

Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Redakcja pracy zbiorowej  
Marek Wyleźoń

**PRZEGLĄD  
OSIĄGNIĘĆ  
STUDENCKICH  
KÓŁ NAUKOWYCH  
DZIAŁAJĄCYCH  
PRZY KPKM**

**Tom 2**

Gliwice 2024

### *Recenzenci*

Dr hab. inż. Marek Wyleżoł, prof. PŚ - Politechnika Śląska

Dr hab. inż. Piotr Przystałka, prof. PŚ - Politechnika Śląska

### *Redaktor zeszytów*

Marek Wyleżoł

### *Redaktor techniczny*

Marek Wyleżoł

### *Projekt okładki*

Wojciech Cholewa, Marek Wyleżoł

## Zeszyt Naukowy Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn

### *BibTeX*

```
@BOOK{, title = {Przegląd osiągnięć studenckich kół naukowych  
działających przy KPKM, Tom II}, publisher = {Politechnika  
Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn}, year = {2024,  
author = {Wyleżoł, M. (red.)}, volume = {159}, series =  
{Zeszyty Naukowe}, address = {Gliwice}}
```

**ISBN 978-83-60759-34-9**

### *Wydawca*

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 18a

44-100 Gliwice

Tel. (32) 237-14-67

<https://kpkm.polsl.pl>

## Spis treści

|  |     |
|--|-----|
| Wyleżoł M.: Wprowadzenie.....  | 5   |
| Bręczewski J., Cojg U.: Zastosowanie sond elektrycznych do badań na rzecz zrównoważonego rolnictwa oraz podtrzymania życia na Marsie w kontekście przyszłych misji załogowych.....   | 7   |
| Krafczyk W., Gurgul J.: System nawigacji globalnej dla autonomicznych robotów mobilnych .....  | 17  |
| Gurgul J., Stawczyk P., Bogacki Sz., Zientek R., Jałowiecki A., Łój P.: System analizy sygnałów wibroakustycznych na platformie mobilnej w kontekście systemu wibroizolacyjnego..... | 29  |
| Gurgul J., Stawczyk P., Bogacki Sz., Zientek R., Jałowiecki A., Łój P.: Koncepcja pasywnych elementów tłumienia drgań na platformie mobilnej Phoenix III.....                        | 43  |
| Kaca M., Nowak P., Szwajca Sz., Czaja P., Panfil W., Pawełczyk A.: Opracowanie i rozwój bezzałogowego statku powietrznego z funkcją monitorowania otoczenia.....                     | 61  |
| Stanisławski J., Stasiuk F., Przyszałka P.: Badania porównawcze głębokich sieci neuronowych w zadaniu klasyfikacji uszkodzeń wybranego układu automatyki.....                        | 73  |
| Wilk K., Kramarz M., Girek S., Muzalewska M.: Rzep_CHECK - pomoc logopedyczna wspomagająca zdolności motoryczne oraz fonetyczne dziecka.....   | 85  |
| Nowak J., Kobielski M., Muzalewska M.: Czworonożna Platforma Krocząca W Terapiach Dzieci – Robopies REXIO.....   | 91  |
| Wycisło M., Szumierz O., Wilk K., Łój P.: Diodobłysk - urządzenie stymulujące dla dzieci z niepełnosprawnościami.....  | 101 |
| Solorz W., Michalak W., Sikorski M., Smółka W., Hamrani Ch., Dawid A., Skarka W.: Czy śmigła toroidalne zmienią oblicze rynku lotniczego?.....                                       | 107 |

|  |     |
|--|-----|
| Kopeć A., Ha Van B., Pająk K., Skarka W.: Skrzydła innowacji:<br>ornitoptery w świecie dronów.....                       | 133 |
| Szczepanek M., Pośpiech M., Górka M., Jassak A., Żymełka J., Skarka<br>W.: Dron o zwiększonej odporności na kolizję..... | 143 |

# Wprowadzenie

Jednym z zadań realizowanych przez nauczycieli akademickich w ramach ponadprogramowego kształcenia studentów jest sprawowanie opieki nad Studenckimi Kołami Naukowymi (SKN).

Studenckie Koła Naukowe stanowią więc dodatkową inicjatywę skierowaną do aktywnych i ambitnych studentów. Celem działania SKN jest rozwijanie zainteresowań, pogłębianie wiedzy, a także działalność na wielu płaszczyznach związanych z daną dziedziną nauki. Zapisując się do wybranego koła naukowego Student może więcej czasu poświęcić temu, co jest dla niego szczególnie interesujące i pasjonujące.

Koła naukowe to nie tylko Studenci, ale również Opiekunowie. Są nimi ludzie, którzy posiadają własne pasje naukowe a dodatkowo chcą i potrafią się nimi dzielić ze Studentami.

Aktualnie przy Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn działają następujące naukowe koła studenckie:

- SKN „Modelowania Konstrukcji Maszyn”,
- SKN „Zastosowań Metod Sztucznej Inteligencji AI-METH”,
- SKN „Projektowania i konstruowania innowacyjnych obiektów technicznych”,
- SKN Politechniki Śląskiej „Aerospace Engineering”.

Efekty działalności członków SKN często doprowadzają m.in. do powstania prac o wyjątkowych wartościach użytkowych a nawet naukowych. Prace takie często są podstawą do publikowania w punktowanych czasopismach, do wygłaszania prezentacji w ramach konferencji naukowych lub też są zgłaszane do tematycznych konkursów.

Tak więc, wychodząc naprzeciw możliwości jak najlepszego wykorzystania osiągnięć studentów-członków SKN oraz ich Opiekunów - kontynuujemy serię Zeszytów Naukowych poświęconych wybitnym osiągnięciom, które powstały w ramach działalności poszczególnych SKN.

Niniejszy Zeszyt Naukowy jest drugim tomem z tej serii.

Marek Wyleżoł



# Rozdział 1

## ZASTOSOWANIE SOND ELEKTRYCZNYCH DO BADAŃ NA RZECZ ZRÓWNOWAŻONEGO ROLNICTWA ORAZ PODTRZYMANIA ŻYCIA NA MARSIE W KONTEKŚCIE PRZYSZŁYCH MISJI ZAŁOGOWYCH

Bręczewski J.<sup>1</sup>, Cojg U.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Silesian Phoenix

### 1.1. Wstęp

Przez wieki ludzie wykazywali fascynację życiem pozaziemskim jak i możliwością osiedlenia się na innej planecie. Rozwój nauki i technologii na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat pozwolił na coraz bardziej zaawansowane metody badań kosmosu, które pozwoliły na dokładniejsze obserwacje różnorodności wszechświata. Obecnie wiadomo, że w samym kosmosie istnieją miliardy galaktyk, a każda z nich posiada setki miliardów gwiazd. Niezmiennie od wieków niepojętego ogromu kosmosu oraz tajemnic przez niego skrywanych z każdą nową obserwacją skłania wielu naukowców do jeszcze intensywniejszego zgłębienia tej dziedziny.

Nie zaprzeczalnym jest fakt, że w dzisiejszych czasach urządzenia elektryczne są oczywistą propozycją na osiągnięcie celów stawianych przez badaczy. Sondy elektryczne stanowią obiecujące narzędzie badawcze ze względu na ich wszechstronne zastosowanie i zdolności analizy różnych parametrów glebowych. Jest to ważne z uwagi na zrozumienie warunków chemicznych gleby, co stanowi kluczowy element dla poznania procesów wzrostu roślin oraz w potencjalnym wykorzystaniu zasobów naturalnych. W kontekście eksploracji kosmosu, zastosowanie sond elektrycznych jest istotne ze względu na zrozumienie warunków glebowych występujących na Marsie. Przyczyni się to do wypracowania metod produkcji żywności jak i innych technologii niezbędnych dla zapewnienia samowystarczalności i przetrwania misji załogowych na innej planecie.

W niniejszym opracowaniu w ramach projektu Silesian Phoenix skupimy się na analizie wykorzystania sond elektrycznych w kontekście możliwości podtrzymania życia na Marsie. Obejmiemy również istotność badanych parametrów, które poszerzą wiedzę w kontekście długoterminowych eksploracji i kolonizacji tej planety.

## 1.2. Badane parametry

W celu wyboru odpowiedniej sondy pomiarowej wykonano przegląd literaturowy, który skupił się na wyróżnieniu parametrów kluczowych dla zrozumienia potencjału życiowego gleby marsjańskiej. Wybrane parametry uznane za kluczowe w przypadku zagadnień niniejszej pracy to:

- Fosfor,
- Azot,
- Potas,
- Wilgotność,
- poziom pH,
- EC (ang. *electrical conductivity*, przewodność elektryczna) gleby.

**Fosfor** jest niezbędnym pierwiastkiem dla życia, odgrywając kluczową rolę w strukturze DNA i błonach komórkowych, a także pełni funkcję nośnika energii w postaci ATP we wszystkich formach życia na Ziemi. Fosfor odgrywa również kluczową rolę w rolnictwie, pomagając w produkcji owoców, promowaniu wzrostu korzeni i zwiększaniu rezerw. Brak fosforu w glebie może prowadzić do słabego wzrostu roślin, które są podatne na choroby, przebarwienia i wytwarzają niewłaściwe owoce [1].

**Azot** jest również jednym z kluczowych pierwiastków niezbędnych dla wszystkich znanych form życia. Należy do grupy pierwiastków biogennych, które stanowią podstawowe składniki życia. Azot jest wykorzystywany do budowy większych cząsteczek, takich jak białka i kwasów nukleinowych DNA i RNA, które są odpowiedzialne za przechowywanie informacji genetycznej. Na Marsie azot stanowi około 3% atmosfery, co czyni go kluczowym elementem do zbadania, zwłaszcza w kontekście poszukiwania oznak życia [2].

**Potas**, podobnie jak wcześniej wspomniane pierwiastki, odgrywa istotną rolę w życiu i uczestniczy w licznych procesach biologicznych, takich jak synteza białek, funkcja enzymów i metabolizm komórkowy. Jest składnikiem wielu skał i minerałów jak i składnikiem odżywczym dla mikroorganizmów, a odkrycie jego źródła może pomóc w znalezieniu potencjalnych siedlisk życia. Dodatkowo, jest niezbędnym składnikiem do wzrostu roślin, a jego identyfikacja może również określić potencjał planety do zrównoważonego rolnictwa i tworzenia systemów podtrzymywania życia dla załogowych misji.



**Wilgotność i poziom pH:** Wilgotność gleby to zawartość wody w glebie. Jeśli gleba na Marsie zawiera odpowiedni poziom wilgoci, może to sugerować, że planeta posiada wodę, która potencjalnie mogłaby wspierać życie mikrobiologiczne. PH gleby jest istotne, ponieważ może wpływać na dostępność składników odżywczych dla roślin. Ponadto, poziomy wilgotności mogą wpływać na wzrost roślin w przyszłości, co może być istotne dla utrzymania obecności ludzkiej na planecie.

**EC gleby:** Elektryczna przewodność gleby (EC) to wskaźnik zawartości soli w glebie, jest istotnym wskaźnikiem zdrowia gleby. Ma on wpływ na plon i jakość plonów, dostępność składników odżywczych dla roślin [3].

Badanie tych wyżej wymienionych parametrów glebowych na Marsie jest zatem kluczowe nie tylko dla zrozumienia potencjału planety do zrównoważonego rolnictwa, ale również dla opracowania systemów podtrzymywania życia dla przyszłych załóg ludzkich. Identyfikacja tych składników jest istotnym krokiem w kierunku eksploracji Marsa oraz ewentualnej kolonizacji tej planety.

### 1.3 Sondy pomiarowe

Na bazie wcześniej opisanych parametrów, dobrano odpowiednie sensory, które zintegrowano w jednym urządzeniu pomiarowym. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest szybkie określenie charakterystyk gleby oraz wygenerowanie raportu dla każdej z analizowanych próbek. Pozwala to dokonać nieinwazyjnej (niedestruktywnej) wstępnej analizy oraz znacznie skraca czas konieczny do przygotowania wyników do późniejszej prezentacji oraz dyskusji.

#### Czujnik NPK

Sensor z interfejsem RS485, ukazany na rys. 1.1 służy do pomiaru zawartości azotu, fosforu i potasu w glebie, stanowi istotne narzędzie w analizie składu glebowego. Umożliwia on dokładne i szybkie zbieranie potrzebnych danych z próbek glebowych. Czujnik ten jest wykonany z wysokiej jakości stali, która jest odporna na rdzę jak i korozję spowodowaną solami czy związkami alkalicznymi. Dzięki tej konstrukcji jest użyteczny w analizie różnorodnych typów gleb, co sprawia, że jest wszechstronny i praktyczny w badaniach glebowych o zróżnicowanym charakterze.



Rys. 1.1 Czujnik NPK mierzący wartości azotu, fosforu i potasu w próbce gleby

## Czujnik EC

Czujnik wilgotności, temperatury i przewodności elektrycznej gleby RS485 przedstawiony na rys. 1.2 jest odpowiedni do pomiaru zawartości wilgoci w glebie oraz temperatury i przewodności elektrycznej. Tak jak w przypadku poprzedniej sondy pomiarowej jest zbudowany z stali nierdzewnej, która stanowi ochronę przed czynnikami zewnętrznymi.



Rys. 1.2 Czujnik EC mierzący wartości wilgotności, temperatury i EC w próbce gleby

## 1.4. Testowanie sondy NPK – przeprowadzenie eksperymentu

W celu oceny efektywności pomiarowej sensora NPK, przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem roztworu czterech soli:  $\text{NaNO}_3$  (azotan sodu),  $\text{KCl}$  (chlorek potasu),  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  (diwodorofosforan sodu),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (fosforan dwupotasowy). Każdą z soli wybrano tak aby końcowo móc zbadać jeden z pierwiastków chemicznych będących w przygotowanych roztworach. Różne stężenia tych roztworów zostały zastosowane w celu dokładnego zbadania reakcji sensora na zmiany składników chemicznych. Same stężenia dobrane były tak aby przetestować dolną jak i górną granicę sensora. Eksperymentalne rozwiązania umożliwiły analizę precyzji i wydajności pomiarowej sensora w zależności od stężeń i składu chemicznego badanych soli oraz pozwoliły na wykonanie kalibracji sensora. Wyniki wykonanych działań przedstawiono w Tab. 1.1, Tab. 1.2., Tab. 1.3 i Tab. 1.4.

Tab. 1.1 Wyniki pomiarów za pomocą sensora NPK przy badaniu odpowiednich stężeń soli  $\text{NaNO}_3$

| Stężenie azotu w soli $\text{NaNO}_3$ [mg/kg] | Mierzona zawartość azotu [mg/kg] | Mierzona zawartość potasu [mg/kg] | Mierzona zawartość fosforu [mg/kg] |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1800  | 1400                             | 1999                              | 1999                               |
| 900   | 860                              | 1999                              | 1999                               |
| 450   | 342                              | 835                               | 834                                |
| 225   | 224                              | 564                               | 560                                |
| 112.5   | 73                               | 215                               | 208                                |

Tab. 1.2 Wyniki pomiarów za pomocą sensora NPK przy badaniu odpowiednich stężeń soli  $\text{KCl}$

| Stężenie potasu w soli $\text{KCl}$ [mg/kg] | Mierzona zawartość azotu [mg/kg] | Mierzona zawartość potasu [mg/kg] | Mierzona zawartość fosforu [mg/kg] |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1800  | 770                              | 1827                              | 1830                               |
| 900   | 263                              | 655                               | 652                                |
| 450   | 152                              | 397                               | 392                                |

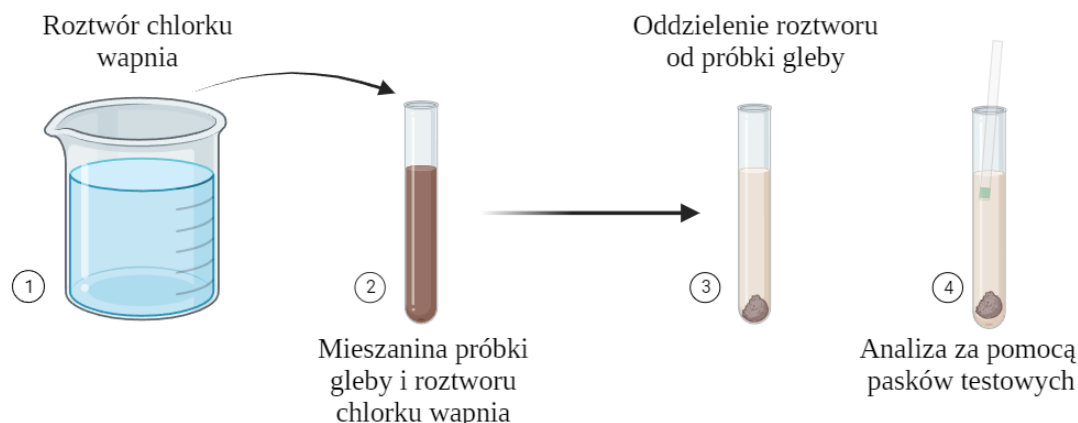
Tab. 1.3 Wyniki pomiarów za pomocą sensora NPK przy badaniu odpowiednich stężeń soli  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$

| Stężenie fosforu w soli $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ [mg/kg] | Mierzona zawartość azotu [mg/kg] | Mierzona zawartość potasu [mg/kg] | Mierzona zawartość fosforu [mg/kg] |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1800  | 555                              | 1333                              | 1330                               |
| 900   | 250                              | 622                               | 626                                |
| 450   | 130                              | 350                               | 354                                |
| 225   | 45                               | 143                               | 150                                |
| 112.5   | 23                               | 92                                | 99                                 |

Tab. 1.4 Wyniki pomiarów za pomocą sensora NPK przy badaniu odpowiednich stężeń soli  $\text{K}_2\text{HPO}_4$

| Stężenie fosforu w soli $\text{K}_2\text{HPO}_4$ [mg/kg] | Stężenie potasu w soli $\text{K}_2\text{HPO}_4$ [mg/kg] | Mierzona zawartość azotu [mg/kg] | Mierzona zawartość potasu [mg/kg] | Mierzona zawartość fosforu [mg/kg] |
|--|---|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1800   | 4300  | 1540                             | 1999                              | 1999                               |
| 900  | 2177  | 656                              | 1565                              | 1563                               |
| 450  | 1080  | 273                              | 674                               | 676                                |
| 225  | 540   | 122                              | 323                               | 328                                |
| 112.5  | 272   | 60                               | 179                               | 186                                |

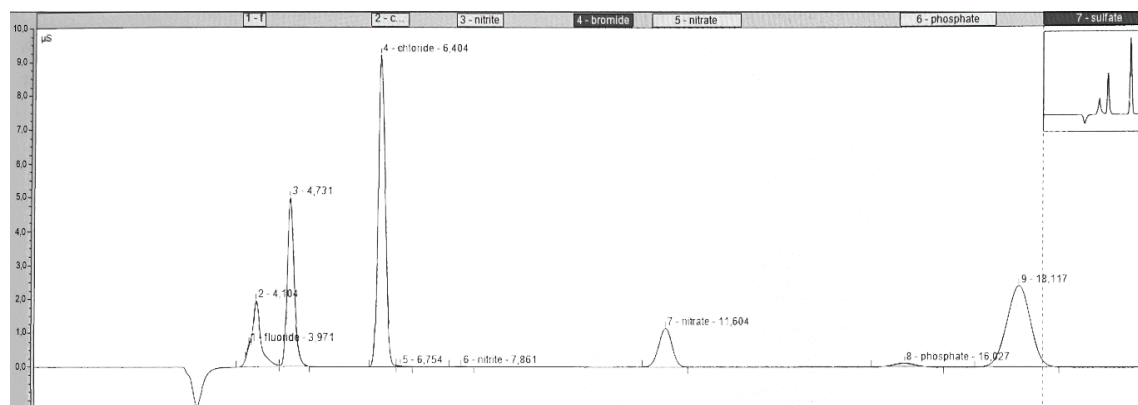
Wykonano również badanie eksperymentalne mające na celu sprawdzenie ilości  $\text{NO}_3^-$  oraz  $\text{NO}_2^-$  w próbce gleby. Wykorzystano do tego półilościowe paski testowe marki Quantofix.



Rys. 1.3 Procedura ekstrakcji azotanów z próbki gleby. Proces wykonania eksperymentu zainspirowany pracą badawczą przeprowadzoną przez T.S.Nelson w 2022 roku [4, 5]

Ekstrakcja azotanów z gleby odbyła się przy zastosowaniu chlorku wapnia. Sama procedura, którą przedstawiono na rys.1.3, obejmowała wytrząsanie próbki gleby z mieszaniną chlorku wapnia i wody destylowanej. Chlorek wapnia działa jako ekstrahent, który umożliwia uwolnienie azotanów z gleby do roztworu. Następnie za pomocą pasków testowych odczytano zawartość substancji. Zmiana koloru paska była odniesieniem do wskazanej przez producenta skali, która pozwalała ocenić ilość azotanów i azotynów obecnych w próbce gleby. Na podstawie tej zmiany koloru można było dokonać oceny ilościowej zawartości wskazanych wcześniej substancji. Eksperyment półilościowy związków azotowych wskazały na obecność  $\text{NO}_3^-$  oraz  $\text{NO}_2^-$  w próbce gleby bliskich dolnych granic wykrywalności paska. Procedurę przeprowadzonego eksperymentu przedstawiono na rys. 1.3.

Badanie to dodatkowo zweryfikowano przy użyciu spektrofotometru jonowego. Proces ten pozwala na precyzyjne określenie stężeń jonów poprzez analizę widna absorbancji próbki, co umożliwia identyfikację i ilościowe wyznaczenie poszukiwanych związków azotowych. Wyniki analizy zostały przedstawione na rys. 1.4.

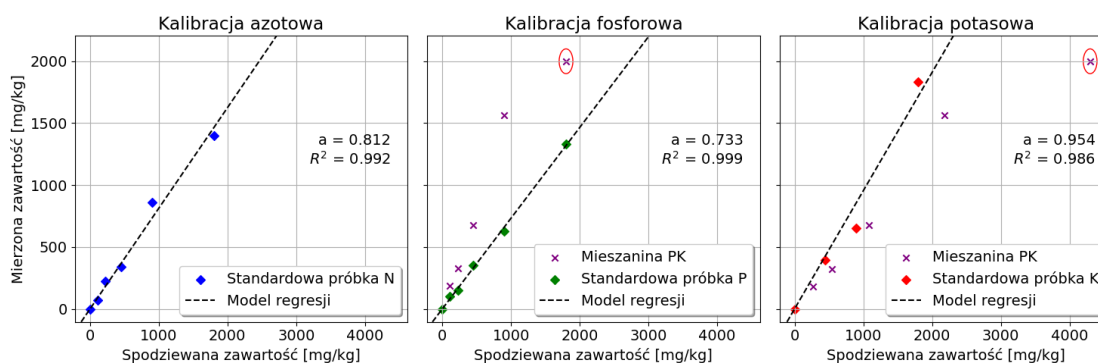


Rys. 1.4 Wyniki analizy spektrofotometrycznej jonowej

Na przedstawionym wykresie spektrofotometrycznym oznaczono wyniki analizy jonowej. Zidentyfikowano dwie krzywe absorbancji odnoszące się do azotynów i azotanów. Krzywa absorbancji dla azotynu wykazała wynik na poziomie 0,28 mg/L, natomiast dla azotanów wynik wyniósł 3,75 mg/L. Te wartości precyzyjnie określiły ilościowe obecności obu związków azotowych w badanej próbce gleby. Zastosowanie spektrofotometrii potwierdziło skuteczność eksperymentu ekstrakcji związków azotowych z gleby. Wyniki analizy wskazały, że wykonana procedura była zgodna z oczekiwaniami.

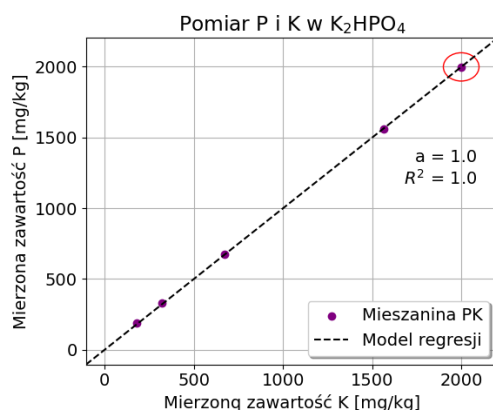
## 1.5. Testowanie sond – dyskusja wyników

Wyniki przeprowadzonych badań, opisanych dokładnie sekcje wcześniej, wskazały na średni błąd sensora w okolicach 19%. Błąd ten obliczony został na podstawie średniej różnic między wartością spodziewaną a wartością zmierzoną dla każdego z pomiarów. Dla badania stężenia azotu otrzymano 17%, dla potasu 13% oraz dla fosforu 26%. Ponadto pomiary wskazywały na zawartość substancji nie obecnych w przygotowanych solach. Dla przykładu przy pomiarze soli  $\text{NaNO}_3$  otrzymano wartości dla potasu i fosforu różne od zera, gdzie oba wspomniane pierwiastki występują w przygotowanej soli ze zerowym stężeniem. Można zaobserwować to przyglądając się Tab. 1.1, Tab. 1.2 oraz Tab. 1.3.



Rys. 1.5 Wykresy przedstawiające wyniki pomiarów, gdzie mieszaniną PK jest  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , natomiast zakreślony punkt odpowiada pomiarowi, który dla pomiaru P lub K osiągnął i przeszedł przez górną granicę rozdzielczej sensora

Innym zjawiskiem, które wystąpiło podczas pomiarów była zauważalna korelacja między pomiarem P i K podczas badania ich mieszaniny  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ . Pomiary dla tej soli znajdują się w Tab. 1.4. Podsumowanie wszystkich pomiarów przedstawiono na rys. 1.5, gdzie można zaobserwować duże odchylenie punktów pomiarowych mieszanin P oraz K od prostej regresji wyliczonej na podstawie standardowych próbek dla każdego z pierwiastków (dla azotu:  $\text{NaNO}_3$ , dla fosforu:  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ , dla potasu:  $\text{KCl}$ ). Sugeruje ona liniową zależność między wartościami mierzonymi a oczekiwanymi w przypadku próbek standardowych.



Rys. 1.6 Zależność między pomiarem P i K w próbce K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>

Jednak przy badaniu mieszaniny oczekiwanych pierwiastków wystąpiła korelacja między pomiarami, czyniąc nie możliwym dokonanie dwóch niezależnych pomiarów pierwiastków. Korelację tą przedstawiono na rys. 1.6, gdzie parametr  $R^2 = 1$  sugeruje bardzo silną zależność liniową między pomiarami, natomiast współczynnik kierunkowy  $a = 1$  może wskazywać na występowanie pewnych zjawisk uśredniających pomiar.

## 1.5. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań udało się ustalić charakterystyki dla sensora NPK. W ich wyniku otrzymano wyniki sugerujące liniowo rosnącą zależność niedokładności sensora. Ponadto zaobserwowano silną korelację między pomiarami stężenia pojedynczych pierwiastków w ich mieszaninach, wskazującymi na dokonywanie pewnego uśrednienia przez elektronikę sensora podczas pomiaru. W celu wykorzystania tego rodzaju sensorów do określonych w niniejszej pracy celów należałoby głębiej zbadać zależności między mierzonymi wartościami i podjąć próbę opracowania systemu kalibrującego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Sims, J. Thomas, i G.M. Pierzynski. "Chemistry of Phosphorus in Soils". Chemical Processes in Soils, pod redakcją M.A. Tabatabai i D.L. Sparks, 2005.
2. Haberle, R.M. "ATMOSFERA PLANETARNE | Mars". Encyklopedia Nauk Atmosferycznych, pod redakcją J.R. Holtona, Academic Press, 2003.
3. Liu, Fangzhou. "Electrical Conductivity in Soils: A Review". ResearchGate, 2015
4. Nelsen, Taylor et al. "Improvements to the Soil Nitrate Quick Test for California Small Grains". California Agriculture, 2022, pp. 1-7.
5. Graficzna reprezentacja stworzona przy użyciu programu przeglądarkowego bioRender: <https://www.biorender.com>.





# Rozdział 2

## SYSTEM NAWIGACJI GLOBALNEJ DLA AUTONOMICZNYCH ROBOTÓW MOBILNYCH

Krafczyk W.<sup>1</sup>, Gurgul J.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Silesian Phoenix

### 2.1. Wstęp

Niezwykle ważnym aspektem w kontekście robotyki mobilnej jest planowanie trasy przejazdu. Kluczowość tego zagadnienia jest związana z zapewnieniem odpowiedniego bezpieczeństwa platformie, zoptymalizowaniem wydatków energetycznych oraz zmaksymalizowania prędkości wykonywanego przemieszczenia. Wszystkie te trzy aspekty w bardzo dużej mierze wpływają na całkowitą wydajność budowanego robota mobilnego. Coraz częściej możemy zaobserwować wykorzystanie metod z zakresu metod sztucznej inteligencji w celu prowadzenia skutecznej nawigacji robota.

W niniejszej pracy przedstawiono system wspomaganie wyznaczenia trudności przejazdu, który może zostać wykorzystany podczas nawigowania robotyczną platformą mobilną na otwartym terenie w ujęciu globalnym. System składa się z modelu oceny trudności przejazdu na określonym terenie oraz model planowania optymalnej trasy. Ocena jest przeprowadzona na podstawie zdjęcia miejsca operacji wykonanego z powietrza, otrzymanego np. podczas zwiadowczego przelotu UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*, bezałogowy statek powietrzny). Takie zdjęcie jest podawane następnie ocenie terenu – wyznaczane są miejsca potencjalnie niebezpieczne, nieprzejezdne, z dobrą nawierzchnią oraz punkty startowe i docelowe. Informacje te są oceniane przez osobę odpowiedzialną za przebieg misji. Planowanie trasy odbywa się na podstawie macierzy wynikowej otrzymanej w procesie oceny terenu. Macierz jest przetwarzana do postaci grafu ważonego, w którym wierzchołkami są kolejne elementy macierzy a wagami krawędzi określona ocena przejezdności. Optymalna ścieżka jest określana z wykorzystaniem algorytmu A\*.

Opisany system jest może zostać wykorzystany do prowadzenia nawigacji w grupie robotów. Pierwszym etapem jest przelot dronem zwiadowczym i wykonanie zdjęć zadanego obszaru. Drugim jest natomiast właściwa operacja przemieszczenia wykonywana przez lądowego robota mobilnego. Taka współpraca pomiędzy robotami jest coraz bardziej popularna, przykładem może być łazik Perseverance oraz wirnikowiec Ingenuity, które współpracują aktualnie na powierzchni Marsa [1].

## 2.2 Nawigowanie robotyczną platformą

Cały opisywany proces autonomicznego przemieszczania się możemy podzielić na dwa główne obszary:

1. określenie przejezdności przez dany teren wraz z wyznaczeniem obszarów dostępu,
2. oznaczenie punktów kontrolnych i wyznaczeniem pomiędzy nimi trasy przejazdu.

Pierwszy obszar jest realizowany z wykorzystaniem modelu określania trudności przejazdu, drugi natomiast jest wykonywany przez model planowania optymalnej trasy.

W pierwszym obszarze trudności związana jest z określeniem kosztu poruszania się po danym terenie. Koszty te obejmują aspekty związane z bezpieczeństwem, czasem, jaki robotowi będzie potrzebny do pokonania danego obszaru oraz zużyciem energii podczas przejazdu. Poprawne określenie trudności poruszania się jest niezwykle istotne w kontekście autonomicznego przemieszczania, ponieważ zwiększa to zdolność robota do samodzielnego dokonywania zmiany pozycji oraz podnosi poziom bezpieczeństwa w trakcie tego zadania. Oba te aspekty mają korzystny wpływ na redukcję konieczności interakcji z ludzkim operatorem.

Dodatkowym skutkiem określania przejezdności jest też informacja dla operatora o tym, że niektóre obszary są całkowicie niedostępne dla robota, lub że ich odwiedzenie może być potencjalnie niebezpieczne. Dzięki takim informacjom operator może odpowiednio sprecyzować kolejność odwiedzania punktów kontrolnych lub całkowicie zrezygnować z niektórych.

W drugim obszarze największą trudnością jest wyznaczenie takiej ścieżki poruszania się, która będzie kompromisem pomiędzy bezpieczeństwem, czasem oraz wydatkami energetycznymi. Jest on rozwiązywany z wykorzystaniem specjalnych algorytmów do planowania ścieżki przejazdu. Algorytmy te pozwalają na opracowanie możliwych ścieżek na podstawie wprowadzonych informacji dotyczących obszaru oraz wybranych punktów kontrolnych. Sam proces planowania trasy jest sposobem przetworzenia otoczenia na inną formę, bardziej dogodną dla przyjętego sposobu rozwiązywania problemu. Kolejnym krokiem jest znalezienie takich przekształceń, które pozwolą przenieść układ początkowy do zadanego stanu końcowego.

W ujęciu robotyki mobilnej jest to takie wyznaczenie ścieżki przejazdu (krzywej geometrycznej), która pozwoli na przejazd pomiędzy początkową pozycją robota, a zadaną pozycją końcową. Dodatkowymi wymaganiami dotyczącymi ścieżki jest to, aby robot minimalizował możliwość wejścia w kolizję z innymi obiektami otoczenia oraz aby ścieżka była możliwa do wykonania przez platformę w rzeczywistości. Drugie założenie jest szczególnie związane z konstrukcją robota (napęd, wymiary fizyczne itp.) oraz jego dynamiką (zakres możliwych do wykonania ruchów).

Algorytmy planowania trasy możemy podzielić na metody globalne oraz lokalne [2]. W omawianym przypadku trasa zostanie przedstawiona w ujęciu globalnym. Zaprojektowany system zakłada obliczenie całej ścieżki w sposób iteracyjny. Największą zaletą jest otrzymanie w efekcie optymalnej trasy przejazdu, wadą natomiast jest duża złożoność obliczeniowa oraz mała odporność na zmiany w środowisku, ponieważ system globalny nie jest aktualizowany o nowe informacje, które są uzyskiwane już w fazie właściwej zmieniania przez robota pozycji.

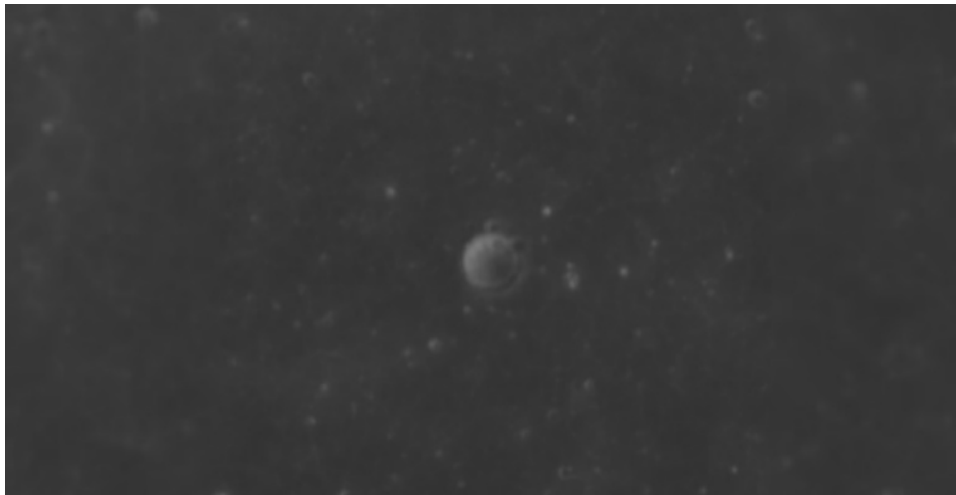
Metody lokalne są natomiast odwrotnością założeń metod globalnych. Zakładają one planowanie trasy tylko na podstawie danych o najbliższym otoczeniu robota i wyznaczanie trasy w sposób przyrostowy. Zaletą takich metod jest duża odporność na dynamiczne zmiany środowiska oraz zapewnienie lokalnej bezkolizyjności. Wadami jest natomiast mała wydajność globalna tworzonej ścieżki oraz możliwość nieodnalezienia trasy do punktu końcowego, pomimo jej fizycznego istnienia.

Aktualnie w robotyce najczęściej używa się połączenia metod lokalnych oraz globalnych [3]. Podczas wstępnego planowania przejazdu tworzona jest ścieżka globalna pozwalająca na upewnienie się, że w ogóle możliwym jest dojazd do celu. Natomiast w momencie poruszania się robota używane są metody lokalne do zapewnienia bezkolizyjności ruchu oraz zwiększenia jakości i płynności poruszania się. Opisane w niniejszej pracy metody mogą zostać w przyszłości użyte do stworzenia bardziej skomplikowanego systemu zakładającego zaplanowanie globalnej trasy a następnie jej wykonanie z aktualizacją o dane lokalne pobrane z platformy w trakcie jej ruchu.

## **2.2. Model określania trudności przejazdu**

W celu sklasyfikowania trudności przejazdu przez poszczególne fragmenty terenu przez autonomicznego robota, niezwykle przydatnym jest wcześniejsza znajomość terenu, np. poprzez zdjęcie z lotu ptaka terenu, w którym mają być prowadzone działania. Znając wysokość, z której zostało zrobione zdjęcie oraz FoV (ang. *Field of View*, pole widzenia kamery), można w prosty sposób określić wielkość poszczególnych elementów oraz przeszkód na mapie. Podczas planowania misji łazików planetarnych należy zwrócić szczególną uwagę na kratery. Charakteryzuje je stromy podjazd zarówno od ich zewnętrznej jak

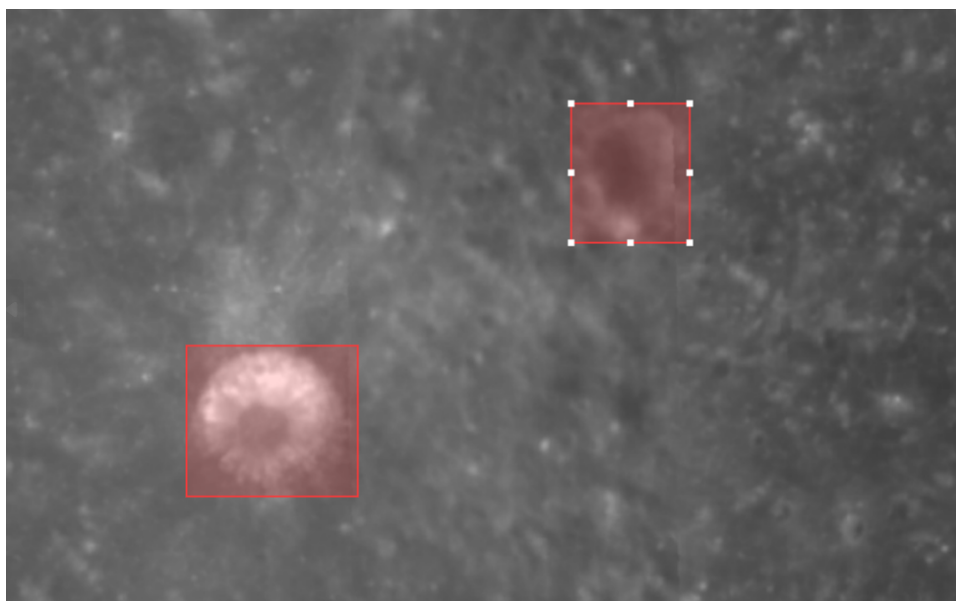
i wewnętrznej strony. Utknięcie robota wewnątrz krateru może spowodować konieczność przerwania zadania, a w przypadkach niesymulowanych misji utratę łazika. By temu zapobiec został opracowany program wykrywający i odpowiednio zaznaczający na zdjęciu tego typu niebezpieczne strefy. Model konwolucyjnej głębokiej sieci neuronowej [4] ResNet-50 został wytrenowany na podstawie zbioru 40 zdjęć powierzchni księżyca (Rys. 2.1), wygenerowanych z wykorzystaniem programu przeglądarkowego dostępnego pod adresem <https://www.moon3dmap.com/>.



Rys. 2.1 Wygenerowane zdjęcie powierzchni księżyca

Na każdym zdjęciu zaznaczono widoczne na nim kratery, generując tzw. ramki ograniczające (ang. *bounding boxes*). Użyta została w tym celu witryna internetowa <https://www.makesense.ai/> pozwalająca na późniejszy import plików w formacie XML (ang. *Extensible Markup Language*,) zawierających położenie na konkretnym zdjęciu ramek ograniczających wraz z ich etykietami. Wynik działania programu został przedstawiony na Rys. 2.2.

Następnie model został wytrenowany i oceniony. Trening składał się z 40 epok, co dało niską wartość straty w końcowych iteracjach. Model został w kolejnym kroku zaimportowany do programu wykrywającego kratery.

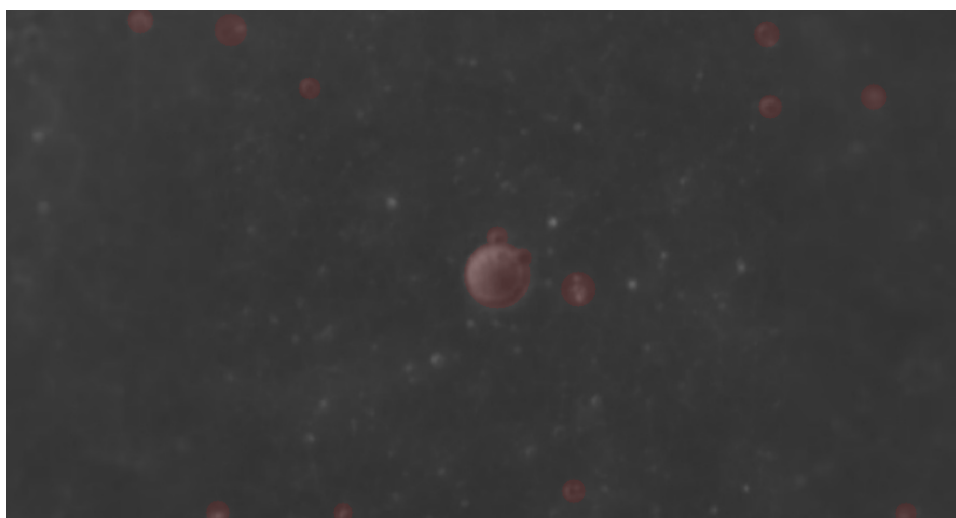


Rys. 2.2 Oznaczenie kraterów

### Sposób działania

Zaproponowane oprogramowanie działa w następujący sposób:

1. Zaimportowanie obrazu przedstawiającego środowisko misji,
2. Wykrycie przez algorytm miejsc, w którym znajdują się kratery i pokazanie użytkownikowi zdjęcia wejściowego z nałożonymi na nie niebezpiecznymi strefami (w kolorze czerwonym) (Rys. 2.3),



Rys. 2.3 Oznaczenie stref niebezpiecznych

3. Na zdjęcie zostaje nałożona maska, filtrująca czerwony kolor w zakresie od 10 do 255 wartości RGB (ang. *Red Green Blue*, Czerwony Zielony Niebieski) i odbywa się przypisanie wartości 1 w miejscach niebezpiecznych i 0 w pozostałych,
4. Dokonywany jest podział obrazu na macierz/siatkę o gęstości ustawionej w parametrach konfiguracyjnych,

5. Na końcu następuje zapis utworzonej mapy do pliku CSV (ang. *Comma-Separated Values*, wartości rozdzielone przecinkiem) jako macierzy z wagami (Rys. 2.4).



Rys. 2.4 Widok reprezentacji pojedynczego krateru w formie macierzy zer i jedynek

Model został napisany w języku Python w wersji 3.12 [5] z wykorzystaniem biblioteki PyTorch [6] do wytrenowania modelu głębokiej sieci neuronowej, co daje możliwość uruchomienia go na wielu platformach oraz łatwego rozbudowania o kolejne funkcjonalności. Macierz wynikowa zapisana w postaci pliku z rozszerzeniem CSV, pozwala na dalsze łatwe wykorzystywanie wyników. Dzięki temu opisywany model może zostać bez większych problemów w kolejnych aplikacjach służących do wyznaczania ścieżki przejazdu. Możliwość konfiguracji gęstości siatki zapewnia odpowiednie wyskalowanie macierzy, tak by odpowiadała parametrom wykonania zdjęcia. Przykład modelu wykorzystującego macierz wynikową został przedstawiony w kolejnym rozdziale.

### 2.3. Model planowania optymalnej trasy

Model jako dane wejściowe przyjmuje macierz wynikową otrzymaną w procesie oceny trudności przejazdu, współrzędne położenia robota oraz jego punktu docelowego.

Macierz oceny przejezdności została odpowiednio przetworzona, aby mogła być rozpatrywana jako graf ważony. Graf jest abstrakcyjnym modelem, który składa się z wierzchołków oraz krawędzi, które łączą te wierzchołki. Teoria grafów stanowi podstawę dla wielu dziedzin matematyki i informatyki, a jej narzędzia i techniki są powszechnie stosowane do rozwiązywania różnorodnych problemów praktycznych np.: wyszukiwania połączeń i tras w miejskim planie ulic czy tworzenia sieci pomieszczeń w budynku [7]. Jednym z najlepszych algorytmów grafowych jest wykorzystywany algorytm A\*. Opracowany przez Petera Harta, Nilsa Nilssona i Bertrama Rapaporta w 1968 roku, łączy w sobie cechy przeszukiwania wszerz i heurystyki. Jest to algorytm heurystyczny używany do znajdowania najkrótszych ścieżek w grafach z wagami.

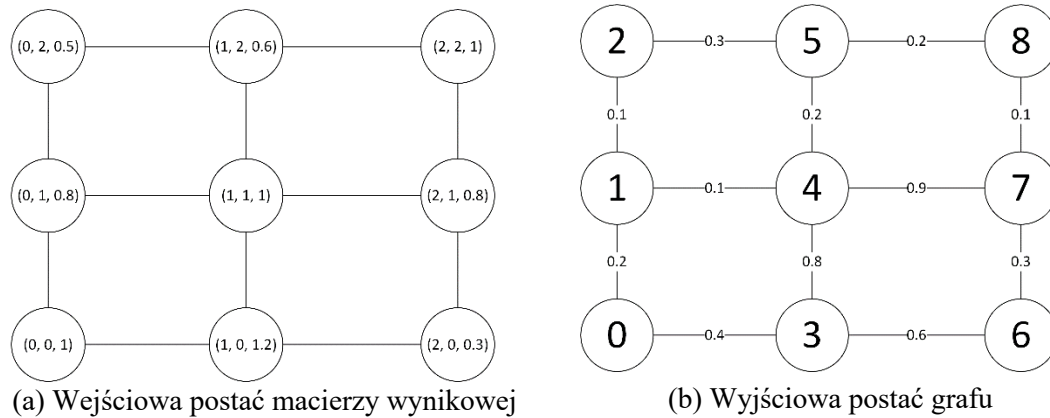
Wszystkie obliczenia zostały przeprowadzone z wykorzystaniem języka Python w wersji 3.12.

#### Przetwarzanie macierzy oceny terenu na graf

Podczas przetwarzania do postaci grafowej, kierowano się następującymi zasadami:

1. Wierzchołkami w grafie zostaną konkretne punkty w siatce terenu. Do ich identyfikacji posłuży unikatowy numer przyznawany od punktu z koordynatami (0, 0) i następnie dla każdego kolejnego punktu w kolumnie. Po skończeniu punktów w danej kolumnie, przechodzimy do kolejnej itd. aż do przepisania wszystkich punktów w siatce.
2. Pojedynczy wierzchołek ma krawędzie tylko z wierzchołkami odpowiadającymi sąsiadującym punktom w siatce. Z każdego wierzchołka możemy przejść maksymalnie do 4 sąsiadujących punktów (góra, dół, lewo, prawo).
3. Ponieważ graf będzie używany w procesie planowania ścieżki przejazdu, krawędziom zostały przypisane odpowiednie wagi. Są one oceną otrzymaną w macierzy wynikowej. Wartości kosztów zostały odpowiednio znormalizowane.

Proces przetwarzania macierzy został zobrazowany na Rys. 2.5.



Rys. 2.5 Proces przetwarzania macierzy wynikowej do postaci grafowej

### Implementacja algorytmu A\*

Algorytm A\* służy do przeszukiwania grafu, efektywnie znajduje najkrótszą ścieżkę między dwoma wierzchołkami w grafie ważonym. Wykorzystuje on funkcję, która szacuje koszt przemieszczenia od danego wierzchołka do wierzchołka końcowego.

Algorytm tworzy dwa zbiory wierzchołków: otwarty, który zawiera wierzchołki do rozważenia, oraz zamknięty, który zawiera już przetworzone wierzchołki. Początkowo, wierzchołek startowy jest dodawany do zbioru otwartego z wartością  $f(0)$ , gdzie  $f(x)$  to suma kosztu dotarcia do danego wierzchołka ( $g(x)$ ) oraz szacowanego kosztu do celu ( $h(x)$ ). Dla wierzchołka startowego  $g(x)$  wynosi 0.

W każdej iteracji algorytm wybiera wierzchołek z zbioru otwartego, który ma najmniejszą wartość  $f(x)$ , a następnie przenosi go do zbioru zamkniętego. Dla każdego sąsiada przetwarzanego wierzchołka, algorytm aktualizuje jego koszt  $g(x)$  oraz  $f(x)$  na podstawie nowego kosztu dotarcia do niego. Jeśli sąsiad nie znajduje się w zbiorze otwartym, zostaje do niego dodany, a jeśli już tam jest, to jego wartości są aktualizowane tylko wtedy, gdy nowa droga jest krótsza niż wcześniej znaleziona.

Algorytm kontynuuje swoje działanie, aż wierzchołek docelowy zostanie przeniesiony do zbioru zamkniętego lub gdy zbiór otwarty jest pusty, co oznacza, że nie istnieje ścieżka między wierzchołkiem startowym a docelowym. Ostateczna znaleziona ścieżka można odtworzyć, poruszając się od wierzchołka docelowego do startowego, śledząc przetworzone wierzchołki na podstawie ich poprzedników.

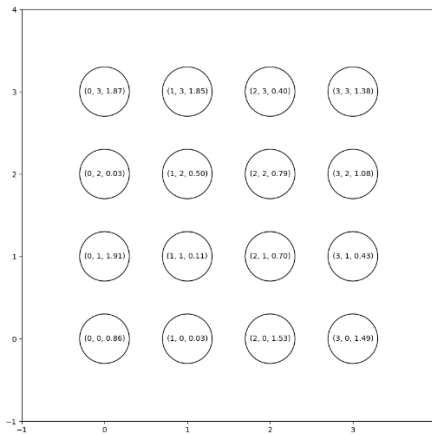
W przypadku wyszukiwania ścieżki w siatce punktów jaką odzwierciedla dostarczony do funkcji graf zdecydowano się do obliczenia wartości funkcji  $f(x)$  na użycie metryki miejskiej (metryki Manhattan), której postać została przedstawiona na Równaniu (1). Odległości między dwoma punktami definiowana jest jako suma bezwzględnych różnic ich odpowiednich współrzędnych kartezjańskich. Pełen proces planowania ścieżki na mniejszym zbiorze danych został przedstawiony na Rys. 2.6.



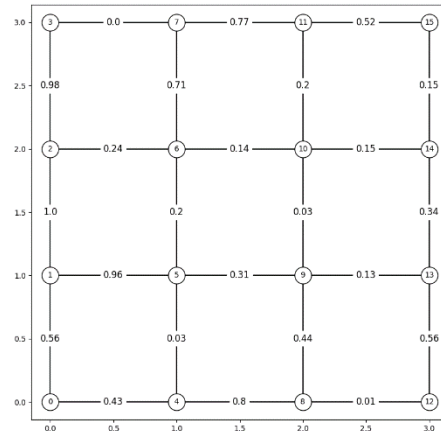
$$d(a, b) = |a_1 - b_1| + |a_2 - b_2| \quad (1)$$

Gdzie:

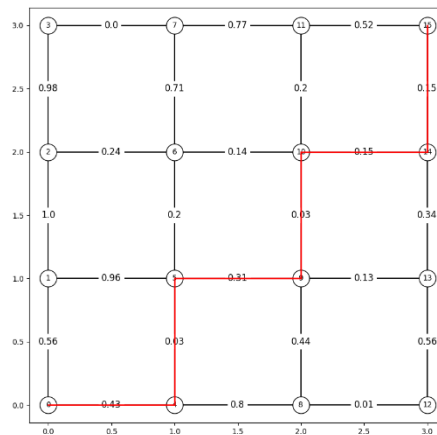
- $d(a, b)$  – odległość między dwoma punktami  $A$  i  $B$  w przestrzeni 2D
- $a_1, a_2$  – współrzędne (X, Y) punktu  $A$  na płaszczyźnie
- $b_1, b_2$  – współrzędne (X, Y) punktu  $B$  na płaszczyźnie



(c) Wejściowa postać macierzy wynikowej



(b) Uzyskana postać grafowa

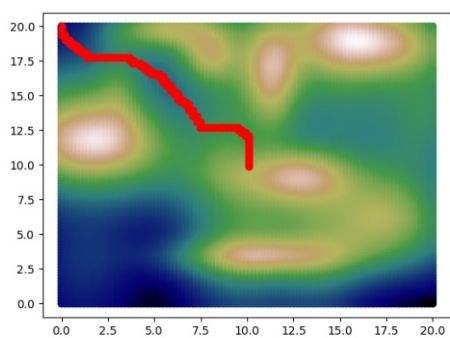


(c) Wyznaczona przez algorytm ścieżka

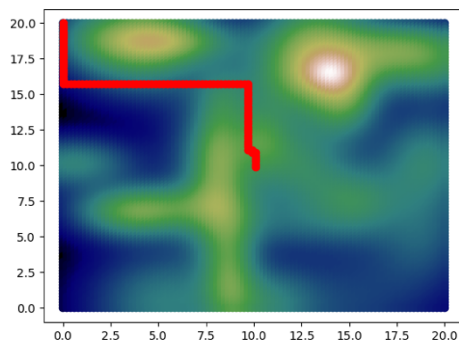
Rys. 2.6 Wizualizacja procesu planowania trasy z wykorzystaniem algorytmu A\*

## Wyniki testu

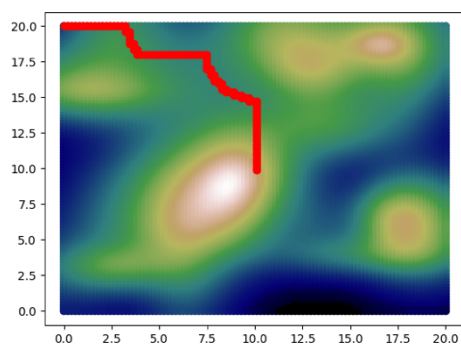
Algorytm A\* odnalazł drogę do wskazanego wierzchołka końcowego, co więcej wykonał obliczenia w bardzo krótkim czasie. Na odnalezienie trasy potrzebował on średnio 0.0161 sekundy. Z wyznaczonymi ścieżkami można się zapoznać na rysunku Rys. 2.7. Kolory użyte na wykresach obrazują wartość kosztu poruszania się po danym punkcie, im jest on ciemniejszy tym bardziej zbliża się do wartości 0, im jaśniejszym tym bliżej wartości 1.



(a) Teren testowy numer 1



(b) Teren testowy numer 2



(c) Teren testowy numer 3

Rys. 2.7 Ścieżki wyznaczone dla testowych macierzy wynikowych

## 2.4. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych prac udało się opracować dwa modele, które razem tworzą podstawowy system do nawigacji globalnej dla autonomicznych robotów mobilnych.

Pierwszy z modeli pozwala na przeprowadzenie oceny trudności przejeźdności na podstawie dostarczonego zdjęcia terenu misji. Dzięki niemu możliwym jest uzyskanie macierzy trudności, która stanowi dane wejściowe dla drugiego modelu.

Opracowany model planowania optymalnej trasy pozwala na przekształcenie macierzy wynikowej oceny terenu do postaci grafowej, w celu jej rozwiązania z wykorzystaniem algorytmu A\*.

W aktualnej formie system może zostać z powodzeniem zaimplementowany w robotycznej platformie mobilnej, do jej nawigowania w ujęciu globalnym. Opracowany model i przeprowadzone badania stanowią również podstawę do dalszego rozwijania do postaci pełnego systemu nawigacji dla robotów mobilnych, uwzględniając dynamiczne i zróżnicowane warunki terenowe. Taki system powinien integrować modele do nawigacji globalnej oraz lokalnej, dzięki czemu robot mobilny będzie w stanie całkowicie samodzielnie w bezpieczny i efektywny sposób zmienić swoje położenie.

## BIBLIOGRAFIA

1. Sasaki, Takahiro, et al. "Where to map? iterative rover-copter path planning for mars exploration." *IEEE Robotics and Automation Letters* 5.2 (2020): 2123-2130.
2. Systemy robotów autonomicznych - Wykład nr 9.  
<https://home.agh.edu.pl/~opal/sysra/wyklady/SysRAw9.pdf>  
[Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
3. Jian, Zhiqiang, et al. "A global-local coupling two-stage path planning method for mobile robots." *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.3 (2021): 5349-5356.
4. Tadeusiewicz, "Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami", Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1998
5. Python 3.12. <https://docs.python.org/3.12/index.html>  
[Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]

6. Paszke, Adam, et al. "Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library." *Advances in neural information processing systems* 32 (2019).
7. Thrun, Sebastian, and Michael Montemerlo. "The graph SLAM algorithm with applications to large-scale mapping of urban structures." *The International Journal of Robotics Research* 25.5-6 (2006): 403-429.

# Rozdział 3

## SYSTEM ANALIZY SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH NA PLATFORMIE MOBILNEJ W KONTEKŚCIE SYSTEMU WIBROIZOLACYJNEGO

Gurgul J.<sup>1</sup> Stawczyk P.<sup>2</sup>, Bogacki Sz.<sup>3</sup>, Zientek R.<sup>4</sup>, Jałowiecki A.<sup>5</sup>, Łój P.<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Silesian Phoenix

<sup>5,6</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

### 3.1. Wstęp

Współczesny rozwój robotów mobilnych rewolucjonizuje szereg dziedzin, od logistyki po opiekę zdrowotną [1]. Kluczową cechą, która wyróżnia te zaawansowane technologicznie urządzenia, jest ich zdolność do pracy w różnorodnych warunkach oraz zdolność do przemieszczania się. Roboty mobilne znajdują zastosowanie nie tylko w kontrolowanych środowiskach fabrycznych, ale również w dynamicznych środowiskach, takich jak miejsca publiczne. Praca tych robotów bardzo często jest związana z wystawieniem ich na oddziaływanie różnych szkodliwych czynników, w tym drgań, które występują podczas przemieszczania się oraz wykonywania powierzonych zadań. Efektywne zarządzanie tymi czynnikami staje się kluczowe dla zapewnienia nie tylko trwałości i niezawodności robotów, ale także dla zagwarantowania bezpiecznej współpracy z otoczeniem i ludźmi.

Podczas przemieszczania się oraz wykonywania zaplanowanych działań robota mogą być generowane drgania, przenoszone przez układ jezdny na pozostałe układy. Zjawisko to ma szereg niekorzystnych skutków, jednym z nich jest wpływ drgań na układy elektroniczne. Pod wpływem wibracji rozpoczyna się proces degradacji połączeń lutowanych. W dłuższej perspektywie degradacja ta postępuje i ostatecznie powoduje inicjację pęknięć połączeń lutowanych, propagację pęknięć i awarie wzajemnych połączeń, prowadzące do awarii całego systemu [1, 2]. Kolejnym przykładem jest wpływ drgań na połączenia śrubowe, które pod ich wpływem mogą się obluźwiać, co w konsekwencji może wpłynąć na stabilność całej konstrukcji oraz na bezpieczeństwo robota oraz jego otoczenia. Zagrożone są również struktury wewnętrzne materiałów kompozytowych, w których pod wpływem wibracji mogą powstać mikropęknięcia, które w konsekwencji mogą

prowadzić do szybszej degradacji całych elementów wykonanych z materiałów kompozytowych [3].

Tematem niniejszego artykułu jest utworzenie systemu składającego się z warstwy sprzętowej oraz oprogramowania do mierzenia wartości sygnału przyspieszeń jakim poddawany jest robot w trakcie jego przemieszczania się. Tak zebrane dane mogą być użyte do walidowania działania elementów tłumiących lub w połączeniu z dodatkowymi systemami (np. systemem wizyjnym) do zaprojektowania systemu sztucznej inteligencji do predykcji nierówności terenu.

Opracowany system został przetestowany z wykorzystaniem platformy testowej (rys. 3.1) dla robota mobilnego Phoenix III (rys. 3.2), rozwijanego przez SKN AI-METH [4] – projekt Silesian Phoenix [5].



Rys 3.1 Platforma testowa, stan na maj 2023



Rys 3.2 Robot mobilny Phoenix III, stan na wrzesień 2023

## 3.2. Projekt systemu pomiarowego

Pierwszym etapem tworzenia systemu pomiarowego było opracowanie fizycznego oraz programistycznego systemu pomiarowego umożliwiającego zbieranie danych dotyczących przyspieszeń liniowych. W tym celu zaprojektowano infrastrukturę, która będzie umożliwiała zbieranie danych z wielu punktów pomiarowych na platformie. Zebrane sygnały będą odpowiednio przetwarzane, aby uzyskać z nich użyteczne informacje. Informacje te posłużą do określenia poziomu drgań na platformie.

W celu opracowania funkcjonalnego systemu pomiarowego, w pierwszej kolejności dokonano przeglądu literaturowego na podstawie którego sformułowano szereg wymagań. Opracowane założenia podzielono na następujące kategorie:

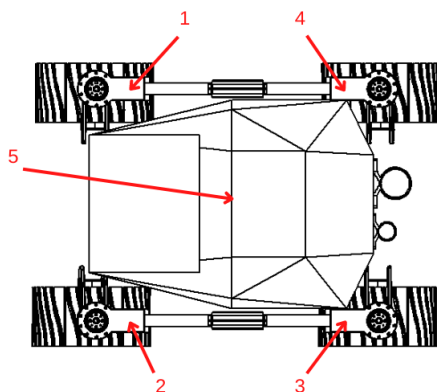
- założenia dotyczące zbieranych danych,
- założenia dotyczące instalacji systemu pomiarowego na platformie,
- założenia dotyczące sposobu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych.

### Założenia dotyczące zbieranych danych

Aby umożliwić określenie poziomu drgań na platformie konieczne jest zmierzenie wartości przyspieszeń liniowych dzięki temu możliwym będzie poprawne określenie poziomu drgań. Tak zebrane dane będą też użyteczne w procesie określania widma częstotliwościowego, które pozwoli na określenie dominujących częstotliwości drgań występujących w czasie działania platformy.

### Założenia dotyczące instalacji systemu pomiarowego

W celu uzyskania wiarygodnych danych pomiarowych zakłada się wykorzystanie 5 czujników IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*) [7] o co najmniej 3 stopniach swobody, tj. posiadający 3-osiowy akcelerometr. Zamocowanie czujników powinno być pewne i stabilne, aby nie wpływać na zbierane dane pomiarowe, przy jednoczesnej możliwości demontażu



Rys. 3.1 Lokalizacja czujników na platformie Phoenix III

pojedynczego czujnika. Ponadto system powinien wykorzystywać uniwersalne złącza przewodowe. Przewidywaną lokalizację czujników na platformie testowej zaprezentowano na rys. 3.3.

### **Założenia dotyczące sposobu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych**

Istotnym aspektem w przypadku zbierania danych pomiarowych sygnałów drganiowych jest częstotliwość z jaką pobierane są wartości z czujników oraz sposób ich zapisu. W ramach projektu zakłada się próbkowanie z częstotliwością co najmniej 120 Hz. Częstotliwość ta uwarunkowana jest tym faktem, że nie jest spodziewany sygnał drganiowy o wysokich częstotliwościach, stąd też częstotliwość próbkowania nie musi być bardzo wysoka. Dodatkowo, aby usprawnić akwizycję danych zakłada się, że układ będzie pobierał surowe dane, które będą obrabiane później. Pozwoli to na odciążenie układu pomiarowego i zwiększenie częstotliwości próbkowania. Kolejnym działaniem jest poddanie surowych danych szeregowi działań z dziedziny przetwarzania sygnałów cyfrowych takich jak: filtrowanie sygnału, analiza widmowa z wykorzystaniem transformaty Fouriera czy transformaty Z.

### **3.3. Dobór elementów układu pomiarowego**

Mając określone wymagania odnośnie sposobu działania elementów układu pomiarowego przystąpiono do procesu selekcjonowania odpowiednich elementów. W pierwszej kolejności postanowiono skupić się na układzie SBC (ang. *Single Board Computer*, komputer jednopłytkowy), ponieważ w zależności od wybranego układu będzie to decydowało o wyborze magistrali komunikacyjnej i rodzaju zastosowanych czujników.

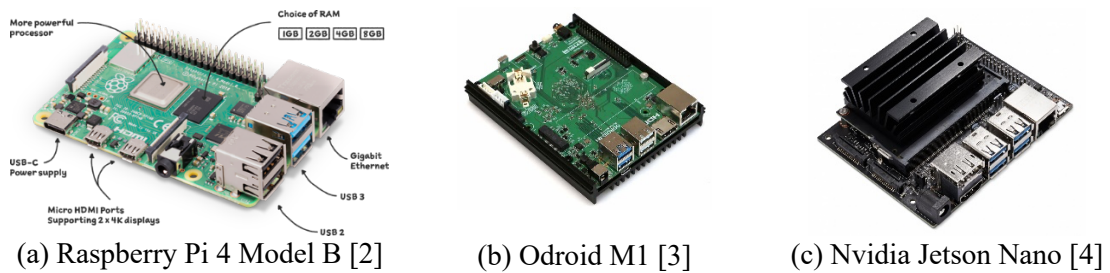
#### **Single Board Computer**

Aktualnie na rynku dostępnych jest wiele układów typu SBC, przeznaczonych do różnych zastosowań, od prostej automatyki typu „smart home” po zaawansowane układy do prowadzenia obliczeń z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. W ramach projektu rozpatrywano trzy rozwiązania:

1. Raspberry Pi 4 Model B [7],
2. Odroid M1 [8],
3. Nvidia Jetson Nano Developer Kit [9].

Na rys. 3.4 zaprezentowano poszczególne rozwiązania.





Rys. 3.2 Rozpatrywane układy SBC

Bazując na specyfikacji technicznej, dostępności i rozmiarze układu, zdecydowano się, że do układu pomiarowego zostanie zastosowany komputer Raspberry Pi 4 Model B. Wybrany SBC jest wystarczający do przewidywanych zastosowań oraz posiada rozbudowaną społeczność użytkowników, co wiąże się z łatwym dostępem do wielu gotowych bibliotek do obsługi zewnętrznych elementów. Jest również wyposażony w złącze GPIO (ang. *general-purpose input/output*, wejście-wyjście ogólnego przeznaczenia) dzięki którym możliwa jest integracja wielu urządzeń dodatkowych, korzystających z różnych magistral komunikacyjnych.

### Czujnik IMU

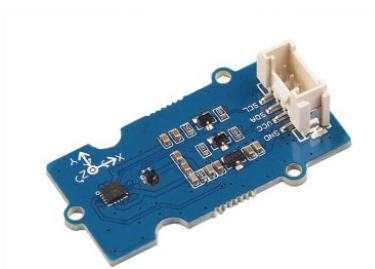
IMU jest to układ elektroniczny wyposażony w zestaw czujników umożliwiających pomiar wartości przyspieszeń (3-osiowy akcelerometr) oraz prędkości kątowych (3-osiowy żyroskop). Bardzo często układ ten wyposażony jest również w magnetometr pozwalający na pomiar wartości pola magnetycznego w trzech osiach.

Zgodnie z wymaganiami dotyczącymi danych pomiarowych, rozważono możliwość wykorzystania dwóch modeli czujnika IMU. Pierwszym rozważanym czujnikiem jest czujnik bazujący na układzie MPU-9250 (rys. 3.5). Jest to czujnik o 9 stopniach swobody, wyposażony w złącze typu Grove.

Drugim rozpatrywanym czujnikiem jest czujnik bazujący na układzie ICM20600 dla akcelerometru i żyroskopu oraz AK09918 dla magnetometru. Tak jak poprzedni czujnik, ten również posiada 9 stopni swobody i jest wyposażony w złącze typu Grove. Postać czujnika zaprezentowano na rys. 3.6.



Rys. 3.3 Czujnik IMU bazujący na układzie MPU-9250 [10]

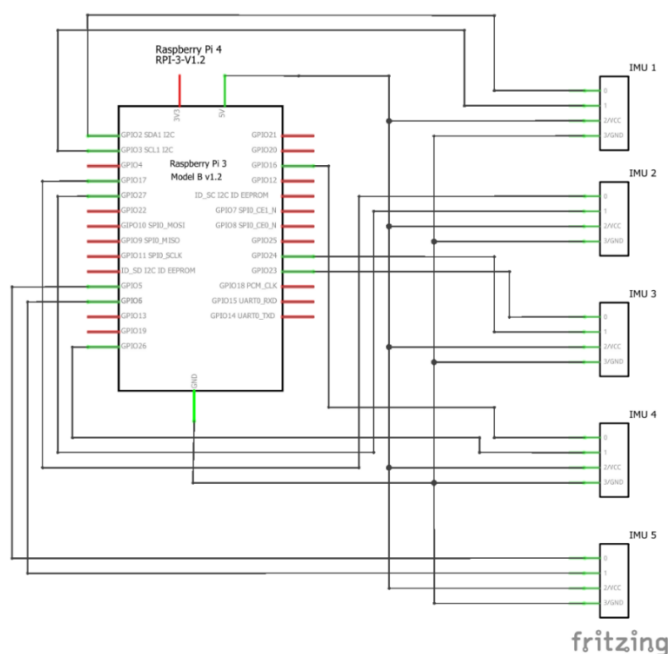


Rys. 3.4 Czujnik IMU bazujący na układzie ICM20600 + AK09918 [11]

Ostatecznie do budowy systemu pomiarowego wykorzystano czujniki bazujące na układzie MPU-9250. O wyborze tych czujników zdecydowała dostępność do otwarto-źródłowej biblioteki w środowisku Python oraz ich łatwiejsza dostępność na rynku.

### Opracowany układ pomiarowy

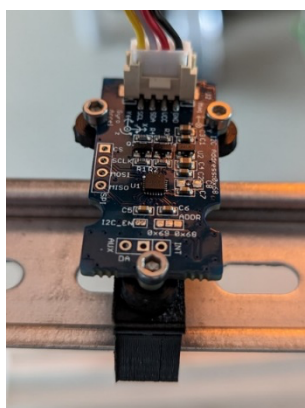
Na podstawie dobranych elementów układu pomiarowego, rozpoczęto prace nad fizycznym układem pomiarowym. Na rys. 3.7 zaprezentowano schemat połączeniowy opracowanego układu, natomiast na rys. 3.8 oraz rys. 3.9 przedstawiono sposób montażu czujników na platformie.



Rys. 3.5 Schemat połączeniowy opracowanego układu pomiarowego



Rys. 3.6 Czujnik zamontowany na ramieniu zawieszenia



Rys. 3.7 Czujnik umieszczony w centralnej części platformy

### 3.4. Opracowanie algorytmu do akwizycji przebiegów sygnałów drganiowych

W celu akwizycji danych z czujnika IMU został napisany autorski program do odczytu i zapisu ramek danych w pliku CSV (ang. *comma-separated values*, wartości rozdzielone przecinkiem). Program został napisany w języku Python [12] w wersji 3.10 [13, 14]. Do odczytywania danych z rejestrów czujnika została użyta biblioteka *mpu9250-jmdev* w wersji 1.0.12 [15].

Wybrany układ SBC, fabrycznie ma do dyspozycji dwie magistrale komunikacyjne typu I2C [16]. Co w naszym przypadku okazało się niewystarczającą liczbą. W celu zwiększenia dostępnych połączeń, utworzono 3 dodatkowe wirtualne magistrale. Powstają one poprzez odpowiednie skonfigurowanie programowe złącz wejścia/wyjścia na wyprowadzeniach GPIO. Dzięki tak przygotowanej platformie, możliwe było podpięcie 5 urządzeń I2C identyfikujących się pod tym samym adresem.

Opracowany program został podzielony na dwie części, pierwsza mająca za zadanie wyszukać w systemie odpowiedni czujniki oraz go zaadresować, druga natomiast przeprowadza proces odczytu oraz zapisu do pliku CSV. W pierwszej części program oczekuje od użytkownika słownika z numerem magistrali oraz adresem czujnika. Następnie sprawdza czy adres jest fizycznie dostępny w urządzeniu, jeśli tak to sprawdza pierwszy rejestr czujnika, który zawiera identyfikator układu. Następnie tworzone są odpowiednie pliki CSV do zapisu danych, a zmienne przechowujące dane na temat czujników przesyłane są do drugiej części programu.

Po otrzymaniu danych konfiguracyjnych druga część programu rozpoczyna proces akwizycji. Może on przebiegać na trzy sposoby:

1. zbieranie określonej liczby danych,
2. zbieranie danych w pętli aż do przerwania programu przez użytkownika,
3. zbieranie danych przez określony czas.

### 3.5 Zdefiniowanie scenariuszy procedury pomiarowej

W celu zweryfikowania działania układu pomiarowego, postanowiono opracować procedurę zbierania danych pomiarowych. Tak opracowane procedury pozwolą na zachowanie jak najbardziej zbliżonych warunków pomiarów pomiędzy kolejnymi pomiarami. Aby wykonany pomiar mógł być uznany za poprawny muszą zostać spełnione następujące warunki:

1. wymagana liczba przejazdów dla takiego samego typu nawierzchni wynosi 10 powtórzeń,
2. platforma porusza się z średnią prędkością  $1,5 \frac{m}{s}$ ,
3. dystans przejazdu wynosi 10 m,
4. przejazd odbywa się bez żadnych dodatkowych zakłóceń.

### 3.6 Akwizycja danych pomiarowych

Mając opracowany i sprawdzony system pomiarowy oraz opracowaną procedurę pomiarową, kolejnym etapem realizacji projektu było zebranie danych pomiarowych dla różnych scenariuszy działania platformy. W tym celu postanowiono dokonać pomiarów przyspieszeń oraz wyznaczenie widma częstotliwości dla czterech przypadków:

- **Przypadek 1.** Pomiar w sytuacji, kiedy platforma pozostaje w bezruchu. Pomiar ten ma na celu określenie drgań spoczynkowych,

- **Przypadek 2.** Pomiar w sytuacji jazdy na wprost po twardej i równej nawierzchni (rys. 3.10). W celu przeprowadzenia tych pomiarów postanowiono wykorzystać korytarz budynku,
- **Przypadek 3.** Pomiar w sytuacji jazdy po utwardzonej, ale nierównej nawierzchni (rys. 3.11). W celu przeprowadzenia pomiarów postanowiono wykorzystać wybrukowany standardową kostką parking,
- **Przypadek 4.** Pomiar w sytuacji jazdy w terenie przygodnym, cechującym się nierównościami terenu i zarówno utwardzoną jak i luźną nawierzchnią (rys. 3.12). W celu wykonania pomiarów postanowiono wykorzystać pas zieleni.



Rys. 3.8 Platforma w trakcie przejazdu po płaskiej utwardzonej nawierzchni



Rys. 3.9 Platforma w trakcie przejazdu po utwardzonej nierównej nawierzchni



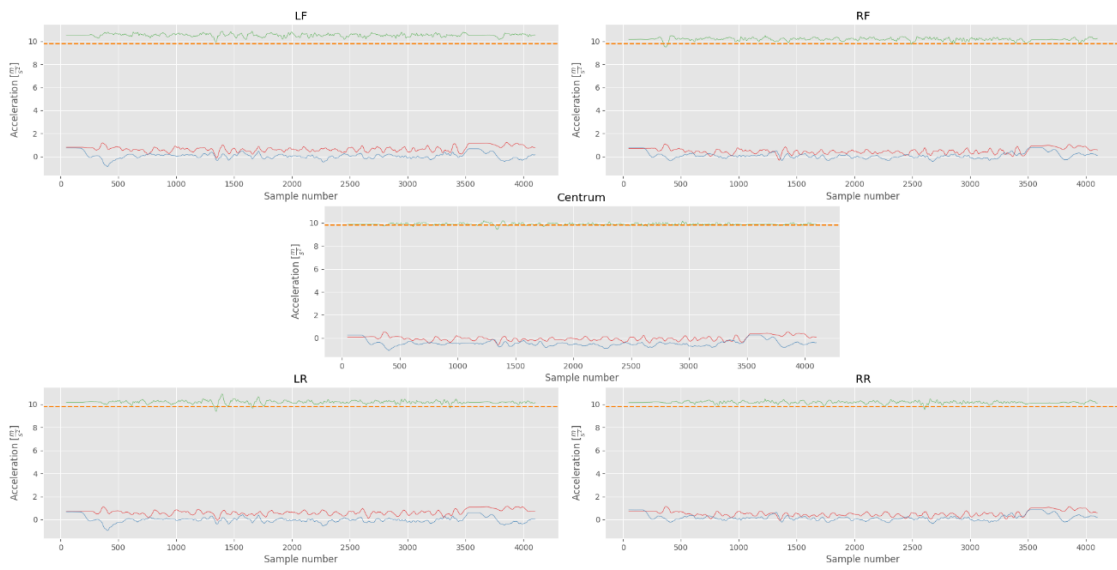
Rys. 3.10 Platforma w trakcie przejazdu w przygodnym terenie

Dla każdego przejazdu, zostały przygotowane dwa zestawy wykresów, obrazujące drgania z jakim platforma miała do czynienia. Pierwszy zestaw składa się z 5 wykresów, przedstawiających odpowiednio wyniki dla każdego z 5 czujników IMU. Do wygładzenia przebiegu funkcji użyto algorytmu średniej kroczącej z krokiem 50. Dodatkowo na wykresach została dodana prosta obrazująca wartość przyspieszenia ziemskiego. Z przykładem takiego zestawu wykresów można się zapoznać na rys. 3.13, przedstawione wyniki zostały otrzymane dla Przypadku 4 – teren przygodny.

Drugi zestaw również składa się z 5 wykresów, obrazujących amplitudy występowania konkretnych częstotliwości drgań dla każdego punktu pomiarowego. Do obliczenia widma częstotliwościowego został wykorzystany algorytm szybkiej transformaty Fouriera [17]. Z przykładem tego zestawu wykresów można się zapoznać na rys. 3.14, otrzymanym dla Przypadku 3 – nierówny utwardzony teren.

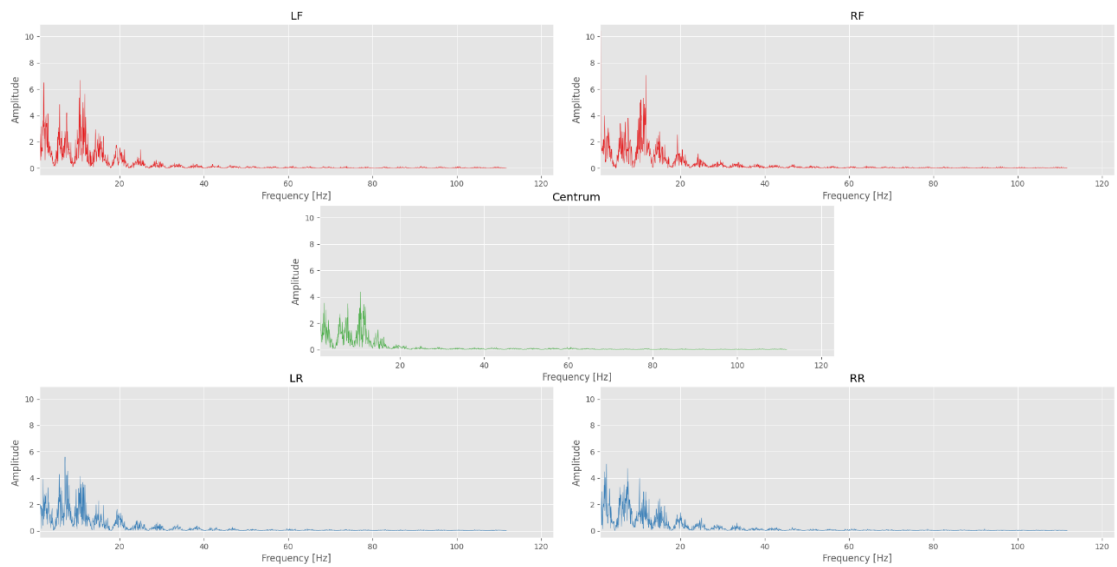
Przy oznaczaniu wykresów przyjęto konwencję, że pierwsza litera **L** lub **R** oznacza stronę odpowiednio **Lewą** (ang. *Left*) oraz **Prawą** (ang. *Right*). Druga litera **F** lub **R**, oznacza określenie osi, odpowiednio **Przednia** (ang. *Front*) oraz **Tylna** (ang. *Rear*).

Accelerations levels - Teren przygodny



Rys. 3.11 Przykładowy zestaw wykresów przyspieszeń

Fourier frequency spectrum - Nierówny utwardzony teren



Rys. 3.12 Przykładowy zestaw wykresów widma częstotliwościowego

### 3.7. Podsumowanie

W ramach prac udało się zaprojektować i wykonać układ pomiarowy pozwalający na zbieranie wartości przyspieszeń, którym poddawana jest platforma mobilna podczas jazdy. Korzystając z opracowanego systemu udało się zebrać zbiory danych, na podstawie, których określono główne składowe częstotliwościowe oraz poziomy drgań.

Wszystkie zebrane dane pomiarowe zostały przeanalizowane z wykorzystaniem opracowanego algorytmu, którego zadaniem było oczyszczenie i wizualizacja pozyskanych danych. W celu uzyskania informacji o głównych częstotliwościach dokonano analizy widmowej wykorzystując transformatę Fouriera dla sygnałów dyskretnych.

Zaprojektowany system został użyty do sprawdzenia wpływu zaprojektowanych elementów tłumiących na platformę testową. A w przyszłości ma zostać zastosowany do wykonania systemu sztucznej inteligencji do predykcji terenu, po którym porusza się platforma Phoenix III.

Badania realizowane były w ramach projektu „System wibroizolacji nadwozia łożnika planetarnego Phoenix III”, który był finansowany w ramach XVIII konkursu finansowania kształcenia zorientowanego projektowo – PBL (ang. *Project-Based Learning*), w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza.

### BIBLIOGRAFIA

1. Rubio, Francisco, Francisco Valero, and Carlos Llopis-Albert. "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16.2 (2019): 1729881419839596.
2. Jannoun, Mayssam, et al. "Probabilistic fatigue damage estimation of embedded electronic solder joints under random vibration." *Microelectronics Reliability* 78 (2017): 249-257.
3. C, ELİK, M., and C. Genc. "Mechanical fatigue of an electronic component under random vibration." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 31.7 (2008): 505-516.
4. Katunin, Andrzej. "Vibration-based spatial damage identification in honeycomb-core sandwich composite structures using wavelet analysis." *Composite Structures* 118 (2014): 385-391.



5. Studenckie Koło Naukowe Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI-METH. <https://sknaimeth.polsl.pl/> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
6. Projekt Silesian Phoenix. <https://sknaimeth.polsl.pl/silesian-phoenix/> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
7. Lin, Pei-Chun, et al. "Design and implementation of a nine-axis inertial measurement unit." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 17.4 (2011): 657-668.
8. Raspberry Pi 4 Model B. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
9. Odroid M1. <https://www.hardkernel.com/shop/odroid-m1-with-8gbyte-ram/> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
10. Jetson Nano Developer Kit. <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
11. Botland - IMU 10DOF <https://botland.com.pl/grove-akcelerometry-i-zyroskopy/15185-grove-imu-10dof-v20-3-osiowy-akcelerometr-zyroskop-magnetometr-i-barometr-i2c-5904422323455.html> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
12. Kamami - Grove IMU 9DOF <https://kamami.pl/moduly-peryferyjne-grove-seeed-studio/583194-grove-imu-9dof-modul-z-9-osiowym-czujnikiem-imu-icm20600-ak09918-101020585.html> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
13. Van Rossum, Guido, and Fred L. Drake Jr. *Python tutorial*. Vol. 620. Amsterdam, The Netherlands: Centrum voor Wiskunde en Informatica, 1995.
14. Guido, V. Rossum, and F. L. Drake Jr. "Python 3 reference manual." *CreateSpace: Scotts Valley, CA, USA* (2009).
15. Python 3.10. <https://docs.python.org/3.10/index.html> [Data uzyskania dostępu: 04.12.2023]
16. Jeferson Menegazzo, Aldo von Wangenheim. MPU-9250 Sensors Data Collect, 2020
17. Module, Structural Mechanics. "User's Guide." *Comsol Multiphysics 5* (1997): 1998-2017.
18. Cooley, James W., and John W. Tukey. "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series." *Mathematics of computation* 19.90 (1965): 297-301.



## Rozdział 4

### KONCEPCJA PASYWNYCH ELEMENTÓW TŁUMIENIA DRGAŃ NA PLATFORMIE MOBILNEJ PHOENIX III

Gurgul J.<sup>1</sup> Stawczyk P.<sup>2</sup>, Bogacki Sz.<sup>3</sup>, Zientek R.<sup>4</sup>, Jałowiecki A.<sup>5</sup>, Łój P.<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Silesian Phoenix

<sup>5,6</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

#### 4.1. Wstęp

Projektując mobilną platformę jezdną, która z założenia ma pracować w trudnych warunkach terenowych, istotnym aspektem jest zadbanie o to aby elementy znajdujące się na platformie nie były narażone na zbyt duże wstrząsy. Na rys. 4.1 zaprezentowano widok z góry na tak zwany *Mars Yard*, na którym rozgrywane są zawody ERC (*ang. European Rover Challenge*) znajdujący się przy Politechnice Świętokrzyskiej.

Przejazd przez tego typu teren będzie generował określoną odpowiedź układu, w postaci drgań, na wymuszenie kinematyczne w postaci nierówności terenu. W większości przypadków, konstrukcje łazików biorących udział w zawodach klasy Rover Challenge nie posiadają żadnych układów mających na celu zredukować wibracje rozchodzące się po platformie mobilnej.

Powstające wibracje mogą stanowić poważne zagrożenie dla łazika. Jednym z głównych problemów związanych z występowaniem drgań jest niekorzystny wpływ na komponenty elektroniki. Poza oczywistą możliwością rozpięcia się któregoś ze złącz elektronicznych i tym samym zaburzenia pracy platformy, może dochodzić do rozłożonej w czasie degradacji połączeń lutowanych, które z czasem mogą pękać co w konsekwencji prowadzi do uszkodzenia układu [2, 3].



Rys. 4.1 Mars Yard znajdujący się przy Politechnice Świętokrzyskiej [1]

Innym obszarem, w którym powstawanie drgań jest problematyczne to wszelkiego rodzaju połączenia rozłączne, głównie połączenia śrubowe. W przypadku nieodpowiedniego zabezpieczenia takich połączeń, na wskutek drgań może dochodzić do luzowania się połączenia lub nawet jego całkowitego rozłączenia [4, 5]. Zaistnienie takiej sytuacji może spowodować nie tylko awarię, któregoś z układów platformy, ale również może doprowadzić do sytuacji, w której może dojść do fatalnego w skutkach uszkodzenia robota, co wiąże się z dużymi kosztami odbudowy. Można tutaj również wspomnieć o możliwości powstawania mikropęknięć wewnątrz struktury materiału, które z czasem mogą prowadzić do zniszczenia elementów robota [6].

Na etapie opracowywania projektu platformy Phoenix III, postanowiono przyjrzeć się kwestii możliwości zredukowania poziomu drgań występujących na platformie poprzez opracowanie systemu wibroizolacji. Ze względu na posiadane możliwości ograniczono się jedynie do rozpatrywania pasywnych systemów tłumienia drgań. W wyniku przeprowadzonych działań opracowano kilka koncepcji pasywnych elementów tłumiących, które zweryfikowano eksperymentalnie na platformie testowej. Poza opracowaniem samych elementów tłumiących w ramach realizowanego projektu opracowano system do zbierania i przetwarzania sygnałów wibroakustycznych na platformie testowej, dzięki czemu możliwym było porównanie poziomu drgań przed i po zastosowaniu elementów tłumiących.

## 4.2. Założenia projektowo-konstrukcyjne

W celu opracowania poprawnie działającego układu tłumienia drgań dla platformy Phoenix III, konieczne było sprecyzowanie wymagań na etapie opracowywania koncepcji. Sformułowane wymagania pozwolą na subiektywną ocenę opracowanych koncepcji i wybór rozwiązania optymalnego. W ramach procesu koncyptowania określono cztery podstawowe założenia, na podstawie, których wyłoniono kryteria oceny koncepcji. Są to:

- możliwość wykonania,
- poziom tłumienia drgań,
- możliwość integracji z istniejącą platformą,
- złożoność rozwiązania.

Jednym z istotnych czynników wpływających na ocenę oraz na sam proces tworzenia koncepcji jest ich możliwość wykonania w dostępnych warunkach warsztatowych, jakimi dysponuje zespół Silesian Phoenix. Poprzez uwzględnienie możliwości technologicznym ogranicza się możliwość opracowania koncepcji, które będą nie realizowalne. W rozpatrywanym przypadku, do dyspozycji zespołu były takie techniki wytwarzania jak obróbka przyrostowa, odlewanie polimerów czy obróbka ubytkowa.

Kolejnym istotnym aspektem opracowanych koncepcji, jest to w jaki sposób dane rozwiązanie tłumią drgania powstałe w trakcie pracy platformy. Na etapie projektowania trudno przewidzieć dokładne zachowanie się opracowanego rozwiązania, w związku z tym postanowiono, że ta cecha rozwiązania będzie oceniona na podstawie fizycznego prototypu. Pozwoli to na bezpośrednie zweryfikowanie skuteczności danego rozwiązania na obiekcie zbliżonym do docelowego.

Posiadając dostęp do fizycznej platformy testowej o parametrach zbliżonych do docelowego rozwiązania możliwym było już na etapie tworzenia koncepcji przemyślenie kwestii związanych z montażem opracowanego rozwiązania na platformie. Istotną kwestią jest opracowanie takiego rozwiązania, które nie będzie wymagało dużych zmian w istniejących układach platformy. Pozwoli to na przyspieszenie procesu testowania opracowanych rozwiązań oraz zmniejszy koszty realizacji projektu.

Kolejnym istotnym elementem każdego opracowanego rozwiązania jest jego poziom złożoności. W rozpatrywanym przypadku na poziom złożoności wpływ będzie miała liczba unikalnych elementów danego rozwiązania. Wraz ze wzrostem złożoności rozwiązania zmniejsza się jego niezawodność, co jest istotne w przypadku projektowania platformy mobilnej, która w założeniach ma funkcjonować autonomicznie bez dostępu do operatora, który będzie mógł dokonać naprawy w razie konieczności.

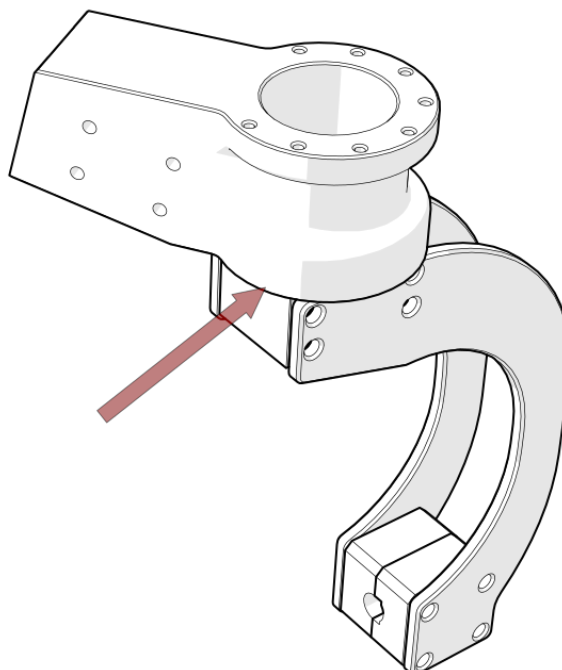
Bazując na tak opracowanych założeniach, sformułowano zestaw kryteriów, które posłużą do późniejszej oceny opracowanych rozwiązań. W Tab. 4.1 zestawiono opracowane kryteria wraz z przypisanymi wagami i wpływem danego kryterium na ocenę całkowitą rozwiązania.

Tab. 4.1 Zestawienie kryteriów oceny opracowanych rozwiązań

| Kryterium                   | Waga        | Wpływ        |
|-----------------------------|-------------|--------------|
| K1 – masa                   | 0,10        | Destymulanta |
| K2 – poziom tłumienia drgań | 0,30        | Stymulanta   |
| K3 – wykonywalność          | 0,25        | Stymulanta   |
| K4 – integracji z platformą | 0,15        | Stymulanta   |
| K5 – poziom złożoności      | 0,20        | Destymulanta |
| <b>SUMA</b>                 | <b>1,00</b> |              |

W rozpatrywanym przypadku zakładamy maksymalizację funkcji celu. I tak kryterium, którego wzrost wartości przekłada się na wzrost wartości funkcji celu, nazywamy stymulantom. Natomiast kryterium o odwrotnym wpływie na funkcję celu, t.j. wzrost wartości kryterium obniża wartość funkcji celu, nazywane jest destymulantom.

Analizując postać konstrukcyjną posiadanej platformy testowej, ustalono, że miejscem, w którym wprowadzenie elementu tłumiącego będzie najmniej kłopotliwe to połączenie uchwyty pałaka koła z pałakiem koła. Przewidziane miejsce montażu elementów tłumiących przedstawiono na rys. 4.2.



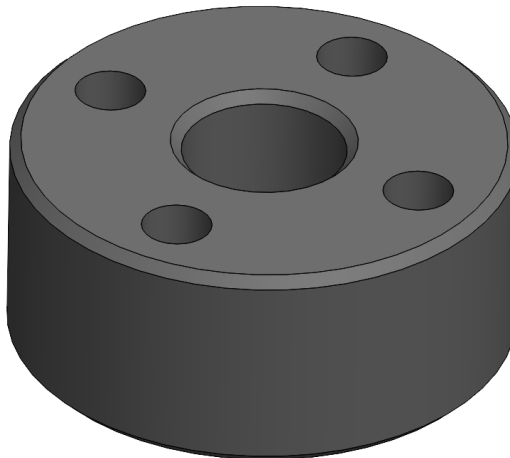
Rys. 4.2 Przewidywane miejsce montażu elementów tłumiących

### 4.3. Opracowane koncepcje

Bazując na wynikach pomiarów poziomu drgań na platformie bez systemu wibroizolacji oraz opracowanych kryteriach projektowych, przystąpiono do tworzenia koncepcji potencjalnego rozwiązania. W ramach procesu konceptowania opracowano cztery koncepcje elementów, które w założeniu powinny zmniejszyć poziom drgań w trakcie przejazdu.

#### Koncepcja nr 1

Pierwsza opracowana koncepcja zakłada proste rozwiązanie bazujące na wprowadzeniu pomiędzy element pałaka oraz montażu pałaka blok w kształcie walca wykonany z tworzywa o dobrych własnościach tłumiących. Postać geometryczną opracowanego elementu przedstawiono na rys. 4.3.

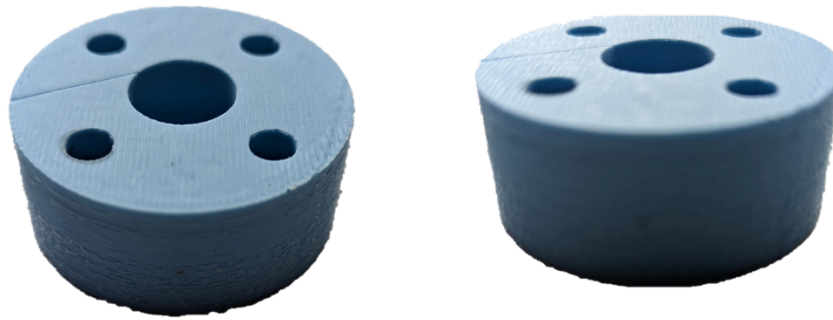


Rys. 4.3 Postać konstrukcyjna pierwszego opracowanego rozwiązania

Jako tworzywo opracowanego rozwiązania rozważono następujące tworzywa:

- silikon RTV,
- żywicę poliuretanową o twardości 60A w skali Shore'a,
- poliuretan termoplastyczny o twardości 20D w skali Shore'a.

Po wykonaniu prototypów elementów z poszczególnych tworzyw, uznano, że najlepszymi własnościami odznacza się wersja wykonana z silikonu RTV. W przypadku elementu wykonanego z silikonu, proces wykonania elementu nie nastroczał większych trudności, a uzyskane elementy odznaczały się powtarzalnością wymiarową. Postać wykonanego prototypu zaprezentowano na rys. 4.4.



Rys. 4.4 Opracowany prototyp koncepcji nr 1

Następnie wykonane elementy zainstalowano na platformie w celu zweryfikowania ich działania. W Tab. 4.2 zestawiono wartości oceny opracowanego rozwiązania zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny.

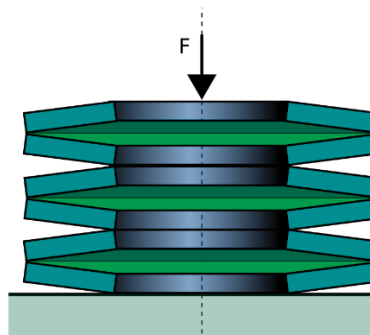
Tab. 4.2 Zestawienie ocen dla pierwszego opracowanego rozwiązania

| Kryterium                   | Wartość |
|-----------------------------|---------|
| K1 – masa                   | 50 g    |
| K2 – poziom tłumienia drgań | 0,50    |
| K3 – wykonywalność          | 0,90    |
| K4 – integracji z platformą | 0,90    |
| K5 – poziom złożoności      | 1,00    |

Opracowane rozwiązanie okazało się stosunkowo sztywne, natomiast dzięki własności tłumienia drgań przez silikon, z którego wykonane zostały elementy, zauważono nieznaczny spadek poziomu drgań na platformie.

## Koncepcja nr 2

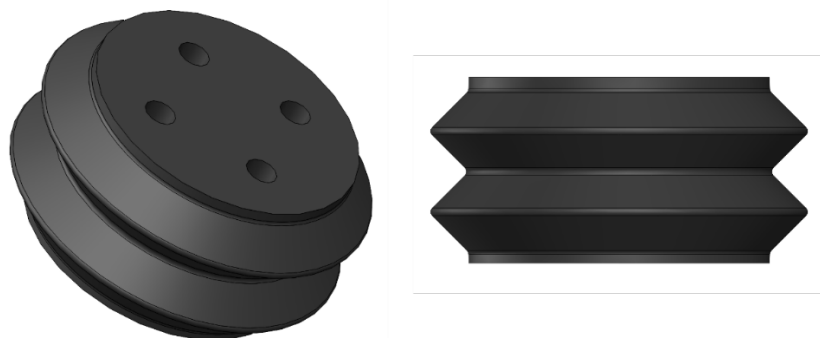
Druga opracowana koncepcja bazuje na idei działania pakietu sprężyn talerzowych. Gdzie sztywność wypadkowa całego elementu jest uzależniona od liczby zestawionych sprężyn. Przykład pakietu sprężyn talerzowych przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5 Pakiet sprężyn talerzowych [7]

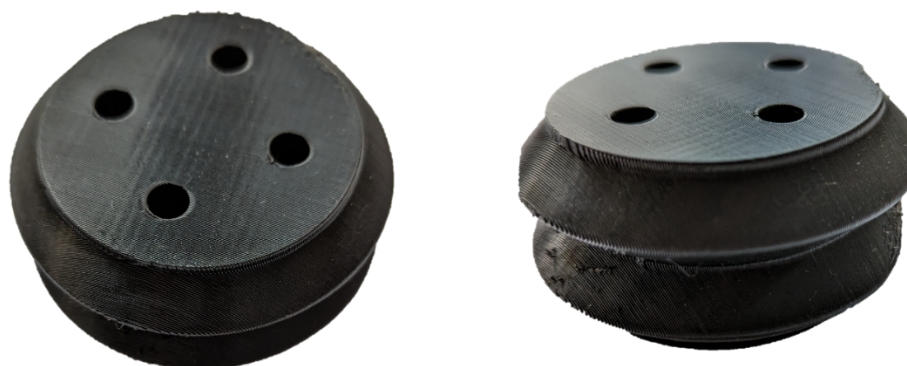


Postać opracowanego wirtualnego modelu dla drugiej koncepcji elementu wibroizolującego przedstawiono na rys. 4.6. Jak można zauważyć element ten charakteryzuje się bardziej złożoną geometrią w porównaniu do pierwszej opracowanej koncepcji. Opracowany model ze względu na swój kształt, był możliwy do wykonania jedynie z wykorzystaniem obróbki przyrostowej.



Rys 4.6 Postać konstrukcyjna drugiego rozwiązania

Prototyp wibroizolatora został wykonany z termoplastycznego poliuretanu o twardości 20D w skali Shore'a. Na rys. 4.7 zaprezentowano wykonany prototyp koncepcji nr 2, natomiast w Tab. 4.3 dokonano oceny zgodnie z przyjętymi kryteriami.



Rys. 4.7 Opracowany prototyp dla koncepcji nr 2

Tab. 4.3 Zestawienie ocen dla drugiego opracowanego rozwiązania

| Kryterium                   | Wartość |
|-----------------------------|---------|
| K1 – masa                   | 35 g    |
| K2 – poziom tłumienia drgań | 0,65    |
| K3 – wykonywalność          | 0,70    |
| K4 – integracji z platformą | 0,80    |
| K5 – poziom złożoności      | 1,00    |

Opracowane rozwiązanie spisywało się zauważalnie lepiej od poprzedniego i spadek poziomu drgań był znacznie lepiej widoczny na uzyskanych wykresach. W ramach poprawy działania opracowanego rozwiązania można zastanowić się nad wykorzystaniem filamentu o nieco mniejszej twardości.

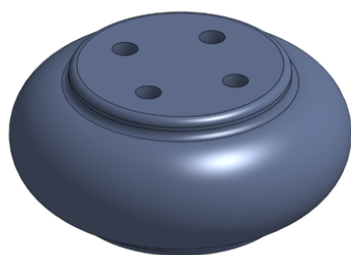
### Koncepcja nr 3

Trzecia opracowana koncepcja, stanowi pewne rozwinięcie wcześniej opracowanej koncepcji i inspirowane jest na postaci geometrycznej sprężyny oponowego. Kształtem przypomina jednopoziomową, sprężynę pneumatyczną typu miech. Sztywność wypadkowa całego elementu jest uzależniona od liczby miechów oraz ich promienia zaokrąglenia. Na rys. 4.8 przedstawiono postać sprężyny oponowego będącego inspiracją dla opracowanej koncepcji. Decyzja o zainspirowaniu się tego typu sprężyną, był fakt dobrego tłumienia pulsacji napędu przez tego typu sprężynę, co powinno umożliwić tłumienie drgań powstałych w trakcie pracy łożyska.



Rys. 4.8 Sprężyna oponowa stanowiąca inspirację dla opracowanej koncepcji [8]

Postać opracowanego elementu zaprezentowano na rys. 4.9. Ze względu na kształt opracowanego elementu, jedyną dostępną metodą wykonania prototypów, był druk 3D. Tak jak w przypadku koncepcji nr 2, tutaj również prototypu wykonano z termoplastycznego poliuretanu.



Rys. 4.9 Postać konstrukcyjna koncepcji nr 3

Wykonane prototypu zainstalowano na platformie i zweryfikowano ich działanie. W Tab. 4.4 zestawiono ocenę opracowanego rozwiązania, natomiast na rys. 4.10 zaprezentowano wykonany prototyp elementu.



Rys. 4.10 Wykonany prototyp dla koncepcji nr 3

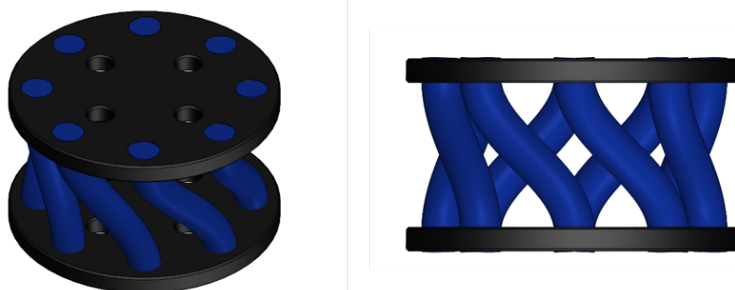
Tab. 4.4 Zestawienie ocen dla trzeciego opracowanego rozwiązania

| Kryterium                   | Wartość |
|-----------------------------|---------|
| K1 – masa                   | 32 g    |
| K2 – poziom tłumienia drgań | 0,75    |
| K3 – wykonywalność          | 0,70    |
| K4 – integracji z platformą | 0,80    |
| K5 – poziom złożoności      | 1,00    |

Opracowane rozwiązanie sprawdziło się najlepiej spośród dotychczas testowanych. Uzyskując zauważalną zmianę w charakterystyce jazdy platformy, jak również spadek poziomu wartości drgań.

#### Koncepcja nr 4

Czwarta i ostatnia koncepcja elementu wibroizolującego została zaprojektowana z myślą jak najpełniejszego wykorzystania sztywności postaciowej i tworzywowej zastosowanych tworzyw. Opracowana koncepcja składa się z trzech podstawowych elementów: podstawy górnej i dolnej oraz łącznika elastycznego. Postać opracowanego rozwiązania przedstawiono na rys. 4.11.



Rys 4.11 Postać konstrukcyjna koncepcji nr 4

W przedstawionym rozwiązaniu zakłada się wykorzystanie zarówno sprężystości liniowej, jak również sprężystości skrętnej do tłumienia drgań powstających w trakcie pracy platformy. W opracowanym rozwiązaniu elementy podstawy górnej i dolnej wykonane zostały jako sztywne wydruki z PLA, natomiast łączniki postanowiono odlać z silikonu RTV. W trakcie opracowywania prototypu napotkano liczne problemy związane z uzyskaniem odpowiedniego dopasowania łączników z podstawami. Połączenia klejone nie sprawdzały się ze względu na trudność łączenia się klei z silikonem. Także w trakcie procesu odlewania łączników napotkano trudności związane z zapewnieniem odpowiedniego kształtu i sztywności.

Ze względu na liczne trudności z opracowaniem prototypu koncepcji nr 4, postanowiono zaprzestać prace nad tym rozwiązaniem. Stąd też rozwiązanie to nie zostało ostatecznie przetestowane na platformie, w związku z czym wykluczono je z dalszych rozważań.

#### 4.4. Analiza porównawcza opracowanych koncepcji

W celu wyboru optymalnego rozwiązania, które zostanie docelowo zainstalowane na platformie Phoenix III, dokonano analizy porównawczej opracowanych rozwiązań. W tym celu zastosowano metodę analizy porównawczej z wykorzystaniem sumy ważonej. Tak jak było już to wspomniane w rozpatrywanym przypadku naszym celem jest maksymalizacja funkcji celu. W Tab. 4.5 zestawiono wartości oceny kryterialnej dla wszystkich rozważanych rozwiązań.

Tab. 4.5 Zestawienie ocen poszczególnych rozwiązań

| Kryterium                   | Koncepcja 1 | Koncepcja 2 | Koncepcja 3 |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| K1 – masa                   | 50 g        | 35 g        | 32 g        |
| K2 – poziom tłumienia drgań | 0,50        | 0,65        | 0,75        |
| K3 – wykonywalność          | 0,90        | 0,70        | 0,70        |
| K4 – integracji z platformą | 0,90        | 0,80        | 0,80        |
| K5 – poziom złożoności      | 1,00        | 1,00        | 1,00        |

Na podstawie powyższych wartości dokonano procesu unitaryzacji, w celu łatwiejszego ich porównywania. Zunitaryzowane wartości oceny zestawiono w Tab. 4.6.

Tab. 4.6 Zunitaryzowane wartości oceny

| Kryterium                   | Konceptcja 1 | Konceptcja 2 | Konceptcja 3 |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| K1 – masa                   | 0,00         | 0,50         | 1,00         |
| K2 – poziom tłumienia drgań | 0,50         | 0,65         | 0,75         |
| K3 – wykonywalność          | 0,90         | 0,70         | 0,70         |
| K4 – integracji z platformą | 0,90         | 0,80         | 0,80         |
| K5 – poziom złożoności      | 1,00         | 1,00         | 1,00         |

W kolejnym etapie wymnożono wartości ocen przez wartości przyjętych współczynników wagowych dla poszczególnych kryteriów. Otrzymane wyniki zestawiono w Tab. 4.7.

Tab 4.7 Wyniki analizy wielokryterialnej

| Kryterium                   | Konceptcja 1 | Konceptcja 2 | Konceptcja 3 |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| K1 – masa                   | 0,000        | 0,050        | 0,100        |
| K2 – poziom tłumienia drgań | 0,150        | 0,195        | 0,225        |
| K3 – wykonywalność          | 0,225        | 0,175        | 0,175        |
| K4 – integracji z platformą | 0,135        | 0,120        | 0,120        |
| K5 – poziom złożoności      | 0,200        | 0,200        | 0,200        |
| SUMA                        | 0,710        | 0,740        | 0,820        |

Jako można zauważyć, rozwiązanie nr 3 uzyskało największą wartość funkcji celu, co jest tożsame z bycie optymalnym rozwiązaniem, które zostanie przeniesione na docelową platformę Phoenix III. Na rys. 4.12 przedstawiono wybrany element wibroizolacyjny po zamontowaniu na platformie.

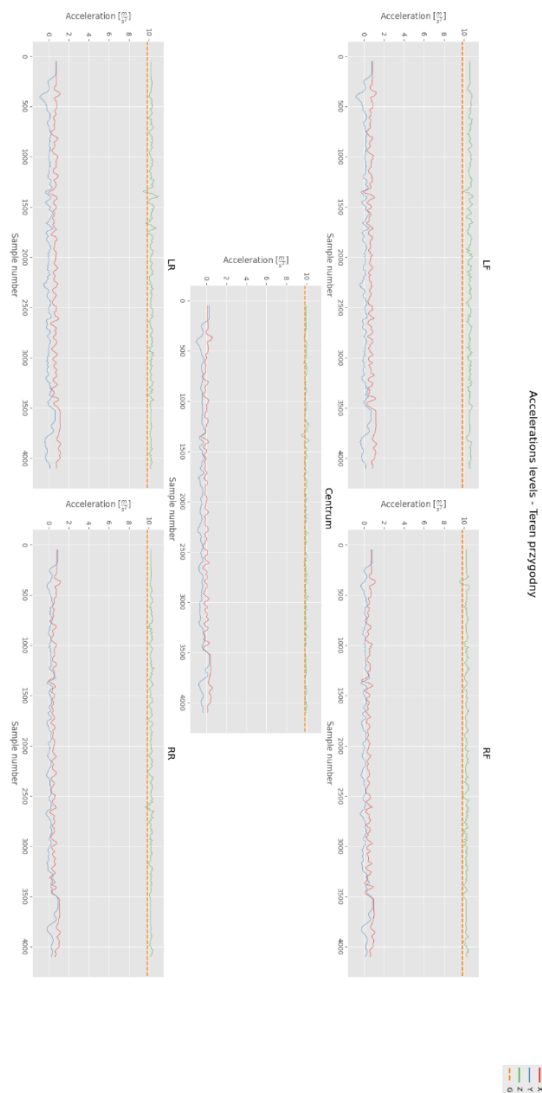


Rys. 4.12 Element tłumiący zainstalowany na platformie testowej

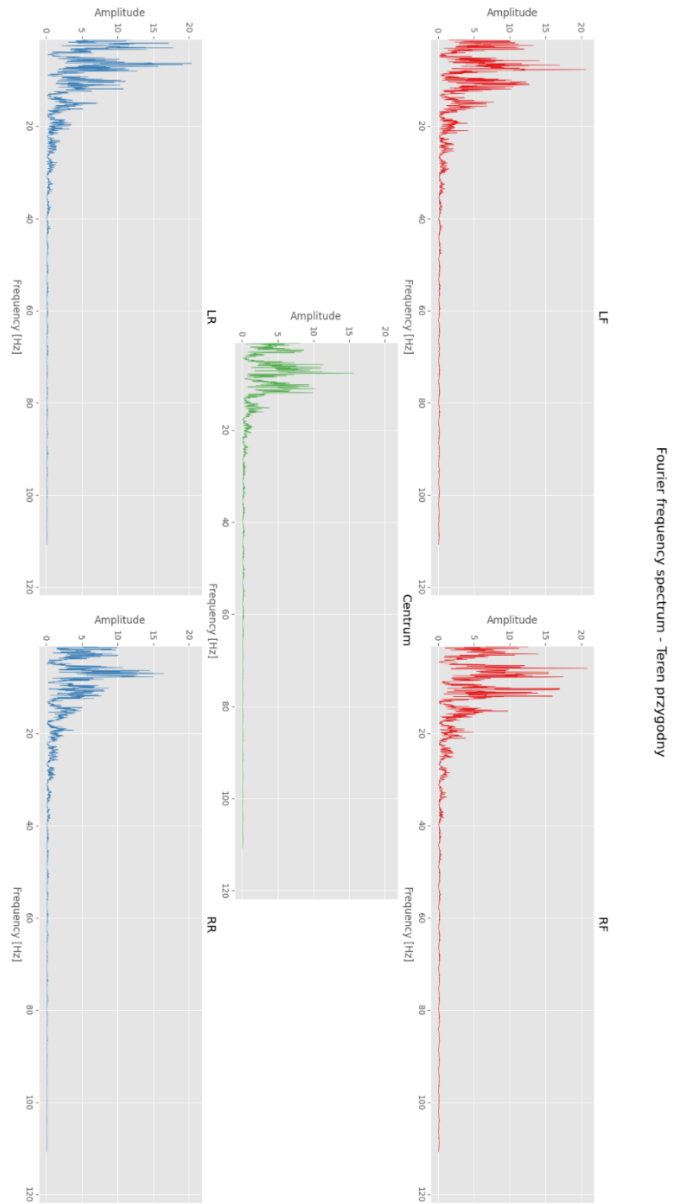
## 4.5. Analiza porównawcza opracowanych koncepcji

W celu sprawdzenia działania elementów wibroizolacji, zrealizowano szereg powtórnych przejazdów zgodnych w terenie w celu potwierdzenia własności tłumiących. Na rys. 4.13 przedstawiono przykładowy wynik prezentujący przebieg przyspieszenia w czasie dla sytuacji bez zainstalowanych elementów tłumiących. Poszczególne wykresy odpowiadają kolejnym punktom pomiarowym zainstalowanym na platformie. Na rys. 4.14 zaprezentowano widmo częstotliwościowe dla uzyskanych przejazdów. Natomiast na rys. 4.15 przedstawiono wyniki pomiarów po zainstalowaniu elementów tłumiących oraz na rys. 4.16 widmo częstotliwościowe.

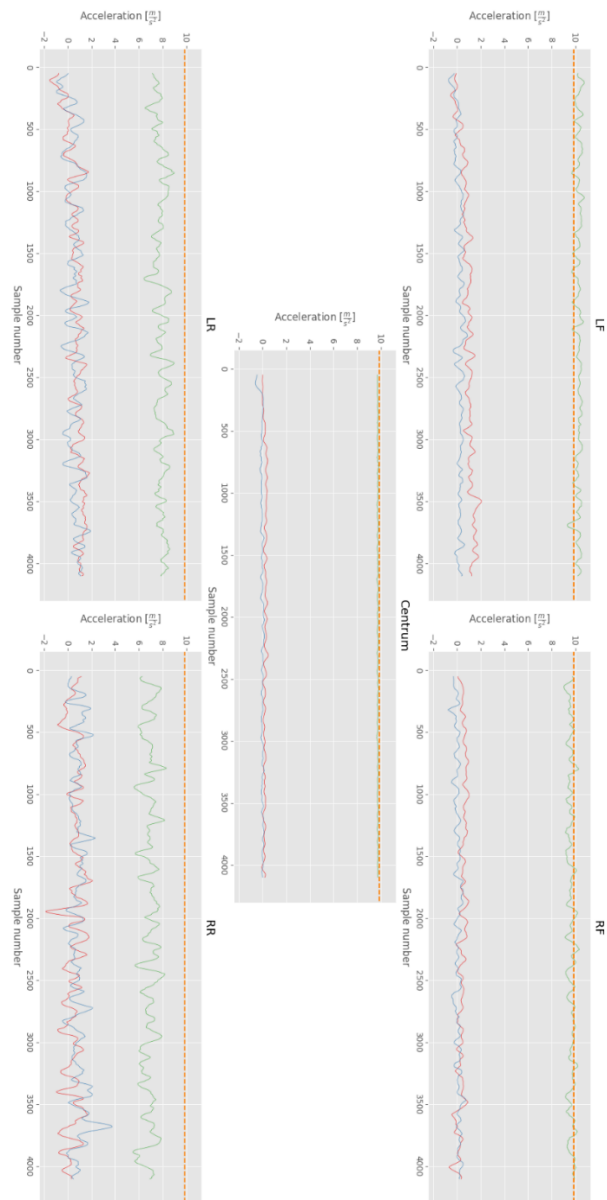
W celu porównania uzyskanych wyników, skupiono się głównie na porównaniu wykresów widma częstotliwościowego. Na zamieszczonych wykresach można zauważyć spadek amplitudy dla częstotliwości dominujących, wyznaczonych dla przejazdów bez wibroizolacji.



Rys. 4.13 Wykres przyspieszeń uzyskanych w trakcie przejazdu w terenie bez elementów tłumiących



Rys. 4.14 Widmo częstotliwościowe dla przejazdu bez elementów tłumiących

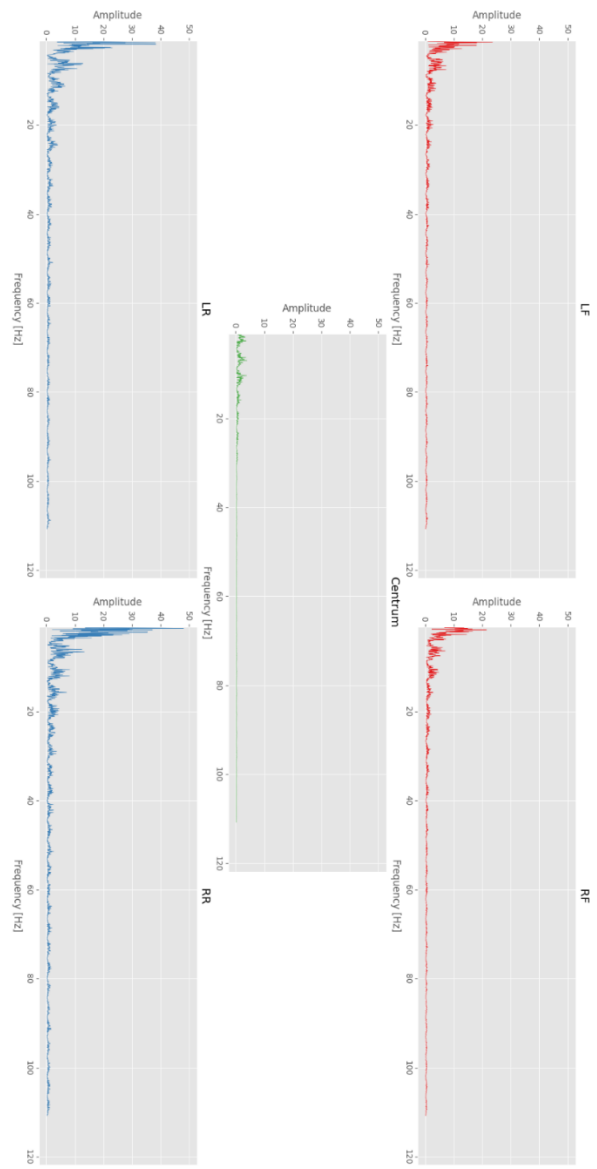


Accelerations levels - Modyfikacja Teren przygodny



Rys. 4.15 Wykres przyspieszeń uzyskanych w trakcie przejazdu w terenie po zainstalowaniu elementów tłumiących





Fourier frequency spectrum - Modyfikacja Teren przygodny

Rys. 4.16 Widmo częstotliwościowe dla przejazdu po zainstalowaniu elementów tłumiących

#### 4.4. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań związanych z opracowaniem pasywnych elementów tłumiących mogących zostać zastosowane na platformie mobilnej Phoenix III udało się opracować i przetestować prototypy trzech rozwiązań.

Na podstawie przeprowadzonych testów oraz analizy wielokryterialnej dokonano wyboru ostatecznego rozwiązania, które w dalszej kolejności zostało poddane dalszym testom w celu określenia skuteczności rozwiązania.

W ramach prowadzonych testów dokonano szeregu przejazdów w terenie w celu określenia poziomu drgań występujących na platformie, zarówno przed jak i po zainstalowaniu elementów tłumiących.

Z przeprowadzonych pomiarów zauważono zmniejszenie się poziomu drgań oraz wyraźną zmianę widma częstotliwościowego, w ramach którego wytłumione zostały częstotliwości w zakresie od 5÷20 Hz. Szczególnie dobrze widać to na czujniku umieszczonym centralnie na platformie. Jest to o tyle korzystana sytuacja ze względu na fakt umieszczenia głównych komponentów elektroniki w centralnej części łoża.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie pasywnych elementów tłumiących w konstrukcji łoża może zmniejszyć poziom drgań, przez co powinno się to przyczynić do zmniejszenia ryzyka wystąpienia awarii w trakcie przejazdu przez nierówny teren.

Jednym z kolejnych działań badawczych jakie mogą zostać podjęte w temacie systemów wibroizolacji w platformach mobilnych jest opracowanie aktywnego systemu tłumienia drgań, który będzie w stanie się dostosowywać do zmieniających się warunków terenowych czy też do zmian w wyposażeniu platformy, które to również mają wpływ na zachowanie się układu.

Badania realizowane były w ramach projektu „System wibroizolacji nadwozia łoża planetarnego Phoenix III”, który był finansowany w ramach XVIII konkursu finansowania kształcenia zorientowanego projektowo – PBL (ang. Project-Based Learning), w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza.

## BIBLIOGRAFIA

1. European Rover Challenge <https://roverchallenge.eu/> [Data uzyskania dostępu: 24.11.2023]
2. Jannoun, Mayssam, et al. "Probabilistic fatigue damage estimation of embedded electronic solder joints under random vibration." *Microelectronics Reliability* 78 (2017): 249-257.
3. C, ELİK, M., and C. Genc. "Mechanical fatigue of an electronic component under random vibration." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 31.7 (2008): 505-516.
4. Zhang, Yong-xiang, et al. "Research on vibration transfer characteristics of the bolt connection structure." *Journal of Failure Analysis and Prevention* 17 (2017): 68-78.
5. Zadoks, R. I., and X. Yu. "An investigation of the self-loosening behavior of bolts under transverse vibration." *Journal of sound and vibration* 208.2 (1997): 189-209.
6. Katunin, Andrzej. "Vibration-based spatial damage identification in honeycomb-core sandwich composite structures using wavelet analysis." *Composite Structures* 118 (2014): 385-391.
7. Sprężyna krążkowa. Wikipedia [https://pl.wikipedia.org/wiki/Spr%C4%99%C5%BCyna\\_kr%C4%85%C5%B4kwa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Spr%C4%99%C5%BCyna_kr%C4%85%C5%B4kwa) [Data uzyskania dostępu: 24.11.2023]
8. Sprzęgło oponowe. Zaopatrzenie 24 <https://zaopatrzenie24.pl/sprzeglo-oponowe-flex-d50-typ-b-otwor-wstepny-tecnamic> [Data uzyskania dostępu: 24.11.2023]



# Rozdział 5

## **OPRACOWANIE I ROZWÓJ BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO Z FUNKCJĄ MONITOROWANIA OTOCZENIA**

Kaca M.<sup>1,2</sup>, Nowak P.<sup>1,2</sup>, Szwajca Sz.<sup>1,2</sup>, Czaja P.<sup>2</sup>, Panfil W.<sup>1,3</sup>, Pawełczyk A.

<sup>1</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Silesian Erne

<sup>2</sup> Techniczne Zakłady Naukowe w Dąbrowie Górniczej

<sup>3</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

### **5.1. Wstęp**

W rozdziale przedstawiono przebieg prac oraz wyniki projektu realizowanego we współpracy SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI-METH z uczniami szkoły średniej Techniczne Zakłady Naukowe w Dąbrowie Górniczej w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza. Głównym wynikiem jest bezzałogowy statek powietrzny (BSP) typu stałopłat, który wyposażony jest w czujnik wizyjny umożliwiający – układ taki, z uwagi na niskie zużycie energii BSP, daje operatorowi możliwość monitorowania odległych obszarów do kilkunastu kilometrów od punktu startu.

### **5.2. Cel i założenia projektu**

Głównym celem projektu było opracowanie prototypu zdalnie sterowanego bezzałogowego statku powietrzego (BSP) typu stałopłat (Rys. 5.1) [1]. Dodatkowym, ale bardzo ważnym, celem projektu było pogłębienie oraz nabycie nowej wiedzy i umiejętności praktycznych uczniów w zakresie budowy bezzałogowych statków powietrznych, ich sterowania, integracji awioniki, prowadzenia lotów w sposób bezpieczny w zgodzie z obowiązującymi przepisami Prawa Lotniczego.

Osiągnięcie założonych celów wymagało spełnienia kilku kluczowych założeń projektowych:

- Przyjęto, że prototyp będzie w formie stałopłatu, co stanowiło istotną koncepcyjną decyzję projektową. Stałopłat jest popularnym i efektywnym energetycznie typem BSP, który może być wykorzystywany w różnych zastosowaniach, od monitoringu po badania naukowe;
- Zdecydowano się na elektryczny układ napędowy, co stanowi istotny krok w kierunku ekologicznych i energooszczędnych rozwiązań w lotnictwie. To założenie jest zgodne z trendami rozwoju nowoczesnych statków powietrznych;
- BSP będzie zdalnie sterowany oraz będzie realizował funkcję autonomicznego powrotu do punktu startowego (RTH), co wpłynie na bezpieczeństwo prowadzenia operacji lotniczych. Dodatkowo, obecność czujnika wizyjnego umożliwi monitorowanie otoczenia statku i poprawia jego zdolność do nawigacji;
- Określono zakres lotów próbnych w warunkach VLOS (Visual Line of Sight) w kategorii otwartej do wysokości AGL max. 120m, zgodnie z obowiązującymi przepisami Prawa Lotniczego (rozporządzenie Komisji UE nr 2019/947 [4]). To zapewniło bezpieczne warunki testowania prototypu.

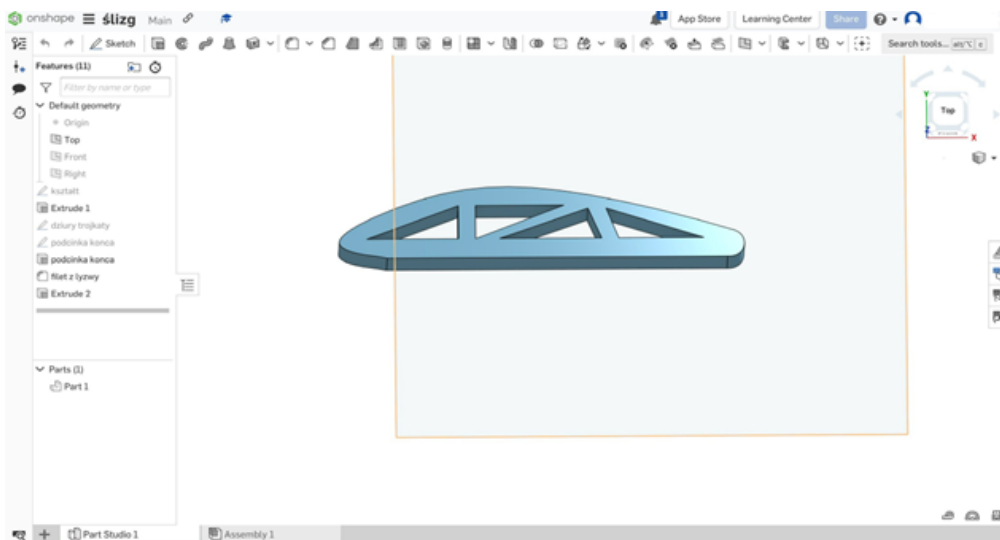


Rys. 5.1 Model Finwing Traveler V2 będący podstawą prac w projekcie [1]

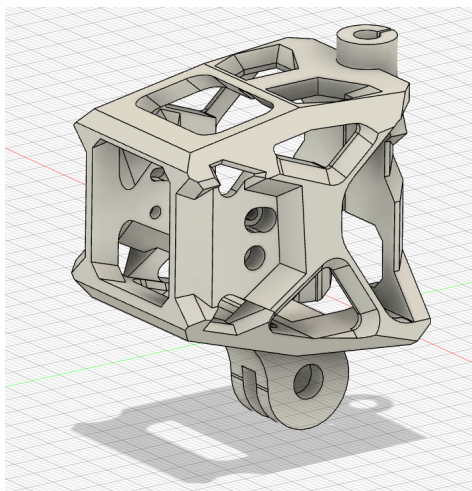
### 5.3. Prace projektowo-konstrukcyjne i wykonawcze

#### Opracowanie modeli 3D

Zespół projektowy dokonał opracowania modeli 3D niektórych komponentów BSP przy użyciu oprogramowania CAD (Rys. 5.2, Rys. 5.3). Wykonane modele były podstawą do dalszych prac konstrukcyjnych.



Rys. 5.2 Model CAD płyty służącej do bezpiecznego lądowania



Rys. 5.3 Obudowa systemu FPV [thingiverse.com]

## Dobór elementów układu napędowego

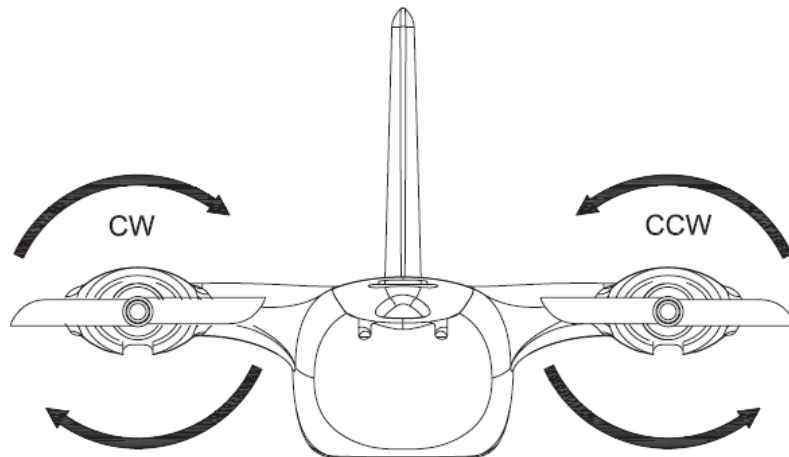
Dokonano doboru elementów układu napędowego na podstawie obliczeń masy samolotu, w tym silników, sterowników, śmigieł oraz akumulatora, zapewniających wystarczający ciąg do lotu BSP.

Dobrano silnik EMAX MT2204 2300KV ze względu na wysoką moc odpowiednią do uniesienia BSP, odpowiednim sterownikiem do powyższego silnika był regulator ESC HobbyWing 20A, zakupiono śmigła PROPROP 6x4,5 dostosowane do silników, obracające się przeciwbieżnie (Rys. 5.4, Rys. 5.5).

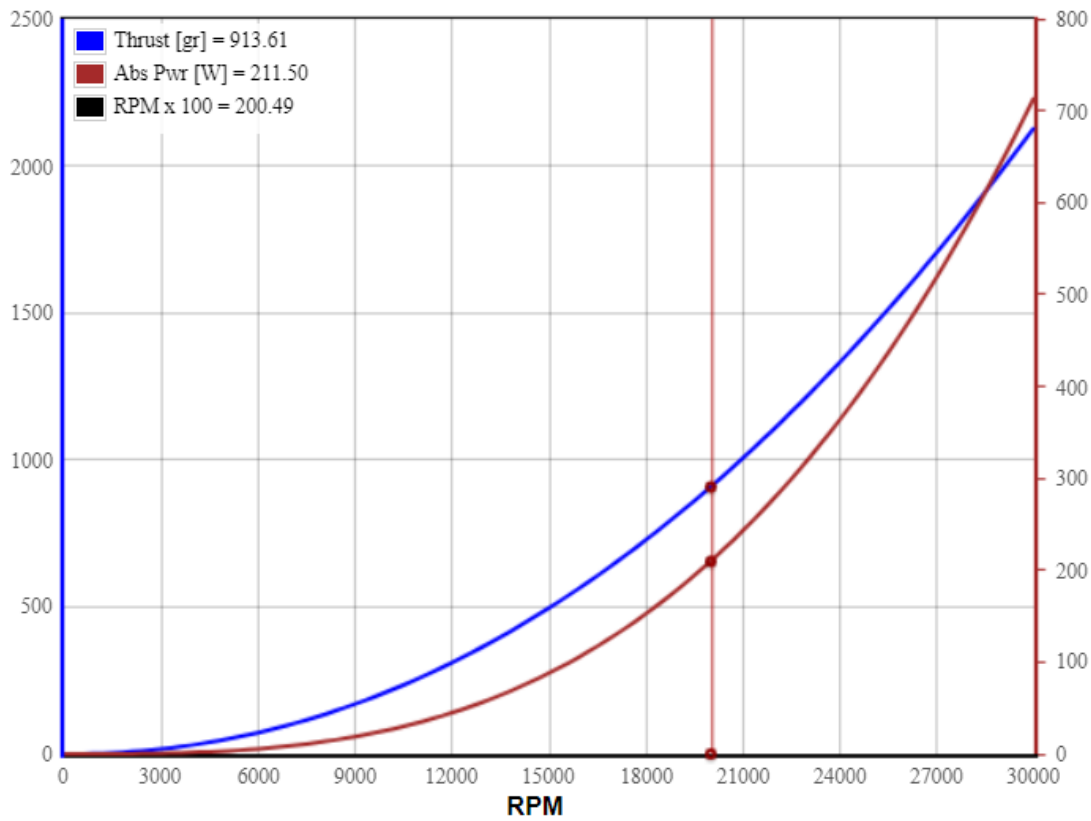
Według obliczeń ciąg układu napędowego wynosić może nawet  $2 \times 908$  [g] (Rys. 5.7). W ramach prób stanowiskowych wykonano pomiary ciągu, który wynosi łącznie 1374 [g], co spełnia założony kamień milowy co najmniej 70-80% MTOM, ponieważ masa BSP gotowego do lotu wynosi 1400 [g]. Charakterystykę układu przedstawiono na Rys. 5.6.



Rys. 5.4 Dobrany silnik EMAX MT2204 oraz jego sterownik ESC HobbyWing Flyfun20A



Rys. 5.5 Kierunki obrotów śmigieł [1]



Rys. 5.6 Charakterystyka układu napędowego



| Estimate Propeller's Static Thrust                      |                              |                  |
|---|------------------------------|------------------|
| updated: Mar 4, 2023                                    |                              |                  |
| Ambient Temperature :                                   | Fahrenheit<br>59             | Centigrade<br>15 |
| Altitude :  | Feet<br>328                  | Meters<br>100    |
| Barometer Pressure:                                     | in Hg<br>29.6                | mbar<br>1001     |
| Prop Type :<br>Choose "Custom" to enter your own values | Custom                       |                  |
|   | Tk 0.9                       | Pk 0.7 Blades 2  |
| Prop Diameter :   | inches<br>6                  | cm<br>15.2       |
| Prop Pitch :  | inches<br>4.5                | cm<br>11.4       |
| Prop Static RPM :                                       | rev / minute<br>20000        |                  |
| Supply Voltage & Current :<br>( when applicable )       | Volts<br>11.1                | Amperes<br>15    |
| Click to Calculate                                      |                              |                  |
| Estimated Static Thrust :                               | ounces<br>32                 | grams<br>908     |
| Supplied Power :  | Horse Power<br>0.22          | Watts<br>167     |
| Prop's Absorbed Power :                                 | Horse Power<br>0.28          | Watts<br>209.6   |
| Static Efficiency :                                     | 125.5 %                      |                  |
| Static Pitch Speed :                                    | mph<br>85.2                  | Km/h<br>137      |
| Appx. Level Flight Speed :                              | mph<br>102                   | Km/h<br>164      |
| Prop Tip MACH Speed :                                   | Max recommended .92<br>0.469 |                  |

Rys. 5.7 Wyznaczenie maksymalnego ciągu – 908[g] dla jednego układu śmigło-silnik [3]

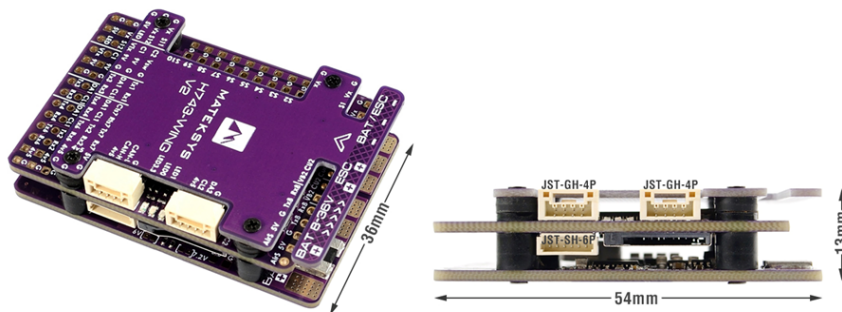
## Dobór serwomechanizmów

Zespół dokonał wyboru serwomechanizmów odpowiednich do sterowania powierzchniami sterowymi BSP. Jest to serwo MG90S z aluminiową przekładnią, które dostarcza moment nawet 2.2 kg/cm, co jest odpowiednie do BSP nawet przy mocnym wietrze.

## Dobór układu autopilota

Na podstawie zdefiniowanych minimalnych wymagań funkcjonalnych dobrano układ autopilota umożliwiającą realizację założonych funkcji BSP oraz odbiornika zdalnego sterowania RC. W celu zaprogramowania autonomicznych

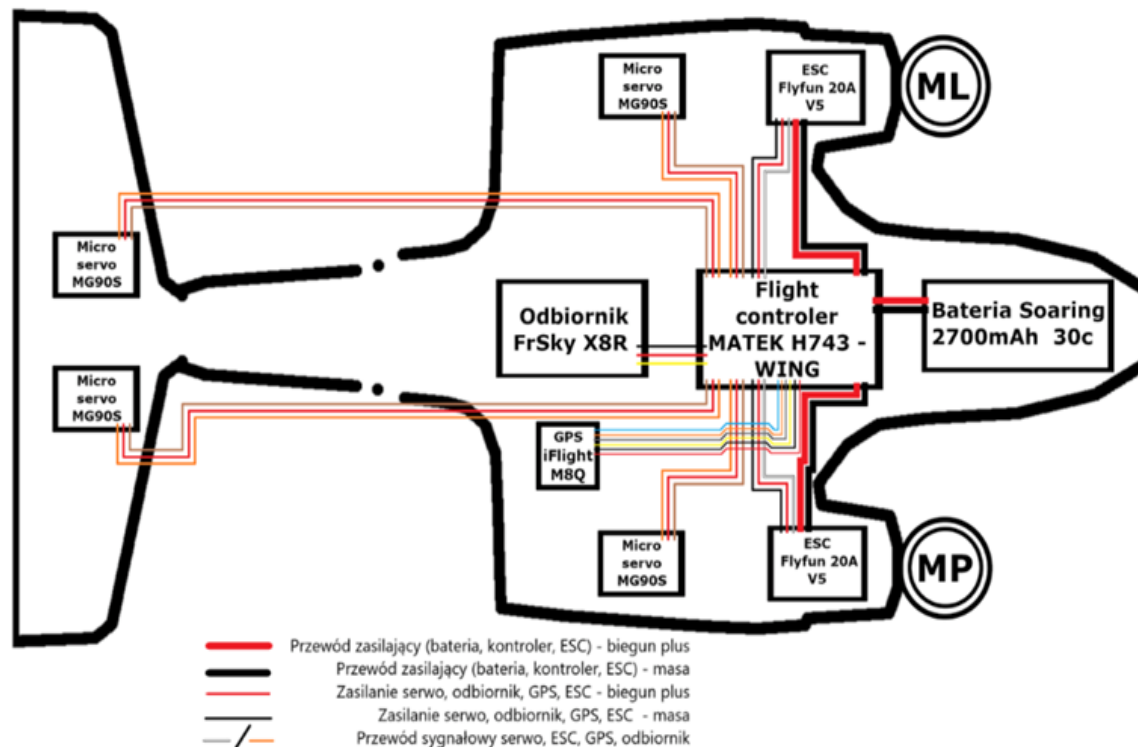
lotów oraz możliwości powrotu do miejsca startu wybrano kontroler MATEK H743 (Rys. 5.8), który umożliwia konfigurowanie oprogramowania sterującego (ArduPlane [2]) oraz nadzorowanie lotu samolotu przez programy takie jak QGroundControl lub MissionPlanner, do tego odbiornik oraz nadajnik RC, które zapewniają wystarczającą liczbę kanałów sterujących z wykorzystaniem sygnałów PWM.



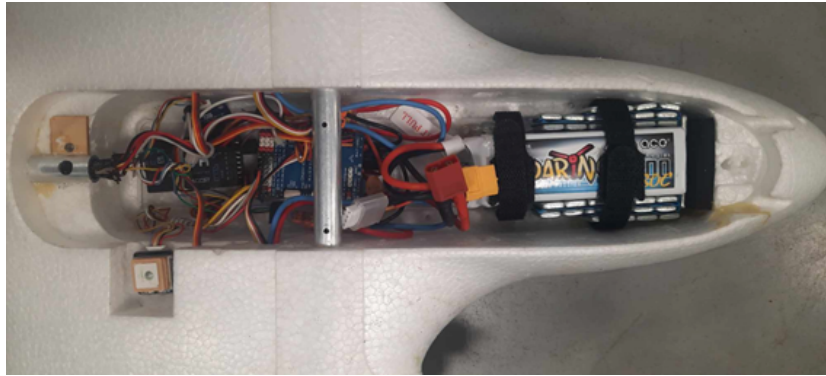
Rys. 5.8 Kontroler lotu MATEK H743 WING

## Projekt i wykonanie układu elektrycznego

Przygotowano projekt schematu elektrycznego obejmującego układy sterowania, napędowy, zasilania oraz komunikacji (Rys. 5.9). Na podstawie projektu wykonano instalację elektryczną, w tym dobrano długości i przekrojów przewodów oraz zarobiono złącza, dostosowane do przewidywanego napięcia i natężenia prądu. Przeprowadzono integrację wszystkich komponentów (Rys. 5.10, Rys. 5.11), konfigurację autopilota i pierwsze uruchomienie.



Rys. 5.9 Projekt układów zasilania, sterowania, komunikacji



Rys. 5.10 Centropłat oraz część kadłuba BSP - wewnątrz autopilot, akumulatory, GPS, instalacja elektryczna



Rys. 5.11 Silnik BSP wraz ze sterownikiem ESC, serwomechanizmem oraz mechanizmem lotki

## 5.4. Przygotowanie do lotów

### Próby stanowiskowe

Opracowano program testów stanowiskowych w celu sprawdzenia poprawności połączeń i działania podstawowych elementów płatowca: układ napędu śmigło-silnik, układ płatowca, układ awioniki. Dodatkowo sprawdzono układ stabilizacji samolotu poprzez obserwację reakcji powierzchni sterowanych na jego odchylenie, przechylenie i pochylenie. Sprawdzone również układ autopilota oraz GPS zapewniając stabilny sygnał GPS oraz podłączając BSP do oprogramowania MissionPlanner. Sprawdzone także ciąż samolotu.

### Wyważenie statyczne BSP

Spradzono wyważenie statyczne BSP, podpierając samolot w punktach wyważenia statycznego określonych przez producenta, znajdujących się na spodzie skrzydła. Jest to kluczowym krokiem w zapewnieniu stabilności i właściwego zachowania się statku w locie. Podczas pierwszych lotów zastosowano przedni środek ciężkości w zakresie dopuszczalnym przez producenta płatowca.

## Przygotowanie scenariuszy lotów próbnych

Opracowano scenariusze lotów próbnych zgodnie z praktyką lotniczą, uwzględniając różne warunki pogodowe (szczególnie wiatr, Rys. 5.12) oraz miejsca wykonywania lotów.



Rys. 5.12 UAV Forecast - aplikacja z aktualną i prognozowaną pogodą

## 5.5. Pierwsze loty

### Prowadzenie testów/lotów próbnych

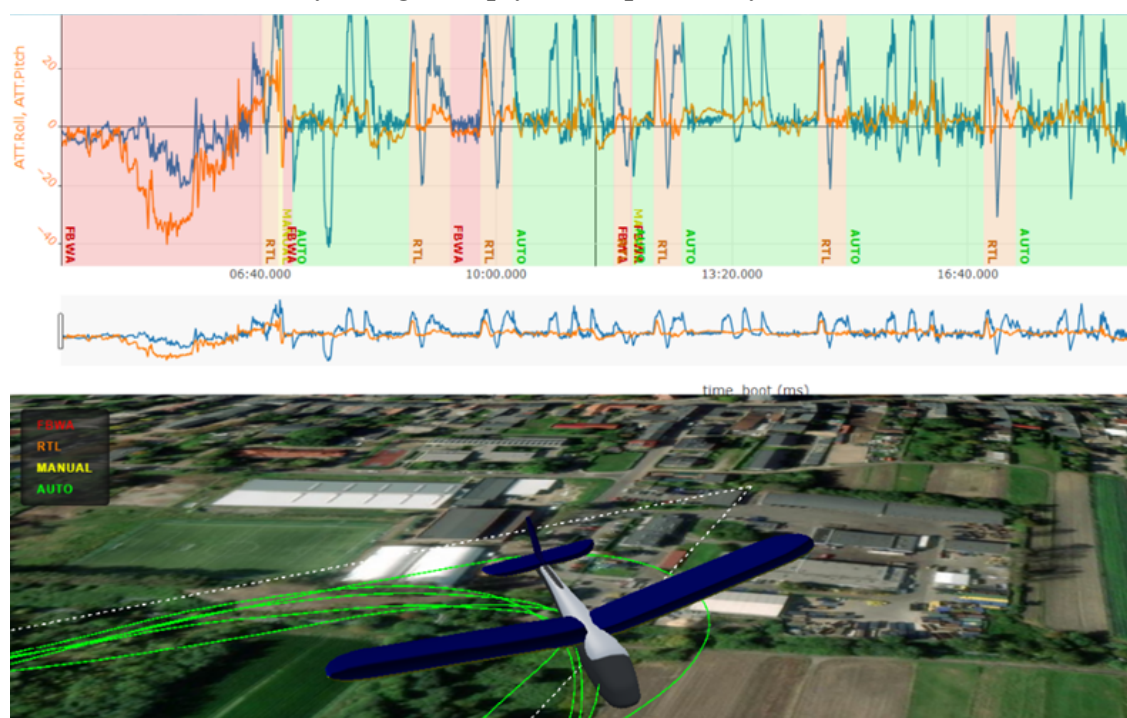
Wielokrotne i systematyczne testy lotów próbnych przeprowadzono zgodnie z opracowanymi scenariuszami. W trakcie lotu pilot miał ciągły podgląd obrazu w trybie *First-Person-View* (FPV) (Rys. 5.13), wspomagany przez liczne informacje telemetryczne.



Rys. 5.13 Widok z kamery FPV zamontowanej na dronie

## Analiza danych telemetrycznych, modyfikacje i strojenie

Zebrano logi z przelotów, czyli dane telemetryczne, które były następnie poddane szczegółowej analizie w aplikacji UAV Log Viewer (Rys. 5.14). Analiza ta miała na celu weryfikację zachowania BSP w locie oraz identyfikację ewentualnych problemów lub koniecznych modyfikacji. Przeprowadzono modyfikacje BSP (wyważenie, położenia powierzchni sterowych) oraz strojenie układu sterowania, aby osiągnąć optymalne parametry lotu i zachowanie BSP.



Rys. 5.14 Analiza danych telemetrycznych w aplikacji UAV Log Viewer (przebiegi kąta pochylenia i kąta pochylenia BSP) [plot.ardupilot.org]

## 5.6. Osiągnięte wyniki i kamienie milowe

W ramach projektu założono osiągnięcie wyników i kamieni milowych, które były kluczowe dla sukcesu projektu. Poniżej zawarto opis działań prowadzących do tych oczekiwanych wyników i kamieni milowych.

### Osiągnięte wyniki projektu

1. Projekt BSP obejmujący układy mechaniczny, sterowania, zasilania, komunikacji:
  - Działania: Zespół projektowy rozpoczął swoje prace od analizy wymagań i przeglądu dostępnych rozwiązań. Następnie zaprojektowano układy mechaniczny, sterowania, zasilania i komunikacji.
  - Metody: Projektowanie zrealizowano w oprogramowaniu CAD do tworzenia modeli 3D oraz na projekcie (schematów elektryczny) układów sterowania, zasilania i komunikacji.
2. Wykonane i zakupione komponenty BSP:
  - Działania: Zespół dokonał wyboru odpowiednich komponentów do BSP, w tym silników, sterowników, akumulatorów, serwomechanizmów itp. Konieczne było również dokonanie zakupu tych komponentów.
  - Metody: Wybór komponentów opierał się na analizie dokumentacji technicznej, parametrach tych komponentów oraz ich dostępności na rynku.
3. Zintegrowany BSP (Rys. 5.15):
  - Działania: Po zakupie i dostarczeniu komponentów, zespół przystąpił do integracji wszystkich układów BSP. Obejmowało to połączenia elektryczne, mechaniczne montowanie elementów oraz programowanie układu sterowania.
  - Metody: Integracja opierała się na dokładnych planach, schematach elektrycznych oraz testach połączeń.



Rys. 5.16 Zintegrowany BSP

4. Testy stanowiskowe i próby w locie (Rys. 5.16):

- Działania: Po zintegrowaniu BSP, zespół przeprowadził testy stanowiskowe, w ramach których sprawdzano działanie każdego komponentu i układu osobno. Następnie przystąpiono do testów w locie, w których oceniano zachowanie statku w powietrzu.
- Metody: Testy stanowiskowe i próby w locie były prowadzone zgodnie z wcześniej przygotowanymi scenariuszami i protokołami. Dane telemetryczne były zbierane i analizowane.



Rys. 5.16 Próby BSP w locie

### Osiągnięte Kamienie Milowe projektu

1. Prototyp BSP zaprojektowany i zintegrowany tak, aby był wyważony statycznie – osiągnięto:
  - Działania: Wszystkie komponenty BSP zostały zintegrowane zgodnie z projektem, a statek został właściwie wyważony.
2. Ciąg układu napędowego na poziomie min. 70-80% MTOM BSP umożliwiający start z ręki – osiągnięto:
  - Działania: Dobrano silniki oraz sterowniki tak, aby uzyskać niezbędny ciąg do startu z ręki. MTOM BSP wynosi 1400 [g], natomiast ciąg osiągniany przez układy napędowe wynosi 1374 [g], co stanowi prawie 100% MTOM.
3. Zaliczone pozytywnie wszystkie próby stanowiskowe – osiągnięto:
  - Działania: Przeprowadzono testy stanowiskowe dla każdego układu BSP w celu upewnienia się, że działają one zgodnie z oczekiwaniami. Próby obejmowały: odpowiedzi powierzchni sterowych oraz układów napędowych na wychylenia drążków aparatury (kierunek wychylenia/obrotów oraz ich proporcjonalność do

wychylenia drążków), wyważenie statyczne BSP, pomiar maksymalnych prądów, transmisja obrazu, próba ciągu maksymalnego.

4. Pozytywnie zakończone loty próbne prototypu BSP (możliwość startu z ręki, zasięg komunikacji min. 500 [m], możliwość lotu do wysokości AGL 120 [m], działająca funkcja RTH) – osiągnięto:
  - Działania: Przeprowadzenie wielu lotów próbnych zgodnie z przygotowanymi scenariuszami, z analizą danych telemetrycznych w celu potwierdzenia spełnienia wszystkich założeń projektowych. Zasięg komunikacji w terenie otwartym wynosi ok. 1000 [m], BSP umożliwia wykonywanie lotów do wysokości 120[m] AGL, a nawet wyżej.

## 5.7. Podsumowanie

Osiągnięcie ww. kamieni milowych wymagało starannego planowania prac, projektowania, integracji i testowania komponentów BSP. Pozytywne osiągnięcie tych wyników stanowiło kluczowy krok w udanej realizacji projektu prototypu bezzałogowego statku powietrznego. W przedstawionej konfiguracji BSP możliwe jest monitorowanie obszarów w odległości do 1km od operatora, co spełnia wymagania kategorii otwartej (rozporządzenie 2019/947/UE [4]). Wykonywanie lotów na większe odległości wymaga wymiany układu komunikacji RC (nadajnik-odbiornik) na np. RFDesign lub ELRS oraz wykonywania lotów w kategorii szczególnej.

## BIBLIOGRAFIA

1. Strona producenta BSP: <https://www.finwinghobby.com/> [Data uzyskania dostępu: 14.02.2024]
2. Dokumentacja oprogramowania ArduPlane <https://ardupilot.org/plane/> [Data uzyskania dostępu: 14.02.2024]
3. Narzędzia do doboru parametrów układów napędowych BSP wraz dokumentacją: <https://rcplanes.online/> [Data uzyskania dostępu: 14.02.2024]
4. Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R0947-20200606&from=PL> [Data uzyskania dostępu: 14.02.2024]



# Rozdział 6

## **BADANIA PORÓWNAWCZE GŁĘBOKICH SIECI NEURONOWYCH W ZADANIU KLASYFIKACJI USZKODZEŃ WYBRANEGO UKŁADU AUTOMATYKI**

Stanisławski J.<sup>1</sup>, Stasiuk F.<sup>2</sup>, Przystałka P.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Silesian Phoenix

<sup>3</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

### **6.1. Wstęp**

Uczenie maszynowe w dobie Przemysłu 4.0 stanowi bardzo ważne narzędzie w diagnozowaniu procesów przemysłowych, w szczególności w przypadku zadania detekcji, izolacji i identyfikacji uszkodzeń. Spośród różnych metod uczenia maszynowego, które z powodzeniem stosowane są do rozwoju systemów diagnostycznych, ważną rolę odgrywają głębokie sieci neuronowe. Sieci tego typu umożliwiają analizę danych na wielu poziomach abstrakcji, co pozwala na wykrywanie nawet subtelnych wzorców w dużych zbiorach danych. Dzięki temu stanowią przydatne narzędzie do identyfikacji anomalii, wykrywania uszkodzeń, czy też przewidywania potencjalnych problemów w procesach przemysłowych. Ich zastosowanie obejmuje szeroki zakres dziedzin przemysłu, począwszy od monitorowania maszyn w fabrykach po diagnostykę procesów produkcyjnych. Głębokie sieci neuronowe stosowane są do analizy strumieni danych z czujników, co umożliwia wykrywanie niestabilności, uszkodzeń czy awarii w maszynach i urządzeniach. Skuteczność głębokich sieci neuronowych w diagnostyce procesów przemysłowych jest uzależniona od jakości danych, na których są uczone, od właściwej architektury sieci oraz od trafności interpretacji wyników. Niezbędna jest odpowiednia obróbka danych, odpowiedni dobór parametrów sieci oraz ciągłe monitorowanie i dostosowywanie modeli.

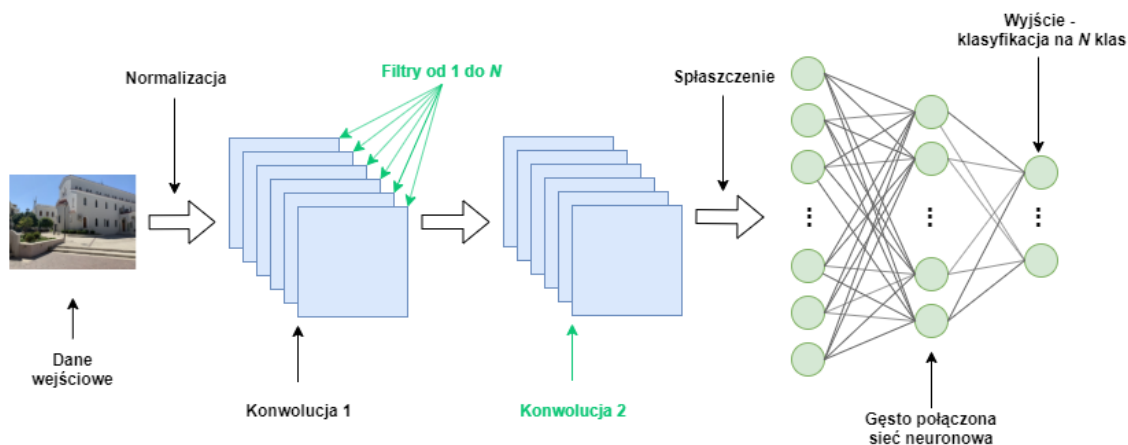
Głębokie sieci neuronowe są obiecującym narzędziem w diagnostyce procesów przemysłowych, umożliwiając szybką identyfikację uszkodzeń, prognozowanie awarii i optymalizację działania systemów przemysłowych, jednakże ich skuteczność wymaga starannego przygotowania danych oraz odpowiedniego dostosowania architektury sieci do konkretnych potrzeb

przemysłowych. W niniejszym rozdziale przedstawiono badania porównawcze wybranych architektur głębokich sieci neuronowych w zadaniu klasyfikacji uszkodzeń wybranego układu automatyki.

## 6.2. Splotowe sieci neuronowe

Splotowe sieci neuronowe znane również jako konwolucyjne sieci neuronowe (ang. Convolutional Neural Network - CNN) wykorzystywane są głównie do problemów klasyfikacji oraz predykcji. Głównym elementem tych sieci jest warstwa konwolucyjna. Konwolucją nazywane jest przekształcenie macierzowe fragmentów zdjęcia mające na celu wydobywanie konkretnych informacji o cechach obrazu. Filtr używany do takiego przekształcenia w konwolucyjnej sieci neuronowej nazywany jest jądrem. Sprawia, że utworzona macierz przemnaża informacje o pikselach na zdjęciu i zwraca wynik z zastosowanym filtrem. Każdy taki filtr ma na celu pozyskanie części informacji o cechach zdjęcia takich jak krawędzie, kształty, kolory oraz wiele innych. Konwolucyjne sieci neuronowe składają się z następujących warstw [1]:

- Warstwa wejściowa (Input Layer): zawiera informacje o danych wejściowych reprezentowanych za pomocą dwuwymiarowej macierzy.
- Warstw konwolucyjnych (Convolutional Layers): warstwy te posiadają wbudowane filtry, za pomocą których wyodrębniane są poszczególne cechy w obrazach. Filtry te dobrane są w taki sposób, aby minimalizować błąd w procesie uczenia. W takich warstwach definiowany jest rozmiar filtra.
- Pooling Layers: warstwa ta odrzuca zbędne informacje wejściowe co skutkuje zmniejszeniem rozmiaru danych wejściowych oraz zmniejsza liczbę parametrów uczenia co skraca czas odpowiedzi systemu.
- Dropout Layer: celem tej warstwy jest spowolnienie procesu uczenia aby nie nastąpiło zbyt szybkie przeuczenie sieci. W tym celu eliminowana jest liczba węzłów.
- Warstwa spłaszczająca (Flatten Layer): aby przeprowadzić proces klasyfikacji/predykcji warstwa ta przekształca dwuwymiarowy obiekt w jednowymiarowy wektor.
- Warstwy gęste (Dense Layers): ostatnie warstwy posiadające liczbę neuronów równą liczbie sygnałów, które sieć ma zwracać.



Rys 6.1 Schemat budowy konwolucyjnej sieci neuronowej do zadania klasyfikacji [2]

### 6.3. Rekurencyjne sieci neuronowe

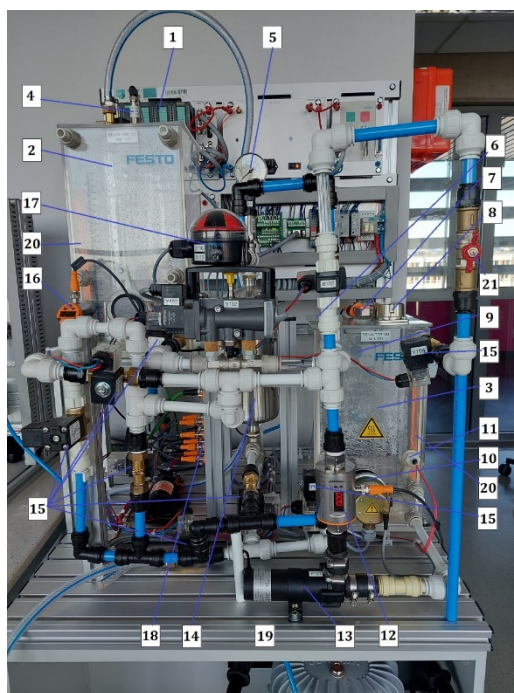
Sieci rekurencyjne (ang. Recurrent Neural Networks – RNN) to rodzaj architektury sieci neuronowej, która uwzględnia poprzednie kroki czasowe w procesie decyzyjnym. Komórki w ramach RNN są zazwyczaj projektowane w taki sposób, aby pamiętały atrybuty wejściowe z poprzednich etapów, co implikuje obecność cech komórki pamięci. Sieci LSTM (ang. Long Short-Term Memory) reprezentują istotną ewolucję koncepcji RNN, umożliwiając naukę zarówno krótkoterminowych, jak i długoterminowych zależności. Powstały one w odpowiedzi na wyzwania związane z trudnościami w przechwytywaniu długoterminowych relacji przez tradycyjne RNN. Szkolenie sieci LSTM odbywa się przy użyciu algorytmu wstecznej propagacji w czasie, co eliminuje problem zanikającego gradientu, który jest powszechnym wyzwaniem w przypadku długich sekwencji czasowych. Kluczową cechą sieci LSTM są bloki pamięci, zastępujące tradycyjne neurony i są one skutecznie zarządzane przez bramki logiczne. Bramka wejściowa w ramach sieci LSTM pełni kluczową rolę w określaniu, jakie wartości wejściowe komórki pamięci należy zaktualizować, uwzględniając konkretne warunki. Bramka wyjściowa natomiast odpowiada za generowanie danych wyjściowych w oparciu o bieżące wejście i informacje z komórki pamięci, również podlegając określonym warunkom. Blok zapominający, trzeci istotny element, umożliwia usuwanie informacji z bloku pamięci zgodnie z wcześniej zdefiniowanymi warunkami.

Należy zaznaczyć, że kluczową przewagą sieci LSTM nad tradycyjnymi RNN jest ich zdolność do przechwytywania długoterminowych zależności. Kluczowym elementem jednostki LSTM jest komórka główna, pełniąca funkcję jednostki pamięci. Proces działania LSTM polega na sumowaniu danych wejściowych pochodzących z różnych źródeł. Bramki są aktywowane poprzez wprowadzenie parametrów wejściowych do funkcji logistycznej. Atrybuty wejściowe przechodzą przez nieliniową funkcję aktywacji. W praktyce, LSTM mnoży wynikową

aktywację przez aktywowaną bramkę wejściową, a następnie mnoży komórkę główną przez bramkę zapominającą, a otrzymane wyniki są zapisywane do komórki głównej. Kolejnym krokiem jest przekazanie zaktualizowanego stanu komórki przez aktywator, a następnie pomnożenie jej przez aktywację bramki wyjściowej. W rezultacie uzyskujemy atrybuty wyjścia. To umożliwia efektywne modelowanie zjawisk, które obejmują szeroki zakres sekwencji czasowych, takich jak analiza tekstu, prognozowanie szeregów czasowych czy generowanie dialogów. W miarę postępu w dziedzinie uczenia maszynowego, sieci LSTM stanowią niezwykle ważne narzędzie, które znajduje zastosowanie w różnorodnych dziedzinach, od przetwarzania języka naturalnego po rozpoznawanie obrazów. Mimo tych zalet, sieci LSTM nie są pozbawione wad. W przypadku bardzo długich sekwencji, mogą nadal napotykać problemy związane z pamięcią długoterminową. Dodatkowo, zastosowanie sieci LSTM wymaga precyzyjnego doboru hiperparametrów i odpowiedniego przygotowania danych [3,4,5].

### 6.3. Obiekt badań

Stanowisko laboratoryjne, na którym przeprowadzone zostały badania to układ hydrotroniczny wykonujący symulowany przemysłowy proces regulacji parametrów cieczy (m.in. temperatury cieczy, przepływu cieczy, poziomu cieczy w zbiorniku oraz ciśnienia cieczy). Zdjęcie aktualnego stanowiska przedstawiono na rys. 6.2.



Rys 6.2 Stanowisko laboratoryjne z zaznaczonymi elementami stanowiska

Stanowisko badawcze oparte jest na zaawansowanej automatyce, która umożliwia precyzyjne monitorowanie oraz sterowanie różnorodnymi parametrami w środowisku przemysłowym. Sensory oraz elementy kontrolne tworzą zintegrowane środowisko do monitorowania i sterowania procesem przepływu medium roboczego. Poniżej opisano najważniejsze elementy stanowiska laboratoryjnego zgodnie z numeracją na rys. 6.2: 1. Siemens S7-300 (rys. 3.15) – sterownik PLC model CPU314C-2 PN/DP; 2. Zbiornik cieczy – zbiornik górny o oznaczeniu B102; 3. Zbiornik cieczy – zbiornik dolny o oznaczeniu B101; 4. Czujnik ultradźwiękowy B102 – odpowiada za pomiar poziomu w zbiorniku B102; 5. Piezo rezystywny czujnik ciśnienia – odpowiada za pomiar ciśnienia w zbiorniku B103; 6. Przełącznik przepływowy S111- zamontowany w zbiorniku B101, odpowiada za zabezpieczenie przed przekroczeniem maksymalnego poziomu cieczy w zbiorniku; 7. IFM UGT580 - czujnik ultradźwiękowy, umożliwia pomiar poziomu cieczy w zbiorniku B101; 8. IFM JN2200 – Czujnik nachylenia pokrywy cieczy w zbiorniku B101; 9. Czujniki pojemnościowe B113 i B114 - dwie sztuki tego typu czujnika zostały zamontowane w zbiorniku B101. Są odpowiedzialne za pomiar dolnego i górnego poziomu cieczy; 10. Grzałka E104 - zamontowana w zbiorniku B101; 11. Pływak dający sygnał binarny w zbiorniku B101; 12. Przepływomierz elektromagnetyczny SM6400; 13. Pompa wirowa; 14. Zbiornik wyrównawczy ciśnienia B103; 15. Elektrozawory – zawory mosiężne i membranowe; 16. IFM TN2435 – czujnik temperatury Pt1000 z wyświetlaczem; 17. Zespół zaworu kulowego V102 oraz przełączniki pływakowe S112 i S117; 18. IFM AL1302- jest to urządzenie typu master, odpowiedzialne za obsługę systemu czujników działających w standardzie IO-Link; 19. Czujnik temperatury P101 - rezystancyjny czujnik Pt100; 20. Elektroniczne czujniki poziomu cieczy KQ1000 w standardzie IO-link; 21. Zawór kulowy ręczny. Stany funkcjonalne i stany techniczne stanowiska

Podczas badań stanowisko pracuje wyłącznie w trybie automatycznym, pomimo że posiada również możliwość pracy w trybie ręcznym. Jeden cykl stanowiska składa się z 9 stanów funkcjonalnych:

- Pierwszy stan funkcjonalny: Stan osiągnięty przed rozpoczęciem cyklu. Ustawia wszystkie wartości początkowe procesu.
- Drugi stan funkcjonalny (czas trwania: 30 s): Stan realizujący automatyczną regulację ciśnienia utrzymując je na zadanym poziomie w zbiorniku B103.
- Trzeci stan funkcjonalny (czas trwania: 20 s): Stan realizujący automatyczną regulację przepływu z dolnego wyjścia zbiornika B101 do jego górnego wejścia. W procesie wykorzystywany jest regulator PID.
- Czwarty stan funkcjonalny (czas trwania: 30 s) Stan realizujący automatyczną regulację poziomu medium utrzymując ją na poziomie 90 mm słupa cieczy w zbiorniku B102.
- Piąty stan funkcjonalny (czas trwania: 15 s): Stan ten obejmuje wyrównanie ciśnienia w zbiorniku B103 z ciśnieniem atmosferycznym. W tym czasie pompa jest wyłączona, a zawór V107 zostaje otwarty.

- Szósty stan funkcjonalny (czas trwania: 30 s): Stan ten charakteryzuje się przepompowywaniem cieczy ze zbiornika B102 do zbiornika B101. W trakcie tego procesu otwarte są zawory V102 i V112. Po upływie 30 sekund następuje zamknięcie tych zaworów.
- Siódmy stan funkcjonalny (czas trwania: 30 s): Ten stan obejmuje automatyczną regulację ciśnienia w zbiorniku B103, wykorzystując regulator PID. W trakcie tego procesu otwarte są zawory V108 oraz V106. Po upływie 30 sekund następuje zamknięcie tych zaworów.
- Ósmy stan funkcjonalny (czas trwania: 20 s): Stan ten realizuje automatyczną regulację przepływu z dolnego wyjścia zbiornika B101 do zbiornika B102. Wartość zadana przepływu wynosi 1L/min. W trakcie pierwszych 10 sekund otwarty jest zawór V101, a po upływie tego czasu otwierają się zawory V103 i V108. Po upływie 20 sekund następuje zamknięcie wszystkich zaworów oraz wyłączenie automatycznej regulacji przepływu.
- Dziewiąty stan funkcjonalny: Stan ten obejmuje wyrównanie ciśnienia w zbiorniku B103 z ciśnieniem atmosferycznym oraz przelaniem cieczy ze zbiornika B102 do zbiornika B101. W tym przypadku pompa jest wyłączona, a otwarte są zawory V102, V112 i V107. Po powrocie poziomu cieczy w zbiorniku B102 do stanu początkowego następuje zamknięcie wszystkich zaworów.

Liczba sygnałów i zmiennych na stanowisku badawczym wymusiła konieczność przeprowadzenia analizy zebranych danych w celu identyfikacji kluczowych zmiennych procesowych. Przeprowadzono szczegółową analizę funkcjonowania stanowiska, na podstawie której dokonano selekcji najważniejszych zmiennych procesowych. Kolejny etap selekcji danych opierał się na analizie, które zmienne pozwalają na precyzyjne określenie różnych stanów technicznych stanowiska. Szczegółowe parametry zostały przeanalizowane i przedstawione w Tabeli 6.1. W rezultacie zachowano jedynie dane niezbędne do przeprowadzenia dalszych badań.

Zmienne od 1 do 9 przedstawione w tabeli 6.1 reprezentują odczyty stanów elektrozaworów na stanowisku. Zmienna „State” zawiera informacje o aktualnym stanie funkcjonalnym stanowiska. Odczyty zmiennych 11 i 26 odnoszą się do pomiarów poziomu cieczy w zbiorniku B102. Dane oznaczone jako „Pressure\_tank103” przedstawiają odczyt z czujnika ciśnienia w zbiorniku B103. Dodatkowo, zmienne 13 i 14 przekazują informacje o osiągnięciu maksymalnego lub minimalnego poziomu cieczy w zbiorniku B101. Odczyt z przepływomierza zawarty jest w zmiennej „Flowmeter”, a parametr „Pump\_speed” odnosi się do wydajności działania pompy, są kluczowe dla monitorowania procesu. Zmienna „Estop” jest wskaźnikiem awaryjnego zatrzymania stanowiska, informując o nagłej potrzebie przerwania działania. Dane od 18 do 22 dostarczają informacje na temat ogólnego stanu technicznego stanowiska, natomiast „Work” rejestruje informacje dotyczące aktualnej pracy stanowiska. Następnie, zmienne procesowe od 24 do 26 zawierają zadane wartości kolejno dla poziomu cieczy w zbiorniku B102, ciśnienia w zbiorniku B103 i przepływu cieczy. Ostatnia zmienna,

„Cycle\_counter”, przechowuje informacje o liczbie wykonanych cykli przez stanowisko.

Tabela 6.1 Zmienne procesowe odczytywane z sterownika PLC S7-1200

| Id  | Nazwa zmiennej            | Typ  |
|-----|---------------------------|------|
| 1.  | V101                      | Bool |
| 2.  | V102                      | Bool |
| 3.  | V103                      | Bool |
| 4.  | V104                      | Bool |
| 5.  | V106                      | Bool |
| 6.  | V107                      | Bool |
| 7.  | V108                      | Bool |
| 8.  | V109                      | Bool |
| 9.  | V112                      | Bool |
| 10. | State                     | Int  |
| 11. | Fluid level tank102       | Real |
| 12. | Pressure tank103          | Real |
| 13. | Fluid lvl MIN tank101     | Bool |
| 14. | Fluid lvl MAX tank102     | Bool |
| 15. | Flowmeter                 | Real |
| 16. | Pump speed                | Real |
| 17. | Estop                     | Bool |
| 18. | Failure F1                | Bool |
| 19. | Failure F2                | Bool |
| 20. | Failure F3                | Bool |
| 21. | Failure F4                | Bool |
| 22. | Failure F5                | Bool |
| 23. | Work                      | Bool |
| 24. | Tank102 set               | Real |
| 25. | Pressure set              | Real |
| 26. | Flow set                  | Real |
| 27. | Fluid lvl tank102 IO link | Int  |
| 28. | Fluid lvl tank101 IO link | Int  |
| 29. | V102 bool                 | Bool |
| 30. | Cycle counter             | Int  |

### 6.3. Czynny eksperyment diagnostyczny

W celu trenowania utworzonych sieci neuronowych należało zebrać dane pomiarowe ze stanowiska laboratoryjnego. Dane zebrano z automatycznego trybu pracy stanowiska. W trybie automatycznym stanowisko ma na celu przejście przez dziewięć stanów funkcjonalnych. W tym czasie symulowano pięć stanów technicznych pracy:

- Stan techniczny F0 – jest stanem pełnej zdolności stanowiska laboratoryjnego, w którym nie występuje żadne uszkodzenie i wszystkie stany funkcjonalne wykonywane są prawidłowo. Wszystkie wartości zmiennych w sterowniku zostają przywrócone do prawidłowych.

- Stan techniczny F1 – w tym stanie jest symulowane uszkodzenie polegające na zbieraniu się kożucha w zbiorniku B102. Uszkodzenie to symulowane jest fizycznie na stanowisku za pomocą oszukania czujnika ultradźwiękowego pomiaru wysokości cieczy w zbiorniku wyciętą drewnianą płytką podpartą śrubą. Sprawia to, że czujnik ten przedstawia błędną wartość poziomu cieczy. W sytuacji, gdy zbiornik B102 jest napełniany cieczą, lub opróżniany czujnik ten przedstawia stałą wartość. Na obiekcie w skali przemysłowej uszkodzenie tego typu może powodować szereg problemów takich jak złe dawkowanie danego preparatu, co może sprawić, że wyprodukowany produkt będzie złej jakości i spowoduje duże straty finansowe dla firmy.
- Stan techniczny F2 – w danym stanie symulowane jest uszkodzenie wycieku cieczy ze zbiornika B102. Symulowane jest za pomocą otwarcia zaworów za pomocą linii kodu w programie TIA Portal. Otwarcie zaworów sprawia, że poziom cieczy stale opada co sprawia, że w sytuacji napełniania zbiornika pompa musi ciągle działać, aby utrzymać zadany poziom cieczy, oraz poziom cieczy w niektórych stanach jest za niski. Takie uszkodzenie w przemyśle może wygenerować duże straty finansowe, ze względu na tracenie cennego produktu. Natomiast jeśli produkt jest niebezpieczny dla zdrowia to taka sytuacja może spowodować niebezpieczeństwo dla środowiska lub pracowników.
- Stan techniczny F3 – to symulowany cyberatak. Wywoływany jest on za pomocą aplikacji napisanej w języku C# z wykorzystaniem biblioteki Snap7. Program ten powoduje nadpisanie wartości nastaw regulatora PID obsługującego pracę pompy, co sprawia, że w stanach, w których utrzymywane jest ciśnienie w zbiorniku B103, następuje przeregulowanie, przez co ciśnienie oscyluje wokół zdanego poziomu oraz osiąga niepoprawny zadany poziom. Takie uszkodzenie ma na celu spowodowanie jak największych strat na stanowisku. Przez rozregulowaną pracę pompy, działa ona niestabilnie co może powodować jej uszkodzenie oraz generuje złe warunki potrzebne do wyprodukowania produktu co generuje straty finansowe. Uszkodzenie to występuje tylko w stanie funkcjonalnym trzecim oraz siódmym, kiedy do zbiornika ciśnienia pompowana jest ciecz.
- Stan techniczny F4 – w tym stanie symulowane jest uszkodzenie przytkania rur. Uszkodzenie to jest narastające. Symulowane jest za pomocą zaworu kulowego znajdującego się na stanowisku. Dane z tego uszkodzenia zbierane były z przypadku, gdy zawór był przykręcany od 20% do 80% z przyrostem co pełen cykl o 20%. Przykręcenie tego zaworu sprawia, że w stanie regulacji przepływu pompa nie potrafi osiągnąć zadanego przepływu oraz pracuje z maksymalną mocą. Takie uszkodzenie może powodować straty na produkcji poprzez złe dawkowanie produktu oraz działanie pompy na maksymalnej mocy przez dłuższy okres czasu może spowodować jej uszkodzenie. To uszkodzenie występuje tylko w trzecim stanie funkcjonalnym, kiedy na stanowisku odbywa się kontrola przepływu cieczy.



Dane uczące z poszczególnych stanów technicznych zebrano do pliku o rozszerzeniu .csv. Plik ten zawierał około pięćdziesiąt tysięcy próbek danych składających się na 40 cykli stanu pełnej zdatności działania systemu oraz po 10 cykli z każdego uszkodzenia. Tak przygotowane dane podzielone zostały na zbiory: trenujące 80% oraz walidacyjne 20%.

## 6.4. Badania weryfikacyjne

Celem przeprowadzonych badań było zweryfikowanie skuteczności dwóch różnych typów sieci neuronowych: konwolucyjnej (CNN) oraz rekurencyjnej (LSTM) w porównaniu do innego podejścia z dziedziny uczenia maszynowego, jakim są drzewa decyzyjne (LightGBM). Głównym celem algorytmów było identyfikowanie różnych stanów technicznych stanowiska laboratoryjnego na podstawie aktualnych danych. W trakcie badań dobrano parametry sieci neuronowych w celu minimalizacji wskaźnika fałszywych alarmów. Proces uczenia sieci neuronowych odbywał się przy użyciu tych samych zbiorów danych uczących i walidacyjnych, co pozwoliło na sprawdzenie ich skuteczności. Wprowadzone modyfikacje miały na celu poprawę precyzji oraz skuteczności klasyfikacji, co jest kluczowe w kontekście identyfikacji stanów technicznych stanowiska laboratoryjnego.

Aby przeprowadzić weryfikację poprawności wyuczonych modeli neuronowych oraz drzew decyzyjnych skorzystano z macierzy pomyłek. Macierz pomyłek przedstawia liczbę klasyfikacji każdego stanu technicznego podczas przeprowadzania testów na danych weryfikacyjnych. W tabeli 6.2 przedstawiono dokładność wykrywania klas dla poszczególnych algorytmów.

Tabela 6.2 Dokładność wykrywania klas na podstawie macierzy pomyłek.

|         | LSTM       | CNN        | LightGBM   |
|---------|------------|------------|------------|
|         | Dokładność | Dokładność | Dokładność |
| Klasa 0 | 98.74 %    | 98.70 %    | 99.63 %    |
| Klasa 1 | 99.47 %    | 99.49 %    | 99.49 %    |
| Klasa 2 | 77.20 %    | 80.83 %    | 93.01 %    |
| Klasa 3 | 87.66 %    | 87.14 %    | 97.92 %    |
| Klasa 4 | 93.69 %    | 90.91 %    | 98.18 %    |

Na podstawie macierzy pomyłek zauważyć można, że najdokładniejsze wyniki klasyfikacji osiągnął algorytm drzew decyzyjnych. Sieci neuronowe LSTM oraz CNN osiągają bardzo podobną dokładność. Klasa druga we wszystkich przypadkach osiąga najniższą dokładność klasyfikacji, natomiast klasa pierwsza osiąga największą dokładność.

W celu potwierdzenia dokładności wykrywania klas przez utworzone algorytmy należało przeprowadzić testy weryfikacyjne na danych pobieranych z aktualnego czasu pracy stanowiska laboratoryjnego. Testy te zostały przeprowadzone przy użyciu platformy NAZCA 4.0 udostępnionej przez firmę APA Group. W pierwszym etapie procesu, utworzony algorytm drzew decyzyjnych oraz modele sieci neuronowych zostały zapisane do pliku o rozszerzeniu .h5, a następnie załadowane do systemu NAZCA. W celu przeprowadzenia testów, skorzystano z oprogramowania Jupyter Lab, które jest bezpośrednio zintegrowane z systemem NAZCA. Utworzono program do realizacji testów weryfikacyjnych, który był w stanie komunikować się z sterownikiem PLC, pobierając aktualne dane z pracy stanowiska laboratoryjnego.

Podczas testów, program pobierał dane z jednego pełnego cyklu pracy stanowiska, a następnie przekształcał je do formatu "dataframe", ograniczając liczbę wierszy do 255. Na podstawie tych danych identyfikowano zależności między sygnałami, odrzucając jednocześnie dane, które nie miały wpływu na proces trenowania sieci neuronowych. Ostatecznie program uruchamiał wcześniej utworzony model, a następnie zliczał wykrycia klas stanów technicznych. W kontekście klasyfikacji każdego wektora danych przez sieć neuronową, oznaczało to uzyskanie 255 wyników klasyfikacyjnych.

W celu określenia wystąpienia konkretnej klasy oraz minimalizacji liczby błędnych wykryć uszkodzeń, zastosowano proces post-processing. Ta dodatkowa faza analizy danych pozwalała na dokładniejsze określenie przynależności do poszczególnych klas stanów technicznych oraz eliminację potencjalnych fałszywych wykryć. W ten sposób, proces testów weryfikacyjnych nie tylko obejmował samo wykonanie klasyfikacji przez sieć neuronową, ale również uwzględniał zaawansowane techniki analizy danych mające na celu poprawę precyzji wyników. Po przeprowadzeniu testów weryfikacyjnych porównano dokładność klasyfikacji sieci neuronowych oraz drzew decyzyjnych.

Analiza wyników wykazała, że algorytm drzew decyzyjnych (LightGBM) przy opracowywanym problemie najlepiej sobie poradził w procesie klasyfikacji stanów technicznych. Wyniki były porównywalne z wynikami osiągniętymi za pomocą metody macierzy pomyłek. Algorytm ten osiągnął największą liczbę poprawnej klasyfikacji oraz wyniki były bardzo podobne w różnych seriach testowych, co pozwala na łatwiejsze dostrojenie wykrycia klasy w post processing'u.

Badania weryfikacyjne nad rekurencyjną siecią neuronową typu LSTM, przeszkoloną do rozpoznawania pięciu różnych stanów technicznych, ukazują jej znaczną efektywność w wykrywaniu stanu technicznego F0. Podczas przeprowadzonych testów nie zanotowano żadnych fałszywych alarmów, a system prezentował poprawne działanie stanowiska. Wysoka skuteczność została odnotowana w przypadku wykrywania uszkodzenia pierwszego, gdzie sieć skutecznie identyfikowała jego wystąpienie, nie generując fałszywych sygnałów dla innych rodzajów uszkodzeń ani stanu pełnej zdadności w obecności tego uszkodzenia. Warto również podkreślić, że informacja o nieprawidłowości pojawiała się z pewnym opóźnieniem. Podczas symulacji wycieku, sieć

rekurencyjna poprawnie nie wykrywała innych stanów. W przypadku trzeciego rodzaju uszkodzenia, sieć osiągnęła wysoką dokładność klasyfikacji, jednak pojawiły się pewne przypadki błędnego wykrywania stanu lub jego braku. Szczególnie interesujące jest, że zatkanie rury było skutecznie rozpoznawane dopiero po osiągnięciu około 50% stopnia zatkania.

Mniej korzystne wyniki osiągnęła sieć neuronowa CNN. Macierz pomyłek wykazywała wysoką dokładność wykrywania poszczególnych klas, natomiast w testach realizowanych na danych pobieranych podczas pracy stanowiska testy wykazały, że program źle klasyfikuje stany techniczne. Podczas stanu technicznego F0 system wykazywał wiele fałszywych alarmów. Stan F1 posiadał największą liczbę fałszywych wykryć, co powodowało problem przy dostrajaniu funkcji post processingu. Stany techniczne F2 oraz F3 wykrywane były z niską skutecznością, oraz program generował wiele fałszywych wykryć stanu F1. System wykazywał brak rozróżnienia stanu technicznego F4.

## 6.4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że sieci neuronowe CNN i LSTM wykazały różnice w skuteczności w identyfikacji stanów technicznych wybranego układu automatyki. Pomimo wysokiej dokładności osiągniętej podczas trenowania i testowania, sieć CNN okazała się mniej skuteczna w praktycznym zastosowaniu, generując wiele fałszywych alarmów, zwłaszcza podczas bardziej złożonych stanów technicznych. Sieć LSTM wykazała się dużą skutecznością w identyfikacji konkretnego stanu technicznego F0, jednak jej ograniczenia w rozpoznawaniu innych stanów technicznych mogą stanowić wyzwanie w środowisku przemysłowym. W porównaniu do sieci neuronowych, algorytm drzew decyzyjnych LightGBM wypadł najlepiej, osiągając największą dokładność w identyfikacji różnych stanów technicznych, co sugeruje jego potencjał do zastosowania w praktyce przemysłowej.

## BIBLIOGRAFIA

1. Saad Albawi, Tareq Abed Mohammed, Saad Al.-Zawi. Understanding of a Convolutional Neural Network, Turcja, 2017.
2. <https://aigeekprogrammer.com/pl/konwolucyjne-sieci-neuronowe-klasyfikacja-obrazow-czesc-2/> (dostęp 16.12.2022)

3. Tadeusz R, Szaleniec M. Leksykon sieci neuronowych, Fundacja „Projekt Nauka”, Wrocław 2015.
4. Géron A. Uczenie maszynowe z użyciem Scikit-Learn i Tensorflow, Helion, 2017.
5. Abdel-Nasser M, Mahmoud K. Accurate photovoltaic power forecasting models using deep LSTM-RNN. Neural Comput & Applic.

# Rozdział 7

## **RZEP\_CHECK - POMOC LOGOPEDYCZNA WSPOMAGAJĄCA ZDOLNOŚCI MOTORYCZNE ORAZ FONETYCZNE DZIECKA**

Wilk K.<sup>1</sup>, Kramarz M.<sup>2</sup>, Girek S.<sup>3</sup>, Muzalewska M.<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Integral SENSO

<sup>4</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

### **7.1. Wstęp**

W ciągu ostatniej dekady nastąpiły rewolucyjne zmiany w wykorzystaniu nowoczesnych technologii w kształceniu dzieci. Tradycyjne pomoce dydaktyczne zastępowane są substytutami wykorzystującymi nowoczesne technologie informacyjne.

W zaspokajaniu potrzeb edukacyjnych najpowszechniej wykorzystywane są komputery, ale także tablice interaktywne, interaktywne zabawki edukacyjne i wiele innych rozwiązań. Nowoczesne środki dydaktyczne używane są także w edukacji i terapii dzieci niepełnosprawnych. Jednym z największych problemów w edukacji dzieci niepełnosprawnych jest motywowanie dzieci [1,2]. Dlatego też pomoce dydaktyczne przyjmują postać zabawek, po które chętnie sięgają dzieci. Przykładem, jednym z wielu, jest interaktywna zabawka Alien Eye. Urządzenie korzysta z Cloud Technology i Internetu, dzięki czemu dziecko może dowiedzieć się wszystkiego o kulturze, ludziach, przyrodzie i zabytkach danego kraju. Urządzenie składa się z dwóch części: z Oka Aliena, czyli okularu oraz specjalnego globusa z wbudowaną technologią RFID. Jest to więc rodzaj nietypowej encyklopedii. Miglino i inni (2014) podkreślają, że technologia RFID ma duży potencjał do zwiększania atrakcyjności tradycyjnych gier i zabawek edukacyjnych ze względu na możliwość połączenia tradycyjnych przedmiotów i wysyłania sygnałów do urządzeń cyfrowych [5].

Wykorzystanie nowoczesnych technologii w procesie edukacji i terapii dzieci niepełnosprawnych doceniane jest przez samych beneficjentów tych rozwiązań, a więc przez dzieci [3]. Współczesne technologie wspomagające w edukacji umożliwiają między innymi usuwanie zaburzeń rozwojowych, rozwijanie umiejętności intelektualnych, wspomaganie rozwoju osobowościowego oraz oswojenie się z nową technologią. Wielu badaczy podkreśla, że wykorzystanie

podczas nauki interaktywnych zabawek edukacyjnych pozwala doskonalić analizę i syntezę wzrokową, spostrzegawczość i koncentrację uwagi, usprawnia zdolności manipulacyjne, koordynację wzrokowo-ruchową, a co najważniejsze pobudza i motywuje do działania dzieci zahamowane, stwarzając im tym samym szansę na pełniejszy kontakt z resztą pełnosprawnego społeczeństwa [8].

Wykorzystując technologię RFID można tworzyć atrakcyjne środowisko edukacji dzieci niepełnosprawnych. Maisura i inni (2017) opracowali aplikację bazującą na radiowej identyfikacji danych (RFID) wspomagającą naukę czytania dla dzieci w wieku od 7 do 12 lat, mających trudności w nauce czytania. Celem aplikacji jest zmotywowanie dzieci do dalszej nauki i wspomaganie w procesie dydaktycznym nauczycieli [4].

Tworzenie efektywnego sposobu nauki czytania jest tematem debat wśród wielu specjalistów logopedii dziecięcej. Jest to szczególnie ważna umiejętność, gdyż zostało wykazane, że dzieci, które wcześniej ją osiągną posiadają w przyszłości:

- mniejsze problemy z koncentracją,
- większy zasób słownictwa
- większe umiejętności dokonywania ogólnych działań umysłowych (takich jak identyfikowanie, różnicowanie, klasyfikowanie, szeregowanie i dokonywanie kategoryzacji)
- pozytywne myślenie o sobie i swoich możliwościach

Język polski jest skonstruowany w taki sposób, że wiele zagranicznych badań i sposobów (takich jak zgadywanie słów z kontekstu lub po wyglądzie) okazuje się nieskutecznych [6]. Obecnie używaną i uważaną za skuteczną metodą jest nauka, dzięki wykorzystaniu relacji litera-głoska. Sposób ten polega na rozbiciu słowa na dźwięki (głoski), a później pokazaniu w sposób graficzny, czyli za pomocą liter lub ich zbiorów [7]. Jest to jednak długotrwały sposób nauki wymagający dużego zaangażowania ze strony nauczyciela, jaki i ucznia.

Obecnie jedną z najczęściej stosowanych pomocy edukacyjnymi są takie składające się z dwóch elementów kart z rysunkami oraz takich, na których znajdują się konkretne sylaby lub litery (rys. 7.1).



Rys 7.1 Pomoce naukowe do nauki czytania drewniana tablica klocki z literkami (po prawej) tablica rzepowa (po lewej) [9]

Uczący się ma za zadanie ułożenie z kart literowych tego co znajduje się na obrazku na tablicy, stworzonej z rzepu. Pomoc ta ma jednak dużą wadę, którą jest brak informacji zwrotnej dla dziecka czy słowo zostało stworzone prawidłowo. Innym sposobem na zaangażowanie do nauki jest użycie klocków z literkami, które po prawidłowym ułożeniu dają właściwe słowo. Proces ten, więc o ile zmniejsza znużenie dziecka długą nauką, nie zmniejsza roli nauczyciela, by sprawdzał każde słowo. Pomoce papierowe są również coraz mniej efektywne, z powodu przyzwyczajenia najmłodszych do nowoczesnych technologii, co skutkuje zapotrzebowaniem na intensywniejsze bodźce.

Z pomocą w tej sytuacji przychodzi urządzenie zaprojektowane i skonstruowane w ramach współpracy Studenckiego Koła Naukowego Ai-Meth ze Specjalnym Ośrodkiem Szkolno-Wychowawczym w Dąbrowie Górniczej - Tablica RFID Rzep\_CHECK.

## **7.2. TABLICA RZEP-CHECK W PROCESIE EDUKACJI I TERAPII LOGOPEDYCZNEJ**

Rzep\_CHECK (rys. 7.2) to interaktywne urządzenie edukacyjne, które pozwala na aktywne i samodzielne uczenie się poprzez zabawę. Jego przeznaczeniem jest praca szczególnie z dziećmi.

### **Budowa i działanie**

Urządzenie zbudowane zostało na wzór tradycyjnych tablic do układania słów. Tablica Rzep\_CHECK może być wykorzystywana do nauki liter, nauki czytania, poznawania słów. Zasada jej działania jest łatwa do przyswojenia, gdyż składa się z kilku prostych kroków:

1. Użytkownik wybiera kartę RFID z rysunkiem lub wydrukiem 3D np. zwierzęcia i umieszcza ją na płycie naciskowej.
2. Po prawidłowym umieszczeniu urządzenie włącza się automatycznie i odczytuje dane z karty.
3. W kolejnym kroku podświetlona na niebiesko zostaje liczba liter w słowie, a następnie użytkownik umieszcza litery na punktach zaczepienia. Jeśli kostka z literą jest umieszczona prawidłowo - dioda pod nią zaświeca się na zielono, a jeśli źle - na czerwono. Uzupełnienie wszystkich liter w sposób prawidłowy nagradzane jest dźwiękiem.

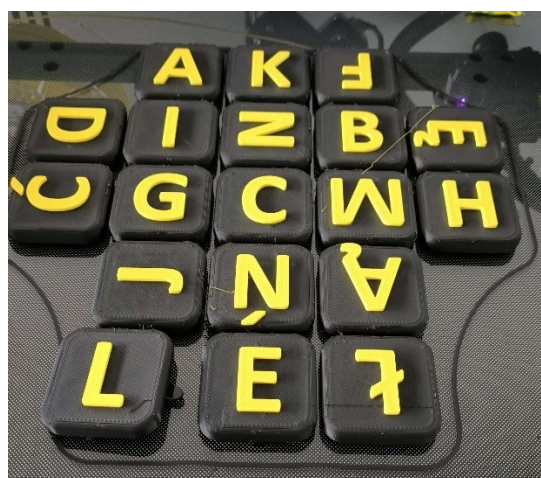


Rys 7.2 Tablica Rzep\_CHECK, jej litery oraz przykładowe obrazki zwierząt

Urządzenie zbudowane zostało w oparciu o Arduino UNO wyposażone w mikrokontroler Atmel ATmega328. Funkcję czytnika kart RFID pełni moduł RC522 pracujący w standardzie 13,56 MHz. Obsługiwane są karty MIFARE Classic, które po zaprogramowaniu przez aplikację mobilną zawierają w pierwszym sektorze pamięci hasło. Urządzenie składa się dodatkowo z rzędu kontaktów magnetycznych, które pozwalają na doczepianie odpowiednich liter w celu ułożenia danego słowa. Pod każdym z kontaktów magnetycznych znajduje się moduł LED RGB WS2812B, który dzięki porównaniu haseł na bieżąco informuje użytkownika o poprawności każdej z liter.

Obudowa urządzenia jak i kostki z literkami zostały wykonane w technologii generatywnej - druk 3D - metoda FDM (Fused Deposition Modeling). Kostki zostały przystosowane pod osoby słabowidzące, poprzez użycie par kolorów wysoko kontrastowych oraz dopasowanie wielkości liter (rys. 7.3). Na ten moment wykorzystywane są komplety w dwóch wersjach kolorystycznych:

- niebiesko – czarny,
- czarno – żółty.

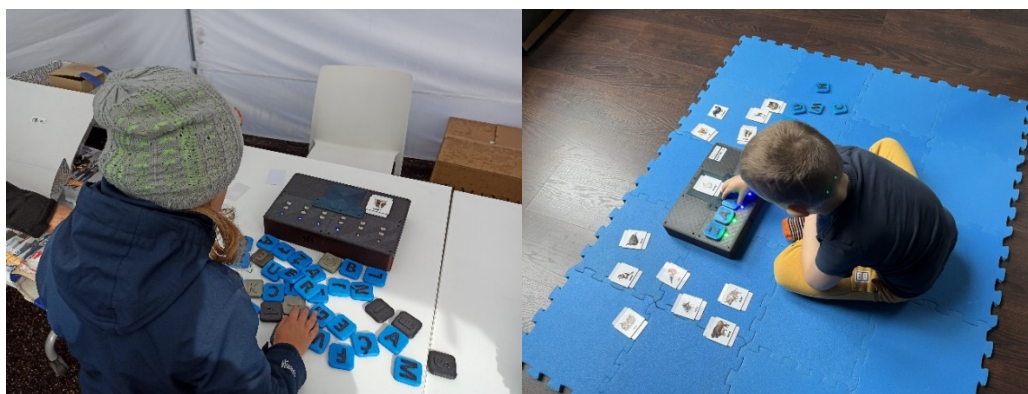


Rys 7.3 Kostki z literkami w wersji czarno-żółtej



### 7.3. Weryfikacja i walidacja

Podczas testów w SOSW w Dąbrowie Górniczej urządzenie zostało docenione za bardzo czytelny sposób interakcji z użytkownikami. Dzieci bez problemu mogą samodzielnie przystąpić do wykonywania kolejnych ćwiczeń, co znacząco odciąża terapeutów. Urządzenie idealnie wspomaga dotychczasowe formy ćwiczeń logopedycznych, wkomponowując się w prowadzone w ośrodku terapie. Daje użytkownikom pole do interaktywnej nauki z elementami grywalizacji wbudowanymi w urządzenie (rys. 4). Tablica Rzep-CHECK była również testowana w trakcie wydarzeń publicznych takich jak Śląski Festiwal Nauki oraz Noc Naukowców Politechniki Śląskiej. Dzieci w wieku przedszkolnym i wczesnoszkolnym były mocno skoncentrowane w trakcie układania słów, Większość była w stanie ułożyć słowa, bez pomocy opiekunów, mimo dużej ilości bodźców zewnętrznych charakterystycznych dla takich wydarzeń.



Rys 7.4 Walidacja tablicy Rzep\_CHECK

W ramach współpracy z SOSW konsultowane są kolejne udoskonalenia, w ramach których, następne wersje urządzenia będą zawierały rozszerzone pole do układania liter oraz wbudowany system recytacji hasła, który będzie realizował zadanie wspierania osłuchania się użytkowników z słowami.

### 7.4. Podsumowanie

Rzep\_CHECK, jak podkreślają terapeuci uatrakcyjnia pracę z dziećmi, jednocześnie motywując je do pracy. Dzieci chętnie bawią się nie dostrzegając, że jest to element procesu edukacji. Interaktywne łączenie obrazka z literami budującymi słowo może być dostosowane do indywidualnych potrzeb i poziomu zaawansowania dziecka. Urządzenie łączy walory aplikacji wspomagającej czytanie z zaletami tradycyjnych tablic edukacyjnych. Dzięki wykorzystaniu typowych komponentów elektronicznych oraz technologii druku FDM urządzenie

cechuje się niskim kosztem produkcji co pozwoli na wdrożenie go do użytku na szerszą skalę. W trakcie wydarzeń, na których prezentowano Rzep CHECK, rodzice oraz nauczyciele podchodzili do urządzenia, zainteresowani kupnem lub wypożyczeniem. Potwierdza to przypuszczenia, że na ten moment brakuje tanich alternatyw dla prostych urządzeń terapeutycznych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Beeland W.D.: Student engagement, visual learning and technology: can interactive whiteboards help? Action Research Exchange, vol. 4, 2002, pp. 1-7.
2. Davydenko E.: A., Artificial intelligence in education of children with learning disabilities, Introduction to Artificial Intelligence, 2012, pp. 1-9.
3. Jadan-Guerrero J., Guerrero L., Lopez G., Caliz D., Bravo J.: Creating TUIs using RFID Sensors - A case study based on the Literacy Process of children with down syndrome, Sensors, 15, 2015, pp. 14846-14857.
4. Maisura N, Mohemand R., Akma F., Wan Fatin Fatimah BINTI Yahya: Teaching and Learning Module on Learning Disabilities (LD) Using RFID Technology Article in International Journal of Learning and Teaching. vol 3(4), 2017, pp. 251-258.
5. Miglino O., Di Ferdinando A., Di Fuccio R., Rega A., Ricci C.: Bridging digital and physical educational games using RFID/NFC technologies, Journal of e-Learning and Knowledge Society, vol 10(3), 2014, pp.89-105.
6. Tejszerska D., Świtoński E., Gzik M.: Biomechanika narządu ruchu człowieka. Wyd.1, Instytut Technologii Eksploatacji - PIB, Radom, 2011.
7. Tejszerska D., Gzik M.: Upper human body parts response Turing head-on and rear car collision, Journal Engineering Mechanics, vol. 11(4), 2004, p.1-8.
8. Zielińska J.: Edukacja dzieci z uszkodzeniem słuchu w społeczeństwie informacyjnym, Wyd. Adam Marszałek, Toruń 2005.
9. Nauka czytania <https://przystanekrodzinka.pl/pomoce-do-nauki-czytania-metoda-sylabowa/> dostęp: 20.06.2023

## Rozdział 8

### CZWORONOŻNA PLATFORMA KROCZĄCA W TERAPIACH DZIECI – ROBOPIES REXIO

Nowak J.<sup>1</sup>, Kobielski M.<sup>2</sup>, Ślusarz D.<sup>3</sup>, Muzalewska M.<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Integral SENSO

<sup>4</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

#### 8.1. Wstęp

Pojęcie animaloterapii opisywane jest jako wprowadzenie zwierząt w otoczenie ludzi w kontekście terapeutycznym, które znajduje odzwierciedlenie w korzystnych zmianach psychologicznych u pacjentów [7]. Znane są liczne przypadki wykorzystania psów (kynoterapia lub inaczej dogoterapia) w terapii osób z zaburzeniami mentalnymi, jak również kotów (felinoterapia) [2, 1]. W następstwie do prowadzenia terapii w asyście żywych zwierząt, pojawił się pomysł przeprowadzenia badania nad skutecznością terapii z wykorzystaniem robotów zwierzęco-podobnych. Przykładem jest porównanie w 2005 roku reakcji australijskich dzieci na robotycznego psa w porównaniu z prawdziwym owczarkiem australijskim. W eksperymencie wzięło udział 72 dzieci w wieku od 7 do 15 lat. Okazało się, że już wtedy interakcja dzieci z robotem niewiele odbiega od interakcji z rzeczywistym zwierzęciem. Rozpoczęła się wtedy kolejna dyskusja o różnicy pokolenia Z, które wychowało się już w towarzystwie technologii i która staje się dla niego rzeczą codzienną [3]. W pracy z 2008 roku przedstawiono wykorzystanie robotów zwierzęco-podobnych jako rozwiązanie problemu, którym był brak wstępu dla zwierząt do placówek szpitalnych w Japonii. Wykorzystano wówczas robota przypominającego wyglądem pluszową fokę. Rozwiązaniem wykazano dużą interakcję między robotem, a osobami starszymi z demencją oraz ich mobilizację [5]. Podobny eksperyment przeprowadzono w 2013 roku w Kanadzie w prowincji Manitoba, gdzie zbadano poprawę zdrowia i jakości życia u starszych osób znajdujących się w domu opieki. Stwierdzono wówczas pozytywny wpływ wywierany na ludzkiej psychice przez robo-zwierzęta [4]. W 2021 roku w Polsce został przeprowadzony badania nad kryterium kształtu robota biorącego czynny udział w terapii autystycznych dzieci. W badaniu porównano roboty antropomorficzne, jak i te kształtem zbliżonym do zwierząt.

Badania te wykazały, że wszystkie te platformy są narzędziami idealnymi do celów pobudzenia dzieci z tego typu schorzeniami [1].

Przez wzgląd na dostęp do platformy robotycznej Uitree oraz nawiązanie bliskiej współpracy z terapeutami ze Specjalnego Ośrodka Szkolno-Wychowawczego z Dąbrowy Górniczej (SOSW) postanowiono przeprowadzić badania na grupach dzieci, rejestrując ich reakcje na interakcję z ReXio oraz w celu sprawienia dzieciom ze Specjalnego Ośrodka radości. Unitree Go 1 EDU jest robotyczną platformą rozwojową, która dzięki czterem łapom, posturze oraz kinematyce ruchu przypomina psa, nazywana potocznie ReXio. Potrafi wchodzić po schodach, utrzymywać dystans od obiektów, wykonywać sztuczki i pokazowe tańce. Sterowany dedykowanym kontrolerem oraz urządzeniem mobilnym, na którym widać odczyt z kamer umieszczonych w przedniej części robopsa.

W trakcie kynoterapii kontakt dziecka ze zwierzęciem może odbywać się na różnym poziomie, stanowiąc główny cel w przebiegu zajęć lub gratyfikador. Podjęto się konsultacji z kynoterapeutą, mgr Martą Strzelecką, która zdobyła doświadczenie oraz licencję w Ośrodku Szkoleniowym w Bydgoszczy, a obecnie pracuje w SOSW. Wiedza zdobyta w trakcie konsultacji pozwoliła na zrozumienie tematyki kynoterapii oraz wspólne wypracowanie wstępnych założeń badań. Główna uwaga kynoterapeuty dotyczyła przystosowania dzieci do platformy rozwojowej w aspekcie postrzegania go jako psa lub jako robota. Pies jest obiektem żywym w dużej mierze powszechnie znany dzieciom, natomiast ich styczność z robotami jest o wiele mniejsza. Specjalista wyróżnił możliwość zajęcia potrzeby zapoznania podopiecznego z obiektami robotyki, tak aby odbiór robopsa był na podobnym poziomie co zwierzęcia żywego. Uznano, że nie jest koniecznym tłumaczenie dzieciom czym tak naprawdę jest ReXio ani jak działa, a należy skupić się wyłącznie na wpływie jaki ma na każde z dzieci jako robopies. Tym sposobem każde z dzieci mogło wypracować własny sposób postrzegania ReXia, właściwy w momencie, jeśli odnosił pozytywny wpływ na uczestnika badań

## 8.2. Opis metody

Opracowano metodę badań, w której robopies stanowi centrum zainteresowania dziecka. Metoda bierze pod uwagę badanie zróżnicowanej grupy dzieci z SOSW, jednak skupiając się na badaniu dzieci z upośledzeniem umiarkowanym, lekkim lub w normie. Założono, że dziecko bez wcześniejszej zapowiedzi zostanie poddane kontaktowi z robotem, a spotkanie odbędzie się wedle wcześniej uzgodnionego ze specjalistami scenariusza. W metodzie oprócz osoby sterującej robopsem oraz sporządzającej raport, obecny musiał być terapeuta wspomagający odpowiadający za bezpieczeństwo dziecka, aczkolwiek bierny i niepodejmujący się interakcji z podopiecznym. Badano reakcję podopiecznego SOSW na ReXia i wpływ długotrwały robopsa na postawę dziecka oraz jego stan emocjonalny w trakcie i po przebiegu badań. Celem metody było określenie wpływu kontaktu z robopsem na stan chwilowy oraz ogólny dziecka

oraz określenie na tej podstawie czy i w jaki sposób wykorzystanie robopsa może pomóc w terapiach dzieci z niepełnosprawnościami.

Za konieczność uznano konsultacje w tej sprawie z terapeutami oraz opiekunami dzieci, którzy je bezpośrednio znają, oraz którzy są w stanie rozpoznać reakcje dzieci oraz ocenić ich stopień zadowolenia. Dzięki temu możliwe było uzyskanie oceny przeprowadzonych badań wspartej o ocenę specjalistów. W celu potwierdzenia powtarzalności opracowanej metody badań, zapewniono wykorzystanie tej samej grupy dzieci w dwukrotnie przeprowadzonym teście oraz zadbano o takie same (lub jak najbardziej zbliżone) warunki badań.

### **Scenariusz wykorzystania metody**

Opracowano dwa główne scenariusze wykorzystania metody.

**Pokaz Grupowy:**

W scenariuszu robopies uczestniczy jako główny obiekt zainteresowania podopiecznych. Wizyta z robopsem przerywa dotychczasową pracę dzieci w formie krótkotrwałej, kilkuminutowej przerwy (czas jest zależny od reakcji dzieci oraz przyzwolenia terapeutów). Pokaz rozpoczyna się od wejścia robopsa do pomieszczenia, w którym znajduje się grupa dzieci. Pomieszczenia są różne, w zależności od aktualnego miejsca obecności dzieci, może to być sala zajęć lub korytarz szkoły. Dzieci mogą siedzieć w ławkach lub też zostać poproszone o ustawienie się w rzędzie, lub zajęcie miejsc siedzących w innym miejscu. Pierwszym sygnałem obecności psa jest sygnał dźwiękowy wydawany przy pracy silników oraz tupania w trakcie chodzenia robopsa. Robopies podchodzi do dzieci, przechodzi dookoła pomieszczenia, wykonuje wybrane z wbudowanych akcji: taniec z podskokami, turlanie, leżenie, machanie tylną częścią tułowia, proszenie, pompki. Jeśli sterujący robopsem widzi taką sposobność, to zatrzymuje ReXia w wybranym miejscu, tak aby dzieci mogły go dotknąć, pogłaskać. Obserwowana jest reakcja dzieci, co później zostaje spisane w arkuszu.

**Pokaz Indywidualny:**

W scenariuszu robopies uczestniczy jako główny obiekt zainteresowania podopiecznego. Wybrane dziecko zostaje wprowadzone przez opiekuna do wydzielonego pomieszczenia. Pokaz rozpoczyna się od wprowadzenia przez terapeutę pojedynczego podopiecznego do sali badawczej oraz ustawienie go w dedykowanym miejscu w rogu pomieszczenia (jeśli stan dziecka na to pozwala, to usadzenie go na przygotowanym krześle). Robopies podchodzi do dziecka i zostaje ustawiony tak, aby można go było dotknąć, pogłaskać. Następnie robopies przechodzi dookoła pomieszczenia, wykonuje wybrane z wbudowanych akcji takie jak przy pokazie grupowym. Obserwowana jest reakcja dziecka, a do arkusza na bieżąco wprowadzane są dane badawcze. Po czasie 5 minut dziecko zostaje wyprowadzone z gabinetu, podopiecznemu oraz terapeutce zostają zadane pytania na temat stanu zadowolenia oraz wrażeń

## Arkusz danych

Opracowano arkusz danych, wedle którego zebrano informacje dotyczące dzieci biorących udział w badaniach. Arkusz podzielono na 5 części: dane osobowe (takie jak płeć, wiek oraz klasa do której chodzi dziecko), dane dotyczące niepełnosprawności (rodzaj i stopień), dane na temat przebiegu zajęć z robopsem (opis scenariusza), dane na temat zachowań dziecka oraz pole do umieszczenia dodatkowych uwag. Wymieniono stopień przystosowania dziecka do żywych zwierząt, uprzednie doświadczenia z żywym zwierzęciem. Wymieniono stany dziecka: początkowy oraz stopień zainteresowania początkowego, w trakcie zajęć oraz rodzaj interakcji jaka wystąpiła, końcowy oraz opinia dziecka na temat tego czy mu się podobało, stan dziecka w większym okresie czasu po zakończeniu interakcji. Stopień przystosowania robopsa do dziecka (ograniczona dostępność do psa ze względu na np. wózek inwalidzki). W arkuszu przewidziano miejsce na zapis szczególnych uwag i opinii dziecka na temat robopsa oraz interakcji z nim, szczególnie zachowania pozytywne oraz negatywne czy niebezpieczne.

### 8.3. Testy w Specjalnym Ośrodku Szkolno-Wychowawczym

W grudniu 2022 roku przeprowadzono w SOSW wstępny test metody badań zaproponowanej wcześniej, podczas której zaprezentowano robopsa kadrze Ośrodka oraz wybranym grupom dzieci.

Celem było sprawdzenie wstępnego odbioru robopsa, a oczekiwania realizacji zostały pozytywnie przekroczone, gdyż większość podopiecznych reagowała euforią oraz radością. Opinie dzieci były bardzo pozytywne, do tego stopnia, że same okrzyknęły robopsa mianem „Reksia”, co przyjęte zostało jako nazwa robocza „ReXio”. W trakcie pokazów grupowych największą radość ReXio sprawiał dzieciom, gdy siadał na tylnych łapach i wykonywał prośbienie lub turlał się. Nieoceniona okazała się pomoc wyszkolonych opiekunów i terapeutów, którzy pilnowali bezpieczeństwa dzieci. W trakcie, gdy jedna z osób sterowała platformą robotyczną, druga z nich oprócz obserwacji reakcji dzieci oraz kontroli trasy przejścia robopsa musiała także kontrolować grupę. Ważnym było utrzymywanie bezpiecznej odległości w trakcie przemieszczania się lub wczesna prewencja takich zachowań jak podkładanie dłoni pod łapy czy nadbieganie do robopsa. Liczba dzieci w grupach przekraczała nawet 20 jednocześnie, przy czym były zróżnicowane pod kątem wieku, posiadały niepełnosprawność w stopniu lekkim. Platforma okazała się być wyjątkowo dobrze dostosowana do bezpośredniego kontaktu, np. głaskania.

Zaplanowano kolejne dwie wizyty w Ośrodku, które odbyły się w kwietniu 2023 roku w odstępie jednego tygodnia. Pierwszą częścią wizyt były pokazy grupowe, wydzielono także czas na pokazy indywidualne.

## Pokazy grupowe

W pokazach grupowych brały udział zróżnicowane grupy dzieci, od 3 do 8 osób. Przedział wiekowy dzieci uczestniczących to 8-12lat, z przewagą niepełnosprawności w stopniu lekkim lub w normie. Stopień przystosowania dzieci do żywych zwierząt jest nieznan, opiekunowie oceniali, że każde z dzieci powinno być wcześniej styczność z żywym zwierzęciem, psem. Dziecko przyprowadzone na zajęcia było w stanie ogólnie dobrym: obojętne, spokojne, emocjonalnie wyciszone. Po rozpoczęciu pokazu zdarzało się, że dzieci podchodziło nieufnie, z rezerwą do robopsa, występowało zaskoczenie, ale w trakcie pokazu następował u wszystkich uczestników stopniowy wzrost zadowolenia, pojawiała się ekscytacja, każdorazowo podopieczni wykazywali się ogromnym zainteresowaniem.

W jednej z grup początkowo wystąpił lekki strach, dzieci utrzymywały dystans, nie wykazywały chęci dotknięcia robopsa pomimo dużego zainteresowania. Według opiekuna grupy opinia dzieci po pokazie była pozytywna, jednak cieszyły się też z tego, że piesek w trakcie pokazu „zasnął” oraz „poszedł do budy”. Opiekun ocenił, że w grupie znajdują się jednostki nieśmiałe oraz strachliwe, których początkowo negatywne nastawienie udzieliło się pozostałym. Finalnie wszystkie dzieci wyraziły pozytywne emocje, cieszyły się i okazywały radość z wizyty.

W pozostałych pięciu grupach na początku wizytacji występowały emocje zbliżone do niepokoju, który szybko przeradzał się w zainteresowanie, a następnie w dużą radość i uciechę. Każde z dzieci z uwagą obserwoowało ruchy wykonywane przez robopsa, wodziły wzrokiem, nawoływały do niego aby wykonał jakąś czynność. Dzieci piszczały i głośno żegnały się z robopsem kiedy kończyły się wizytacje, nawoływały żeby został, pytały czy jeszcze kiedyś do nich przyjdzie. W trakcie kolejnego pokazu część dzieci już kojarzyła robopsa, więc zwracały się do niego przybraną nazwą, witały go i cieszyły się. Widać było, że takie zachowanie udziela się również innym podopiecznym, a robopies stanowi obiekt zainteresowania i motywuje w dzieciach pozytywne emocje.

Podczas zajęć zaobserwowano możliwość wystąpienia sytuacji niebezpiecznych, np. w momentach, gdy tłum dzieci nadmiernie zbliżył się do robopsa lub gdy zagradzały mu trasę przejścia w trakcie przemieszczania się. Wtedy operatorzy reagowali wydając ostrzeżenia głosowe, odgradzając sobą dostęp do robopsa oraz skierowując go w inne miejsce w pomieszczeniu. Nie natknięto się na osobę chcącą „wyrządzić krzywdę” robopsu, ani na podopiecznego nim przestraszonego, czy obrzydzonego.



Rys 8.3 Pokazy grupowe w SOSW

### **Pokazy indywidualne**

W gronie 10 podopiecznych Ośrodka (5 kobiet i 5 mężczyzn) w wieku 5 do 20 lat przeprowadzono dwie próby badawcze z pokazami indywidualnymi. Uczestnicy posiadali głównie niepełnosprawność w stopniu umiarkowanym lub w normie, niepełnosprawność sprzężoną, autyzm, Mózgowe Porażenie Dziecięce, zespół Downa. Oprócz tego występowały również zaburzenia mowy, wzroku. Przebieg próby badawczej zorganizowany został wedle opracowanej metody. Każdy z pokazów trwał 5 minut, podczas których dziecko przebywało w pokoju zajęć wraz z robopsem, dwojgiem operatorów oraz przy biernej obecności terapeuty wspierającego. Każda z prób badawczych została zarejestrowana oraz omówiona z opiekunem terapeuty, który udzielił komentarza oraz wsparł analizę wyniku. W każdym z przypadków zarejestrowano ogólne polepszenie odbioru robopsa w trakcie trwania próby oraz wywołanie w odbiorcach emocji pozytywnych, takich jak radość i zadowolenie. Co więcej, bazując na relacjach opiekunów terapeutów oraz ich opinii, część podopiecznych zareagowała na robopsa w sposób niecodzienny, czy nawet zjawiskowy.

Pacjentka 1, lat 14, Mózgowe Porażenie Dziecięce z zanikiem mowy, poruszająca się na wózku – początkowo odczuwała lekki strach oraz wycofanie spowodowane raczej zajęciem sytuacji odmiennej niż w codziennej rutynie, w trakcie pokazu widać było stopniową zmianę zachowania. W trakcie wprowadzania do pomieszczenia, terapeuta ocenił stan dziewczynki na stale skłonny do krzyku, agresji wobec osób i obiektów nieznanymi, dlatego był obecny w początkowej fazie pokazu, jednak przy robopsie wykazywała wzmożone zainteresowanie. Wykonywała wzmożone wodzenie wzrokiem, wyciągała ręce do robopsa, starała się go dotknąć. Co więcej, odnotowano także wzmożoną aktywność mówienia, wydawała dźwięki sylabo-podobne o zabarwieniu pozytywnym, artykułowała próby śmiechu. Dziewczynka przeszła ze stanu apatii w stan radości oraz aktywności emocjonalnej. Stan ten utrzymał się również przy drugiej próbie badawczej, aczkolwiek nie udało się zebrać od niej (ani kogokolwiek z jej otoczenia) informacji o tym, jak odbiera poprzednie spotkanie z ReXio, czy go pamięta.



Pacjentka 2, lat 9, Mózgowe Porażenie Dziecięce, poruszająca się na wózku – od samego początku wykazywała zainteresowanie, które zostało ogromnie wzmocnione w trakcie trwania próby. Wprowadzona od razu zareagowała pozytywnie na ReXio, wykazywała dużą radość oraz zadowolenie, ekscytację. Jej interakcja z robopsem była na bardzo wysokim poziomie w stosunku do pozostałych, traktowała robopsa niemalże z czułością. Zwracał się do niego personalnie, wydawała polecenia. Jej stan emocjonalny utrzymał się na długo po zakończeniu pierwszej próby, opowiadała o wizycie robopsa w domu, nie mogła się doczekać kolejnej. Przy drugiej z wizyt okazała jeszcze bardziej nasilone zainteresowanie oraz przywiązanie, używała sformułowań melioratywnych, traktowała go bardzo pozytywnie. Powiedziała p.. „mój ReXio, mój grzeczny piesek”. Analizując próby z jej udziałem pokazane zostało, że dziewczynka postrzega robopsa jako istotę żywą lub co najmniej samodzielnie funkcjonującą i nie rozumie roli operatora, jest on dla niej pomijany. Mimo to wynikiem wizyt było polepszenie jej stanu funkcjonowania, radość oraz aktywność emocjonalna.

Pacjent 3, lat 9, Autyzm – posiada dwa koty i bardzo lubi zwierzęta, a do obydwu prób podszedł z początkową rezerwą, ale i wzrastającym zainteresowaniem. Z początku wystraszony, na pierwszą próbę został wprowadzony przez terapeutę, ale nie chciał być na niej sam, nie chciał być odseparowany od opiekuna. Nie mniej już po chwili, zainteresował się pokazem oraz robopsem, uważnie go obserwował. Jego stan w obu próbach był podobny i regularny, spokojnie obserwował czynności wykonywane przez robopsa, we wskazanych momentach chętnie go głaskał. Gwałtowne ruchy robopsa powodowały u niego napięcia mięśni, wprowadzenie ciała w stan gotowości do ucieczki, ale pomimo to uśmiechał się i cieszył kiedy robopies wykonywał taniec, bardzo podobało mu się gdy ruszał tylną częścią tułowia. Z informacji przekazanych od osób z jego otoczenia wynika, że rozmawiał o pierwszej z wizyt w domu oraz że wywarła ona na nim bardzo pozytywne wrażenie, bardzo się cieszył i ekscytował.

Pacjent 4, lat 11, Autyzm – pierwszą z prób rozpoczął z dużym dystansem, wycofany oraz nieśmiały. W jej trakcie wzrastało jego zainteresowanie, chętnie podejmował się interakcji z robopsem, wodził za nim wzrokiem, był radosny. Informacje otrzymane po zakończeniu próby również były pozytywne, chłopiec dużo opowiadał do opiekunów, bliskich osób, kolegów, o wizycie ReXia. Nie mógł się doczekać kolejnej z wizyt, bardzo chciał uczestniczyć w pokazie. W trakcie drugiej próby badawczej werbalnie zakomunikował, że nie lubi jak robopies tak głośno tupie, że ma tak głośny dźwięk w trakcie poruszania, pomimo że bardzo mu się podoba kiedy np. tańczy czy rusza tylną częścią tułowia. W trakcie drugiej z prób badawczych rzeczywiście pomieszczenie lepiej odbijało dźwięki z wewnątrz, przez co były one wyraźniejsze i donioślejsze, przez co robopies wydał się być głośniejszy niż poprzednio. Mimo tej uwagi cieszył się z każdej czynności wykonywanej przez robopsa.

Oprócz wyżej wymienionych przypadków wystąpiły także inne, w których każdy z uczestników prób badawczych wykazał się indywidualnym podejściem, w inny sposób wchodził w interakcję z robopsem. Większości dzieci nie interesowało to, czym jest ReXio, a tylko dwoje z nich wprost pytało

i interesowało się tym, jakim robotem jest ten obiekt. Żaden z podopiecznych Ośrodka nie był agresywny lub w inny sposób negatywnie nastawiony do robopsa. U wszystkich zaobserwowano znaczną poprawę samopoczucia, wzbudzenie pozytywnych emocji oraz aktywności.

Należy nadmienić, że operatorzy starali się być jak najbardziej biernych i nie wchodzić w interakcję z dziećmi, jednak było to niemożliwe. Brak doświadczenia w pracy z dziećmi z niepełnosprawnościami mógł stanowić przeszkodę dla operatorów do przeprowadzenia badań, dlatego skonsultowano z terapeutami i specjalistami z SOSW sposób prowadzenia prób badawczych, w tym sposób komunikacji z podopiecznymi w nich uczestniczącymi. Dzięki temu wypracowano schemat możliwych rozmów oraz poleceń słownych czy uwag, które operatorzy kierowali w stronę dzieci, tak aby przedstawić im robopsa ReXio, objaśnić im sytuację, w której się znajdują, zebrać od nich potrzebne do analizy informacje.



Rys 8.3 Pokazy indywidualne w SOSW, pierwsze zajęcia (u góry), kolejne zajęcia (u dołu)

#### 8.4. Podsumowanie i kierunek rozwoju

Po przeprowadzeniu badań oraz analizie zebranych danych, które skonsultowano z odpowiednimi specjalistami oraz opiekunami poszczególnych

dzieci, wyciągnięto wniosek, że robopis ReXio wywiera pozytywny wpływ na dzieci w trakcie interakcji z nim, ich zaangażowanie wzrasta, nastrój się poprawia oraz pojawia się duża chęć na dalsze spotkania. Aby zwiększyć zadowolenie dzieci z zajęć należałoby rozważyć wprowadzenie takich scenariuszy zachowań, jak: stryżenie uszami, machanie ogonem, podawanie łapy, podnoszenie nogi do sikania, dawanie głosu. Ponadto dzieci wyraziły chęć, aby ReXio posiadał futerko lub fakturę na korpusie, uszy, ogon, łapy oraz ruchome oczy. Opinie te potwierdzone zostały również od strony terapeutów, którzy sugerowali rozbudowanie platformy pod względem systemów bezpieczeństwa.

Kolejnym etapem badań nad platformą oraz jej wykorzystaniem w roboterapii powinno być przeprowadzenie asysty w trakcie wybranych zajęć, gdzie robopis stanowi gratyfikację, lub zaaranżowanie dedykowanych zajęć, w których dziecko wykonuje wraz z psem dane ćwiczenia. Aby uzyskać jeszcze lepsze wyniki badań należałoby postarać się o bardziej powtarzalne środowisko przeprowadzania testów oraz systematyczność wizyt.

Wszystkie interakcje prowadzone wedle opracowanej na potrzeby badań metody zarejestrowano jako pozytywne oraz są one podstawą do dalszej pracy w tym temacie.



Rys 8.4 Zadowolone i radosne dzieci na pokazie grupowym

## BIBLIOGRAFIA

1. Goleman, M., et al.: Cat therapy as an alternative form of animal-assisted therapy, *Medycyna Weterynaryjna*, 2012, s. 732-735.
2. Klimova, B., Josef T., and Kamil K.: Effectiveness of the dog therapy for patients with dementia-a systematic review, *BMC psychiatry*, 2019, s. 1-7.
3. Melson, G. F., et al.: Robots as dogs? Children's interactions with the robotic dog AIBO and a live Australian shepherd, *CHI'05 extended abstracts on Human factors in computing systems*. 2005.
4. Sutherland, A. L.: An ethnography of robotic cat therapy in a Manitoba care home. University of Manitoba, Canada, 2013.
5. Szymona, B., et al.: Robot-Assisted Autism Therapy (RAAT). Criteria and types of experiments using anthropomorphic and zoomorphic robots. review of the research, *Sensors*, 2021.
6. Wada, K., et al.: Robot therapy for elders affected by dementia, *IEEE Engineering in medicine and biology magazine*, 2008, s. 53-60.
7. Willis, Debra A.: Animal therapy, *Rehabilitation Nursing* 1997, s. 78-81.

# Rozdział 9

## **DIODOBŁYSK - URZĄDZENIE STYMULUJĄCE DLA DZIECI Z NIEPEŁNOSPRAWNOŚCIAMI**

Wycisło M.<sup>1</sup>, Szumierz O.<sup>2</sup>, Wilk K.<sup>3</sup>, Łój P.<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> SKN Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji AI – METH, zespół Integral SENSO

<sup>4</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

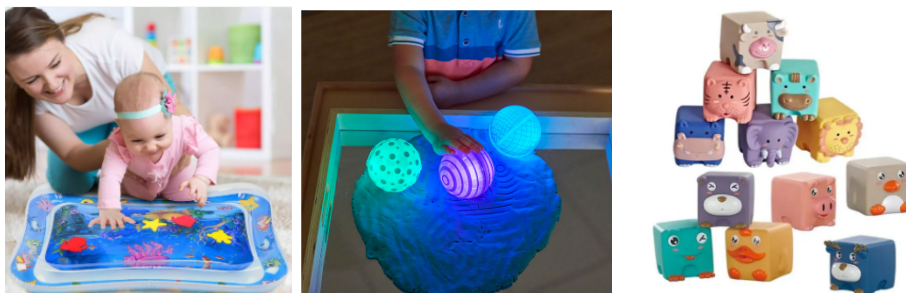
### **9.1. Wstęp**

Diodobłysk został skonstruowany przede wszystkim w celu stymulacji narządu wzroku u dzieci z jego zaburzeniami. Dodatkowo dla dzieci znajdujących się w normie wzrokowej, urządzenie to pozwala na ćwiczenie koncentracji oraz odstresowanie, poprzez pozytywny wpływ prostej zabawy, polegającej na zaświeceniu jednocześnie wszystkich gasnących z czasem sektorów „lampek”. Diodobłysk we wszystkich swoich rolach wspomaga pracę terapeuty z dzieckiem. Jak udowodniono w literaturze pobudzanie sensoryki małej jak również fototerapia dobrze wpływają na psychoruchowy rozwój dzieci [1, 2]. Dodatkowo w badaniach wykazano, że fototerapia wpływa pozytywnie na jakość życia oraz przede wszystkim poprawia samoocenę dzieci i młodzieży niewidomych i słabowidzących [2].

### **9.2. Przegląd istniejących rozwiązań**

Współcześnie na rynku istnieje wiele specjalistycznych rozwiązań stymulujących przeznaczonych dla dzieci z niepełnosprawnościami. Większą część takich rozwiązań stanowią zabawki sensoryczne, które pozwalają stymulować zmysły dziecka w trakcie zabawy (Rys.1). Dzięki aktywnej zabawie dziecko może doskonalić swoje zmysły takie jak dotyk, wzrok, słuch [4]. Zabawki te są wyposażone w szorstkie, puchate, gładkie, śliskie, świecące lub miękkie elementy, o różnej fakturze i kształcie, o zmiennych kolorach i segmentach dźwiękowych. Często dołączane są do nich plastikowe gryzaki, bezpieczne

lusterka lub błyszczące elementy (Rys.1). Dzięki tym cechom, zabawka staje się atrakcyjniejsza dla niemowlaka lub starszego dziecka i umożliwia zainteresowanie się nią na dłuższy okres zabawy [3].



Rys. 9.1. Przykłady produktów sensorycznych dla dzieci (od lewej) Dmuchana Mata Woda, Zabawka sensoryczna – świecące piłki, Zwierzątka – miękkie klocki [5, 6]

### 9.3. Istota urządzenia

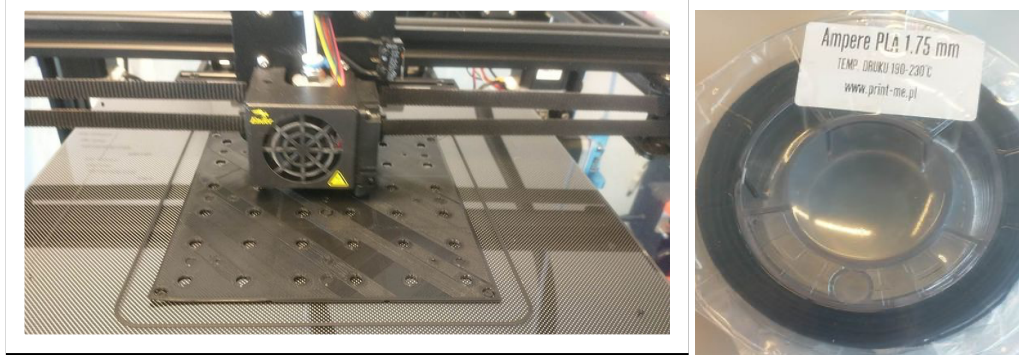
Diodobłysk (Rys. 2) to urządzenie skonstruowane w Studenckim Kole Naukowym AI-METH, aby wspomóc pracę terapeutów ze Specjalnego Ośrodka Szkolno-Wychowawczego (SOSW) z Dąbrowy Górniczej. SOSW jest jednym z największych ośrodków w Europie, którego kadra opiekuńcza i terapeutyczna zajmuje się szeroko rozumianą rehabilitacją i terapią dzieci z niepełnosprawnościami. Dzięki wizytom w ośrodku, licznym konsultacjom, wywiadom oraz ankietom wykonanych przez członków koła, zebrano informacje na temat aktualnych potrzeb w terapii dzieci będących podopiecznymi w ośrodku. Jednym z efektów wykorzystania zebranych informacji jest powstanie Diodobłysku. Urządzenia mającego na celu, uspokojenie dziecka oraz zajęcie jego uwagi poprzez stymulację przy pomocy światła o różnych kolorach.



Rys.9.2 Prototyp urządzenia

Podczas budowy urządzenia, niezwykle ważnym kryterium konstrukcyjnym było bezpieczeństwo docelowego użytkownika. Konieczne było zadbanie o brak możliwości skaleczenia się lub wyrządzenia krzywdy innemu dziecku w czasie zabawy. W tym celu należało usunąć wszelkie ostre krawędzie oraz zadbać o to

by dziecko nie mogło otworzyć urządzenia, nawet przy użyciu całej swej siły oraz kreatywności. Dlatego do wykonania urządzenia wykorzystana została technologia generatywna (druk 3D) – FDM (ang. Fused Deposition Modeling) Pozwoliło to na tanie, łatwe oraz szybkie wykonanie urządzenia z bezpiecznego dla ludzkiego organizmu polilaktydu, znanego szerzej jako PLA. Dzięki temu urządzenie posiada wytrzymałą oraz bezpieczną i lekką konstrukcję. Z kolei sektory z diodami oraz dolna część obudowy, zostały wydrukowane z tzw. Ampere PLA - polilaktydu zawierającego nanorurki węglowe, co pozwala na przewodzenia prądu elektrycznego [7]. Zastosowanie przewodzącego filamentu pozwoliło na wyeliminowanie zbędnych elementów (taśmy przewodzącej itp.), które mogły być zdzierane przez dzieci, jak miało to miejsce w przypadku prototypu. By uzyskać duży kontrast kolorystyczny, tak ważny dla dzieci z zaburzeniami wzroku, wykorzystane zostało tworzywo koloru czarnego.



Rys. 9.3 Drukowanie 3D - powstanie obudowy; przewodzący filament Ampere PLA

Natężenie światła może być zmieniane przy pomocy przełącznika, tak by dzieci w normie wzrokowej mogły na nie spoglądać bez uczucia dyskomfortu. Z kolei po włączeniu mocniejszego światła, dzieci o słabszym wzroku uzyskują silniejszy bodziec, co pozwala im również korzystać z urządzenia. Używając zabawki sensorycznej dziecko, trzyma ją w rękach, a poprzez dotknięcie metalowego pinu, powoduje zapalenie się diod przypisanych danemu sektorowi. Dzieje się tak gdyż dotknięcie jednocześnie pinu i spodu obudowy prowadzi do zamknięcia obwodu elektrycznego za pośrednictwem ludzkiego organizmu.



Rys. 9.4 Wykonane wersje urządzenia 3x3 i 2x2 sektory

## 9.4. Weryfikacja i walidacja urządzenia

Urządzenie zostało przekazane do Specjalistycznego Ośrodka Szkolno-Wychowawczego (SOSW) w Dąbrowie Górniczej, gdzie zostało zweryfikowane oraz zwalidowane przez terapeutów oraz ich podopiecznych. W ich opinii urządzenie, bardzo dobrze stymuluje dzieci z „poczuciem światła” czyli zaburzeniem wzroku. Ponadto działa bardzo dobrze na dzieci jako motywator do wykonywania ćwiczeń. Dodatkowo opiekunowie znaleźli kolejne zastosowanie urządzenia i dają ją dziecku jako nagrodę za poprawnie wykonane ćwiczenie.



Rys. 9.5 Urządzenie wykorzystane przez podopiecznego SOSW

## 9.5. Podsumowanie

Diodobłysk to bardzo proste urządzenie, które poprzez stymulację wzroku wpływa pozytywnie na dziecko, które poprzez załączanie kolejnych sektorów świetlnych, stara się zapalić komplet różnokolorowych diod. Opisana w rozdziale zabawka sensoryczna, została w pełni zaprojektowana i wytworzona w ramach projektu Integral Senso działającego w kole naukowym AI-METH. Urządzenie to okazało się niezwykle przydatne w terapii dzieci z niepełnosprawnościami ze Specjalnego Ośrodka Szkolno-Wychowawczego (SOSW) z Dąbrowy Górniczej, jako urządzenie stymulujące zarówno wzrok jak i poprawiające koncentrację u dzieci ze specjalnymi potrzebami. Należy jednak pamiętać, aby podczas zabawy diodobłyskiem nie przebodźcować dzieci.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Wieczór E., Szmalec J., Brzuzy G.: Sensoryka i motoryka w rozwoju dziecka i uczeniu się w aspekcie terapii integracji sensorycznej. Difin, Warszawa, 2019
- [2] Buraczyńska, B., Torlińska, T., Rajewski, Wpływ fototerapii na samoocenę zaburzeń nastroju u dzieci i młodzieży niewidomej i słabowidzącej, Neuropsychiatria i Neuropsychologia/Neuropsychiatry and Neuropsychology, vol 2, no. 2, 76-82.
- [3] <https://www.smyk.com/porady/zabawki-sensoryczne-czym-sa-i-jakie-warto-wybrac,718.html> (17.06.2023)
- [4] <https://terapiaspecjalna.pl/artukul/terapia-integracji-sensorycznej-jako-metoda-wsparcia-malego-dziecka-niewidomego-z-niepełnosprawnością-intelektualną-case-study> (17.06.2023)
- [5] <https://www.sklep.habarri.pl/zwierzeta-miekkie-klocki-sensoryczne-12szt> (17.06.2023)
- [6] <https://rehazakupy.pl/zabawka-sensoryczna-swiece-pilki> (17.06.2023)
- [7] <https://3dreaktor.pl/Filament-techniczny/Print-me-Ampere-PLA-0,2kg-1,75mm> (17.06.2023)



# Rozdział 10

## CZY ŚMIGŁA TOROIDALNE ZMIENIĄ OBLICZE RYNKU LOTNICZEGO?

Solorz W.<sup>1</sup>, Michalak W.<sup>2</sup>, Sikorski M.<sup>3</sup>, Smółka W.<sup>4</sup>, Hamrani Ch.<sup>5</sup>, Dawid A.<sup>6</sup>  
Skarka W.<sup>7</sup>

<sup>1-6</sup> SKN Aerospace Engineering

<sup>7</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

### 10.1. Wstęp

W obliczu rosnących wyzwań związanych z innowacyjnością w lotnictwie, śmigła toroidalne stają się przedmiotem intensywnych badań i rozwoju. Ostatnie prace prowadzone przez Massachusetts Institute of Technology (MIT) [1] rzuciły nowe światło na potencjalne zastosowania i korzyści płynące z tej technologii. Zastosowanie śmigieł toroidalnych w lotnictwie obiecuje przynieść znaczące zmiany, zwłaszcza w kontekście efektywności paliwowej i redukcji hałasu. Szczególnie interesujące jest zastosowanie śmigieł toroidalnych w dronach. Badania MIT wykazały [1], że takie śmigła mogą znacznie zwiększyć wydajność i stabilność dronów, co jest kluczowe w kontekście ich rosnącego wykorzystania w różnorodnych dziedzinach, od fotogrametrii po dostawy. Wykorzystanie śmigieł toroidalnych w dronach może również przyczynić się do rozwoju bardziej zrównoważonego lotnictwa, oferując nowe możliwości w zakresie projektowania i inżynierii.

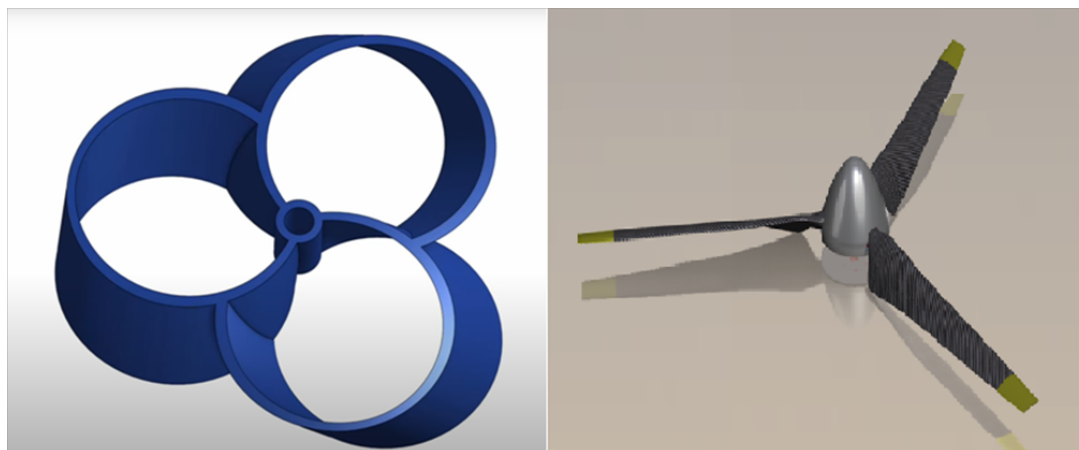


Rys 10.1 Zastosowanie śmigieł toroidalnych w bezałogowym statku powietrznym [3]

W trakcie badań wykorzystano narzędzia analizy numerycznej oraz modele symulacyjne, aby dokładnie ocenić wpływ śmigieł toroidalnych na różne aspekty lotu. Śmigła toroidalne są fascynującą perspektywą dla przyszłości lotnictwa, oferując potencjał poprawy efektywności, osiągow i zrównoważonego rozwoju tej kluczowej dziedziny technologii. Dalsze badania i prace rozwojowe są niezbędne, aby w pełni wykorzystać wszystkie możliwości, jakie ta innowacyjna technologia może dostarczyć.

## 10.2. Geometria

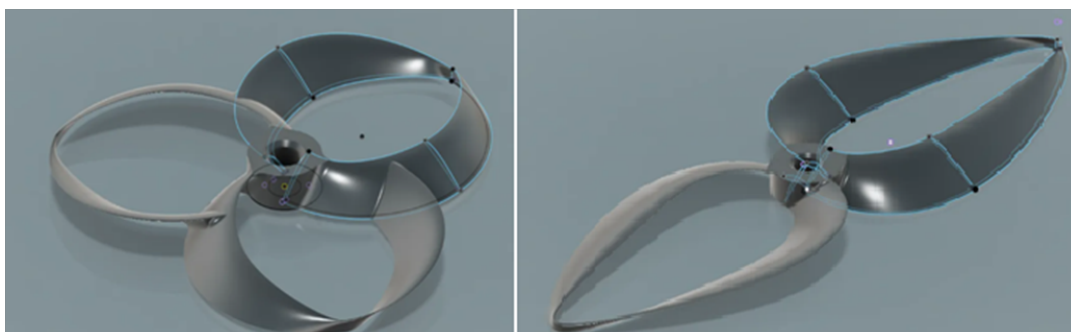
Śmigła toroidalne cechują się zdecydowanie odmienną budową zestawiając je z klasycznym śmigłem. Śmigło toroidalne, widoczne na poniższym zestawieniu po lewej stronie ma łopaty w kształcie pierścieni, które wzajemnie na siebie nachodzą. Taka konfiguracja ma przede wszystkim zapewnić znaczącą redukcję hałasu, ale również zmniejszyć ryzyko uszkodzeń w wyniku kolizji. Jest to możliwe dzięki zaokrąglonym krawędziom łopat, których czubki nie są ostro zakończone. Natomiast z uwagi na bardziej złożony kształt śmigła toroidalnego, koszty produkcji są zdecydowanie wyższe.



Rys 10.2 Zestawienie śmigła toroidalnego trójłopatowego oraz klasycznego trójłopatowego [6]

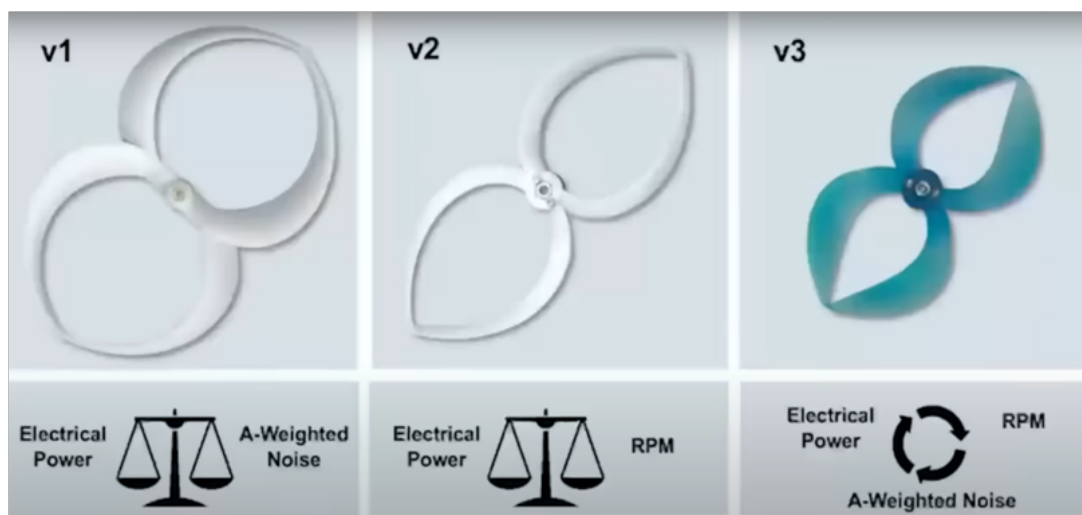
### Geometria śmigieł toroidalnych

Uzyskiwane osiągi oraz parametry śmigieł są bezpośrednio powiązane z ich geometrią. Z tego powodu, bardzo ważne jest odpowiednie zamodelowanie oraz zoptymalizowanie modelu. W przypadku śmigieł toroidalnych rozróżniamy zarówno śmigła z dwoma jak i wieloma łopatami.



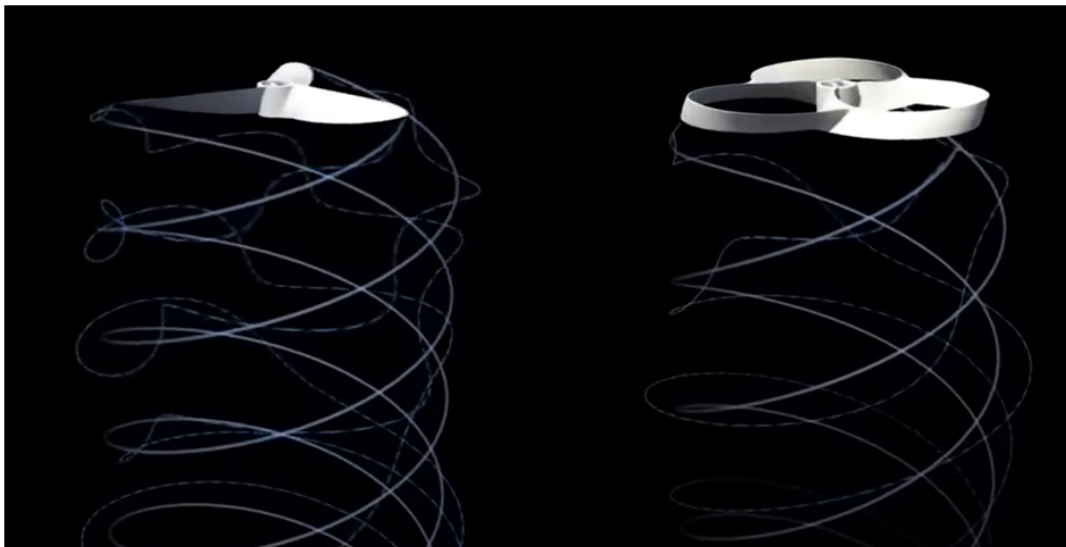
Rys 10.3 Zestawienie śmigła toroidalnego dwułopatowego oraz klasycznego śmigła trójłopatowego [5]

Opublikowany przez MIT Lincoln LAB artykuł [5] zawiera kilka wariantów śmigieł toroidalnych z dwoma łopatom. Dobór geometrii to balansowanie pomiędzy zużyciem mocy, liczbą obrotów, a generowanym hałasem. Zgodnie z poniższą grafiką wersja śmigła z lewej strony pozwala uzyskać najlepszy stosunek użytej mocy elektrycznej do wytworzonego hałasu przez śmigło, wersja śmigła na środku umożliwia osiągnięcie najlepszego stosunku użytej mocy elektrycznej do prędkości obrotowej. Śmigło, które reprezentuje najlepszą korelację pomiędzy użytą energią elektryczną, prędkością obrotową a wytworzonym hałasem oznaczone jest na poniższej grafice kolorem niebieskim i znajduje się po prawej stronie.



Rys 10.4 Zestawienie różnych wariantów śmigła toroidalnego dwułopatowego [4]

## Wpływ geometrii na aerodynamikę



Rys 10.5 Zestawienie aerodynamiczne śmigła toroidalnego trójłopatowego oraz klasycznego śmigła trójłopatowego [4]

Nieodłącznym elementem modyfikacji geometrii obiektu jest jego zmiana aerodynamiki. W klasycznym śmigle np. trójłopatowym wiry powstają na końcach łopat. Natomiast w przypadku śmigła toroidalnego, powstające wiry mogą być rozpraszane na długości całej łopaty, co powoduje, że są skuteczniej rozpraszane w strumieniu opływu.

### 10.3. Porównanie emisji hałasu

Badania nad redukcją hałasu trzeba rozpocząć od zrozumienia jakie są rodzaje hałasu aerodynamicznego. W statkach powietrznych możemy rozróżnić cztery typy hałasu pochodzące z:

- Silnika
- Układu wydechowego silników spalinowych
- Śmigieł
- Poszycia struktury

Natomiast największą uwagę trzeba poświęcić hałasowi aerodynamicznemu pochodzącemu ze śmigieł. Wiele badań i eksperymentów przedstawiły, że głównym źródłem hałasu w śmigłach normalnych z małą liczbą łopat jest hałas ciągu i momentu obrotowego, ponieważ struktura i umiejscowienie śmigła znacznie niweluje hałas trzepotania łopat i hałas przepływu takiego śmigła, tak jak zostało to pokazane w artykule National Aeronautics and Space Administration [13]. Dla lotów z dużą prędkością badania wykazały, że hałas grubości może

znacznie przekroczyć hałas ciągu oraz momentu obrotowego. Aby skutecznie rozwiązać problem i zredukować wytwarzany hałas, konieczne jest przyjęcie skrupulatnej strategii i opracowanie odpowiedniego śmigła. Niemniej jednak, aby określić poziom hałasu wytwarzanego przez konkretne śmigło, należy je w jakiś sposób zmierzyć lub sprawdzić. Do takich zadań możemy użyć np. sonometru wyposażonego w miernik natężenia częstotliwości. Zazwyczaj takie mierniki posiadają zakres pomiaru do 130 dB oraz zakres 1/3 oktawy w analizie częstotliwości w przedziale między 20 Hz-8kHz. Rozwiązanie takie jest doskonałe przez jego poręczność i zapewnia duże możliwości analizy. Wybrano jednak bardziej wszechstronne podejście, wykorzystujące metody zwykle stosowane w branży dźwiękowej, gdzie inżynierowie dźwięku przeprowadzają pomiary i kalibrują systemy liniowe za pomocą mikrofonów kalibracyjnych. Ich zakres jest znacznie większy niż zakres mikrofonu w podręcznym sonometrze co daje nam możliwość na dokładniejszą analizę naszych wyników. Dodatkowo użycie oprogramowania typu Smaart pozwala na obserwowanie w czasie rzeczywistym wyników naszych badań. Kluczem do dokładnej analizy zmian w generowanym hałasie jest dobór odpowiednich przyrządów pomiarowych. Do badań wybrano podejście polegające na wykorzystaniu nie jednego, a trzech mikrofonów pomiarowych, pozwalających na badanie hałasu pod różnymi kątami wokół śmigła, gdyż odbiorca nie zawsze znajduje się dokładnie pod łopatom statku powietrznego.

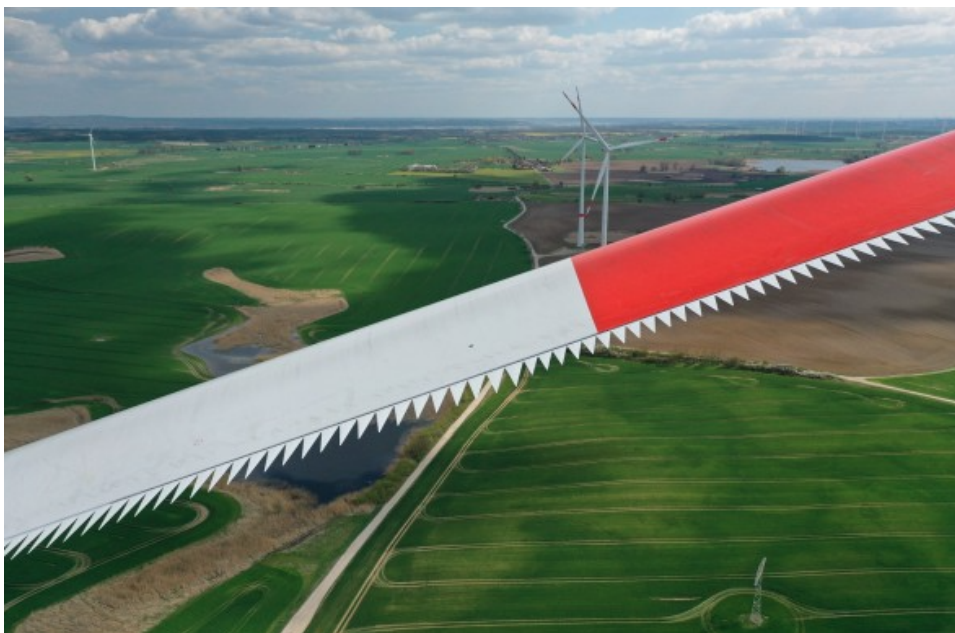
#### 10.4. Inne śmigła stosowane do redukcji hałasu

Dążąc do redukcji emisji hałasu przez śmigła zaproponowano kilka możliwości. Jednym ze sposobów redukcji dźwięku emitowanego są śmigła o modelu Q-Tip. Śmigła te wyróżniają się ostrym zagięciem płatu łopatek na ich końcach.



Rys 10.6 Śmigło Q-Tip z zagiętymi końcówkami łopat [7]

Innym rozwiązaniem są śmigła z ząbkowaną krawędzią spływu. Zastosowanie takiej geometrii pozwala na redukcję hałasu szerokopasmowego. Takie rozwiązanie spotykane jest w turbinach wiatrowych.



Rys 10.7 Śmigło z ząbkowaną krawędzią spływu [8]

Kolejnym sposobem na redukcję hałasu są śmigła osłonięte. Jest to śmigło umieszczone w kanale, który ma za zadanie zwiększyć wydajność oraz zwiększyć ciąg. Taki rodzaj śmigła jest często spotykany w transporcie morskim.



Rys 10.8 Śmigło osłonięte [9]



## 10.5. Zastosowanie śmigieł toroidalnych

Śmigła toroidalne, ze względu na swój innowacyjny kształt i wydajność, znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach, szczególnie tam, gdzie konieczna jest efektywność i precyzja. Jednym z zastosowań jest żegluga i przemysł morski. Firma Sharrow Marine zaprezentowała [2] innowacyjne rozwiązanie w dziedzinie technologii napędowej. Śmigła te zapewniają lepszą wydajność, szybsze osiągnięcie prędkości i zwiększoną oszczędność paliwa. Zaprojektowane są tak, aby zmniejszać drgania, hałas i zapewniać lepszą kontrolę podczas dokowania. Dostępne są różne modele śmigieł dla różnych typów łodzi i silników, a ich wykorzystanie może znacznie poprawić doświadczenia związane z pływaniem.



Rys 10.9 Śmigło Sharrow MX4 [2]

Śmigła toroidalne znajdują zastosowanie również w sektorze energii odnawialnej, gdzie mogą być wykorzystane jako jedna z opcji w turbinach wiatrowych i wodnych. Dzięki swojej zdolności do efektywniejszego wykorzystania energii kinetycznej, pozwalają na produkcję większej ilości energii elektrycznej, co jest niezwykle istotne w kontekście globalnych wysiłków na rzecz zrównoważonego rozwoju. W lotnictwie, śmigła toroidalne zyskują na popularności jako alternatywa dla tradycyjnych śmigieł, szczególnie w lekkich statkach powietrznych i bezzałogowych pojazdach latających. Ich stabilność i odporność na zmienne warunki atmosferyczne sprawiają, że są one idealne do zastosowań wymagających precyzyjnego manewrowania i niezawodności. Jedną z głównych zalet takiego rozwiązania jest ich zdolność do redukcji hałasu. Jest to szczególnie korzystne w zastosowaniach miejskich lub tam, gdzie drony są wykorzystywane w pobliżu ludzi – na przykład w filmowaniu, monitoringu czy dostawach.

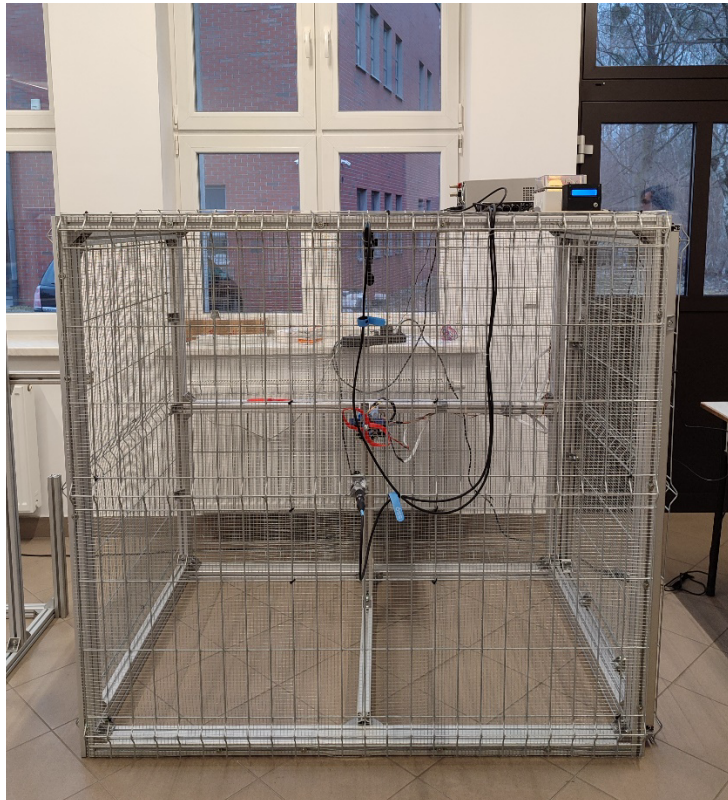
## 10.6. Zalety śmigieł toroidalnych

Śmigła toroidalne, charakteryzujące się swoim unikatowym, pierścieniowym kształtem, oferują szereg zalet w różnych zastosowaniach, od morskich po lotnicze. Jedną z kluczowych korzyści jest ich zdolność do znacznego zmniejszenia szumów i drgań, co jest niezwykle ważne w urządzeniach wymagających cichego działania, takich jak okręty podwodne czy specjalistyczne drony. Dzięki lepszemu rozkładowi przepływu powietrza lub wody wokół śmigła, zapewniają one również poprawioną wydajność, zwiększając ciąg przy niższych prędkościach obrotowych, co przekłada się na lepszą efektywność energetyczną. Ponadto, śmigła toroidalne charakteryzują się zmniejszonym ryzykiem uszkodzeń, gdyż ich łopatki są osłonięte przez pierścień, co chroni je przed uderzeniami w obiekty. To sprawia, że są one bardziej trwałe i odpowiednie dla środowisk, gdzie istnieje wysokie ryzyko kolizji. Dodatkowo, równomierny przepływ zapewniany przez te śmigła przyczynia się do lepszej stabilności i manewrowości pojazdu, co jest istotne w wielu zastosowaniach.

## 10.7. Wady śmigieł toroidalnych

Śmigła toroidalne, choć innowacyjne i przydatne w wielu zastosowaniach, posiadają również szereg wad, które mogą ograniczać ich praktyczność w niektórych sytuacjach. Jedną z głównych wad jest ich złożona konstrukcja, która nie tylko podnosi koszty produkcji, ale również wymaga bardziej skomplikowanej obsługi i konserwacji. Dodatkowo, śmigła toroidalne często wykazują mniejszą wydajność przy wyższych prędkościach. Oznacza to, że mogą nie być odpowiednie dla zastosowań, które wymagają szybkiego przemieszczania się lub wyższej wydajności. Ich unikalny kształt i rozmiar również nakładają ograniczenia na konfigurację i skalę, co może być problemem w aplikacjach wymagających dużych lub niestandardowych śmigieł. Śmigła toroidalne, ze względu na swoją unikalną konstrukcję, mogą być bardziej podatne na skomplikowane naprężenia. Zginanie wywołane siłami odśrodkowymi, czyli siłami działającymi w kierunku centrum krzywizny, może powodować dodatkowe obciążenia dla materiału, z którego wykonane są łopatki śmigła. W konwencjonalnych śmigłach, naprężenia są zazwyczaj wynikiem bezpośredniego nacisku powietrza na łopatki. W śmigłach toroidalnych, dodatkowe zginanie może powstawać przez ich unikalny kształt i sposób, w jaki siły są na nie rozkładane. To może prowadzić do szybszego zużycia materiału. Integracja śmigieł toroidalnych z istniejącymi systemami może również stanowić wyzwanie. Wymaga to często dodatkowych modyfikacji i dostosowań, co zwiększa czas i koszty implementacji.

## 10.8. Stanowisko badawcze



Rys 10.10 Stanowisko badawcze

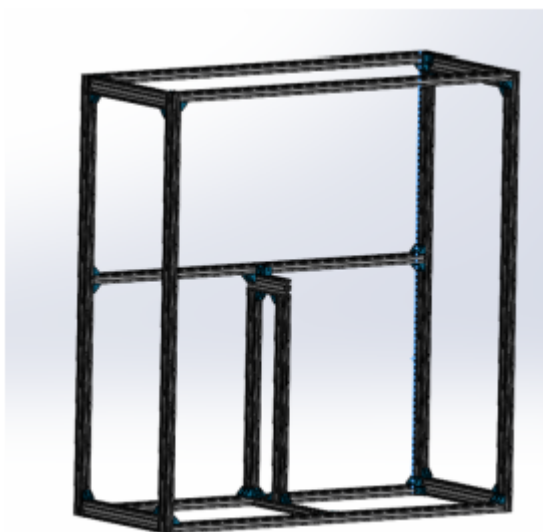
Stanowisko badawcze wykorzystywane jest do pomiaru ciągu silników BLDC. Stanowisko wykorzystuje oprogramowanie komputerowe do zapisywania wyników w czasie rzeczywistym. Moc silnika regulowana jest ręcznie. Stanowisko umożliwia przeprowadzenie pomiaru w czasie rzeczywistym takich parametrów jak:

- Napięcie  $U$  [V]
- Natężenie prądu pobieranego przez układ napędowy  $I$  [A]
- Prędkości obrotowej silnika  $n_{\text{motor}}$  [obr/min]
- Momentu obrotowego silnika  $M_{o\_motor}$  [Nm]
- Wibracji silnika z i bez śmigła

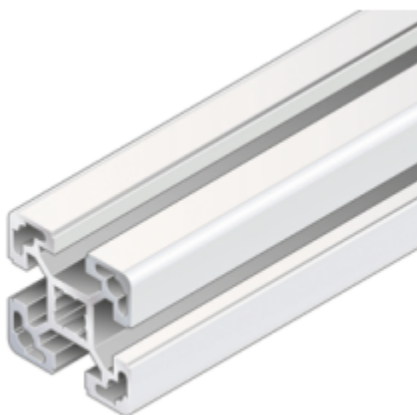
Do pomiaru momentu obrotowego oraz siły działającej został zastosowany czujnik w postaci belki tensometrycznej, ułożonej prostopadle do działania siły. Sterowanie silnikiem odbywa się za pomocą potencjometru obrotowego, który umożliwia zmianę napięcia na wyjściu do sterownika ESC, który jest wymagany, aby móc sterować obrotami silnika. W celu uniknięcia wpływu momentów skręcających na pomiary, belka tensometryczna została zamocowana przy pomocy przegubów płaskich.

## Budowa stanowiska

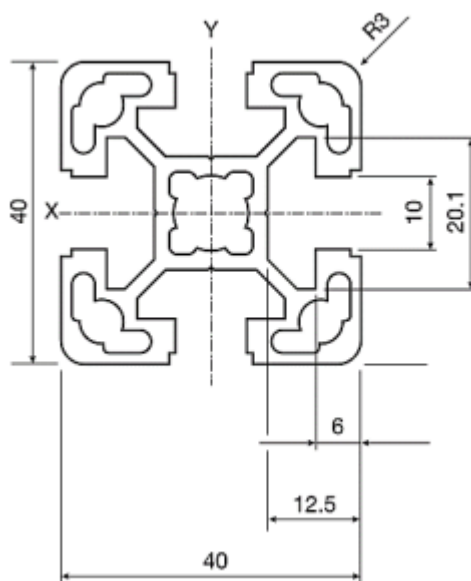
Stanowisko w postaci klatki (rys. 2) zbudowano z profili aluminiowych 40×40 mm oraz 80×40 mm firmy ITEM z rowkami montażowymi (rys. 3,4). Umożliwiają one szybki montaż i demontaż stanowiska, oraz jego ewentualne modyfikacje. Do połączenia profili wykorzystano kątowniki aluminiowe. W celu ochrony użytkownika stanowiska należało zamknąć stanowisko. Wykorzystano do tego siatkę drucianą o oczkach 10×10 mm (rys. 5) oraz panele ogrodzeniowe z drutu o grubości 3,8 mm i oczkach 60×200 mm (rys. 6).



Rys 10.11 Obudowa stanowiska [10]



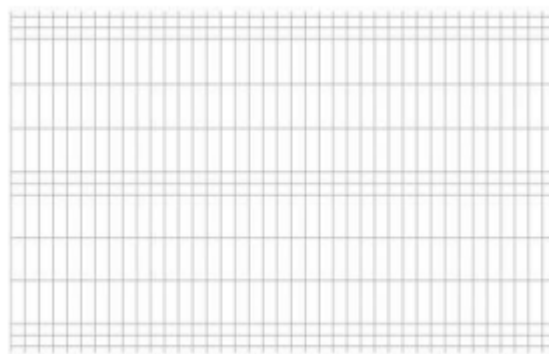
Rys 10.12 Profile aluminiowe [10]



Rys 10.13 Rowki montażowe [10]

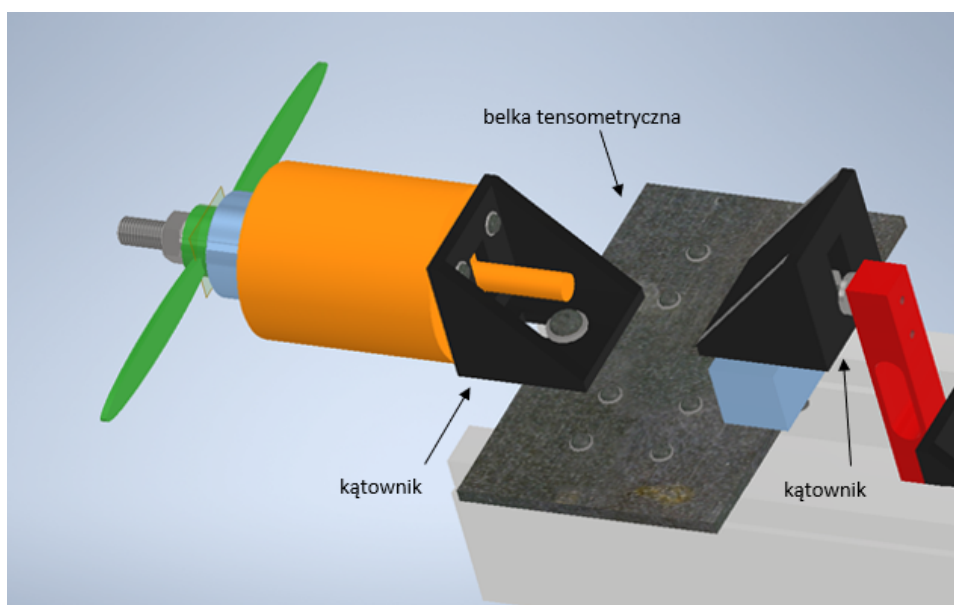


Rys 10.14 Siatka druciana [10]



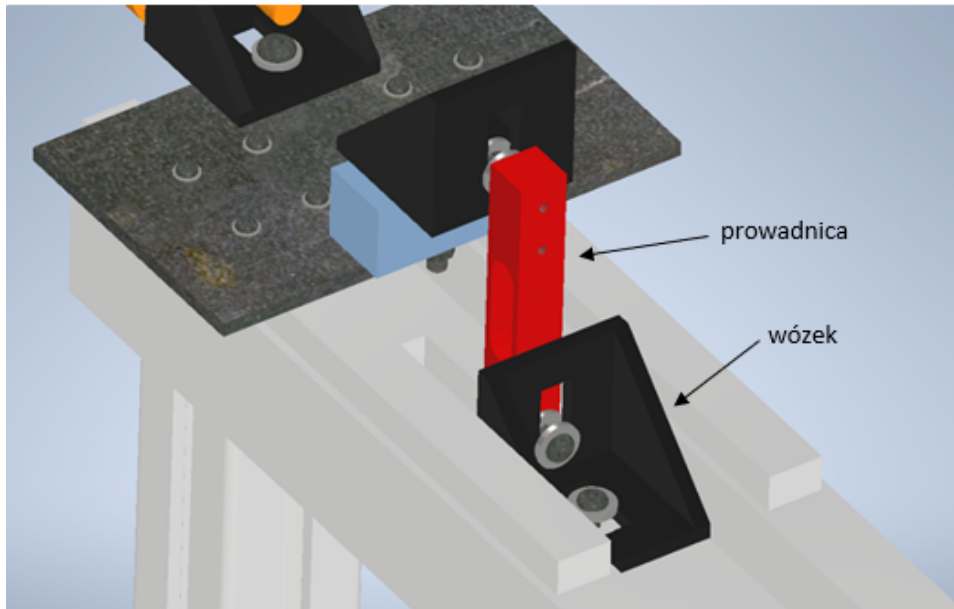
Rys 10.15 Panele ogrodzeniowe [10]

Badany zespół napędowy składa z silnika elektrycznego PROPDRIVE 50-60 380KV i płytki metalowej, na której silnik jest zamocowany przy pomocy kątownika. Warto zaznaczyć, że analizowany zespół napędowy jest łatwo wymienialny, co oznacza, że użytkownik może stosunkowo łatwo samodzielnie wymienić elementy bez konieczności posiadania zaawansowanej wiedzy technicznej. Płytkę jest połączona z przewodnikami tocznymi, aby układ podczas generowania ciągu mógł się swobodnie przemieścić o odległość potrzebną do pomiaru przez belkę tensometryczną. Energię do działania silnika zapewnia zasilacz główny, który dzięki swojej programowalności, umożliwia elastyczny dobór parametrów przez użytkownika, takich jak: napięcie wyjściowe, prąd wyjściowy czy inne istotne parametry. Do uzyskania pomiarów takich jak: moment obrotowy czy siła ciągu, wykorzystuje się belkę tensometryczną w położeniu prostopadłym do działania wektora siły (rys. 7).



Rys 10.16 Zespół napędowy [10]

Belka tensometryczna została zamocowana przy pomocy dwóch kątowników do wózka poruszającego się po prowadnicach tocznych oraz do profilu aluminiowego. W celu połączenia belki z profilem został wykonany otwór o wielkości pozwalającej na swobodne umiejscowienie belki tensometrycznej wraz z kablami (rys. 8).

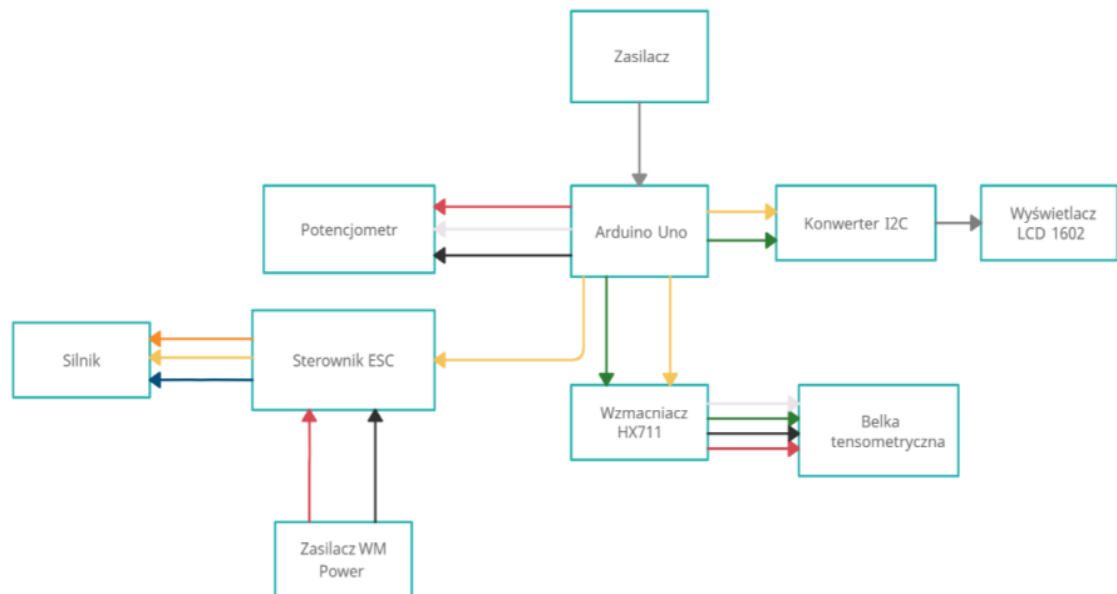


Rys 10.17 Schemat zespołu napędowego [10]

### Zasada działania stanowiska

Belka tensometryczna została zaprojektowana do pomiaru różnych sił, takich jak siły nacisku, rozciągające czy ściskające. Belka operuje na zasadzie fizycznej charakterystyki przewodników, gdzie modyfikacje w długości belki wywołują zmiany w jej oporności. Prowadnice są przymocowane do środkowego profilu stanowiska za pomocą śrub. W budowie stanowiska do przeprowadzenia pomiarów wykonano układ elektroniczny do pomiaru siły ciągu silnika z podłączonym śmigłem. W ramach rozwiązania wykorzystano mikrokontroler Arduino oraz belkę tensometryczną do pomiaru siły nacisku. Po zakończeniu pomiaru aplikacja tworzy wykres zależności siły ciągu od obrotów silnika. Podczas obrotu gałką potencjometr wysyła sygnał z zakresu 0 do 1024 do mikrokontrolera. Aby sygnał dawał rzetelną informację, tzn. wysyłał wartości w voltach za pomocą kodu należy odpowiednio skonfigurować i przeliczyć podawane przez niego wartości.

## Schemat działania układu napędowego



Rys 10.18 Schemat działania układu [10]

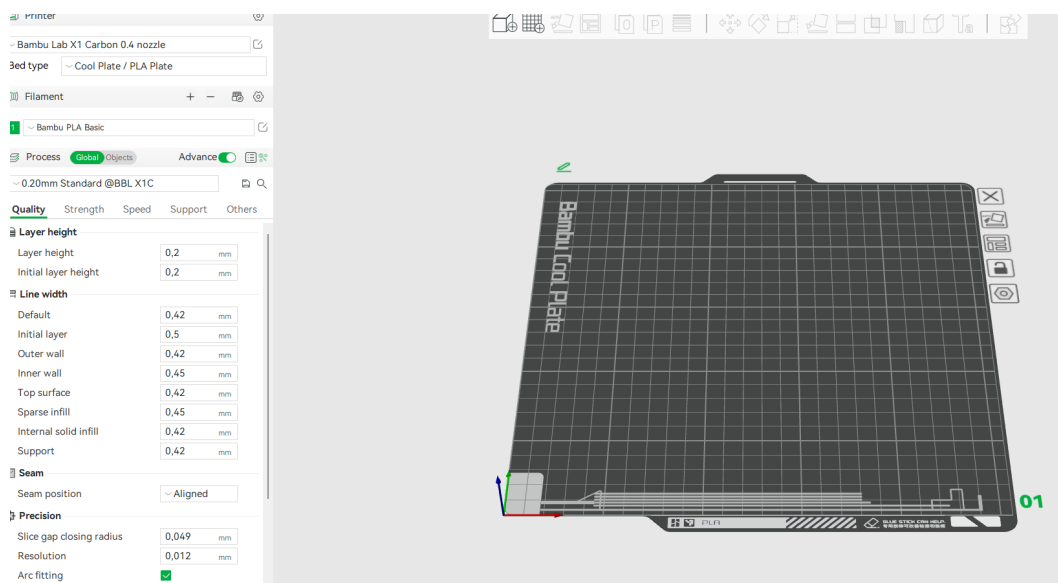
## 10.9. Proces tworzenia modeli CAD oraz druk 3D

Druk 3D to zaawansowana technologia umożliwiająca tworzenie trójwymiarowych obiektów poprzez nanoszenie warstw materiału, a jedną z branż, w której znajduje szerokie zastosowanie, jest przemysł lotniczy. Druk 3D umożliwia szybkie i precyzyjne wytwarzanie skomplikowanych komponentów konstrukcyjnych, co jest kluczowe w produkcji lotniczej. Ten proces pozwala na tworzenie lekkich, wytrzymałych i złożonych struktur, które mogą być trudne lub niemożliwe do osiągnięcia za pomocą tradycyjnych metod produkcyjnych. W branży lotniczej druk 3D jest wykorzystywany do produkcji prototypów, komponentów do silników, elementów konstrukcyjnych i wielu innych części, co przyczynia się do innowacyjności i efektywności w projektowaniu i wytwarzaniu konstrukcji lotniczych. Do drukowania użyto drukarki 3D Bambu Lab X1 Carbon.



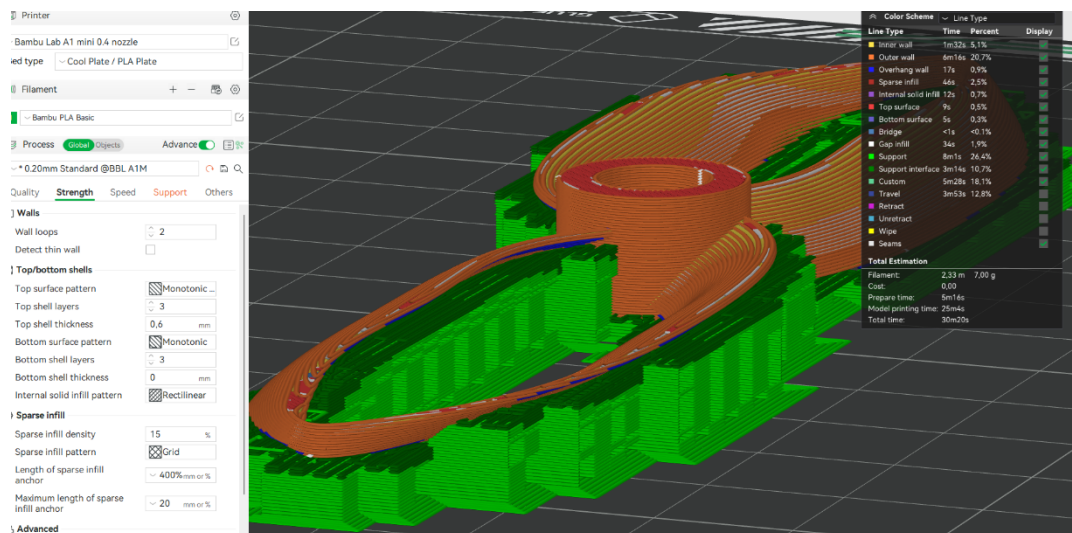
10.19 Drukarka 3D Bambu Lab X1 Carbon [14]

Drukarka ta to rewolucyjne narzędzie, które wnosi wiele innowacji do świata druku 3D. Dzięki innowacyjnej konstrukcji CoreXY, osiąga prędkości do 500 mm/s, co skraca czas drukowania. Wykorzystanie potencjału sztucznej inteligencji monitoruje proces druku, wykrywa ewentualne nieprawidłowości i sprawdza pierwszą warstwę wydruku. Dzięki aktywnej redukcji drgań, płynności osi Z i precyzyjnej kontroli przepływu filamentu, drukarka zapewnia gładkie i dokładne wydruki, zachowując najmniejsze szczegóły. Drukarka jest kompatybilna z różnorodnymi filamentami, w tym z zaawansowanymi, takimi jak te z dodatkiem włókna węglowego i szklanego. [14]



Rys 10.20 Przygotowanie do wydruku w programie Bambulab



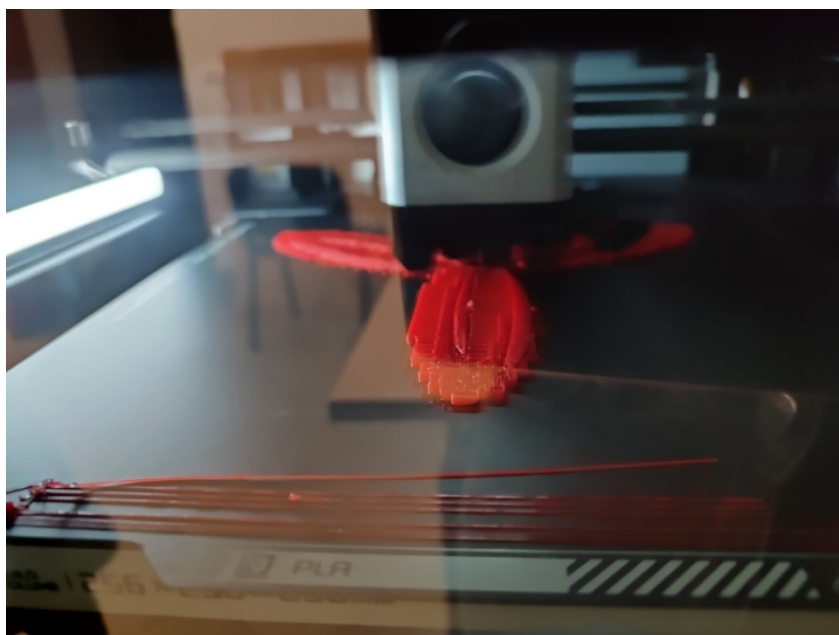


Rys 10.21 Model gotowy do wydruku

Podczas procesu druku 3D śmigła toroidalnego zastosowano filament PLA jako materiał do drukarki. Dla zapewnienia optymalnej wytrzymałości konstrukcji, wybrano 100% wypełnienie oraz zastosowanie warstwy o grubości 0,08 mm. W celu utrzymania integralności geometrii śmigła, konieczne było użycie wsporców strukturalnych. Te wsparcia są niezbędne dla obszarów, które w programie modelującym są reprezentowane jako zawieszony w przestrzeni. Takie podejście zapewnia zachowanie precyzji i stabilności modelu podczas procesu druku 3D.



Rys 10.22. Proces wydruku w drukarce Bambulab



Rys 10.23. Proces wydruku w drukarce Bambulab

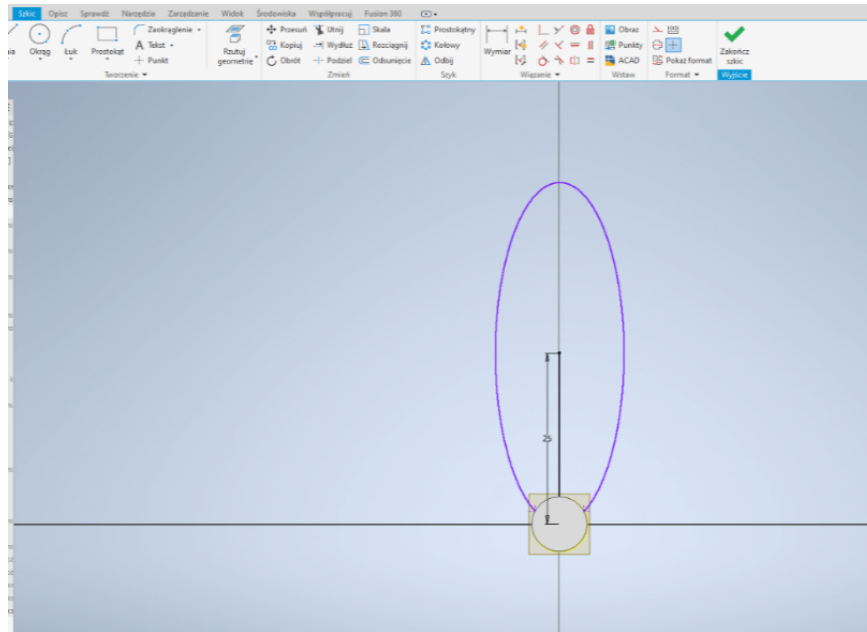


Rys 10.24 Wydrukowane śmigła

### **Model CAD śmigła toroidalnego**

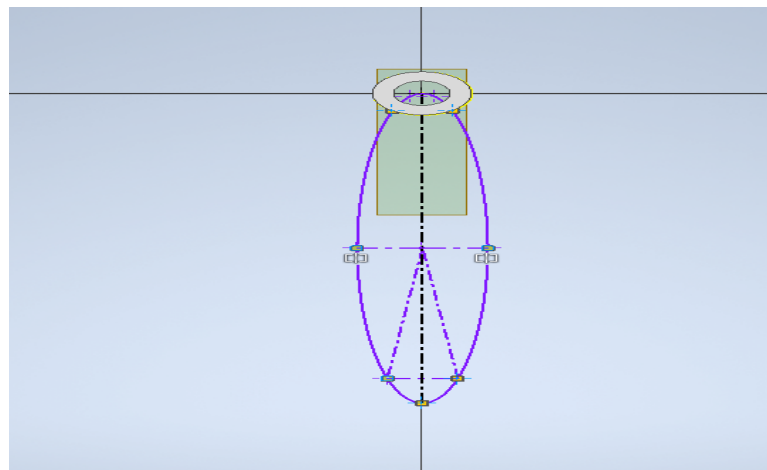
W celu stworzenia zaawansowanych łopatek toroidalnych, poniżej przedstawiony jest szczegółowy opis procesu:

1. W pierwszym etapie konstrukcji cylindra został utworzony rdzeń śmigła



Rys 10.25 Pierwszy etap projektowania

2. Wyznaczono siedem istotnych punktów wokół zewnętrznej krawędzi cylindra.



Rys 10.26 Drugi etap projektowania

3. Do kształtowania odpowiedniego profilu aerodynamicznego użyto zaawansowanych programów takich jak Airfoil do uzyskania najbardziej zoptymalizowanych łopatek.

**Airfoil Tools**  
Search 1638 airfoils

You have 0 airfoils loaded.  
Your Reynolds number range is: 50,000 to 1,000,000 ( )

ENHANCED BY Google Search

**Applications**  
Airfoil database search  
My airfoils  
Airfoil plotter  
Airfoil comparison  
Reynolds number calc  
NACA 4 digit generator  
NACA 5 digit generator

**Information**  
Airfoil data  
Lift/drag polars  
Generated airfoil shapes

**Searches**  
Symmetrical airfoils  
NACA 4 digit airfoils  
NACA 5 digit airfoils  
NACA 6 series airfoils

**Airfoils A to Z**  
A a15 to avistar (25)  
B b29root to bw3 (22)  
C c141a to curtisc72 (40)  
D dae11 to du861372 (28)  
E e1095 to esa40 (209)  
F falcon to fsx21155 (121)  
G geminiam to gu255118 (419)  
H hh02 to ht23 (63)  
I isa871 to isa952 (4)  
J j5012 to joukowsk0021 (7)  
K k1 to kenmar (11)  
L l1003 to lwk80150k25 (24)  
M m1 to mue139 (95)  
N n0009sm to npx (174)  
O oa206 to oaf139 (9)  
P p51droot to pws8mod (16)  
R r1045 to rmodsg36 (63)  
S s1010 to supermarine371ii (176)  
T tempest1 to tsag8 (8)  
U ua2 to usmp4 (36)  
V v13005 to vr9 (17)  
W waspm to whitcomb (4)  
Y ys900 to ys930 (3)  
List of all airfoils

**Site**  
Home  
Contact  
Privacy Policy

## CLARK Y AIRFOIL (clarky-ii)

### CLARK Y AIRFOIL - CLARK Y airfoil

**Details**  
(clarky-ii) CLARK Y AIRFOIL  
CLARK Y AIRFOIL  
Max thickness 11.7% at 25% chord.  
Max camber 3.4% at 42% chord  
Source [UIUC Airfoil Coordinates Database](#)  
[Source dat file](#)  
The dat file is in Lednicer format

**Dat file**  
CLARK Y AIRFOIL  
61.0 61.0  
0.0000000 0.0000000  
0.0005000 0.0023390  
0.0010000 0.0037271

**Parser**  
No parser warnings  
[Send to airfoil plotter](#)  
[Add to comparison](#)  
[Lednicer format dat file](#)  
[Seta format dat file](#)

**Similar airfoils**

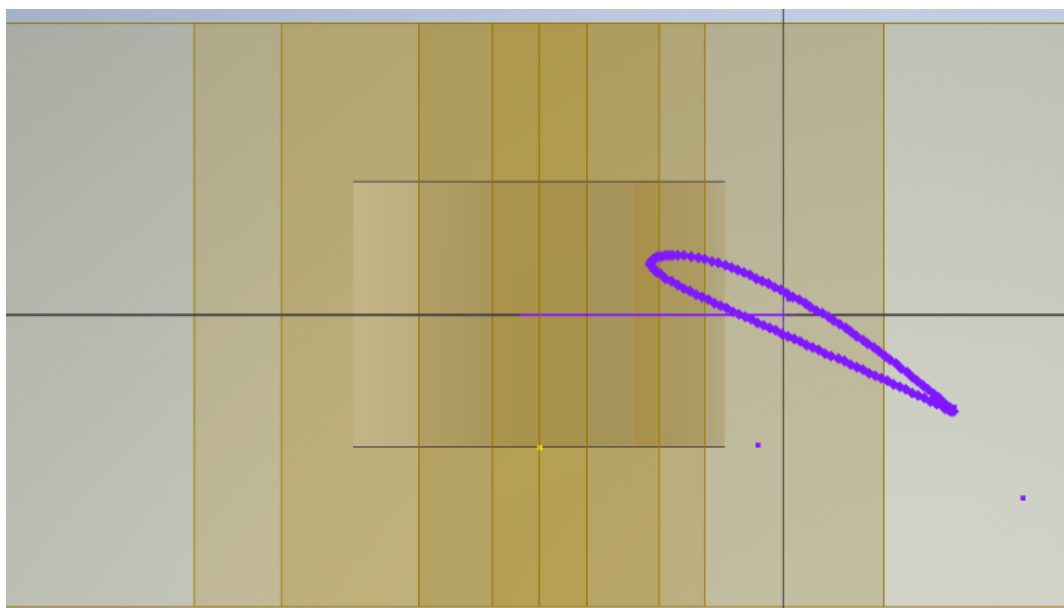
|                        |                         |                         |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CLARK K AIRFOIL        | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| CLARK X AIRFOIL        | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| CLARK Y 11.7% smoothed | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| GOE 683 AIRFOIL        | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| GOE 796 AIRFOIL        | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| PT40                   | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| GOE 623 AIRFOIL        | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| Davis AIRFOIL          | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| N-10                   | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |
| Rhode St. Genese 32    | <a href="#">Preview</a> | <a href="#">Details</a> |

**Polars for CLARK Y AIRFOIL (clarky-ii)**

| Plot                                | Airfoil   | Reynolds # | Ncrit | Max C/l/cd                  | Description    | Source   |
|-------------------------------------|-----------|------------|-------|-----------------------------|----------------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> | clarky-ii | 50,000     | 9     | 29.6 at $\alpha=9.25^\circ$ | Mach=0 Ncrit=9 | <a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a> |
| <input type="checkbox"/>            | clarky-ii | 50,000     | 5     | 36.5 at $\alpha=7.5^\circ$  | Mach=0 Ncrit=5 | <a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a> |
| <input type="checkbox"/>            | clarky-ii | 100,000    | 9     | 53 at $\alpha=6.75^\circ$   | Mach=0 Ncrit=9 | <a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a> |
| <input type="checkbox"/>            | clarky-ii | 100,000    | 5     | 54.1 at $\alpha=6^\circ$    | Mach=0 Ncrit=5 | <a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a> |
| <input checked="" type="checkbox"/> | clarky-ii | 200,000    | 9     | 73.2 at $\alpha=4.75^\circ$ | Mach=0 Ncrit=9 | <a href="#">Xfoil prediction</a> <a href="#">Details</a> |

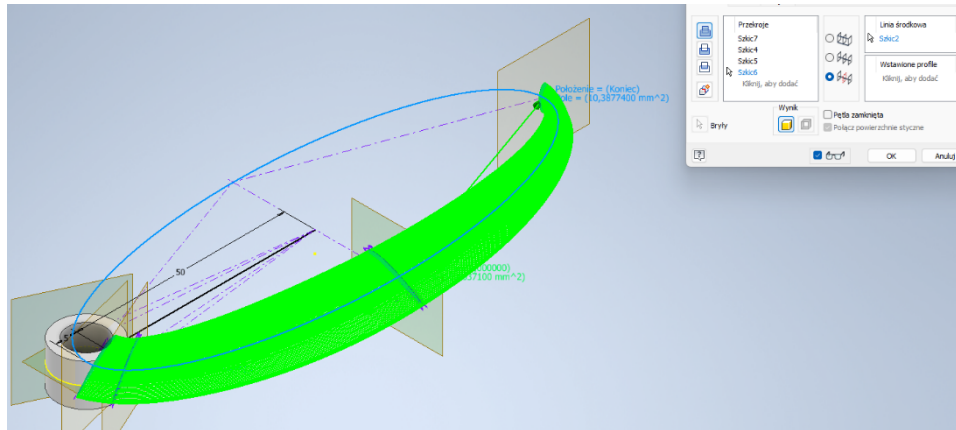
Rys 10.27 Airfoil tools [13]

4. Wykorzystano narzędzia dostępne w programie Autodesk Inventor do dostrojenia kształtu łopatek w kluczowych punktach

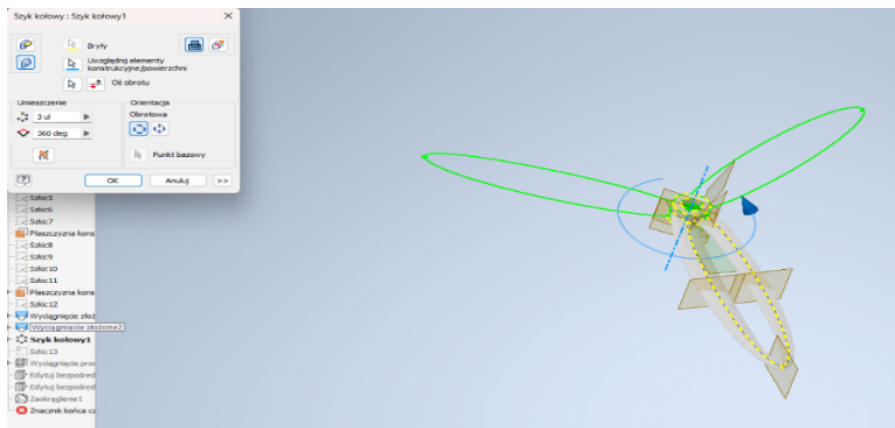


Rys 10.28 Trzeci etap

5. Zastosowano funkcję wyciągnięcie złożone, a następnie "szyk kołowy" dla całkowitego ukształtowania śmigła



Rys 10.29 Wyciągnięcie złożone



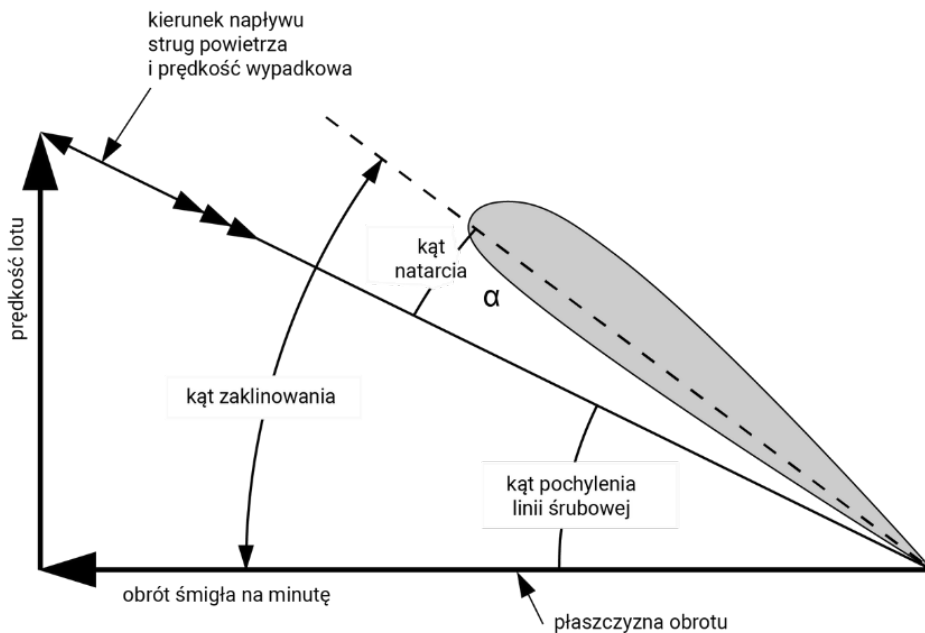
Rys 10.30 Finalny etap

Tab. 10.1 Porównanie profilu Clark Y z innymi profilami lotniczymi [12]

| Lp | $\alpha$ | I.A.W.- 743 Cx | I.A.W.- 743 Cz | CLARK Y |       | GA (W) - 1 |      |
|----|----------|----------------|----------------|---------|-------|------------|------|
|    |          |                |                | Cx      | Cz    | Cx         | Cz   |
| 1  | -4       | 0,013          | -0,2           | 0,01    | 0,1   | 0,011      | 0    |
| 2  | -2       | 0,0106         | 0              | 0,017   | 0,25  | 0,011      | 0,2  |
| 3  | 0        | 0,0093         | 0,2            | 0,0172  | 0,384 | 0,011      | 0,5  |
| 4  | 2        | 0,0106         | 0,43           | 0,02    | 0,5   | 0,011      | 0,7  |
| 5  | 4        | 0,02           | 0,64           | 0,025   | 0,68  | 0,0115     | 1    |
| 6  | 6        | 0,03           | 0,82           | 0,0465  | 0,819 | 0,0155     | 1,4  |
| 7  | 7        | 0,035          | 0,90           | 0,05    | 0,89  | 0,016      | 1,42 |
| 8  | 8        | 0,04           | 0,95           | 0,058   | 0,98  | 0,018      | 1,5  |
| 9  | 10       | 0,05           | 1,02           | 0,075   | 1,1   | 0,02       | 1,6  |
| 10 | 13       | 0,075          | 1,08           | 0,11    | 1,29  | 0,0225     | 1,7  |
| 11 | 16       | 0,08           | 1,06           | 0,14    | 1,38  | 0,03       | 1,8  |

## Podstawowe charakterystyki aerodynamiczne płata nośnego samolotu

$\alpha$  - kąt zawarty pomiędzy kierunkiem napływającej strugi powietrza a cięciwą profilu skrzydła



Rys 10.31 Kąt natarcia [15]

### Cx. współczynnik oporu aerodynamicznego

Reprezentuje stosunek oporu aerodynamicznego płata samolotu do dynamicznego ciśnienia atmosferycznego i kwadratu prędkości lotu.

1. Im mniejsza wartość  $C_x$ , tym mniejszy opór aerodynamiczny i efektywniejsze działanie skrzydła.
2. W równaniu obliczania oporu całkowitego płata skrzydła,  $C_x$  uwzględnia opór profilowy (kształtu) oraz opór indukowany.

### Cz. współczynnik siły nośnej

1. Reprezentuje stosunek siły nośnej wytworzonej przez skrzydło samolotu do dynamicznego ciśnienia atmosferycznego i kwadratu prędkości lotu.
2. Jest miarą efektywności generowania siły nośnej przez skrzydło.
3. W równaniu siły nośnej skrzydła,  $C_z$  jest bezpośrednio związane z kątem natarcia płata.

## Zalety profilu Clark Y

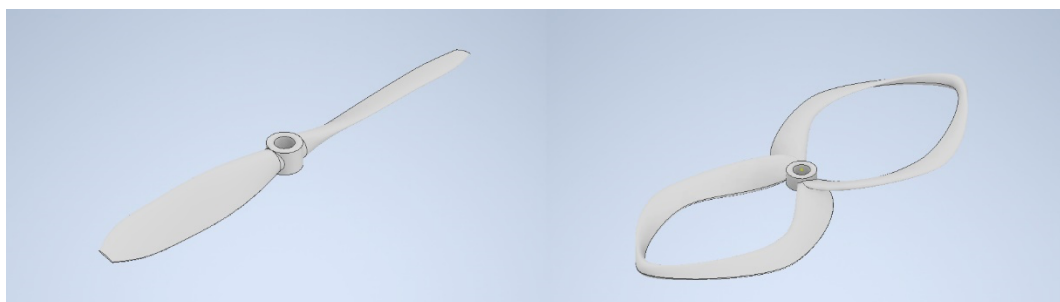
Profil Clark Y jest powszechnie używany w konstrukcji ogólnego zastosowania dla różnych modeli samolotów. Jest stosunkowo wszechstronny i sprawdza się w wielu sytuacjach. Posiada płaskie dno, co ułatwia pomiar kątów na śmigłach oraz prostą konstrukcję skrzydeł. Jest to szczególnie przydatne dla początkujących modelarzy, którzy mogą łatwiej budować modele o dobrej charakterystyce lotnej. Charakteryzuje się odpornością na uszkodzenia i ma stałe właściwości aerodynamiczne. Krawędź natarcia i spływu utrzymują się stabilnie, co ułatwia pilotaż modelu.

## Wady profilu Clark Y

W porównaniu do bardziej zaawansowanych profili aerodynamicznych, Clark Y generuje większy opór aerodynamiczny. Modele z profilem Clark Y latają zazwyczaj wolniej niż te z bardziej zaawansowanymi profilami, co może być uznawane za wadę w przypadku bardziej wymagających zastosowań.

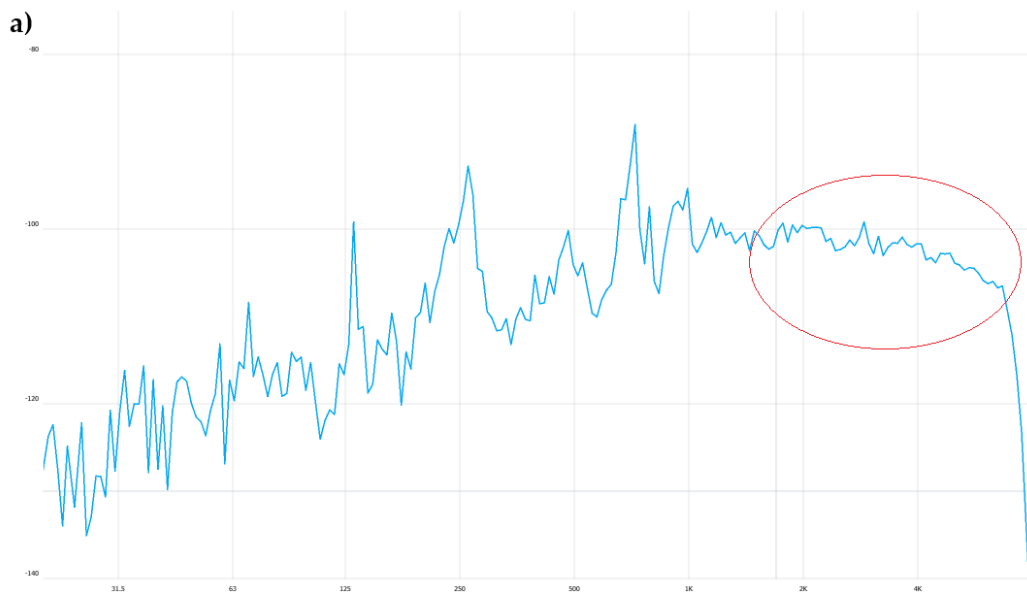
## 10.11. Badania przeprowadzone na stanowisko pomiaru siły ciągu oraz emisji hałasu

Do przeprowadzenia badania generowanego ciągu oraz emisji hałasu zostało poddane śmigło tradycyjne oraz toroidalne. Oba obiekty badawcze posiadają jednakowe średnice, profile aerodynamiczne oraz zostały wykonane jednakową metodą wydruku 3D z zastosowaniem tego samego materiału oraz parametrów druku.

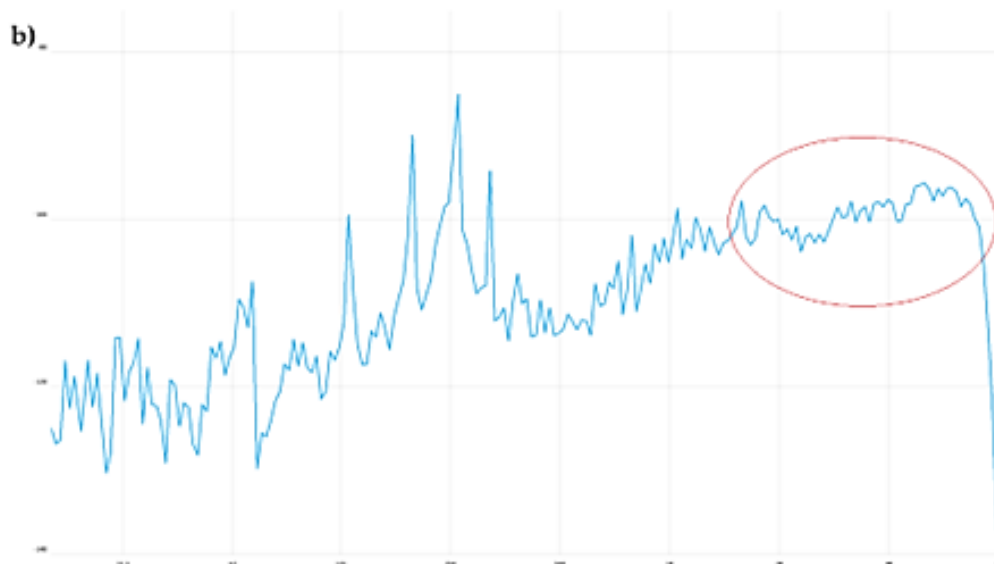


Rys 10.32 Zestawienie śmigła konwencjonalnego dwułopatowego oraz śmigła toroidalnego dwułopatowego

Do pomiaru emisji hałasu posłużyły trzy mikrofony pojemnościowe wysokiej jakości marki Superlux ECM 999 oraz program ogólnodostępny program o nazwie Open Sound Meter. Wyniki tych badań można zaobserwować na poniższych wykresach.



Rys 10.33 Charakterystyka emisji hałasu przy 7600 obr/min śmigło toroidalne

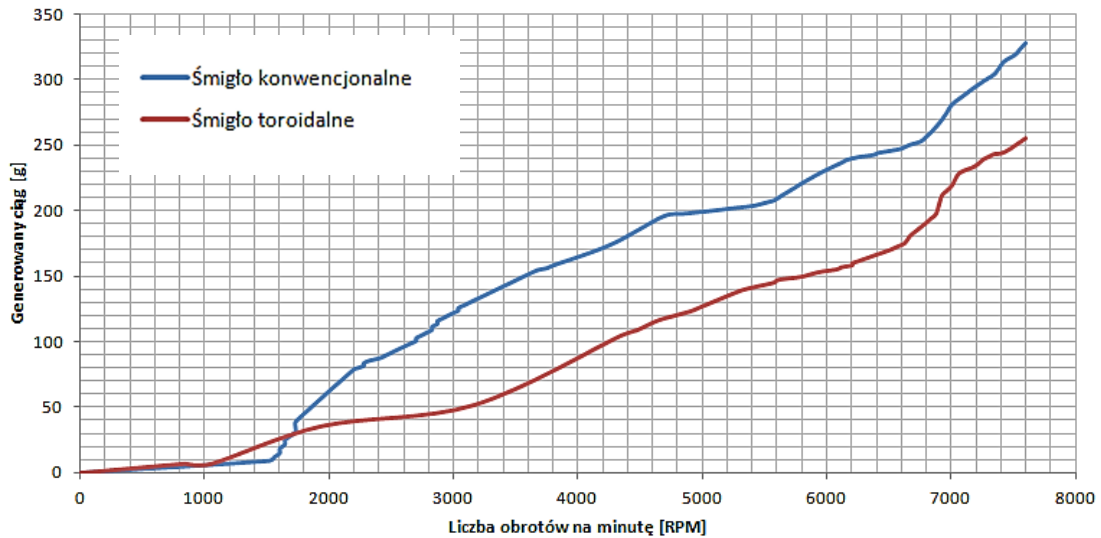


Rys 10.34 Charakterystyka emisji hałasu przy 7600 obr/min śmigło konwencjonalne

Częstotliwości zaznaczone czerwonymi elipsami na powyższych wykresach to zakres między 2kHz a 8kHz. Częstotliwości w tym zakresie klasyfikowane są jako dźwięki o wysokich częstotliwościach, które powszechnie uważane są jako nieprzyjemne dla ludzkiego ucha. Na podstawie wykresów można stwierdzić znaczące różnice między śmigłem toroidalnym a tradycyjnym. W tym zestawieniu, śmigło toroidalne generuje o około 10 decybeli mniej w zakresie wysokich częstotliwości.



## Porównanie generowanego ciągu przez śmigło konwencjonalne oraz toroidalne



Rys 10.35 Porównanie generowanego ciągu przez śmigło konwencjonalne oraz toroidalne

Dla maksymalnych obrotów pomiaru, które wynoszą 7600 obr/min ciąg generowany przez śmigło toroidalne wynosi 254,78 [g], natomiast ciąg generowany przez śmigło konwencjonalne wynosi 327,8 [g]. Wynika z tego, że jest o ok. 28% więcej ciągu generowanego przez śmigło konwencjonalne względem śmigła toroidalnego.

### 10.12. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych prób możliwe jest postawienie hipotezy, że śmigła toroidalne spełniają założenia postawione na początku badań. W rezultacie, śmigła toroidalne zmniejszają hałas wysokich częstotliwości (przedział 2 kHz do 8 kHz) względem tradycyjnych śmigieł. Jednakże, przeprowadzone badania wykazały, że śmigła toroidalne generują mniejszy ciąg porównując ze śmigłami konwencjonalnymi.

### 10.13. Podsumowanie

Artykuł przedstawia innowacyjne podejście do konstrukcji i działania śmigieł w przemyśle lotniczym. Śmigła toroidalne są prezentowane jako przełomowe rozwiązanie, które może zrewolucjonizować obecne standardy w zakresie wydajności, bezpieczeństwa i ekologiczności lotów. Dzięki swojej unikalnej

konstrukcji, śmigła te oferują zwiększoną wydajność poprzez zmniejszenie hałasu. Ponadto, wprowadzenie śmigieł toroidalnych może otworzyć nowe możliwości dla projektantów lotniczych, oferując im więcej swobody w eksperymentowaniu z kształtami i rozmiarami statków powietrznych. Choć technologia ta jest obiecująca, jej wprowadzenie na rynek będzie wymagało dalszych badań, testów i inwestycji, aby dopracować geometrię samego śmigła oraz odpowiedni dobór silnika, tak aby otrzymać parametry porównywalne ze śmigłami konwencjonalnymi.

Projekt częściowo finansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach Programu „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”, numer projektu: SKN/SP/569377/2023 oraz w ramach dofinansowania projektów realizowanych w ramach studenckich kół naukowych a także Project Based Learning - Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza

## BIBLIOGRAFIA

1. MIT Lincoln Laboratory [https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/other/doc/2023-02/TVO\\_Technology\\_Highlight\\_41\\_Toroidal\\_Propeller.pdf](https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/other/doc/2023-02/TVO_Technology_Highlight_41_Toroidal_Propeller.pdf) [Data uzyskania dostępu: 02.01.2024]
2. Sharrow Marine <https://sharrowmarine.com/> [Data uzyskania dostępu: 02.01.2024]
3. MIT Lincoln Laboratory <https://www.ll.mit.edu/news/six-lincoln-laboratory-inventions-win-rd-100-awards> [Data uzyskania dostępu: 21.12.2023]
4. Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=M0nMW1E8J90> [Data uzyskania dostępu: 23.12.2023]
5. Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=UUPffl7JxKw> [Data uzyskania dostępu: 23.12.2023]
6. GrabCad <https://grabcad.com/library/3-blade-propeller> [Data uzyskania dostępu: 23.12.2023]
7. Thecfiguy <https://www.thecfiguy.com/single-post/2018/02/19/no-this-was-not-a-prop-strike-the-benefits-of-these-props-are-huge> [Data uzyskania dostępu: 23.12.2023]
8. Windsourcing <https://www.windsourcing.com/en/trailing-edge-serrations-as-a-retrofit-solution-for-noise-reduction-on-senvion-wtgs> [Data uzyskania dostępu: 23.12.2023]

9. Wikipedia [https://en.wikipedia.org/wiki/Ducted\\_propeller](https://en.wikipedia.org/wiki/Ducted_propeller) [Data uzyskania dostępu: 23.12.2023]
10. Raport – stanowisko badawcze opera [Raport - stanowiska badawcze OPERA.docx](#) [Data uzyskania dostępu: 02.01.2024]
11. National Aeronautics and Space Administration: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19700005920/downloads/19700005920.pdf> [Data uzyskania dostępu: 02.01.2024]
12. Clark Y information [Dlaczego Jastrząb zawiódł? Część I | dlaPilota.pl](#) [Data uzyskania dostępu: 30.01.2024]
13. Clark Y airfoil [CLARK Y AIRFOIL \(clarky-il\) \(airfoiltools.com\)](#) [Data uzyskania dostępu: 30.01.2024]
14. [Bambu Lab X1 Series | Desktop 3D Printer | X1-Carbon - Bambu Lab](#) [Data uzyskania dostępu: 30.01.2024]
15. [Zintegrowana Platforma Edukacyjna \(zpe.gov.pl\)](#) [Data uzyskania dostępu: 30.01.2024]



# Rozdział 11

---

## SKRZYDŁA INNOWACJI: ORNITOPTERY W ŚWIECIE DRONÓW

Kopec A.<sup>1</sup>, Ha Van B.<sup>2</sup>, Pająk K.<sup>3</sup>, Skarka W.<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup> SKN Aerospace Engineering

<sup>4</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

### 11.1. Wstęp

#### Inspiracja naturą

W dziedzinie nauki i technologii stale występuje trend inspirowania się naturą w tworzeniu nowych wynalazków, rozwiązań. Nie jest to nowe zjawisko, gdyż już w przeszłości geniusze, tak jak Leonardo da Vinci, znajdowali inspirację w naturze, co dało w rezultacie niezwykle, innowacyjne dzieła. Nie ma się więc czemu dziwić, że trend ten jest obecny od wielu lat, a nawet wieków, organizmy takie jak rośliny, zwierzęta ewoluowały tysiące lat, żeby przystosować się do otaczających je warunków, a każdy gatunek zrobił to trochę inaczej, nabywając swoje osobliwe „supermoce” które naukowcy, wynalazcy, badacze mogą wykorzystać w badaniach i rozwiązaniach problemów współczesnego świata.

#### Czym jest ornitopter?

Idealnym przykładem syntezy technologii i inspiracji naturą są ornitoptery. Ale co to takiego ornitopter? To rodzaj maszyny latającej, która czerpie inspirację z różnorodności natury, łącząc cechy nietoperzy, ptaków i owadów. W tym artykule zgłębiona zostanie ta fascynująca dziedzina, a także przedstawiona zostanie seria projektów, tych skończonych jak i tych które aktualnie są realizowane. Realizowany projekt to próba stworzenia lotniczej maszyny, która nie tylko imituje, ale i doskonali zdolności lotnicze zwierząt. Ornitoptery jako drony inspirowane mechanizmem lotu organizmów, obejmują szeroki zakres od tych najmniej ewolucyjnie skomplikowanych, jak stawonogi, aż po te, które wspięły się wyżej po drabinie ewolucji, jak ptaki i nietoperze. Jest to technologia stosunkowo młoda i jeszcze nie została w pełni wprowadzona w szeroki użytek. Z tego powodu powstały projekty, mające na celu poprzez budowę i badanie ornitopterów aktywne wsparcie rozwoju tej dziedziny.

### **Przedstawienie realizowanego projektu**

Ta ciekawa technologia zainspirowała zespół studentów do wykonania projektu, w ramach którego powstał demonstrator poruszający skrzydłami. Obecnie realizowane są również projekty, finansowane w ramach zajęć PBL oraz finansowania projektów studenckich kół naukowych, fundusze były uzyskane dzięki finansowaniu w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza. Realizowane projekty mają na celu ulepszenie zrobionego już demonstratora oraz wykonanie stanowiska badawczego.

## **11.2. OWADY, PTAKI, A MOŻE NIETOPERZE?**

Grupa organizmów zdolnych do lotu to idealny przykład tego jak różne gatunki wykształcają indywidualne umiejętności, osobliwe style i strategie lotów. U samych ptaków można dostrzec te różnice w mechanice lotu, niektóre ptaki poruszają się szybko i są zwrotne, niektóre są „specjalistami” od długodystansowych lotów. Niektóre tak jak kolibry można rozważać jako osobny przypadek, ponieważ wykonują specyficzne ruch skrzydeł, gdy zawisają w powietrzu. Wszystkimi tymi osobliwymi cechami możemy inspirować się tworząc ornitoptery do wyspecjalizowanych zadań, co tylko pokazuje jak wielki potencjał drzemie w tej technologii

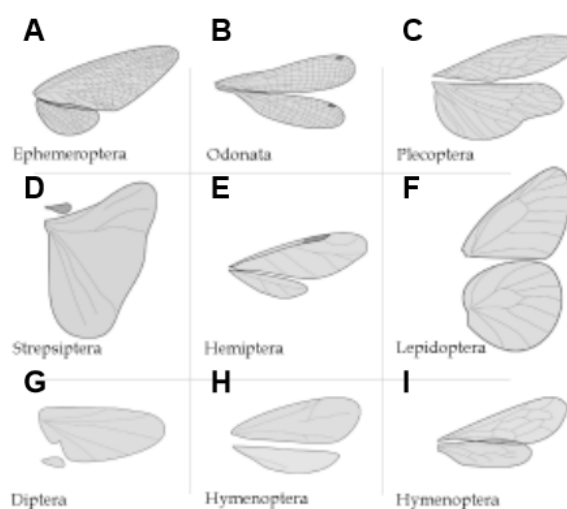
### **Podział skrzydeł**

Skrzydła są kluczowym elementem ornitopterów. Podział na skrzydła nietoperze, skrzydła ptaków i skrzydła owadów wprowadza dodatkową

różnorodność w konstrukcji, wpływając na efektywność lotu. W naszym opracowaniu skupimy się głównie na skrzydłach ptaków.

## A. Owady

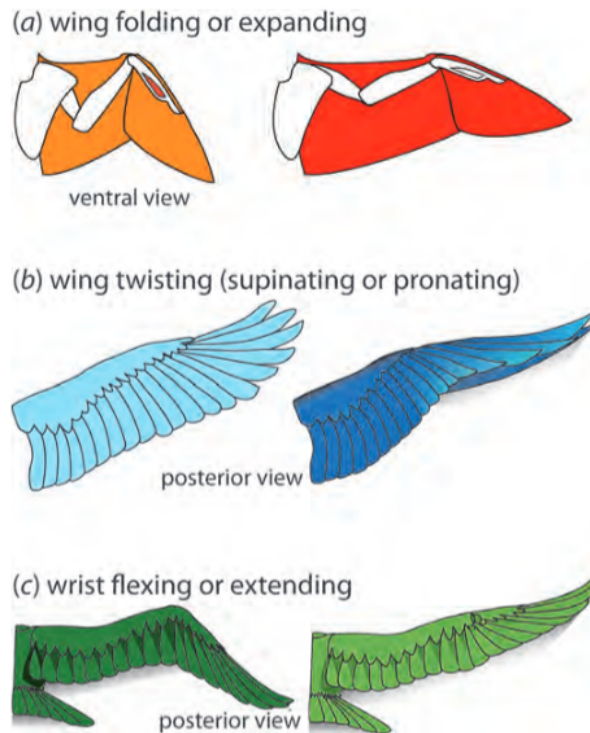
Owady mają wysoką częstość uderzeń skrzydeł w porównaniu z ptakami czy nietoperzami. Skrzydła owadów różnią się też budową - mają one formę cienkiej błonki rozpostartej na ramie utworzonej z żyłek. Znacznie różnią się kształtem i wielkością między gatunkami.



Rys 11.1 Skrzydła różnych gatunków owadów [2]

## B. Ptaki

Skrzydła ptaków łączy to, że każde porusza się w górę i w dół (poza kolibrami, które można rozważać jako osobny przypadek). Ruch w dół generuje znaczną większość siły unoszącej ptaka. Natomiast podczas ruchu do góry na skrzydła działają największe opory, żeby je zmniejszyć ptaki wykonują ruchy takie jak zginanie łokcia i przywodzenie nadgarstka [4]. Mają one na celu zmniejszenie czynnej powierzchni skrzydła, a co za tym idzie zmniejszenie sił na nie działające. Zmiana kształtu skrzydeł może również poprawić kontrolę lotu, umożliwiając przejściowe zmiany w celu utrzymania stabilności lotu, takie jak składanie skrzydeł w odpowiedzi na turbulencje [4]. Zmiana kształtu skrzydeł może być pasywna lub też aktywna. Pasywna zmiana nie jest wywołana pracą mięśni, a elastyczność i właściwości piór, które wyginają się i zmieniają kształt pod wpływem działających na nie sił aerodynamicznych, mogą pełnić one funkcje porównywalną do wingletów na samolotach i zmniejszać opory powietrza towarzyszące lotowi. Ptaki są też zdolne do aktywnej zmiany kształtu skrzydła, do takich zmian wykorzystują one mięśnie, do aktywnej zmiany skrzydeł zaliczamy także kontrolowanie pasywnego procesu składania skrzydeł i przeciwdziałanie mu w celach kontrolowania lotu.



Rys 11.2 Aktywna zmiana kształtów skrzydła ptaka a) składanie skrzydeł b) skręt skrzydła c) zginanie skrzydła [2]

skręt skrzydła (ang. wing twisting) polega na zmianie kąta natarcia na długości skrzydła. Ponieważ prędkość skrzydeł, a w konsekwencji kąt natarcia w naturalny sposób zwiększają się wraz z rozpiętością nieskręconego skrzydła, ptaki muszą skręcić skrzydła, aby znormalizować kąt natarcia i zmniejszyć przeciągnięcie na końcach skrzydeł [4]. Proces ten może zachodzić pasywnie lub aktywnie, w tym przypadku zaangażowany jest nadgarstek w skrzydle ptaka. Skrzydła mogą być także poruszane w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny skrzydła (ang. flexing and extending), ruch ten pozwala na zwiększenie siły aerodynamicznej podczas ruchu skrzydła w dół oraz na zmniejszenie momentu bezwładności działających na skrzydło przy ruchu w górę. Różne gatunki ptaków różnią się również kształtem skrzydeł ze względu na to, że prowadzą inny tryb życia, na przykład ptaki poruszające się z dużymi prędkościami mają stosunkowo płaskie, długie, wąskie skrzydła, natomiast ptaki latające na duże odległości mają zwykle krótsze skrzydła o większej powierzchni

### C. Nietoperze

Owady mają skrzydła z nieelastycznej błony, ptaki mają pióra, natomiast unikalną cechą nietoperzy jest to, że ich skrzydła są zbudowane z cieniwej elastycznej błony rozpostartej między kończynami i zależnie od gatunku do ogona. To właśnie ta elastyczna błona o złożonej budowie zapewniła nietoperzom zdolność do lotu, jest ona zbudowana z wiązek elastyny i osadzonych w niej maleńkich mięśni



szkieletowych [1]. To właśnie dzięki tej strukturze nietoperze kontrolują napięcie skrzydeł podczas lotu.

### 11.3.PROJEKTOWANY ORNITOPTER

#### Wybór koncepcji

Po dogłębnej analizie literatury i wielu konsultacjach skupionych na wyborze typu ornitoptera, który został zrealizowany w projekcie, a także wzięciu pod uwagę wszelkich zalet i wyzwań konstrukcyjnych, wybrany został ornitopter, naśladujący mechanikę ruchu ptaka. W celach uproszczenia konstrukcji zastosowane zostały skrzydła przypominające budową bardziej te nietoperza, przybierające formę płachty materiału rozpostartego na rusztowaniu.

O wyborze tym zdecydowało to, że jest to rozwiązanie optymalne pod względem realizowanego projektu, w rozwiązaniu tym nie są wymagane ruchy skrzydeł o takiej częstotliwości co u ornitopterów inspirowanych owadami. Szybkie machanie skrzydłami wymaga dużych zasobów energii co przy maksymalnej redukcji wagi może być problemem i skrócić czas lotu takiego drona, ponieważ nie ma możliwości zamontowania dużego akumulatora. Ornitoptery inspirowane nietoperzami także mają swoje wyzwania, którymi jest znalezienie materiału naśladującego właściwości skrzydeł nietoperza, co jest wyzwaniem obejmującym dziedzinę inżynierii materiałowej.

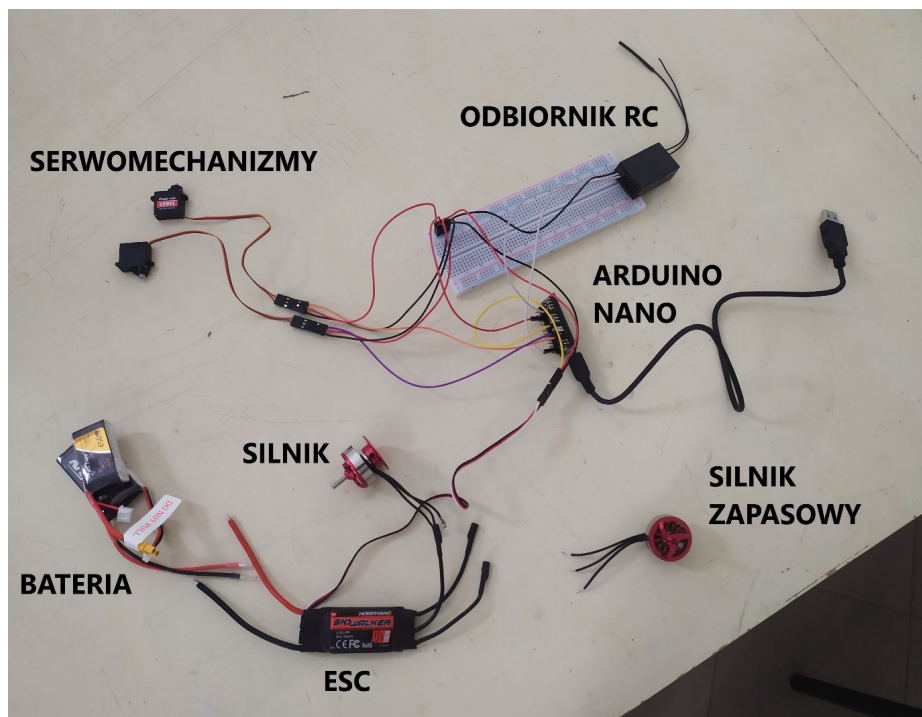
#### Pierwszy demonstrator

Pierwszy demonstrator ma rozpiętość skrzydeł 1400 mm i długość około 600 mm. Z powodu braku doświadczenia wzorowany był na ornitopterze opisanym na stronie Autodesk Instructables. Dużym wyzwaniem konstrukcyjnym było zredukowanie wagi drona, która była kluczowa, każde dodatkowe obciążenie zmniejszało szanse na lot drona, ze względu na to konieczne było dokładne dobranie komponentów składających się na ornitoptera, które podano w tabeli poniżej

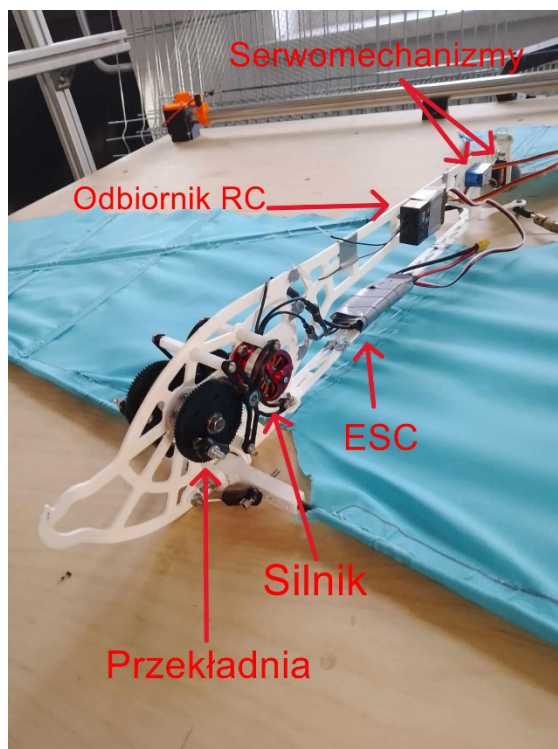
Tabela 11.1 Lista wybranych komponentów z ich wagą

| Komponent:      | Waga:  |
|-----------------|--------|
| Serwomechanizmy | 2x 6 g |
| Arduino Nano    | 28 g   |
| Odbiornik RC    | 14,8 g |

|                 |      |
|-----------------|------|
| ESC             | 36 g |
| Silnik          | 29 g |
| Zapasowy silnik | 29 g |

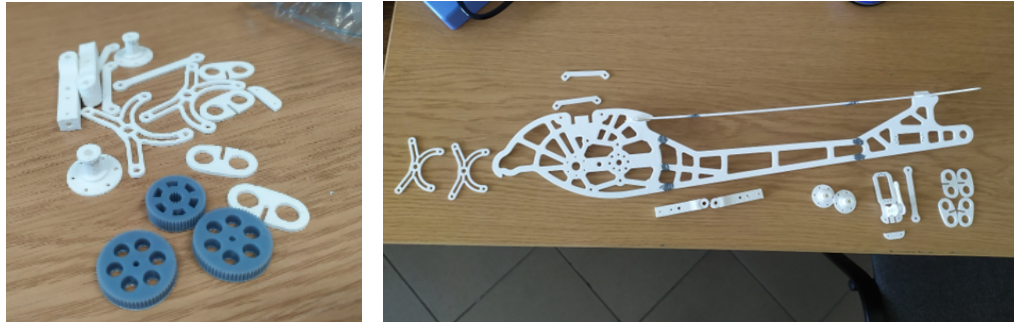


Rys 11.3 Główne/wybrane komponenty drona



Rys 11.4 Komponenty zamocowane do głównej ramy

Redukcja wagi była powodem wielu wyzwań takich jak konstrukcja, która nie była wystarczająco sztywna, została ona wykonana w technologii druku 3D z materiału PLA. Żeby zwiększyć wytrzymałość konstrukcji konieczne byłoby zwiększenie grubości co jest równoznaczne z większą wagą ornitoptera, alternatywnym rozwiązaniem jest też zastosowanie innej techniki wykonania lub też innego materiału



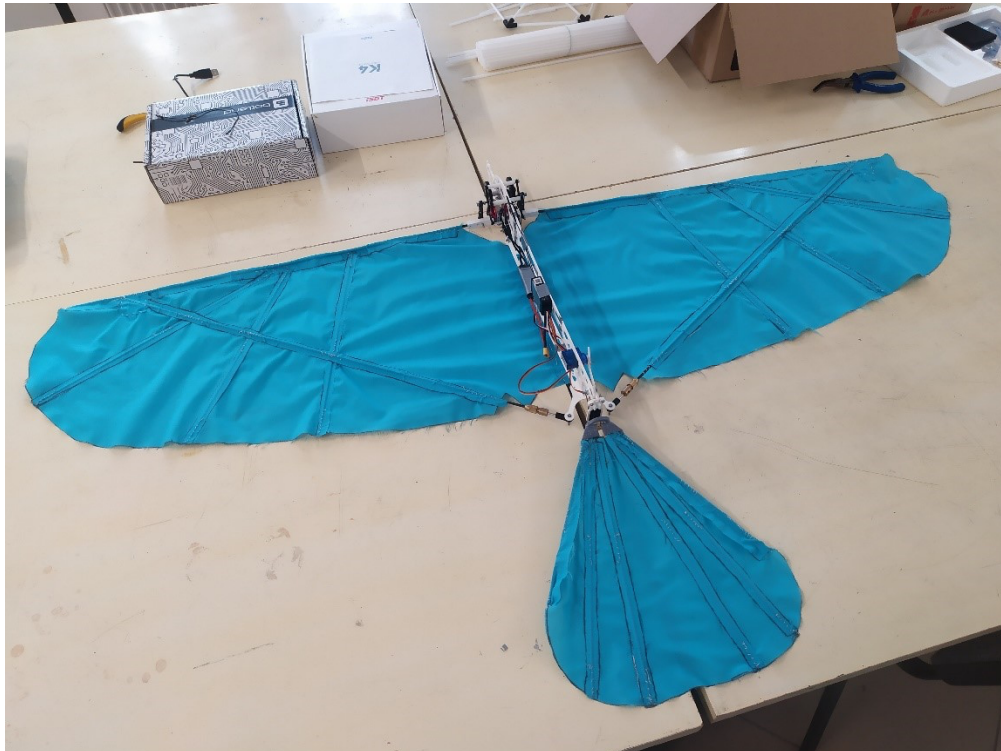
Rys 11.4 Druki 3D, na pierwszym zdjęciu m. in. Koła przekładni, na drugim zdjęciu kadłub i elementy kadłuba

## Skrzydła i ogon

Skrzydła i ogon zostały wykonane z materiału Nylon Ripstop 70D o gramaturze 65 g/cm<sup>2</sup> rozpostarte zostały na prętach węglowych, które stworzyły rusztowanie



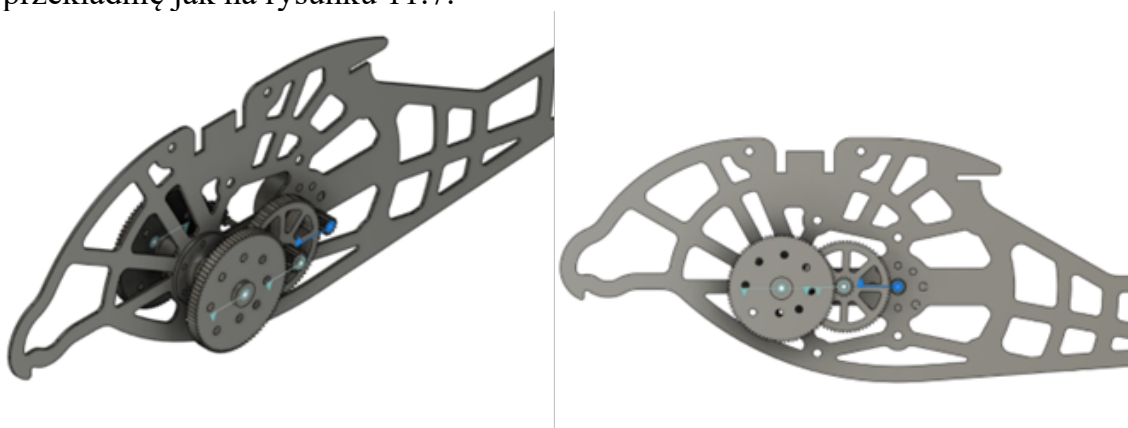
Rys 11.5 Przygotowanie materiału i prętów węglowych



Rys 11.6 Gotowe skrzydła i ogon połączone z kadłubem

### Przekładnia

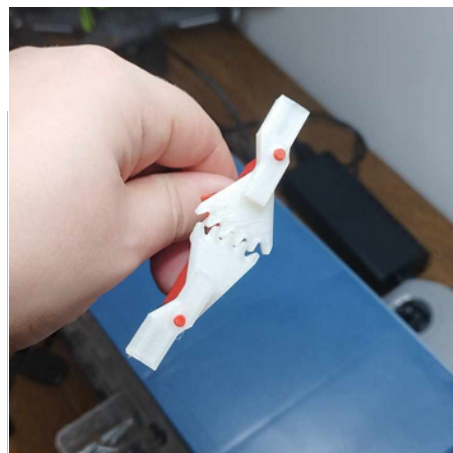
Niewątpliwie sercem ornitoptera jest przekładnia, można wybierać spośród różnych rodzajów, które mają swoje plusy i minusy, a także mogą być stosowane do różnych rozwiązań. W przypadku naszego demonstratora zdecydowaliśmy się na przekładnię jak na rysunku 11.7.



Rys 11.7 Model przekładni pierwszego demonstratora, inspirowanego modelem przekładni z strony Autodesk Instructables [5]

Rozwiązanie to pozwoliło zmienić ruch obrotowy generowany przez silnik na ruch skrzydeł. Koła zębate przekładni zostały wydrukowane w technologii druku 3D przy użyciu drukarki żywicznej, zapewniło to trwałość a także dokładność wydruków, które są niezbędne do prawidłowego działania przekładni. W drugiej wersji demonstratora zastosowana zostanie inna konfiguracja przekładni, która

dzięki zdecydowanie mniejszej ilości elementów pozwoli zredukować wagę, ale także problemy takie jak poślizg zębów kół zębatych. Rozwiązanie te także dzięki swojej prostocie daje też większe pole manewru w kwestii prędkości ruchu skrzydeł.



Rys 11.8 Model przekładni do nowszej wersji ornitoptera oraz wydrukowany prototyp

## 11.4. Podsumowanie

Ornitoptery to przyszłościowa technologia o wielu zastosowaniach, wizja dronów-ptaków o zwinności i zdolnościach porównywalnych do tych skrzydlatych stworzeń jest kusząca, jednak tą technologią czeka jeszcze długi okres zanim dorówna żywym istotom. Niewątpliwie jednak ornitoptery mają bardzo duży potencjał i mogą być wręcz przełomową technologią, łącząc w sobie umiejętność zawisu dronów wirnikowych oraz ekonomię szybowania dronów ze stałym płatem (ang. fixed wing). Mogą one zastąpić drony jakie obecnie znamy, być stosowane w wielu dziedzinach i zmienić nasz sposób w jaki patrzymy na lotnictwo

## 11.5 Wnioski

W trakcie realizacji projektu mającego na celu wytworzenie demonstratora wynikło parę problemów które tworzą okazję do rozwinięcia projektu. Do problemów tych zaliczyć można problemy z przekładnią, czy z sztywnością konstrukcji. W trakcie realizacji jest także budowa stanowiska do identyfikacji sił w trakcie lotu i obserwacji ruchu i zachowania się skrzydeł oraz obserwacji wykonywania obserwacji lotu.

Projekt częściowo finansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach Programu „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”, numer projektu: SKN/SP/569377/2023 oraz w ramach dofinansowania projektów realizowanych w ramach studenckich kół naukowych a także Project Based Learning - Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza

## BIBLIOGRAFIA

1. Cao, Tianxin & Jin, J.-P. (2020). Evolution of Flight Muscle Contractility and Energetic Efficiency. *Frontiers in Physiology*. 11. 10.3389/fphys.2020.01038
2. Celis, Jose & Díaz-Benjumea, Fernando. (2003). Developmental basis for vein pattern variations in insect wings. *The International journal of developmental biology*. 47. 653-63.
3. C. P. Ellington: *The areodynamics of hovering insect flight*, Royal Society 1984
4. Altshuler, Douglas & Bahlman, Joe & Dakin, Roslyn & Gaede, Andrea & Goller, Benjamin & Lentink, David & Segre, Paolo & Skandalis, Dimitri. (2015). The biophysics of bird flight: Functional relationships integrate aerodynamics, morphology, kinematics, muscles, and sensors. *Canadian Journal of Zoology*. 93. 10.1139/cjz-2015-0103.
5. Autodesk Instructables [https://www.instructables.com/Open-source-Ornithopter-Prototype-Arduino-Powered-a/?fbclid=IwAR0ihAt2\\_9pZgsHX00716DIaCFnXD4qrH9cDfJ1Spks7ffDI5LOeulfM7NA](https://www.instructables.com/Open-source-Ornithopter-Prototype-Arduino-Powered-a/?fbclid=IwAR0ihAt2_9pZgsHX00716DIaCFnXD4qrH9cDfJ1Spks7ffDI5LOeulfM7NA) (dane z dnia 26.01.2024)

# Rozdział 12

## DRON O ZWIĘKSZONEJ ODPORNOŚCI NA KOLIZJE

Szczepanek M.<sup>1</sup>, Pośpiech M.<sup>2</sup>, Górka M.<sup>3</sup>, Jassak A.<sup>4</sup>, Żymełka J.<sup>5</sup>, Skarka W.<sup>6</sup>

<sup>1-5</sup> SKN Aerospace Engineering

<sup>6</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

### 12.1. Streszczenie

Drony są obecnie wykorzystywane w coraz większej liczbie obszarów, w tym w tych, w których występuje wiele przeszkód, w które dron może uderzyć podczas wykonywania swojego zadania. W związku z tym pojawiła się potrzeba zabezpieczenia drona przed uszkodzeniem w przypadku zderzenia z przeszkodą, taka ochrona umożliwi również wykorzystanie dronów w obszarach wymagających działania na bardzo małej przestrzeni z dużym prawdopodobieństwem kolizji. Jednym z rozwiązań tego problemu jest umieszczenie drona w klatce ochronnej. W artykule przedstawiono wyniki analizy obciążenia klatki ochronnej dla drona, a proponowana klatka ma specyficzną strukturę i składa się z zewnętrznej siatki o specjalnie ukształtowanych węzłach i topologii elementów siatki. Cała klatka jest zawieszona na połączeniu typu gimbal, które zwiększa zdolności kolizyjne i minimalizuje wpływ kolizji na zachowanie drona i obciążenie klatki. Nietypowa konstrukcja samego drona, a w szczególności rozmieszczenie śmigieł drona, pozwala nam zmaksymalizować możliwości operacyjne. Wyniki pokazują, w jaki sposób obciążenia rozkładają się na klatkę i element gimbała oraz jak wpływają na drona wewnątrz. Testy zostały przeprowadzone zarówno w środowisku symulacyjnym, jak i na zbudowanych demonstratorach w warunkach laboratoryjnych i symulowanych warunkach operacyjnych.

## 12.2. Wstęp

W ramach projektu PBL zatytułowanego "Dron odporny na kolizje" opracowany został system drona z klatką zaprojektowaną w celu zwiększenia jego odporności na kolizje z obiektami zewnętrznymi. Skrót PBL oznacza "Project-Based Learning", czyli podejście edukacyjne, które kładzie nacisk na naukę poprzez praktyczne doświadczenia i projekty. Podczas zajęć PBL uczniowie pracują nad projektami lub zadaniami zazwyczaj związanymi z rzeczywistymi problemami lub sytuacjami, co zdecydowanie sprawia, że nauka jest bardziej autentyczna i angażująca. W projekcie brali udział członkowie SKN Aerospace Engineering.

## 12.3. Koncepcja drona

Zaprezentowany w artykule model drona jest przykładem innowacyjnego podejścia do projektowania dronów, które łączy w sobie prostotę montażu, trwałość i precyzyjną kontrolę lotu. Rama tego drona została wydrukowana w 3D i zoptymalizowana tak, aby była niezwykle łatwa w montażu. Jednocześnie konstrukcja jest wystarczająco wytrzymała, pomimo niewielkiej wagi, aby umożliwić osiągnięcie wydajności lotu przy minimalnym obciążeniu. Rama ta stanowi solidną podstawę dla pozostałych komponentów. Aby zapewnić odpowiedni przepływ powietrza, zastosowano dwa przeciwbieżne śmigła, umieszczone naprzeciwko siebie. Dzięki takiemu rozwiązaniu dron osiąga doskonałe osiągi i stabilność w powietrzu. Za sterowanie silnikami, śmigłami i całą maszyną odpowiada płytki "Ultra Control 30a 2-6s"[1], która gwarantuje precyzyjne i responsywne działanie. Dodatkowo kontrolą lotu zarządza płytki "MATEK F405-WMN Flight Controller" [2], która zapewnia stabilność i pewność podczas manewrów. Serwomechanizmami w modelu steruje płytki "MATEK F405-miniTE" [3], która pozwala na precyzyjne sterowanie kamerą lub innymi przydatnymi akcesoriami. Aby utrzymać drona w stabilnej pozycji w powietrzu, został on wyposażony w specjalną osłonę oraz gimbal, które mocowane są za pomocą dwóch połączeń typu "push". Takie rozwiązanie ułatwia wykonywanie płynnych i precyzyjnych nagrań lub zdjęć podczas lotu. Ten model drona to doskonałe połączenie nowoczesnej technologii druku 3D i zaawansowanych podzespołów elektronicznych.

## 12.4. Przeprowadzenie analizy obciążenia na osłonie drona

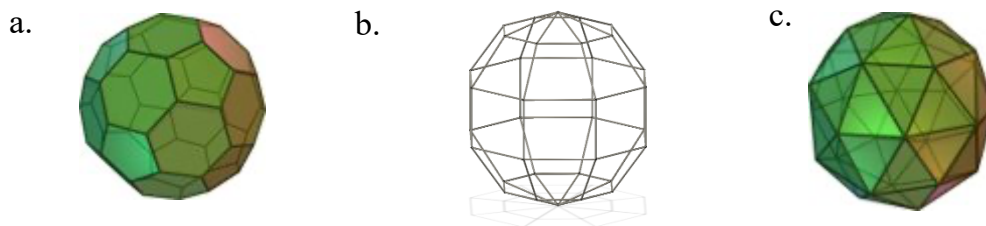
### Projekt osłony drona



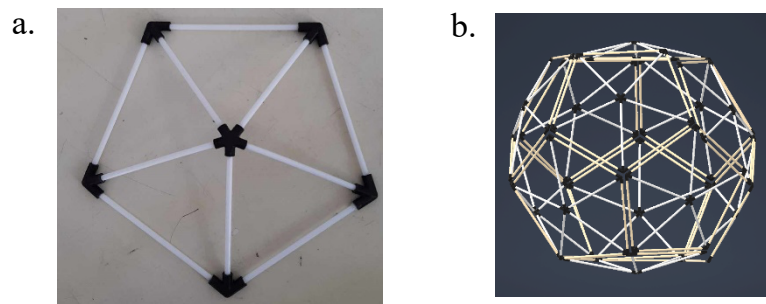
Głównym celem było zaprojektowanie takiej osłony, która będzie łatwa w złożeniu, lekka oraz ochroni drona w maksymalnym stopniu. Po przemyśleniach wybrana została siatka w kształcie sfery, wewnątrz której znajdowałby się dron [5].

Podczas przeprowadzania badań literaturowych wytypowane zostały różne rodzaje siatek, które wydawały się najbardziej obiecujące. Zostały one przedstawione poniżej:

- Dwudziestościan ścięty (taki sam jak na piłce futbolowej; rys. 2a),
- W kształcie globusa (naśladujący linie szerokości i długości geograficznej; rys. 2b),
- Z ang. „Pentakis dodecahedron” (Rys. 2c).

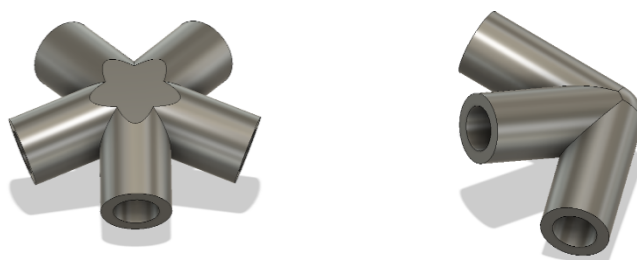


Rys. 12.1 (a) Dwudziestościan ścięty, (b) w kształce globusa, (c) Pentakis dodecahedron



Rys. 12.2 (a) Segment osłony, (b) Osłona

Po przeanalizowaniu źródeł, projekt pokazany powyżej (Pentakis dodecahedron) został wybrany jako osłona do wykorzystania w projekcie. Jego przewagą nad innymi konstrukcjami jest możliwość łatwego skalowania, ponieważ wymaga jedynie zmiany długości użytych rur. Złącza (rys. 4a i 4b) pozostają takie same. Projekt składa się z 12 identycznych segmentów (rys. 3), dzięki czemu naprawa wszelkich uszkodzeń lub demontaż są łatwe i szybkie.



Rys. 12.3 (a) Środkowe złącze, (b) Złącze brzegowe

Materiał rur został wybrany spośród różnych rodzajów materiałów, takich jak stal, włókno szklane czy włókno węglowe [6]. Najlepsze (biorąc pod uwagę najlepszy stosunek dostępności do ceny) okazały się być rurki balonowe wykonane z LDPE.

Pręty zostały przymocowane do łączników za pomocą ciasnego pasowania oraz kleju cyjanoakrylowego.

Kinematyka połączenia między klatką a dronem została zaczerpnięta z koncepcji kinematyki żyroskopu. Połączenie w segmentach żyroskopu zostało zrealizowane przy użyciu specjalnie zaprojektowanych do druku 3D i łatwych w montażu łączników.

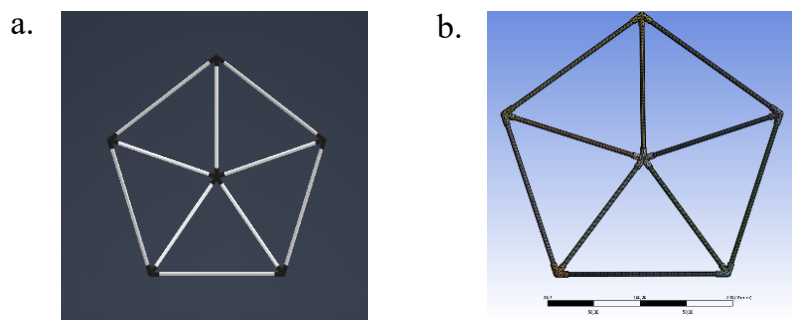
### Analiza wytrzymałościowa osłony drona

Symulacja została przeprowadzona na jednym segmencie klatki drona.

Siatka składa się z elementów HEX20 i w mniejszym stopniu TET10 o wymiarach nieprzekraczających 5 mm (rys. 5b). Została ona wygenerowana automatycznie przez program z określonym górnym limitem.

Materiały użyte w symulacji to:

- Polietylen o niskiej gęstości (LDPE) dla rurek,
- PET-G (poli (tereftalan etylenu) z domieszką glikolu) dla złączy.



Rys. 12.4 (a) Model CAD segmentu, (b) Siatka na segmencie osłony

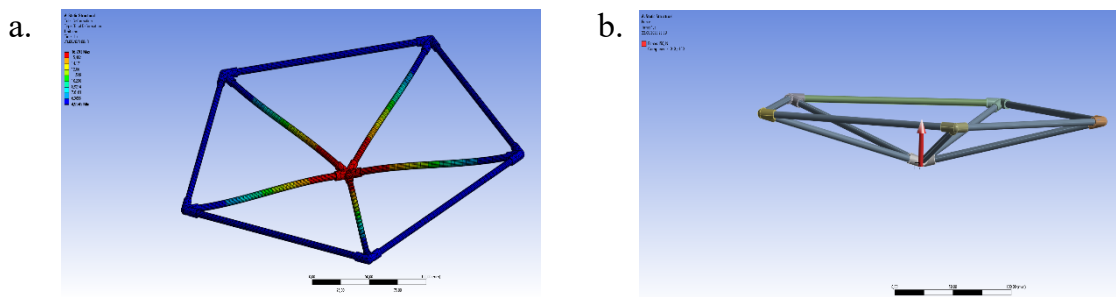
Symulacja została przeprowadzona z warunkami brzegowymi takimi jak:

- mocując łączniki na krawędzi, pozwolono im poruszać się maksymalnie o 5 mm wzdłuż osi z, z wektorem skierowanym w stronę minusową, co pozwoliło na imitację rzeczywistego połączenia segmentów,

- standardowa grawitacja ziemiska:  $9806,6 \text{ mm/s}^2$ ,
- obciążenie  $0,226 \text{ kg} = 2,2163029 \text{ N}$  ma na celu naśladowanie pozostałych 11 segmentów klatki, które zostały pominięte na potrzeby symulacji w celu uproszczenia modelu obliczeniowego,
- siła  $150 \text{ N}$  przyłożona w 3 różnych miejscach.

### Siła przyłożona do środka przez złącze środkowe

W pierwszym przypadku przyłożono siłę  $150 \text{ N}$ , ustawioną w symulacji wzdłuż osi „z”, z wektorem skierowanym w stronę ujemną, mającą imitować siłę występującą podczas zderzenia klatki z obiektem. Siła została przyłożona do najbardziej wystającego punktu pojedynczego segmentu klatki, tj. centralnego łącznika pojedynczego segmentu (rys. 7b).

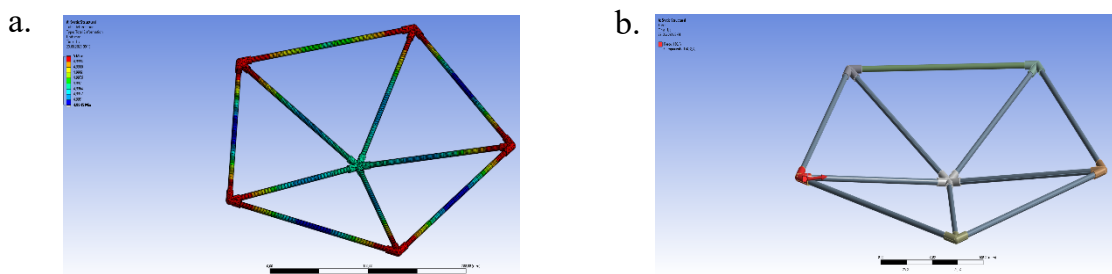


Rys. 12.5 (a) odkształcenie segment, (b) wektor przyłożonej siły

Jak widać na rysunku 7a, maksymalne odkształcenia występują głównie w punkcie przyłożenia siły i w najbliższym obszarze złącza. Maksymalne odkształcenie występujące w symulacji wynosi  $16,793 \text{ mm}$ , co daje nam około  $1,68 \text{ cm}$ . Ze względu na wysoką plastyczność materiału, z którego wykonane są rury, powrócą one do poprzedniego stanu bez większych problemów.

### Siła przyłożona do złącza krawędziowego przez środek

Siła  $150 \text{ N}$  jest podawana w symulacji wzdłuż osi „x”, z wektorem skierowanym w stronę plusa. Miało to imitować siłę występującą podczas zderzenia klatki z obiektem. Siła została przyłożona do zewnętrznego łącznika segmentu klatki i była skierowana do środka segmentu klatki (Rys.8b).

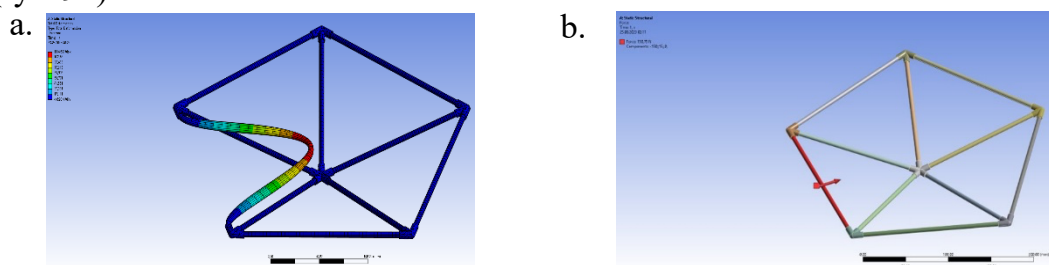


Rys. 12.6 (a) odkształcenie segmentu, (b) wektor przyłożonej siły

Maksymalne odkształcenia (rys. 8a) modelu występują w zewnętrznych łącznikach rurowych oraz w bezpośrednim obszarze łączników. Maksymalne odkształcenia występujące w symulacji wynoszą 5 mm, wynikają one z zadanych warunków brzegowych imitujących maksymalny zakres ruchu podczas łączenia poszczególnych segmentów klatki opaskami kablowymi.

### Siła przyłożona do rury położonej na krawędzi

W symulacji zastosowano siłę 150 N wzdłuż osi „x” i „y”, z wektorem skierowanym w środek segmentu klatki. Miało to imitować siłę występującą podczas zderzenia klatki z obiektem. Siła została przyłożona do rury między dwoma zewnętrznymi łącznikami segmentu klatki i była skierowana do środka segmentu klatki (rys. 9b).



Rys. 12.7 (a) odkształcenie segmentu, (b) wektor przyłożonej siły

Maksymalne odkształcenia modelu (Rys. 9a) występują dokładnie w miejscu przyłożenia siły. Maksymalne odkształcenia występujące w symulacji wynoszą 114,87 mm i występują w punkcie przyłożenia siły oraz w bliskiej odległości od niego. Rura, do której przyłożono siłę przed osiągnięciem wartości 114,87 mm, uległaby awarii wcześniej i musiałaby zostać wymieniona.

## 12.5. Analiza obciążenia drona

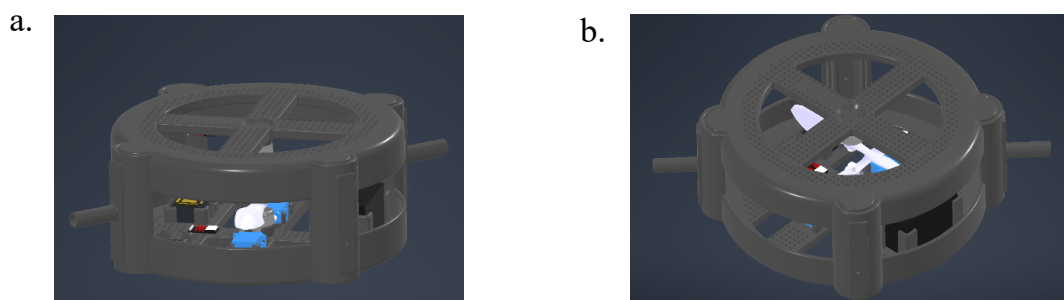
### Projektowanie dronów

Zaprojektowano drona o wyższej odporności na kolizje, dzięki zastosowaniu dwóch połówek obudowy wykonanych z materiału PET-G. Materiał ten charakteryzuje się wyjątkową wytrzymałością mechaniczną i niską wagą, co czyni go idealnym wyborem dla drona. Obie części obudowy posiadają silnik elektryczny z wytrzymałym śmigłem, kluczowym dla generowania prądów powietrznych i zapewnienia ruchu. Silnik i śmigło są odpowiednio ekranowane, aby zminimalizować ryzyko uszkodzenia podczas lotu [7].

Dolna część obudowy pełni funkcję ochronną dla akumulatora, elektroniki sterującej, telemetrii i serwonapędów, posiadając również silnik elektryczny z wytrzymałym śmigłem. Bateria stanowi źródło zasilania, a elektronika sterująca zapewnia precyzyjną kontrolę i stabilność podczas lotu. Telemetria umożliwia

zdalne monitorowanie i sterowanie dronem, co jest niezbędne w różnych zastosowaniach [8].

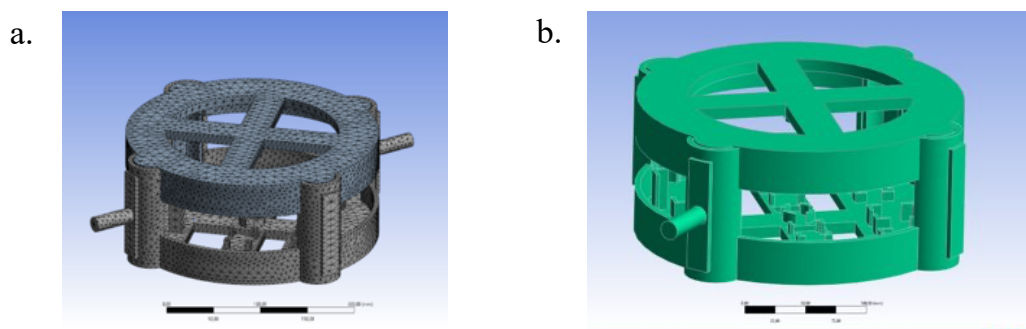
Serwonapędy sterują płytkami z tworzywa piankowego umieszczonymi pod tą częścią obudowy, gwarantując precyzyjną manewrowość i minimalizując ryzyko uszkodzenia elektroniki. Podstawową innowacją projektu jest jednak zastosowanie struktury siatkowej, zapewniającej lekką obudowę przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej trwałości. Dzięki temu dron staje się bardziej wydajny i osiąga dłuższy czas lotu.



12.8: Model drona (a) widok od boku, (b) widok z góry

### Analiza wytrzymałości drona

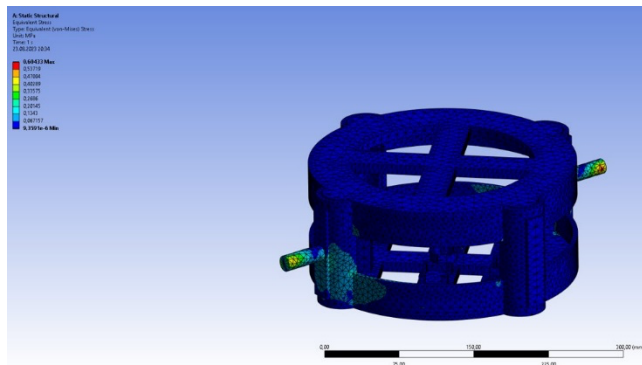
Analizy wytrzymałości drona przeprowadzono w środowisku oprogramowania Ansys Workbench. Przy wyborze programu do analizy uwzględniono wielofunkcyjność programu i jego znajomość. W początkowej fazie modelu używanego do symulacji warunków skrajnych poddano kompleksowemu procesowi uproszczenia (Rys.11b). Nieistotne zaokrąglenia i drobne otwory zostały wyeliminowane w celu przyspieszenia procesu i usprawnienia wykonywania symulacji warunków skrajnych.



Rys. 12.9 (a) siatka naniesiona na model, (b) uproszczony model

Siatka elementów skończonych została zastosowana do uproszczonego modelu w celu jego podzielenia na połączone elementy. Siatka składa się w całości z elementów skończonych TET10 o wymiarach nieprzekraczających 5 mm (Rys.12). Podczas analizy wytrzymałości drona zidentyfikowano istotne warunki brzegowe, kluczowe do precyzyjnej oceny jego wytrzymałości. Poniżej przedstawione są szczegóły tych warunków:

- Standardowa grawitacja Ziemska: 9806,6 mm/s<sup>2</sup>,
- Usztywnienie w punktach mocowania do przegubu,
- Siła imitująca ciężar elementów elektrycznych i klatki - 4,64 N.



Rys. 12.10 Rozkład naprężeń na modelu drona

Model pod działaniem grawitacji ziemskiej, z zasymulowaną masą komponentów elektrycznych, wykazuje istotną charakterystykę naprężeń. Te wartości naprężeń są kluczowe dla zrozumienia, w jaki sposób model reaguje na siły zewnętrzne i obciążenia. Przyjrzyjmy się bliżej tym parametrom naprężeń:

**Tensor maksymalnego naprężenia:** Maksymalny tensor naprężenia odczuwany przez model wynosi około 0,60433 MPa. Daną wartość reprezentuje najwyższy poziom naprężenia w materiale lub strukturze. Występuje w określonych punktach lub regionach modelu, gdzie przyłożone siły lub obciążenia są najbardziej intensywne. Zrozumienie maksymalnego naprężenia jest niezbędne do oceny integralności strukturalnej i potencjalnych punktów awarii modelu. W tym przypadku służy jako kluczowy punkt odniesienia do oceny wytrzymałości modelu pod wpływem sił grawitacyjnych i masy komponentów elektrycznych.

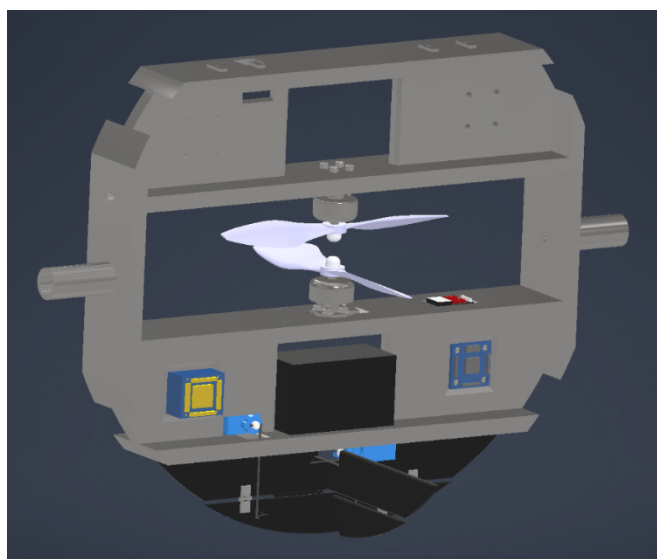
**Minimalny tensor naprężenia:** Z kolei minimalny tensor naprężeń w modelu jest wyjątkowo niski i wynosi około 9,3591e-006 MPa. Wartość minimalnego naprężenia sugeruje obszary w modelu, w których przyłożone siły mają minimalny wpływ lub gdzie materiał jest poddawany mniejszym naprężeniom. Mimo że wartość ta jest znacznie niższa niż maksymalne naprężenie, nadal odgrywa rolę w ogólnym zachowaniu modelu, szczególnie w określaniu jego reakcji na zmienne obciążenia i siły grawitacyjne.

**Średni tensor naprężenia:** Średni tensor naprężeń w całym modelu wynosi około 2,2928e-002 MPa. Wartość ta umożliwia wgląd w ogólny rozkład naprężeń w strukturze. Stanowi ona istotny parametr do oceny wydajności i trwałości modelu pod wspólnym wpływem sił grawitacyjnych i symulowanej masy komponentów elektrycznych. Średnie naprężenie stanowi ogólne wskazanie tego, jak materiał zachowuje się w typowych warunkach i pomaga zidentyfikować obszary, które mogą wymagać wzmocnienia lub optymalizacji.

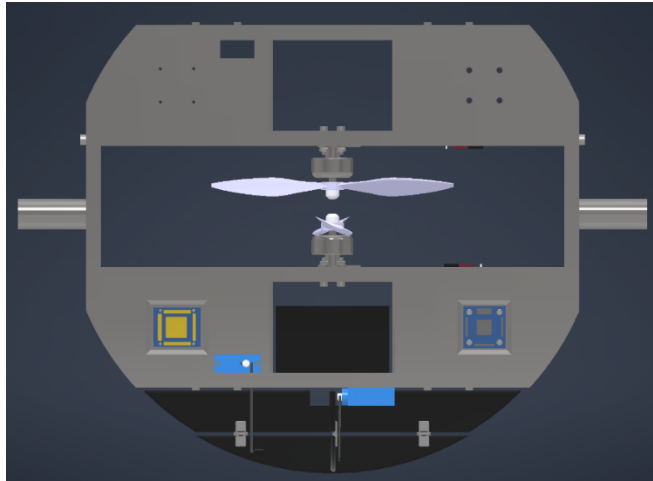
Poprzedni projekt drona przeszedł gruntowną metamorfozę, przekształcając się w nową, znacznie bardziej zaawansowaną wersję (rys. 13). Konstruktorzy z naszego zespołu zdecydowali się na gruntowną modyfikację w celu osiągnięcia jeszcze

lepszych parametrów. Kluczową zmianą było zmniejszenie wagi drona. Nowy model jest znacznie lżejszy, co ma ogromny wpływ na jego zdolność do wznoszenia się do lotu. W efekcie mamy teraz mniej problemów z wznoszeniem się i utrzymaniem stabilności podczas lotu. Dodatkowo, zwiększona powierzchnia modelu została wykorzystana w bardziej wydajny sposób. W rezultacie nowy dron ma większą zwrotność w powietrzu, co czyni go bardziej zwinnym i łatwiejszym w obsłudze. Nowa lotka pozwala na jeszcze lepszą kontrolę nad dronem, co znacznie zwiększa jego manewrowość i możliwości wykorzystania go w różnych zadaniach. Ponadto uzyskano znaczną poprawę kontroli nad dronem poprzez dodanie nowej konstrukcji lotek sterujących skrzętem. Nowy model jest również znacznie bardziej kompaktowy niż poprzedni. Jest to ważne, gdyż pozwala to na łatwiejszy transport i przechowywanie drona, co znacznie zwiększa jego użyteczność w terenie.

Wyniki projektu były weryfikowane w środowisku naukowym i prezentowane m. in. na zagranicznej konferencji [9]. W kolejnych etapach rozwoju drona planowane jest wykorzystanie metodologii Model-Based Design do systematycznej analizy i rozwoju struktury drona, ze szczególnym uwzględnieniem zwiększenia wydajności poprzez poprawę efektywności energetycznej [10]. Ponadto zostanie zwrócona szczególna uwaga na analizy aerodynamiczne i ocena wpływu poszczególnych elementów konstrukcyjnych na właściwości aerodynamiczne [11].



Rys. 12.11 Projekt po optymalizacji



Rys. 12.12 Projekt po optymalizacji

## 12.6. Wnioski

Podsumowując, klatka drona przyjmuje uderzenia lepiej na łącznikach niż na rurkach, ale gdy cała klatka jest zmontowana, odkształcenia będą inne, szczególnie w trzecim przypadku, więc konieczne jest przeprowadzenie analizy na całej klatce. Model drona jest zbyt sztywny, co oznacza, że powinien zostać uproszczony, a ściany powinny być cieńsze. Zwiększy to elastyczność i zmniejszy obciążenia.

Projekt częściowo finansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach Programu „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”, numer projektu: SKN/SP/569377/2023 oraz w ramach dofinansowania projektów realizowanych w ramach studenckich kół naukowych a także Project Based Learning - Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza

## BIBLIOGRAFIA

1. „How to Connect, Flash and Configure BLHeli\_S ESCs” [Data uzyskania dostępu 20.09.2023] <https://oscarliang.com/connect-flash-blheli-s-esc/>
2. Instrukcja obsługi i specyfikacja kontrolera lotu. [Data uzyskania dostępu 20.09.2023] <http://www.mateksys.com/?portfolio=f405-wmn#tab-id-2>
3. Instrukcja obsługi i specyfikacja kontrolera lotu. [Data uzyskania dostępu 20.09.2023] <http://www.mateksys.com/?portfolio=f405-minite>



4. Laurie Newman, „Drones: The Complete Manual: The Essential Handbook for Drone Enthusiasts”, Imagine Publishing Ltd 2023.
5. Terry Kilby & Belinda Kilby „Make: Getting started with Drones” Maker Media San Francisco, CA
6. Reg Austin, „Unmanned Aircraft Systems UAVS Design, Development and Deployment”, WILEY
7. Andrew J. Keane Andras Sobester James P. Scanlan, „Small Unmanned Fixed-wind Aircraft Design”, WILEY
8. Patrick Di Justo „Make: DIY Drone and Quadcopter Projects”, Maker Media San Francisco, CA
9. Skarka W., Szczepanek M., Pośpiech M. [i in.], Load analysis on the drone protection cage increasing collision resistance W: ICSI2023. The 5th International Conference on Structural Integrity 28th August - 1st September 2023 Funchal, Madeira. Book of Abstracts / Moreira Pedro, Tavares Paulo (red.), 2023, s.166-166, ISBN 978-989-33-4739-3
10. Skarka, W.: „Model-Based Design and Optimization of Electric Vehicles”, 25th ISPE Inc International Conference on Transdisciplinary Engineering 2018 | TRANSDISCIPLINARY ENGINEERING METHODS FOR SOCIAL INNOVATION OF INDUSTRY 4.0 7 , pp.566-575
11. Peciak, M.; Skarka, W, „Assessment of the Potential of Electric Propulsion for General Aviation Using Model-Based System Engineering (MBSE) Methodology. Aerospace 2022, 9, 74”  
<https://doi.org/10.3390/aerospace9020074>

