie euforii końca projektu jest bardzo warte każdego wkładu.

Przez ponad 3 lata studiów oraz 2 lata pracy w programie BEXUS autor miał przyjemność poznać szereg inspirujących i wartościowych ludzi. Zespoły miały okazję zapoznać się z działaniem dużych organizacji od wnętrza, poznać szereg pracujących tam ekspertów oraz ich ludzką stronę. Szczególne podziękowania należą się pani Armelle Frenea-Schmidt, manager programu REXUS/BEXUS ze strony Szwedzkiej Korporacji Kosmicznej. Wartość przekazanej wiedzy i doświadczeń będą przywiecały autorowi przez długi czas w rozwoju naukowym i osobistym.

Gdyby autor miał jeszcze raz podejść do zadania konstrukcji elektroniki do takiego projektu, z całą pewnością zostałyby podjęte inne wybory. Zdobyte doświadczenie sugeruje, że układ realizujący sterowanie takim eksperymentem mógłby być mniejszy m. in. przez zastosowanie innego mikrokontrolera, bądź integrację go bezpośrednio w płytce drukowanej. Nawet bez wymiany żadnego z komponentów, projektowi należy się kolejna iteracja płytka PCB, która poprawiłaby szereg małych błędów oraz uprościła ich konstrukcję. Więcej uwagi należy zwrócić na integrację podzespołów. Całość nauki wyciągniętej z projektu można podsumować jednym określeniem - inżynierii systemów. Co zaczęło się jako projekt elektroniki, skończyło się na zarządzaniu całością eksperymentu i próbą spięcia zmiennych mikrobiologicznych, mechanicznych, elektronicznych, projektowych oraz ludzkich w jedną działającą całość. W trakcie pracy nad projektem podjęto szereg decyzji na poziomie projektu, organizacji pracy czy poszczególnych komponentów, które były krytyczne do sukcesu całego projektu, a wykraczają poza projekt elektroniki.

Bezpośrednie plany na przyszłość wiążą się z zakończeniem badań mikrobiologicznych oraz napisaniem pracy naukowej z wynikami. Planowana publikacja ma mieć miejsce 1-5 Maja na 25 Sympozjum Europejskich Programów Rakietowych i Balonowych organizowanym przez Europejską Agencję Kosmiczną w Barritz, Francji.

Równolegle autor jest odpowiedzialny za przyszły rozwój projektu Stardust jako koordynator. Celem jest zebranie doświadczenia i wiedzy zdobytej w trakcie realizacji poprzednich misji do konstrukcji ulepszonej platformy stratosferycznej. Planowo konstrukcja ma być wykorzystana do wynoszenia ładunków naukowych dla kół naukowych, organizacji bądź innych zainteresowanych jednostek.

WYKAZ LITERATURY

- [1] Safonova, Margarita et al, *An Overview of High-Altitude Balloon Experiments at the Indian Institute of Astrophysics* (2015); <https://arxiv.org/pdf/1506.01538.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [2] NASA Earth Observatory, *Ozone Balance in the Stratosphere* (Czerwiec 1999) | https://earthobservatory.nasa.gov/features/Ozone/ozone_2.php [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [3] L. L. Lazutin et al, *Cosmic Ray Investigation in the Stratosphere and Space: Results from Instruments on Russian Satellites and Balloons*, Advances in Astronomy (2013).
doi:[10.1155/2013/461717](https://doi.org/10.1155/2013/461717)
- [4] Priya DasSarma et al, *Survival of microbes in Earth's stratosphere*. *Current Opinion in Microbiology*, Environmental Microbiology * The New Microscopy (2018), 43(), 24–30.
doi:[10.1016/j.mib.2017.11.002](https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.11.002)
- [5] Smith, David J. *Microbes in the Upper Atmosphere and Unique Opportunities for Astrobiology Research*. *Astrobiology* (2018), 13(10), 981–990. doi:[10.1089/ast.2013.1074](https://doi.org/10.1089/ast.2013.1074)
- [6] Koło Naukowe SimLE, *Projekt Stardust*, Politechnika Gdańsk (2021). <https://simle.pl/stardust> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [7] K. Pelzner, S. Magrian. *Układ pobierający próbki mikrobiologiczne w warunkach Stratosferycznych*, Politechnika Gdańsk Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki (2018)
- [8] European Space Agency, *What is ESA Academy?*, ESA Education Office (2021).
https://www.esa.int/Education/ESA_Academy/What_is_the_ESA_Academy [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [9] BEXUS Organizers: *BEXUS User Manual*, SSC, ZARM (2021).
https://rexusbexus.net/wp-content/uploads/2021/06/BX_REF_BEXUS_User-Manual_v8_03Jun21.pdf [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [10] BEXUS Organizers: *Esrage Safety Manual*, SSC (2021).
<https://sscspace.com/wp-content/uploads/Esrage-Safety-Manual.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [11] Hach, *Non-Sterile Nylon Syringe Filter* (2021).
<https://www.hach.com/non-sterile-nylon-syringe-filter-33mm-0-2um-50-pk/product?id=13610302182> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [12] K. Loret. *Projekt układu podciśnieniowego do pobierania próbek biologicznych w wysokich partiach stratosfery*, Politechnika Gdańsk Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa (2020).
- [13] Arduino CC. *Arduino Mega 2560 v3* (2021).
<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [14] Arduino CC. *Arduino Ethernet Shield 2* (2021).
<https://store.arduino.cc/products/arduino-ethernet-shield-2> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [15] Honeywell, TruStability® Board Mount Pressure Sensors, 2014 Honeywell International Inc.
<https://www.mouser.com/datasheet/2/187/honeywell-sensing-trustability-ssc-series-standard-740340.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]

- [16] Maxim Integrated, *DS3231 Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal*, Maxim Integrated Products Inc. (2015). <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [17] Aosong Electronics Co.,Ltd, Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [18] u-blox, NEO-6 GPS Modules
https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS_G6-HW-09005%29.pdf [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [19] CUI, P78-2000-S Non-isolated switching regulator, 2020
https://pl.mouser.com/datasheet/2/670/p78_2000_s-1729053.pdf [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [20] Texas Instruments, INAx181 Bidirectional, Low- and High-Side Voltage Output, Current-Sense Amplifiers. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [21] NXP Semiconductors, PCA968516-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller (2015).
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [22] Texas Instruments, *TCA9555 Low-Voltage 16-Bit I2C and SMBus I/O Expander with Interrupt Output and Configuration Registers* (2019). <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9555.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [23] IPC, Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies, (2020).
<https://www.ipc.org/TOC/IPC-J-STD-001H-toc.pdf> [Dostęp 1 Stycznia 2021]
- [24] European Cooperation for Space Standardization, ECSS-Q-ST-70-08C – Manual soldering of high-reliability electrical connections (6 March 2009).
<https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-70-08c-manual-soldering-of-high-reliability-electrical-connections/> [Dostęp 1 Stycznia 2021]

WYKAZ TABEL

Tabela 3.1: Listing sensorów, modeli, poboru prądu oraz protokołu komunikacyjnego, str 16
Tabela 3.2: Pobór mocy przez komponenty platformy, str. 17

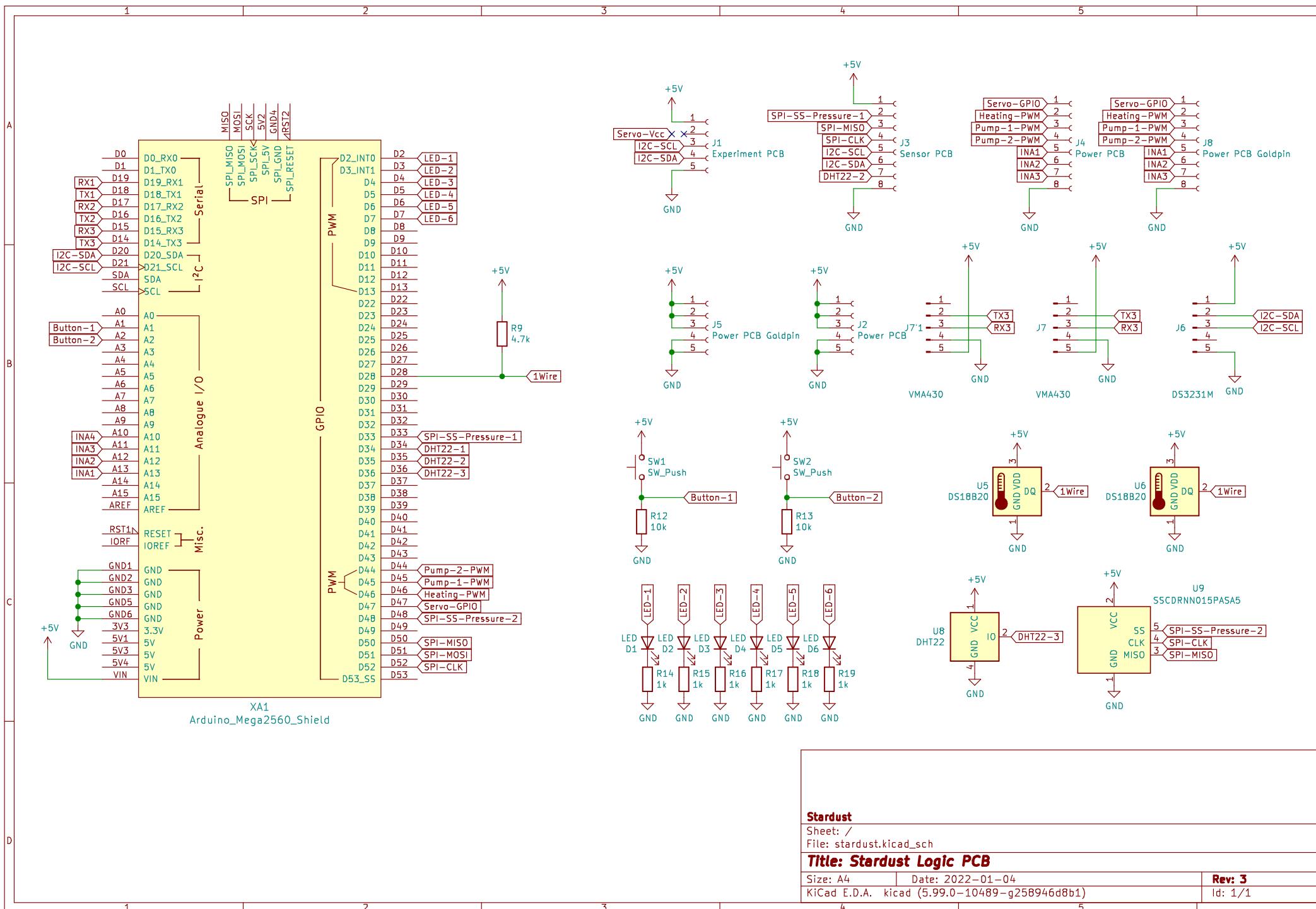
WYKAZ RYSUNKÓW

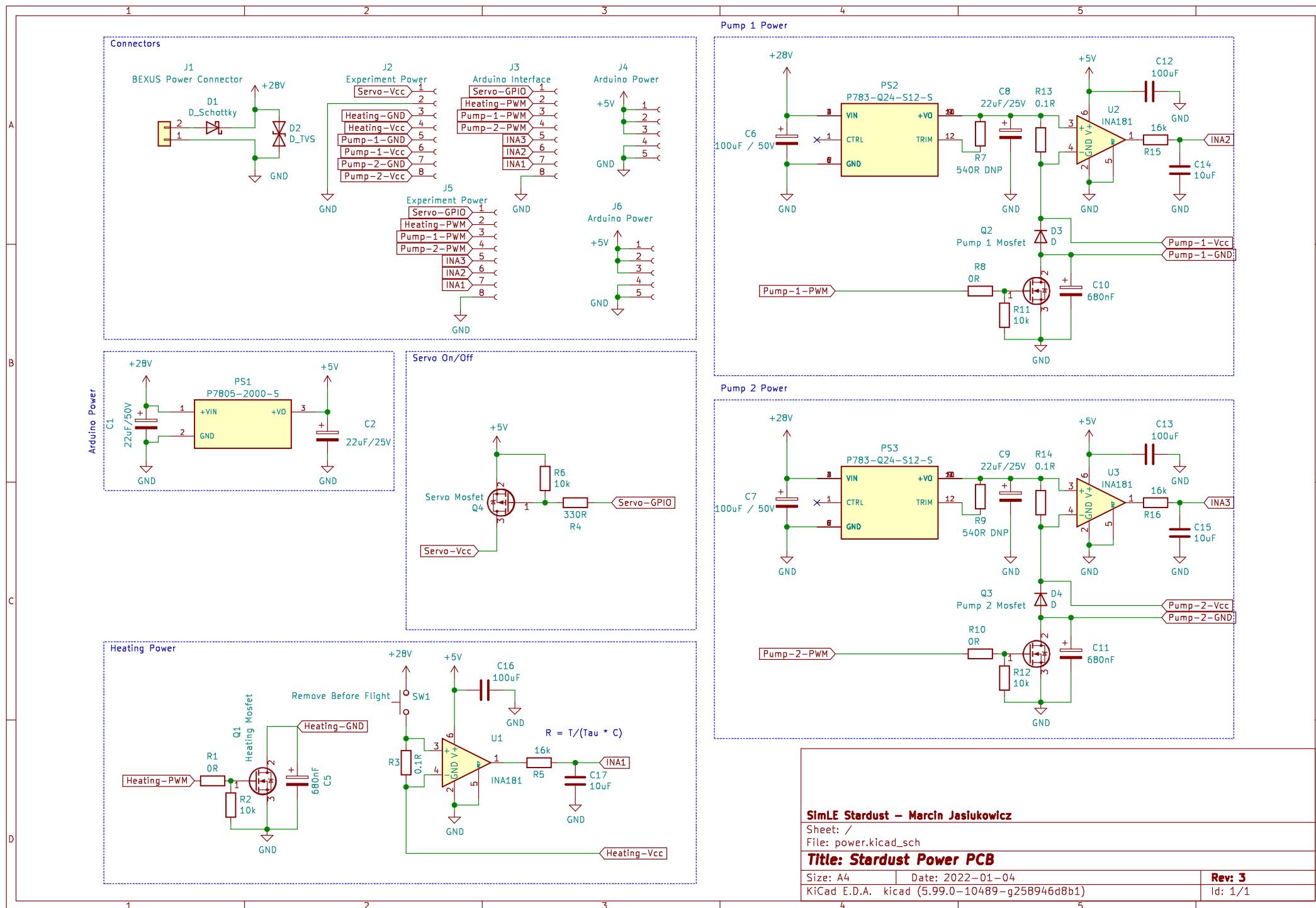
- Rys. 2.1: Typowy przelot misji Stardust. str. 5
Rys. 2.2: Identyfikacja graficzna Projektu Stardust, str. 5
Rys. 2.3: Misja balonu stratosferycznego koła naukowego SimLE w 2018 roku, str. 6
Rys. 2.4: Zespoły biorące udział w REXUS/BEXUS Selection Workshop w 2019 roku, str. 9
Rys. 2.5: Typowy przelotu misji BEXUS, str. 10
Rys. 3.1: Filtr strzykawkowy, str. 11
Rys. 3.2: Schemat ideowy układu filtracyjnego (autor: Mateusz Grzybowski), str. 12
Rys. 3.3: Wykonanie fragmentu układu filtracyjnego (autor: Mateusz Grzybowski), str. 12
Rys. 3.4: Jednostka kontroli zaworu - Valve Control Unit (autor: Kacper Loret), str. 14
Rys. 3.5: Obudowa eksperymentu wraz z układem filtracyjnym (autor: Kacper Loret), str. 15
Rys. 3.6: Schemat układu kontrola napięcia linii zasilania pomp oraz grzania, str. 18
Rys. 3.7: Schemat układu pomiaru prądu, str. 19
Rys. 3.8: Schemat układu resetu napięcia serwomechanizmów, str. 21
Rys. 3.9: Układ TCA9685 oraz PCA9555, str. 21
Rys. 3.10: Rezystor grzejny 40 W (autor: Telpod), str. 22
Rys. 3.11: Złącza międzymiędzyplatkowe (autor: Würth Elektronik), str. 22
Rys. 3.12: Maszyna stanów i warunki przejścia, str. 23
Rys. 3.13: Widok stacji naziemnej kontrolującej eksperiment, str. 24
Rys. 4.1: Logiczne połączenie podzespołów eksperymentu, str. 26
Rys. 4.2: Podział podzespołów między płytami PCB, str. 26
Rys. 4.3: Przód oraz tył płytki zasilania, str. 27
Rys. 4.4: Zbliżenie na układ pomiaru prądu oraz tranzystor mosfet, str. 28
Rys. 4.5: Przód oraz tył płytki logiki, str. 29
Rys. 4.6: Przód oraz tył płytki eksperimentu, str. 30
Rys. 4.7: Przód oraz tył płytki sensorowej, str. 31
Rys. 4.8: Panel zamówień firmy JLC-PCB, str. 32
Rys. 4.9: Stanowisko robocze lutowania, str. 33
Rys. 4.10: Płytki PCB w trakcie konstrukcji, str. 33
Rys. 4.11: Wnętrze obudowy Kradex Z4A, str. 34
Rys. 4.12: Wnętrze eksperimentu Stardust , str 35
Rys. 4.13: Testy platformy naukowej w warunkach obniżonej temperatury, str. 36
Rys. 5.1: Wnętrze gondoli eksperimentalnej przed odlotem, str. 37
Rys. 5.2: Start misji Stardust z Torunia, str. 38
Rys. 5.3: Profil lotu misji Stardust z 2020 roku, str. 39

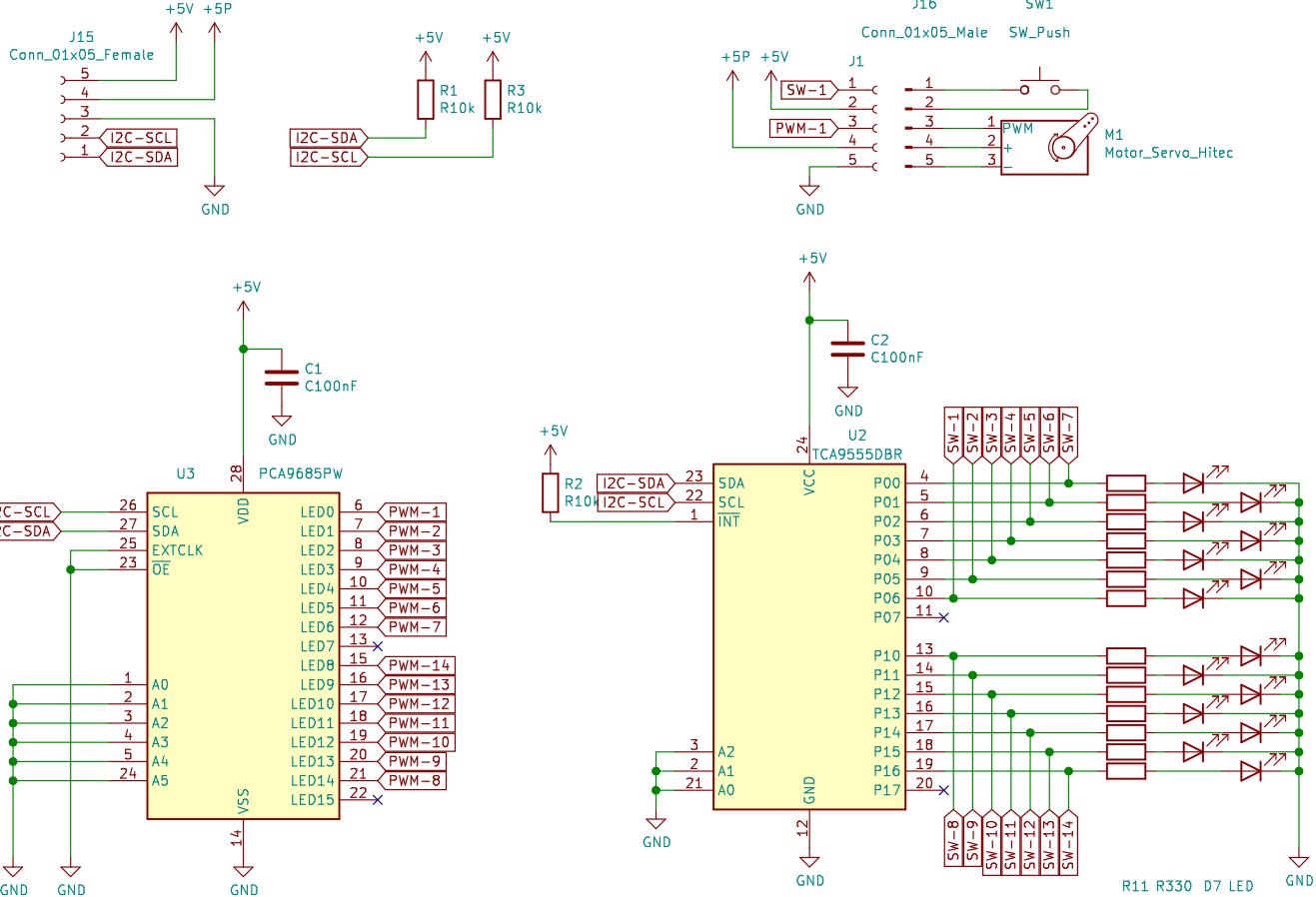
- Rys. 5.4: Profil lotu w kontekście geograficznym (rzut pod kątem), str. 39
- Rys. 5.5: Pomiar wysokości na bazie ciśnienia w trakcie misji testowej, str. 40
- Rys. 5.6: Pomiar temperatury w trakcie misji testowej, str. 41
- Rys. 5.7: Pomiar wilgotności w trakcie misji testowej, str. 41
- Rys. 5.8: Zespół Stardust po przechwyceniu platformy naukowej, str. 42
- Rys. 5.9: Reprezentanci zespołu Stardust w terenie kosmodromu Esrange, str. 42
- Rys. 5.10: Montaż eksperymentu stardust w gondoli balonu BEXUS 30, str. 43
- Rys. 5.11: Zespół Stardust na stanowisku operatorskim, str. 44
- Rys. 5.12: Gondola BEXUS 30 podwieszona pod pojazdem startowym "Hercules", str. 44
- Rys. 5.13: Balon stratosferyczny BEXUS 30 uwolniony przez pojazd Hercules, str. 45
- Rys. 5.14: Eksperyment Stardust (dolny prawy róg) na wysokości 27.3 km (autor: Romain Giraud, bammsat.com), str. 46
- Rys. 5.15: Zespoły BEXUS 30 oraz 31 po udanych lotach (autor: ESA Education Office), str. 47
- Rys. 5.16: Profil lotu misji BEXUS 30 w ujęciu geograficznym, str. 47
- Rys. 5.17: Profil lotu misji BEXUS 30, str. 48
- Rys. 5.18. Pomiary temperatury w trakcie misji BEXUS 30, str. 49
- Rys. 5.19: Pomiary wilgotności w trakcie misji BEXUS 30, str. 50
- Rys. 5.20: Pomiar ciśnienia atmosferycznego w trakcie misji BEXUS 30, str. 51
- Rys. 5.21: Zależność ciśnienia atmosferycznego od wysokości dla misji BEXUS 30, str. 51
- Rys. 5.22: Sumaryczna moc pobierana przez eksperyment w trakcie misji BEXUS 30, str. 52
- Rys. 5.23: Napięcie na linii zasilania eksperymentu z gondoli BEXUS 30, str. 52

ZAŁĄCZNIKI

- Załącznik A - Schemat elektryczny płytka PCB
- Załącznik B - Dane z misji testowej w formacie .xlsx
- Załącznik C - Dane z misji BEXUS 30 w formacie .xlsx
- Załącznik D - Nagranie z misji BEXUS 30 w formacie .mp4 (autor: Romain Giraud, bammsat.com)

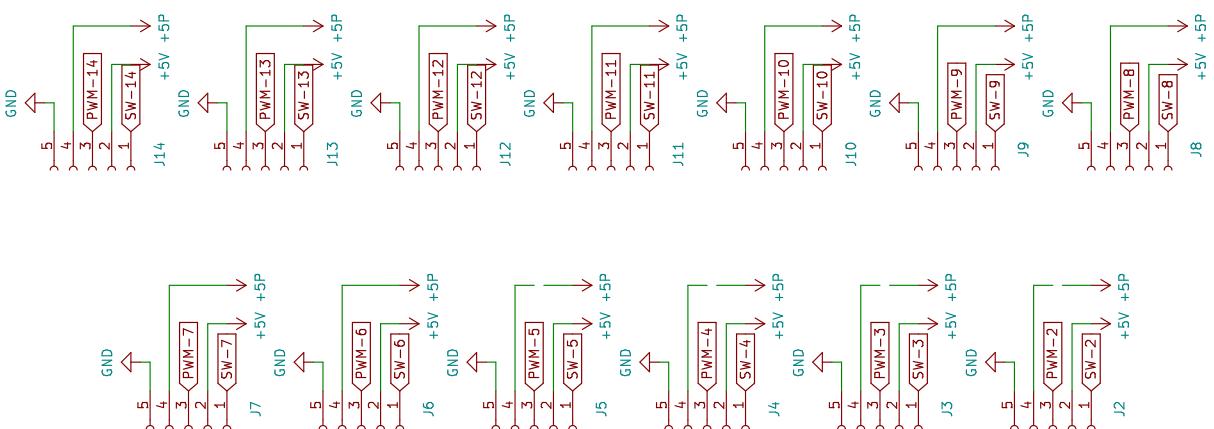






R11 R330 D7 LED
R10 R330 D6 LED
R9 R330 D5 LED
R8 R330 D4 LED
R7 R330 D3 LED
R6 R330 D2 LED
R5 R330 D1 LED

R12 R330 D8 LED
R13 R330 D9 LED
R14 R330 D10 LED
R15 R330 D11 LED
R16 R330 D12 LED
R17 R330 D13 LED
R18 R330 D14 LED



SimLE Stardust – Marcin Jasikowicz

Sheet: /
File: mech.kicad_sch

Title: Stardust Mech PCB

Size: A4 Date: 2022-01-04
KiCad E.D.A. kicad (5.99.0-10489-g258946d8b1)

Rev: 3
Id: 1/1

