

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Redakcja pracy zbiorowej
Marek Wyleżoł

**PRZEGLĄD
OSIĄGNIĘĆ
DYDAKTYCZNYCH
DYPLOMANTÓW
I PROMOTORÓW**

Tom 2

Gliwice 2024

Recenzenci

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

Dr hab. inż. Marek Wyleżoł, 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 dydaktycznych dyplomantów i promotorów, Tom II}, publisher = {Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn}, year = {2024, author = {Wyleżoł, M. (red.)}, volume = {160}, series = {Zeszyty Naukowe}, address = {Gliwice}}
```

ISBN 978-83-60759-35-6

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
Brożyna K., Januszka M., Kocybik S., Carlsson B.: Pakiet aerodynamiczny naczepy kurtynowej z certyfikacją VECTO.....	7
Polnik P., Januszka M., Kosior M.: System sterowania robotem eksploracyjnym bazujący na głębokich sieciach neuronowych.....	17
Matuszyński R., Fidali M.: Algorytm pozycjonowania układu sterowania stelaża paneli fotowoltaicznych.....	35
Rokita A., Fidali M.: Porównanie i ocena wybranych metod uczenia maszynowego pod kątem ich zastosowania w klasyfikacji stanu łożysk tocznych.....	47
Tatoj W., Fidali M.: Implementacja rozmytego wskaźnika diagnostycznego Sturma w komercyjnym module monitorowania stanu maszyn.....	65
Pisula K., Rzydzik S.: System zdalnego sterowania chwytakiem o cechach anatomicznych ludzkiej ręki.....	79
Rodak B., Skarka W.: Optymalizacja aerodynamiczna gondoli podskrzydłowej.....	89
Kupczak Sz., Chrzanowski P.: Projekt inteligentnej opaski do pomiaru podstawowych parametrów życiowych człowieka.....	101
Górny M., Cholewa A.: Tester ekranów dotykowych paneli HMI.....	117
Ledwoń K., Loska A.: Badanie wpływu zużycia maszyny obróbczej na jakość wytwarzanych elementów.....	123
Krafczyk W., Panfil W.: System sterowania grupą mikrobusów podążających w trybie platooning.....	141
Froń M., Wyleżoł M.: Model wirtualny urządzenia do autorehabilitacji osób po zabiegu endoprotezoplastyki stawu łokciowego.....	153

Wprowadzenie

Jednym z głównych zadań realizowanych przez nauczycieli akademickich w ramach kształcenia i wychowywania studentów jest sprawowanie opieki nad dyplomantami wykonującymi projekty inżynierskie (pierwszy stopień studiów) oraz prace przejściowe i prace dyplomowe magisterskie (drugi stopień studiów).

Dobra współpraca pomiędzy Dyplomantem a Promotorem jest warunkiem koniecznym do osiągnięcia sukcesu, w postaci pozytywnych obron inżynierskich bądź magisterskich. Dyplomant, wykorzystując wiedzę nabytą podczas studiów – wykonuje pracę kończącą dany stopień studiów i jest jej jedynym autorem. Natomiast Promotor – wykorzystując własną wiedzę i doświadczenie – często formułuje temat oraz zakres zadaniowy danej pracy, a później sprawuje nadzór nad działaniami Dyplomanta, tak aby uzyskany rezultat był jak najlepszy.

Efekty wspomnianej współpracy często doprowadzają do powstania prac o wyjątkowych wartościach użytkowych lub 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.

Dla Dyplomanta osiągnięciem dydaktycznym jest dobrze napisana i obroniona praca kończąca dany stopień studiów. Dla Promotora osiągnięciem dydaktycznym jest doprowadzenie Dyplomanta do udanej obrony. Tak więc, wychodząc naprzeciw możliwości jak najlepszego wykorzystania tak rozumianych osiągnięć dydaktycznych - rozpoczynamy serię Zeszytów Naukowych poświęconych wybitnym pracom inżynierskim oraz magisterskim, które zostały obronione w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Każdy z rozdziałów Zeszytu powstał na podstawie napisanej pracy inżynierskiej lub magisterskiej. Niniejszy Zeszyt Naukowy jest pierwszym tomem z tej serii.

Marek Wyleżoł

Rozdział 1

PAKIET AERODYNAMICZNY NACZEPY KURTYNOWEJ Z CERTYFIKACJĄ VECTO

Brożyna Kamil¹, Januszka Marcin², Kocybik Sebastian³, Carlsson Björn⁴

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, kamibro906@student.polsl.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, marcin.januszka@polsl.pl

³Wielton S.A., s.kocybik@wielton.com.pl

⁴Quintus Technologies AB, bjorn.carlsson@quintusteam.com

1.1. Wstęp

Różnego rodzaju urządzenia aerodynamiczne stają się coraz bardziej powszechne w pojazdach ciężarowych i naczepach [5]. Ich głównym celem jest optymalizacja konstrukcji, co przekłada się na poprawę aerodynamiki poprzez redukcję oporu powietrza. W efekcie obserwujemy mniejsze zużycie paliwa przez pojazd, co ma istotne znaczenie zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne [2].

Dla producentów naczep i przyczep Komisja Europejska zleciła opracowanie narzędzia VECTO -Vehicle Energy Consumption Calculation TOol [11], które stało się kluczowym narzędziem wspierającym proces projektowania i rozwoju nowych modeli pojazdów, szczególnie w kontekście wdrażania do nich urządzeń aerodynamicznych. Poprzez analizę zużycia energii i emisji CO₂ generowanych przez różne konfiguracje pojazdów i technologie, producenci mogą doskonalić swoje produkty, dążąc do zmniejszenia ich wpływu na środowisko i zwiększenia ich efektywności energetycznej. Ponadto, wykorzystanie VECTO może pomóc producentom w spełnieniu regulacyjnych wymogów dotyczących emisji CO₂, co jest kluczowym czynnikiem w kontekście zmian legislacyjnych dotyczących emisji CO₂ w sektorze transportu drogowego. Zmiany legislacyjne wprowadzane w Europie, w tym kary grożące producentom i użytkownikom pojazdów o niewystarczającej efektywności energetycznej, wyraźnie wskazują konieczność rozwoju różnego rodzaju urządzeń aerodynamicznych.

Z punktu widzenia urządzeń aerodynamicznych pojazdy ciężarowe składają się z różnych elementów, takich jak osłony boczne, tylne deflektory powietrza, spojlerzy dachowe oraz wloty powietrza o zoptymalizowanej geometrii (rys. 1.1). W przypadku naczep, głównym celem jest stosowanie osłon bocznych i spoilerów

tylnych, które montuje się na krawędziach drzwi. Ich projektowanie opiera się na zmniejszeniu oporu powietrza oraz redukcji turbulencji, co przekłada się na zmniejszenie zużycia paliwa i emisji CO₂. Wdrożenie różnych pakietów takich elementów może przynieść korzyści ekonomiczne dla przewoźników, wpłynąć na poprawę środowiskowych aspektów działalności transportowej oraz zwiększyć efektywność wykorzystania zasobów energetycznych [6].



Rys 1.1 Rozwiązania urządzeń aerodynamicznych w naczepach [4][10]

W ramach badań przeprowadzanych w firmie Wielton we współpracy z Politechniką Śląską oraz firmą Quintus Technologies, opracowano boczne urządzenia aerodynamiczne, które tworzą spójny pakiet aerodynamiczny dla naczep produkowanych przez firmę Wielton. Cechą, która wyróżnia te elementy poszycia zewnętrznego, to ich adaptacja pod kątem technologii elastycznego formowania blach stalowych (ang. flexforming) [8]. Rezultaty osiągnięto w ramach projektu inżynierskiego realizowanego w ramach studiów dualnych na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn na Wydziale Mechanicznym Technologicznym oraz w ramach projektu POIR.01.02.00-00-0047/18 „Opracowanie technologii hydroformowania wybranych elementów naczepy celem stworzenia innowacyjnej naczepy INNEXTRAILER”, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Działania 1.2 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 - „Sektorowe programy B+R”, Program Sektorowy „INNOMOTO”.

W ramach szeroko zakrojonych prac przeprowadzono analizę porównawczą między dotychczas stosowanymi rozwiązaniami rynkowymi, a nowo opracowanym rozwiązaniem pakietu aerodynamicznego, a także między naczepą wyposażoną w pakiet aerodynamiczny a naczepą bez takiego pakietu. Analiza

oparta na symulacjach numerycznych, pozwoliła ocenić parametry aerodynamiczne naczepy z pakietem aerodynamicznym oraz bez niego. W analizach zastosowano modele obliczeniowe wg wytycznych wynikających z rozporządzenie Komisji (UE) 2022/1362 i narzędzia symulacyjnego VECTO. Projektowanie pakietu aerodynamicznego koncentrowało się na poprawie estetyki pojazdu oraz spełnieniu wymogów regulacyjnych związanych z homologacją. Podczas rozwoju rozwiązania zbadano również jego technologiczną wykonalność, zwłaszcza pod kątem zastosowania technologii elastycznego formowania blach stalowych. Analizy numeryczne formowania miały na celu określenie efektu odkształcenia sprężystego, identyfikację obszarów potencjalnie zagrożonych pęknięciami oraz ocenę jakości powierzchni. Na bazie projektu technicznego i technologicznego wytworzono prototypowe elementy pakietu aerodynamicznego.

1.2. Opracowane rozwiązanie pakietu aerodynamicznego

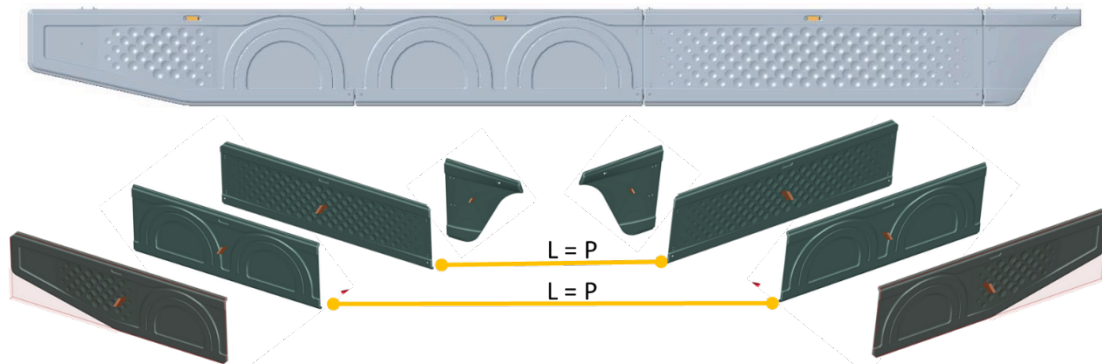
Projektowanie urządzeń aerodynamicznych dla naczep kurtynowych to wyzwanie związane z problemem optymalizacji przepływu powietrza wokół pojazdu oraz uwzględnieniem praktycznych potrzeb dotyczących dostępu do podzespołów naczepy. Głównym celem projektowym jest zatem stworzenie rozwiązania, które pozwala zarówno na redukcję oporu aerodynamicznego, jak i zachowanie funkcjonalności naczepy.

Pierwszym krokiem jest zidentyfikowanie obszarów, które najbardziej wpływają na opór aerodynamiczny naczepy. Wśród tych obszarów szczególne znaczenie mają boczne elementy naczepy, które charakteryzują się niewykorzystanymi przestrzeniami między kołami a bocznymi urządzeniami zderzeniowymi (BUZ) i nogami podporowymi (rys. 1.2). Rozwiązaniem jest wykorzystanie tych miejsc do zamontowania elementów aerodynamicznych.



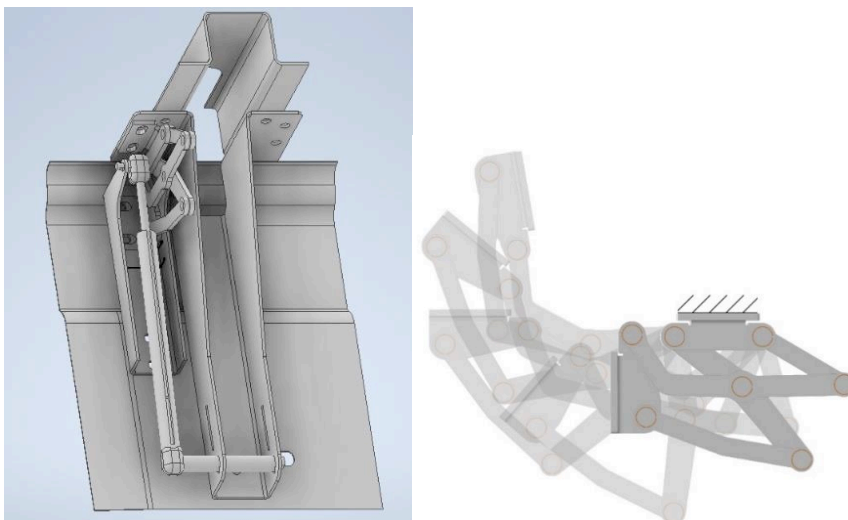
Rys 1.2 Naczepa kurtynowa firmy Wielton bez pakietu aerodynamicznego

Opracowany pakiet aerodynamiczny składa się z każdej strony z czterech głównych segmentów osłon bocznych: osłony tyłu, osłony kół, osłony z funkcją bocznego urządzenia zderzeniowego oraz osłony nóg podporowych (rys. 1.3). Każdy segment jest zaprojektowany w taki sposób, aby umożliwić swobodny dostęp do urządzeń i elementów pod naczepą. W celu ułatwienia produkcji i montażu, pakiet jest podzielony na krótsze elementy osłonowe. Przetłoczenia na panelach nie tylko pełnią funkcje estetyczne, ale również maskują ewentualne wady powierzchniowe i tolerancje kształtu [1].

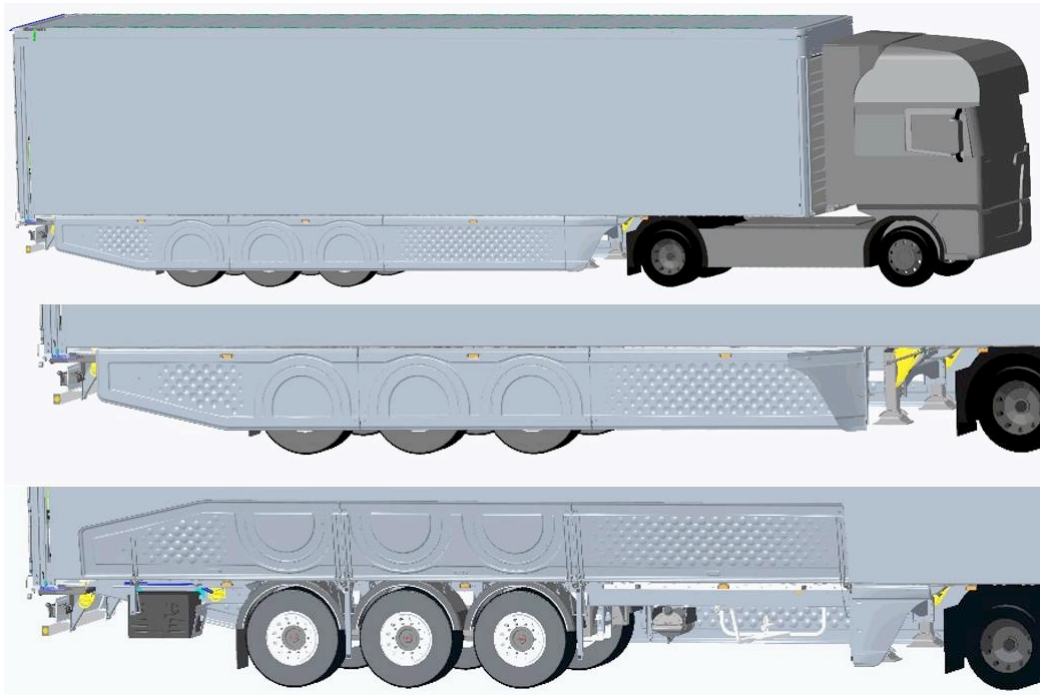


Rys 1.3 Opracowane modele 3D CAD jako rezultat procesu projektowania elementów pakietu aerodynamicznego naczepy INNEXTRAILER

Podczas projektowania niezbędne było także zapewnienie odpowiedniego mechanizmu podnoszenia i zamykania paneli bocznych. Zastosowane niestandardowe zawiasy (rys. 1.4) umożliwiają podnoszenie paneli do pozycji pionowej (rys. 1.5) łącząc ruch obrotowy z ruchem postępowym. Specjalne zamki zapadkowe zabezpieczają przed przypadkowym otwarciem osłon. Dodatkowo, elastyczne wykończenie krawędzi elementów poszycia i sprężyny gazowe (wspomagające podnoszenie) zapewniają stabilność i bezpieczeństwo użytkowania.



Rys 1.4 Rozwiązanie mocowania paneli wraz z opracowanym zawiasem [1]



Rys 1.5 Model naczepy wraz z pakietem aerodynamicznym w pozycji do jazdy, z uchylonym w bok przednim elementem oraz uchylonymi do góry pozostałymi bocznymi panelami

Jako materiał do wytwarzania elementów poszycia paneli pakietu zastosowano arkusze blachy ze stali zimnowalcowanej SSAB Form04 [9]. Wybór materiału jest podyktowany potrzebą zapewnienia trwałości i odporności na warunki atmosferyczne. Tworzywo to charakteryzuje się także odpowiednimi właściwościami mechanicznymi, które umożliwiają jego formowanie w procesie flexformingu.

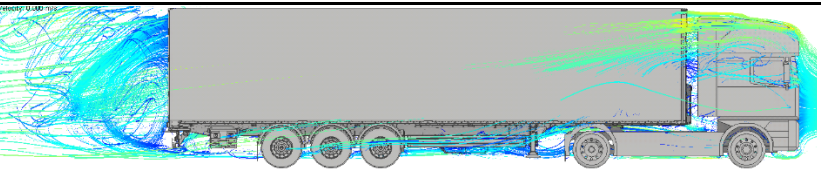
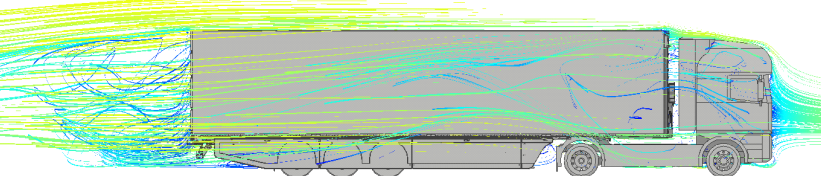
Opracowany pakiet aerodynamiczny poddawo szczegółowym analizom w celu potwierdzenia poprawy współczynnika oporu aerodynamicznego oraz sprawdzenia jego technologicznej poprawności

1.3. Ocena rozwiązania pod kątem współczynnika oporu aerodynamicznego

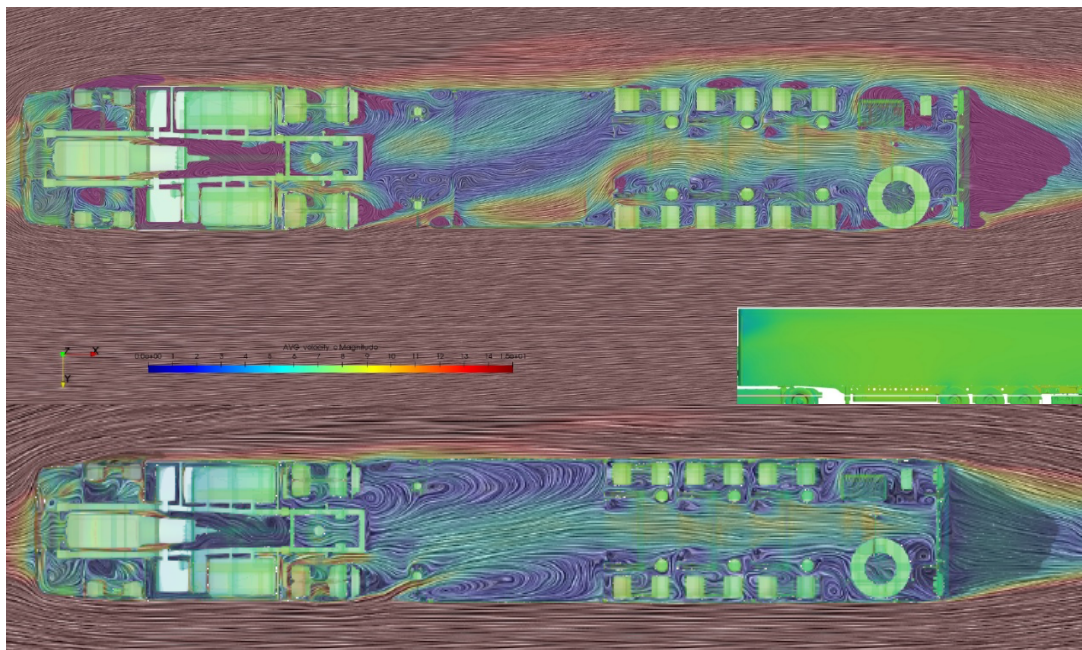
W ramach prowadzonych prac wykonano analizy aerodynamiczne naczepy z zaprojektowanym pakietem aerodynamicznym. Analizy obejmują ocenę wpływu pakietu na zmianę współczynnika oporu aerodynamicznego C_x . Na potrzeby analiz zastosowano narzędzia obliczeniowej dynamiki płynów (CFD). Naczepę z ciągnikiem umieszczono w wirtualnym tunelu aerodynamicznym, przyjęto prędkość 80km/h. W analizach określono C_x dla naczepy bez pakietu oraz z pakietem aerodynamicznym.

Wyniki (tab 1.1) pokazują istotne zmniejszenie C_x przy zastosowaniu pakietu aerodynamicznego (z 0,65 do 0,45). Różnice prędkości powietrza i ciśnienia (rys. 1.6) na bocznych obszarach naczepy lub pod naczepą są mniejsze, co świadczy o mniejszym zaburzeniu przepływu powietrza i korzystniejszym współczynniku C_x .

Tab. 1.1 Współczynnik oporu aerodynamicznego naczepy bez pakietu oraz z pakietem aerodynamicznym

Wariant	C_x	
Zestaw bez pakietu aerodynamicznego	0,65	
Zestaw z pakietem aerodynamicznym	0,45	

Uzyskane wyniki sugerują możliwość oszczędności paliwa na poziomie 1,5 l/100 km (redukcja o 5%) [10] lub nawet 3 l/100 km (redukcja o 10%) [3]. Dla ostatecznej weryfikacji zaleca się badania w tunelu aerodynamicznym na fizycznych prototypach. Alternatywą jest instalacja elementów na wybranych naczepach i przeprowadzenie testów w warunkach rzeczywistych, choć jest to czasochłonne. Niemniej jednak regulacje prawne, np. dyrektywa VECTO [7][11], opierają się na korzyściach z elementów aerodynamicznych, nie wymagając potwierdzenia na fizycznych produktach. Analizy numeryczne VECTO są wystarczające z punktu widzenia przepisów regulacyjnych.

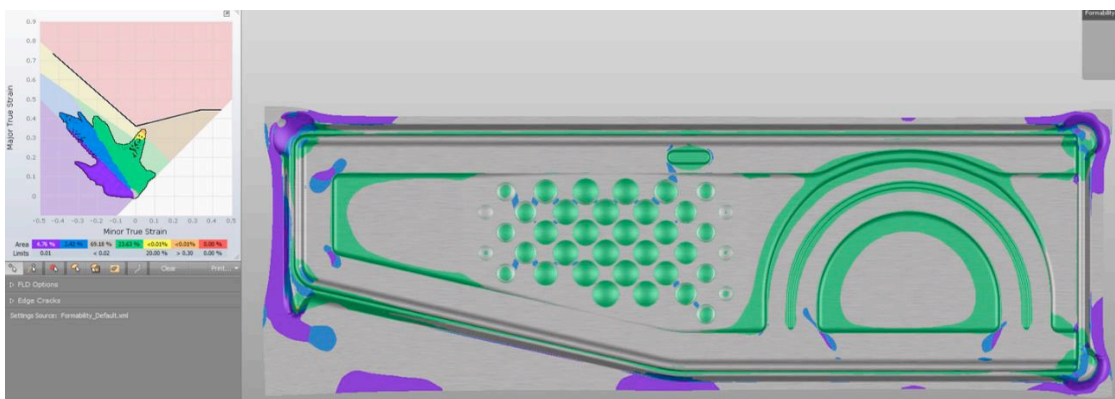


Rys 1.6 Porównanie pól ciśnienia na wysokości 225 mm od podłoża – naczepa bez pakietu aerodynamicznego (na górze) oraz z pakietem (na dole)

1.4. Analiza poprawności technologicznej i wytworzony prototyp

Ocenę poprawności technologicznej przeprowadzono zgodnie z metodyką projektowania dedykowaną elastycznemu formowaniu blach (flexforming) opracowaną w firmie Wielton. Analizowano potencjalne nieprawidłowości, takie jak nadmierne pocienienie materiału i pęknięcia oraz dbano o uzyskanie odpowiednich tolerancji wymiarowych, kształtu i położenia. Badania koncentrowały się także na jakości i estetyce powierzchni, gdzie istotne było odkształcenie sprężyste po formowaniu i cięciu laserowym 3D.

Analizy przeprowadzono dla różnych gatunków materiału, uwzględniając szerokie pola tolerancji parametrów wytrzymałościowych i grubości materiału dostarczanego w różnych partiach od dostawcy (przykład patrz rys. 1.7). Jest to zagadnienie szczególnie istotne z punktu widzenia powtarzalnej produkcji seryjnej. Zmiana dostawcy określonego gatunku materiału (tu Form04/DC04), dla którego granica sprężystości może różnić się na poziomie 100MPa zależnie od partii materiału (wciąż spełniając wymagania normy materiałowej), może powodować pojawienie się pęknięć lub deformacji widocznych na wykresie tłoczności z graniczną krzywą tłoczności dla tworzywa (ang. forming limit curve/diagram, FLC/FLD). Graniczna krzywa tłoczności (na diagramie FLD) umożliwia numeryczną weryfikację tłoczności elementów. Potencjalne problemy mogą pojawić się szczególnie kiedy zauważalne na wykresie są obszary blisko tej krzywej. Wtedy niewielka zmiana parametrów mechanicznych tworzywa (w wyniku użycia innej partii materiału) może spowodować pojawianie się pęknięć.



Rys 1.7 Wybrane wyniki symulacji formowania elementów pakietu aerodynamicznego naczepy kurtynowej Wielton

Na podstawie projektu pakietu oraz symulacji wytworzono narzędzia do formowania oraz panele boczne. Całość zamontowano na naczepie kurtynowej Wielton (rys. 1.8).



Rys 1.8 Naczepa kurtynowa Wielton z zamontowanym pakietem aerodynamicznym

1.4. Podsumowanie

W obszarze budowy i eksploatacji pojazdów ciężarowych, układy aerodynamiczne odgrywają kluczową rolę w poprawie aerodynamiki i efektywności paliwowej. Opracowany pakiet aerodynamiczny z potwierdzoną numerycznie certyfikacją zgodnie z VECTO składa się z czterech głównych segmentów osłon bocznych: osłony tyłu, osłony kół, osłony z funkcją bocznego urządzenia zderzeniowego oraz osłony nóg podporowych. Każdy segment może być niezależnie podnoszony, co ułatwia dostęp do urządzeń pod naczepą. Wykorzystano technologię elastycznego formowania blach stalowych do wytworzenia paneli bocznych, co pozwoliło uzyskać odpowiednie właściwości wytrzymałościowe oraz estetyczne. Analizy numeryczne wykazały istotne zmniejszenie współczynnika oporu aerodynamicznego C_x dla naczepy z pakietem aerodynamicznym w porównaniu do naczepy bez pakietu. Zastosowanie tego

rozwiązania może przynieść oszczędności na zużyciu paliwa na poziomie 1,5 l/100 km, co stanowi redukcję zużycia o 5%. Wyniki te, choć obiecujące i wystarczające z punktu widzenia certyfikacji VECTO, wymagają zapewne dodatkowego potwierdzenia poprzez przyszłe badania w warunkach rzeczywistych. Wdrożenie pakietu aerodynamicznego, który przynosi korzyści w zakresie poprawy efektywności paliwowej, znacząco wpływa na osiągnięcie celów związanych z ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych. Dlatego spełnienie wymagań VECTO przez opracowany pakiet aerodynamiczny jest kluczowe dla jego akceptacji i zastosowania w praktyce, przyczyniając się jednocześnie do bardziej zrównoważonego rozwoju transportu drogowego.

Dodatkowa walidacja technologiczna wykazała, że zaprojektowane elementy pakietu aerodynamicznego są poprawne technologicznie, spełniając stawiane wymagania, w tym zachowując odpowiednie tolerancje wymiarowe i jakość powierzchni. Opracowany pakiet aerodynamiczny stanowi więc ważny krok w kierunku udoskonalania rozwiązań aerodynamicznych dla pojazdów ciężarowych firmy Wielton. Zastosowanie bocznych pakietów aerodynamicznych przyczynia się do obniżenia zużycia paliwa, poprawia stabilność pojazdu przy bocznym wietrze oraz ogranicza rozbryzgi na mokrych drogach. Zapewniają również większe bezpieczeństwo, chroniąc niechronionych użytkowników dróg przed dostaniem się pod pojazd.

BIBLIOGRAFIA

1. Brożyna K. Projekt hydroformowanego pakietu aerodynamicznego dla naczepy kurtynowej; Projekt inżynierski RMT/INZ/291392/2023 opracowany pod opieką M. Januszka, A. Loska; Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, 2023
2. Chowdhury H., Moria, H., Ali A., Khan I. A Study on Aerodynamic Drag of a Semi-trailer Truck, *Procedia Engineering* 56, s. 201–205, 2013
3. ELOFSSON P. *Experimental Methods in Vehicle Aerodynamics*, SCANIA, KTH Vehicle Aerodynamics, 2004
4. Pyszczek K. 40ton.net - Już 40 lat temu ciężarówki mogły palić 40 proc. mniej – dawne aerodynamiczne zestawy, Dostępne pod adresem: <https://40ton.net/juz-40-lat-temu-ciezarowki-mogly-palic-40-proc-mniej-dawne-aerodynamiczne-zestawy> (dostęp dn.: 14.02.2024r.)
5. Van Raemdonck G., Von Tooren M. Design of an Aerodynamic Aid for the Underbody of a Trailer within a Tractor-Trailer Combination, *BBA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamic & Application*, s. 20-24, 2008
6. Vallbona A.G. Idiada - Support for aerodynamic modelling of heavy-duty trailers, Procedure no: 090203/2022/882079/SER/CLIMA B3, dostępne pod adresem:

- https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-07/policy_transport_road_co2_report_20230726_en.pdf (dostęp dn.: 14.02.2024r.)
7. Zacharof N-G, Fontaras G. Report on VECTO Technology Simulation Capabilities and Future Outlook, JRC EU Commission Technical Report, Dostępne pod adresem: <https://core.ac.uk/download/pdf/81685131.pdf> (dostęp dn.: 14.02.2024r.)
 8. Quintus Technologies - strona www producenta pras do flexformingu, dostępna pod adresem: <https://quintustechnologies.com> (dostęp dn.: 14.02.2024r.)
 9. SSAB - specyfikacja stali SSAB Form 04, dostępne pod adresem: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/ssab-form-deep-drawing-steel/product-offer/04> (dostęp dn. 14.02.2024r.)
 10. WABCO – OptiFlow AERODYNAMIC REAR TRAILER FAIRINGS, Dostępne pod adresem: https://www.zf.com/products/media/automotive/cv/literature_downloads_wna/trailer_solutions/aerodynamics_sales_publications/SP18039_web.pdf, (dostęp dn.: 14.02.2024r.)
 11. Vehicle Energy Consumption calculation TOol – VECTO, dostępne pod adresem: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/vehicle-energy-consumption-calculation-tool-vecto_en (dostęp dn.: 14.02.2024r.)

Rozdział 2

SYSTEM STEROWANIA ROBOTEM EKSPLORACYJNYM BAZUJĄCY NA GŁĘBOKICH SIECIACH NEURONOWYCH

Polnik Paweł¹, Januszka Marcin², Kosior Mateusz³

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, paul.polnik@gmail.com

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, marcin.januszka@polsl.pl

³Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, mateusz.kosior@polsl.pl

2.1. Wprowadzenie

Autonomia pojazdów, przez długi czas związana głównie z futurystycznymi wizjami [1], zyskała praktyczne zastosowanie w latach sześćdziesiątych XX wieku w ramach wyścigu kosmicznego, szczególnie w kontekście łazików kosmicznych [2]. Jednak to dopiero na początku XXI wieku autonomia samochodów stała się obszarem intensywnych badań i rozwoju. Departament Obrony Stanów Zjednoczonych - DARPA [3] włączył się aktywnie w rozwój autonomii sponsorując serię wyzwań, które miały na celu przyspieszenie postępu w tej dziedzinie. Choć pierwsze próby były nieudane to już w 2005 roku pięć zespołów z powodzeniem ukończyło Grand Challenge [4], pokonując trasę przez kalifornijską pustynię Mojave w czasie krótszym niż siedem godzin. Obecnie liczne firmy motoryzacyjne, takie jak: Ford, Mercedes-Bens, BMW, Tesla, oraz firmy technologiczne Nvidia i Google z samochodem Waymo, intensywnie angażują się w badania nad autonomią pojazdów.

Również na polu eksploracji kosmosu autonomia odgrywa kluczową rolę zwłaszcza w przypadku łazików marsjańskich. W kontekście dużej odległości między Ziemią a Marsem co wpływa na opóźnienia w transmisji danych systemy autonomicznej jazdy stają się niezwykle ważne. Inżynierowie rozwijają systemy umożliwiające łazikom samodzielne podejmowanie decyzji. W zależności od tego jak trudny jest teren operatorzy mają do wyboru dwie opcje:

- Operatorzy mają możliwość wysyłania konkretnych poleceń, takich jak: podjedź 5 metrów do przodu, a następnie skręć w prawo o 90 stopni w postaci następującego schematu:

eksperymentach i implementacji algorytmów na rzeczywistych platformach. W kontekście robotów eksploracyjnych zwłaszcza marsjańskich łazików istnieje zasadnicza potrzeba stworzenia platformy edukacyjnej, która będzie stanowiła solidną podstawę do nauki i rozwijania autonomicznych systemów sterowania. Platforma ta powinna uwzględniać specyficzne wyzwania związane z eksploracją marsjańskiego terenu.

2.2. Przegląd istniejących konstrukcji platform do nauki autonomicznej jazdy

Prognozy rynkowe wskazują, że do 2025 roku na drogach będzie poruszać się ponad 20 milionów autonomicznych pojazdów [7]. W dziedzinie badawczej małych autonomicznych platform pojawiają się różnorodne konfiguracje dostosowane do badania konkretnych problemów z dedykowanym oprzyrządowaniem. W środowiskach naukowych do testowania często używane są modele o odpowiedniej skali na przykład 1/10, ze względu na koszty i kwestie bezpieczeństwa. Platformy do rozwoju systemów autonomicznej jazdy stanowią zatem doskonałą okazję do nauki i eksperymentowania z najnowszymi technologiami. Przegląd literatury oraz analiza rynku technologii [9] wykazują, że istnieje wiele platform do nauki autonomii skupiających się głównie na prostych robotach dwukołowych lub konstrukcjach przypominających samochody. Jednak brakuje dedykowanych platform do rozwoju systemów autonomicznych dla robotów eksploracyjnych. Niektóre z popularnych projektów to:

- FITENTH [29] - platforma samochodowa do szybkiej jazdy na przygotowanych nawierzchniach.
- AutoRally Robot [30] – platforma samochodowa do jazdy w warunkach nieutwardzonej nawierzchni.
- Duckiebot [31] – otwarty źródłowy prosty robot dwukołowy.
- Jackal UGV [32] – komercyjny projekt platformy robota eksploracyjnego.

W związku z potrzebą stworzenia platformy służącej jako baza do nauki i rozwoju autonomicznych systemów sterowania zwłaszcza dla robotów eksploracyjnych zdecydowano się w ramach pracy magisterskiej [9] zbudować 6-kołową platformę robotyczną z zawieszeniem typu rocker-bogie i napędem na każde koło. Ta platforma jest wzorowana na konstrukcjach Amerykańskiej Agencji Kosmicznej NASA, takich jak łaziki Curiosity oraz Perseverance. Widok finalny platformy przedstawiono na rysunku 2.2.

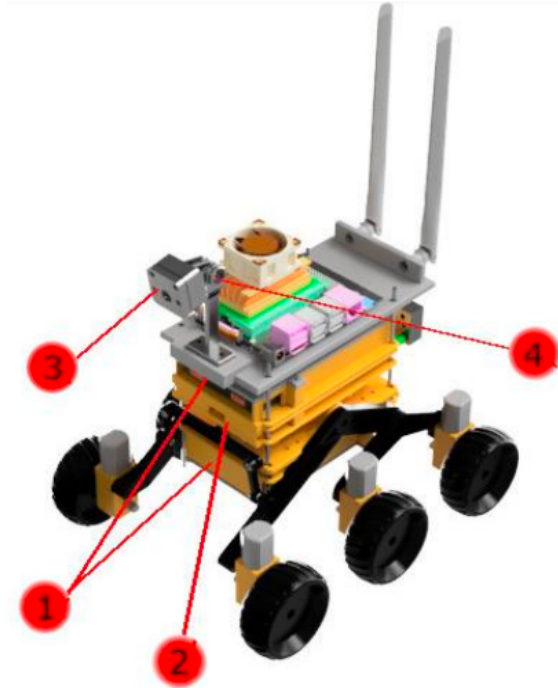


Rys. 2.2 Widok platformy robotycznej do nauki i rozwoju autonomicznych systemów sterowania w kontekście robotów eksploracyjnych

2.3. Konstrukcja platformy robotycznej oraz jej modyfikacje

Koncepcja konstrukcji platformy robotycznej została opracowana w ramach realizacji pracy przejściowej [8][26]. W trakcie prac modelowano obudowę źródeł zasilania (rys. 2.3. poz. 1, 2), okablowania (rys. 2.3. poz. 2), a także elementy mocujące sterowniki silników i płytę mocującą zestaw Jetson Nano wraz z antenami komunikacyjnymi. Celem robota eksploracyjnego jest autonomiczna jazda oparta na danych obrazowych z kamery umieszczonej na odpowiedniej wysokości i pod odpowiednim kątem w stosunku do podłoża co pozwala na swobodne zbieranie informacji z powierzchni, po której przemieszcza się robot. Te zebrane informacje są później wykorzystywane w algorytmach sterowania. Z myślą o tych zagadnieniach zamodelowano obudowę kamery (rys. 2.3. poz. 3) z odpowiadającym jej mocowaniem (rys. 2.3. poz. 4) umożliwiającym optymalne dostosowanie pozycji. Do napędu wybrano sześć silników prądu stałego z metalową przekładnią kątową uwzględniając ich wytrzymałość. Mając na uwadze założenie modularności robota oraz przyjęty typ zawieszenia zdecydowano się wykorzystać projekt zawieszenia rocker boogie jako uniwersalnej platformy do robotyki pojazdów RC autorstwa mgr inż. Tadeusza Cabana [10] na podstawie której rozbudowano i dostosowano platformę edukacyjna robota eksploracyjnego. Modularna konstrukcja platformy robotycznej oraz zastosowanie druku 3D umożliwiły szybkie prototypowanie poszczególnych elementów oraz ich prostą implementację do konstrukcji. W trakcie przeprowadzania badań na utworzonych torach testowych biorąc pod uwagę niski współczynnik tarcia na utwardzonych płaskich powierzchniach zdecydowano się na zastąpienie koła posiadające bieżnik w kształcie odwróconej litery V tzw. chevron pattern autorstwa mgr inż. Tadeusza Cabana [10] posiadające 24 rowki wzorowanych na marsjańskim łąziku

eksploracyjnym Curiosity. W związku z tym zamodelowano nowe koła z podziałem na felgę oraz oponę. Decyzję tą podjęto z względu na większą elastyczność. W tej konfiguracji istnieje możliwość zmiany kształtu bieżnika opon dostosowując ją do występujących warunków. Ponadto, w technologii druku 3D zdecydowano się wykorzystać materiały o właściwościach zbliżonych do gumowych (oparty na żywicy fotopolimerowej), przez co możliwe stało się uzyskanie odpowiedniej przyczepność.



Rys. 2.3 Złożenie modelu robota eksploracyjnego [9]

Podczas realizacji projektu napotkano szereg problemów związanych z zasilaniem jednostki obliczeniowej Jetson Nano. Do tego celu użyto oddzielnego powerbanku INIU BIB41 o pojemności 10000mAh, posiadającego dwa wyjścia USB-A o parametrach napięcia 5V i natężenia prądu 3A na każdym z wyjść. Jetson Nano został skonfigurowany tak, aby spełniać zapotrzebowanie energetyczne na poziomie 10W, z uwagi na obliczenia wykonywane na jednostce graficznej przy implementacji algorytmów sztucznej inteligencji. Ze względu na dużą liczbę używanych urządzeń peryferyjnych, takich jak kamera Raspberry Pi HD v2 8MPx, dwa sterowniki silników układ PCA9685 + TB6612, wyświetlacz PiOLED, karta sieciowa Intel Dual Band Wireless-AC oraz wentylator, w momencie uruchamiania kamery i algorytmu sterowania, czyli podczas chłonnych obliczeń, dochodziło do automatycznego wyłączenia zestawu programistycznego. Ten problem stał się znaczącym wyzwaniem do rozwiązania. W tym celu przeprowadzono szereg testów z użyciem stabilizowanego zasilacza laboratoryjnego Korad KD3005P 0-30V 5A [11]. W trakcie analizy literatury natrafiono na informację w dokumentacji firmy NVIDIA [12], która wskazywała, że moduł NVIDIA Jetson Nano wymaga do działania napięcia minimum 4,75V i natężenia 2A. Początkowo przyjęto natężenie prądu na poziomie 2,5A, a napięcie ustalono na 5,10V, co było wartością większą od nominalnej. Niemniej jednak

problem z wyłączaniem jednostki Jetson Nano nadal występował. W trakcie badań z stopniowo zwiększonymi parametrami prądowymi stwierdzono, że w momencie rozpoczęcia działania nauczonych modeli następuje znaczny spadek napięcia na ścieżkach zasilających płytke z złącza baryłkowego. Pomiar napięcia przed wyłączeniem, dokonany miernikiem Fluke 87V [13], wynosił w granicach 4,83V – 4,91V. Te pomiary wskazywały na problem w przewodach zasilających. W związku z tym zdecydowano się przylutować przewody silikonowe o przekroju 0,5mm² i długości 500mm bezpośrednio do złącza baryłkowego na płycie Jetson Nano. Wybór tego przekroju wynikał z deklarowanej przez producenta obciążalności prądowej przewodu do 7A. Po przeprowadzeniu tych działań Jetson Nano zaczął działać poprawnie, a wcześniejsze problemy zostały wyeliminowane. Wyniki te wskazują, że oryginalnie używane przewody miały zbyt mały przekrój, co przy dużym obciążeniu powodowało znaczne straty napięcia w przewodzie zasilającym. Przeprowadzono dodatkowe badania, zmniejszając stopniowo parametry prądowe na zasilaczu, aż do ponownego wyłączenia Jetsona Nano. W trakcie tych badań stwierdzono, że w trybie zasilania 10W, przy używanych urządzeniach peryferyjnych i wykonywanych zadaniach obliczeniowych, czyli po uruchomieniu algorytmu, minimalne wartości prądowe, jakie trzeba dostarczyć do Jetson Nano przy zastosowanych przewodach i zasilaczu, to napięcie 5,09V i natężenie 2,48A dla prawidłowej, stabilnej pracy. Po uzyskaniu tej wiedzy dokonano pomiarów wartości wyjściowych parametrów powerbanku.

2.4. Środowiska testowe do utworzenia zbiorów danych uczących

Realizacja projektu wymaga utworzenia zbioru danych uczących niezbędnych do wytrenowania modeli umożliwiających odpowiednią klasyfikację zajętości drogi. Proces ten jest zazwyczaj najbardziej czasochłonną i problematyczną częścią projektu korzystającego z sieci neuronowych. W tym konkretnym przypadku, aby zgromadzić odpowiednie przykłady utworzono dwa tory testowe – jeden w warunkach zewnętrznych, a drugi wewnętrznych. Środowisko testowe w warunkach wewnętrznych (rys. 2.4.) przybiera formę elipsy o wymiarach 3000 x 1500mm. Składa się ono z ciągłych czarnych pasów symulujących pasy ruchu z przerywanymi liniami pośrodku. W tym przypadku głównym celem jest przetestowanie algorytmów autonomicznej jazdy, pomijając specyficzne cechy mechaniczne łożyska. Środowisko to umożliwia przeprowadzenie realistycznych badań oraz zdobycie doświadczenia w kontekście przyjętych założeń.



Rys. 2.4 Widok toru testowego w warunkach wewnętrznych

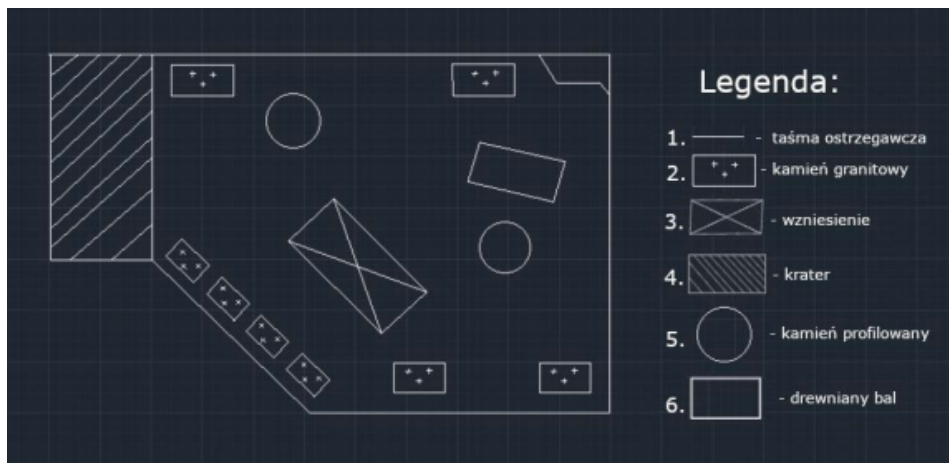
W celu przeprowadzenia testów nad właściwościami zawieszenia oraz zdolnościami poruszania się utworzonego robota eksploracyjnego po terenach nieutwardzonych, które mają symulować warunki marsjańskie utworzono specjalne środowisko badawcze do jazdy w warunkach zewnętrznych. Budowa tego środowiska to proces wymagający czasu, w którym należy precyzyjnie określić potrzeby i przewidzieć różne scenariusze badawcze już na etapie koncepcyjnym. Tor testowy w warunkach zewnętrznych (rys. 9.5.) został zaprojektowany o nieregularnym kształcie i granicznych wymiarach wynoszących 3500 x 4000mm. Inspiracją do jego stworzenia było unikalny obiekt Marsian Yard [14] będące areną zmagania międzynarodowych zawodów European Rover Challenge (ERC) organizowanych corocznie w Kielcach na terenie Politechniki Świętokrzyskiej.



Rys. 2.5 Widok toru testowego w warunkach zewnętrznych

Obszar został odgradzony taśmą ostrzegawczą (rys. 2.6, pkt.1) natomiast wzdłuż krawędzi toru, które nie kontrastują zastosowano kamienie murowe granitowe (rys. 2.6, pkt.2). Ta koncepcja ma ułatwić zbieranie danych jednoznacznie określając granice toru. Podłoże zostało pokryte skałami osadowymi o zróżnicowanej frakcji umożliwiając testowanie właściwości różnych

typów opon. Dodatkowo przygotowano wzniesienie (rys. 2.6, pkt.3) jako sprawdzian dla zawieszenia typu rocker-bogie. Wykonano również podłużne zagłębienie (rys. 2.6, pkt.4) symulując formy marsjańskie w postaci krateru. Właściwości jezdne zostały sprawdzone przy pokonywaniu odpowiednio profilowanych kamieni (rys. 2.6, pkt.5). Elementem odznaczającym się odmiennymi wymiarami oraz fakturą jest drewniany bal (rys. 2.6, pkt.6) dodany w celu przetestowania poprawności klasyfikacji przeszkody przez algorytm oraz przetestowania manewru ominięcia.

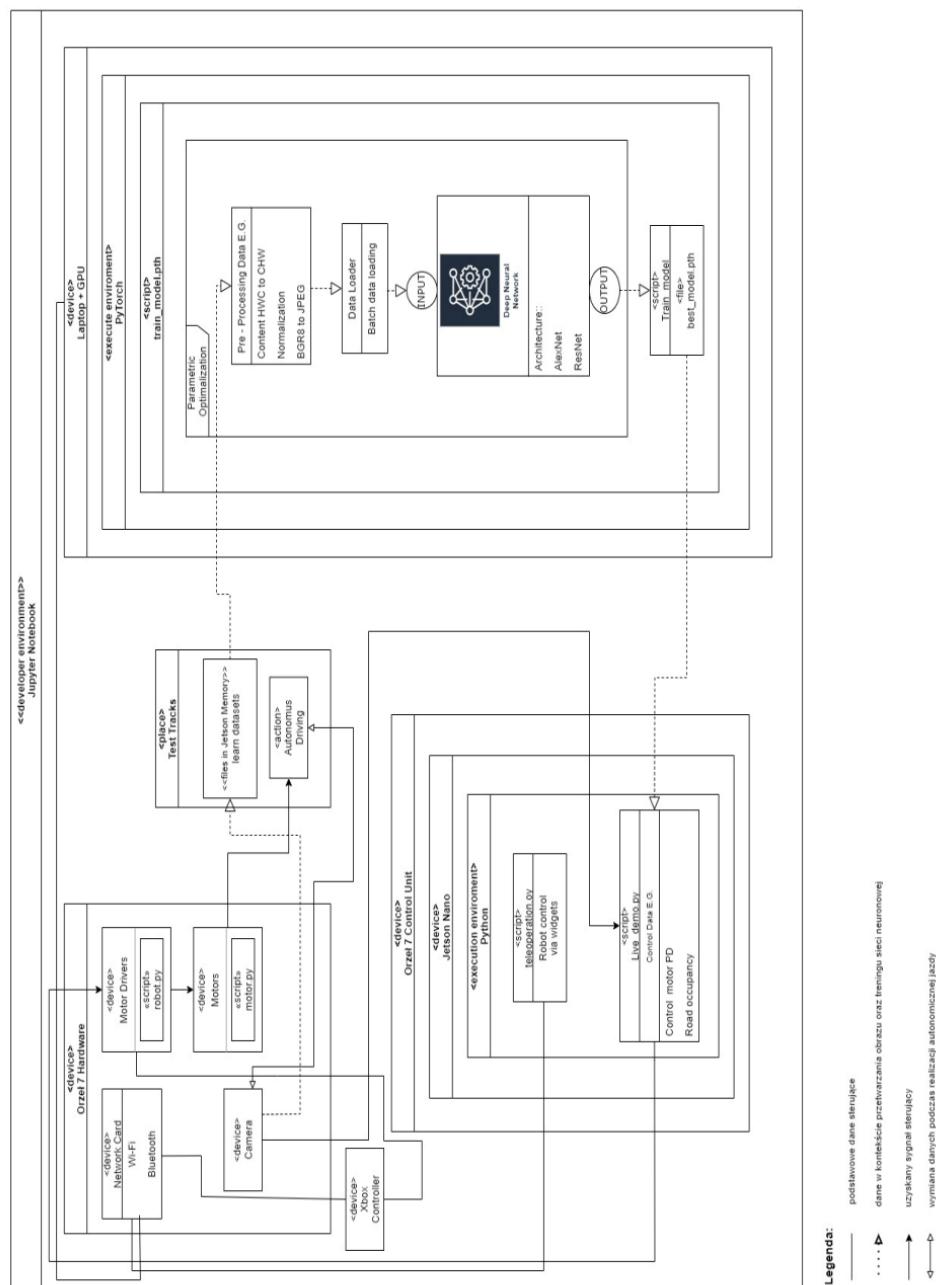


Rys. 2.6 Schemat toru testowego w warunkach zewnętrznych z wyszczególnionymi elementami składowymi

2.5. Projekt algorytmu sterowania

Na schemacie przedstawiono strukturę opracowanego systemu sterowania robotem eksploracyjnym opartego na głębokich sieciach neuronowych. Składa się on z dwóch kluczowych elementów: komputera przenośnego wyposażonego w dedykowaną jednostkę graficzną do zadań obliczeniowych oraz robota eksploracyjnego o nazwie „Orzeł 7”. Wszystkie operacje związane z implementacją sterowania i komunikacją z robotem są realizowane za pośrednictwem platformy programistycznej JupyterLab [15] pełniącej funkcję zintegrowanego środowiska programistycznego IDE (Integrated Development Environment) oraz repozytorium z dokumentacją projektu JetBot AI [16]. Robot Orzeł 7 składa się z dwóch głównych elementów: części sprzętowej oraz jednostki sterującej (układ Jetson Nano). Część sprzętowa obejmuje m.in. sterowniki silników oraz silniki zastosowano także zmodyfikowane skrypty robot.py i motor.py do sterowania 6-kołowym robotem. Kluczowym elementem systemu jest kamera pełniąca rolę podstawowego źródła danych i jedyne czujnika, za pomocą którego robot zbiera informacje z otoczenia. Tory testowe zostały uwzględnione na schemacie jako integralna część systemu sterowania robotem eksploracyjnym, gdyż są niezbędne do wygenerowania zbioru danych uczących. Poprzez użycie laptopa z dedykowaną jednostką graficzną i wykorzystując

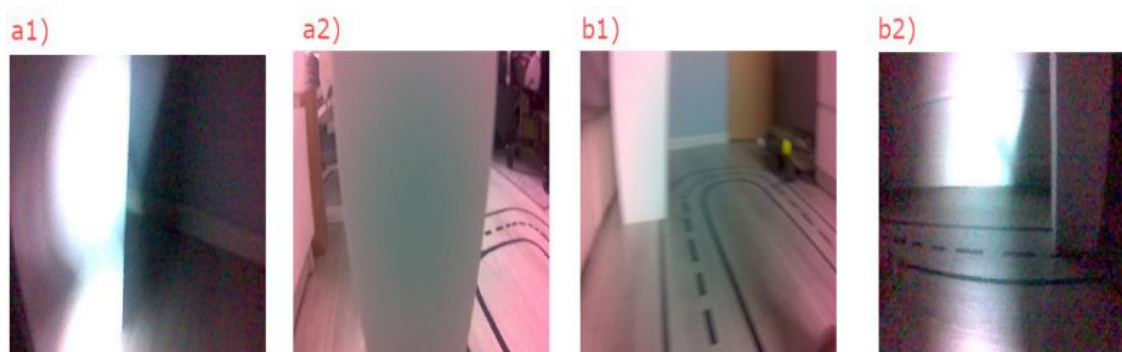
bibliotekę PyTorch w skrypcie Python dane są przygotowywane do przekazania na wejście sieci neuronowej tzw. preprocessing. Proces ten obejmuje normalizację, zmianę rozmiaru i formatu danych. W kolejnym kroku przygotowane dane są dzielone na próbki oraz wgrywane do wstępnie przetrenowanych wybranych architektur sieci neuronowych tj. AlexNet oraz ResNet. Cały proces podlega optymalizacji poprzez dostrojenie parametrów, a wynikiem jest przetrenowany model sieci neuronowej. Ostatecznym etapem jest przesłanie modelu z komputera przenośnego na układ Jetson Nano. System sterowania robotem eksploracyjnym bazujący na głębokich sieciach neuronowych został skonstruowany zgodnie ze specyfikacją opracowaną podczas realizacji projektu, korzystając z dokumentacji projektu JetBot firmy Nvidia.



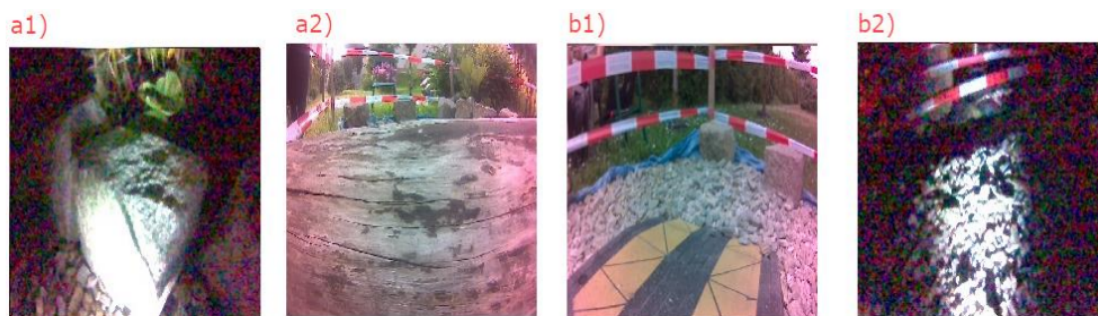
Rys. 2.7 Schemat struktury systemu sterowania robotem eksploracyjnym

2.6. Zbiór danych

W trakcie tworzenia systemu sterowania opartego na przetwarzaniu obrazu przy użyciu głębokich sieci neuronowych kluczowym wyzwaniem jest stworzenie zbioru danych uczących. Efektywność działania systemu oraz skuteczność przejazdów są ściśle zależne od liczby, jakości i różnorodności dostępnych przykładów w zbiorach danych. Ta trudność wynika z unikalnego ukształtowania miejsc, w których operuje pojazd co sprawia, że nie ma dostępnych konkretnych danych w ogólnodostępnych zbiorach internetowych. Możliwe jest wykorzystanie ogólnodostępnego zbioru np. ImageNet składającego się z ponad 14 milionów obrazów wraz z adnotacjami przez co można wyczuć sieć identyfikacji elementów. Działanie to jednak nie jest przedmiotem tej pracy, w której celem jest poprawny przejazd platformy robotycznej po utworzonych torach testowych poprzez klasyfikowanie zajętości trasy. Te miejsca eksploracyjne są unikalne a zbierane dane powinny odzwierciedlać specyfikę warunków w jakich operuje pojazd. Z tego powodu stworzono zestawy danych zarówno dla warunków dziennych jak i nocnych. Przykłady zdjęć ze zbiorów testowych są przedstawione poniżej na rys. 2.8. oraz rys. 2.9. Należy zauważyć, że zniekształcenia obrazu i charakterystyczne przesunięcie w kierunku czerwieni przy krawędziach obrazu wynikają ze specyfiki stosowanej kamery.



Rys. 2.8 Przykładowe zdjęcia z zbioru toru testowego w warunkach wewnętrznych od lewej – a1) zajętość drogi w warunkach nocnych; a2) zajętość drogi w warunkach dziennych; b1) wolna droga w warunkach dziennych; b2) wolna droga w warunkach nocnych



Rys. 2.9 Przykładowe zdjęcia z zbioru toru testowego w warunkach zewnętrznych od lewej – a1) zajętość drogi w warunkach nocnych; a2) zajętość drogi w warunkach dziennych; b1) wolna droga w warunkach dziennych; b2) wolna droga w warunkach nocnych

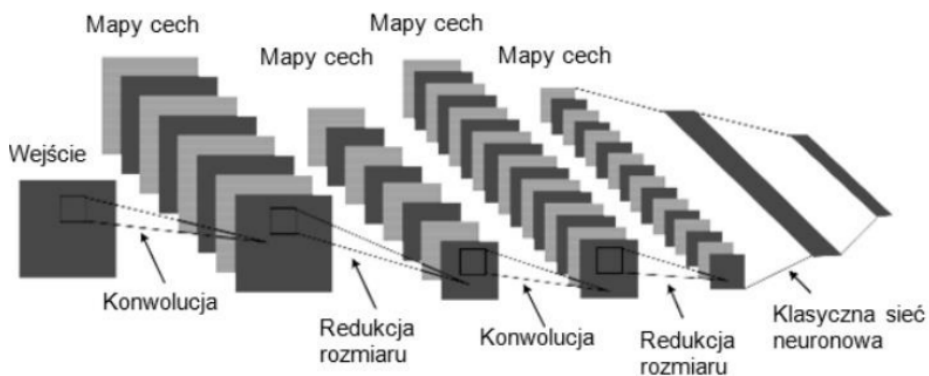
Zbiorcze zdjęcia w zestawie uczącym zostały programowo przeskalowane do rozmiaru 224 x 224 pikseli. To dostosowanie pozwala na efektywne wprowadzenie ich do pierwszych warstw architektury AlexNet i ResNet oraz ogranicza rozmiar danych przekazywanych do sieci. W trakcie realizacji projektu przeprowadzono badania analizując zależność pomiędzy rozmiarem zbioru uczącego a wynikami nauki modelu sieci oraz skutecznością pracy jednostki robotycznej po jej zaimplementowaniu. W celu zrealizowania tego zadania stworzono kilka zbiorów danych o różnych wielkościach. Poniższa tabela przedstawia rozmieszczenie próbek w poszczególnych zbiorach. Podział na zbiory o wartościach 300, 500 i 800 próbek został ustalony niezależnie przez autora projektu biorąc pod uwagę ograniczenia czasowe związane z tworzeniem zbiorów.

Tab. 2.1 Przyjęte wielkości utworzonych zestawów danych

Tor wewnętrzny		Tor zewnętrzny	
Dzień	Noc	Dzień	Noc
<i>Liczba próbek</i>			
300		300	
500		500	
800		800	

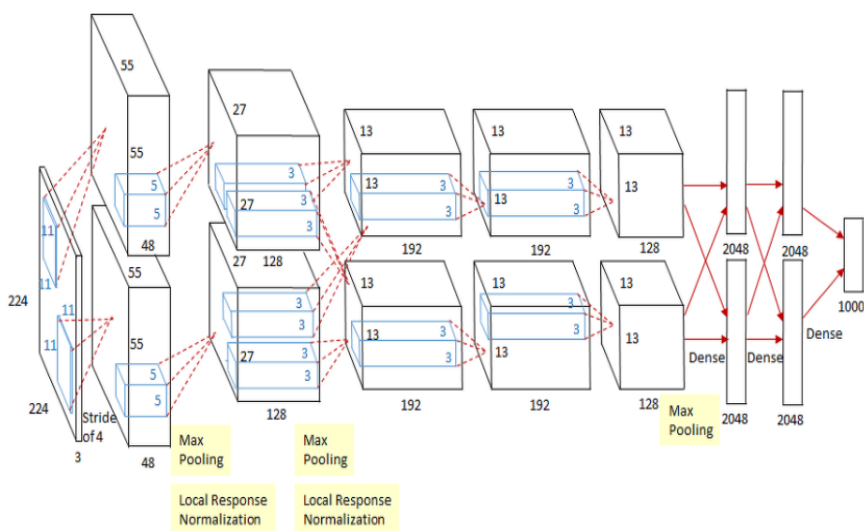
2.7. Uczenie głębokie i architektury stosowanych sieci neuronowych

Głębokie sieci neuronowe (DNN ang. Deep Neural Network) będące odmianą sieci neuronowych pełnią istotną rolę w rozpoznawaniu i klasyfikacji obiektów. Charakteryzują się one posiadaniem wielu warstw ukrytych. W obszarze wizji komputerowej tradycyjne sieci neuronowe okazały się niewystarczająco efektywne. Obrazy podawane na wejście mogą zawierać tysiące pikseli i do trzech kanałów kolorów co wymagałoby ogromnej liczby połączeń i parametrów w klasycznych sieciach neuronowych [17]. Typem głębokich sieci neuronowych wykorzystywanych do analizy obrazów są sieci konwolucyjne CNN (ang.convolutional neural network) zwane również splotowymi, stanowią specyficzną odmianę głębokich sieci neuronowych wykorzystywanych do analizy obrazów. Konwolucyjne sieci neuronowe (rys. 2.10) operują przy użyciu różniczkowalnych funkcji przekształcających zbiór danych na kolejne poziomy. Sieci splotowe uwzględniają fakt, że obraz składa się z mniejszych cech lub detali co umożliwia analizę każdej cechy osobno wpływając ostatecznie na całościową decyzję [18]. W kontekście uczenia głębokiego sieci neuronowe mają zdolność tworzenia precyzyjnych algorytmów sterowania. Mogą sterować robotem określając prędkość i kierunek ruchu. Informacje o otoczeniu są zbierane przez czujniki i przetwarzane przez odpowiedni algorytm sterujący [19]



Rys. 2.10 Konwolucyjna (splotowa) sieć neuronowa [20]

AlexNet to rozbudowana splotowa sieć neuronowa CNN uznawana za jedną z najbardziej dominujących w dziedzinie rozpoznawania obrazów z wykorzystaniem obliczeń prowadzonych na wielu procesorach graficznych GPU (ang. Graphics Processing Unit) [24]. Jej architektura (rys. 2.11.) wprowadziła wiele nowoczesnych rozwiązań, które obecnie stanowią standard w sieciach konwolucyjnych. Zastosowano w niej nienasyconą funkcję aktywacji ReLU (ang. rectified linear unit) co zapewnia lepszą wydajność i szybszą zbieżność procesu uczenia. Dodatkowo, w warstwach w pełni połączonych zaimplementowano metodę regularyzacji "dropout" w celu zmniejszenia zjawiska niedopasowania. Rozmiar architektury AlexNet i dostępność zasobów obliczeniowych podczas uczenia skłoniły twórców do podziału przetwarzania na dwa procesory graficzne GPU. To rozwiązanie miało istotny wpływ na architekturę i efektywność działania. Z kolei architektura ResNet opiera się na sieciach rezydualnych. Te sieci wykorzystują fakt, że zwiększanie liczby warstw może prowadzić do spadku skuteczności modelu z powodu przekroczenia pewnej granicznej wartości. Architektura ResNet stworzona przez zespół Kaiming He [21] wprowadza innowacyjne podejście wykorzystując normalizację wsadową (ang. batch normalization) do małego zbioru próbek uczących (wartości średniej zerowej i jedynkowej wariancji) [22].



Rys. 2.11 Struktura sieci AlexNet [23]

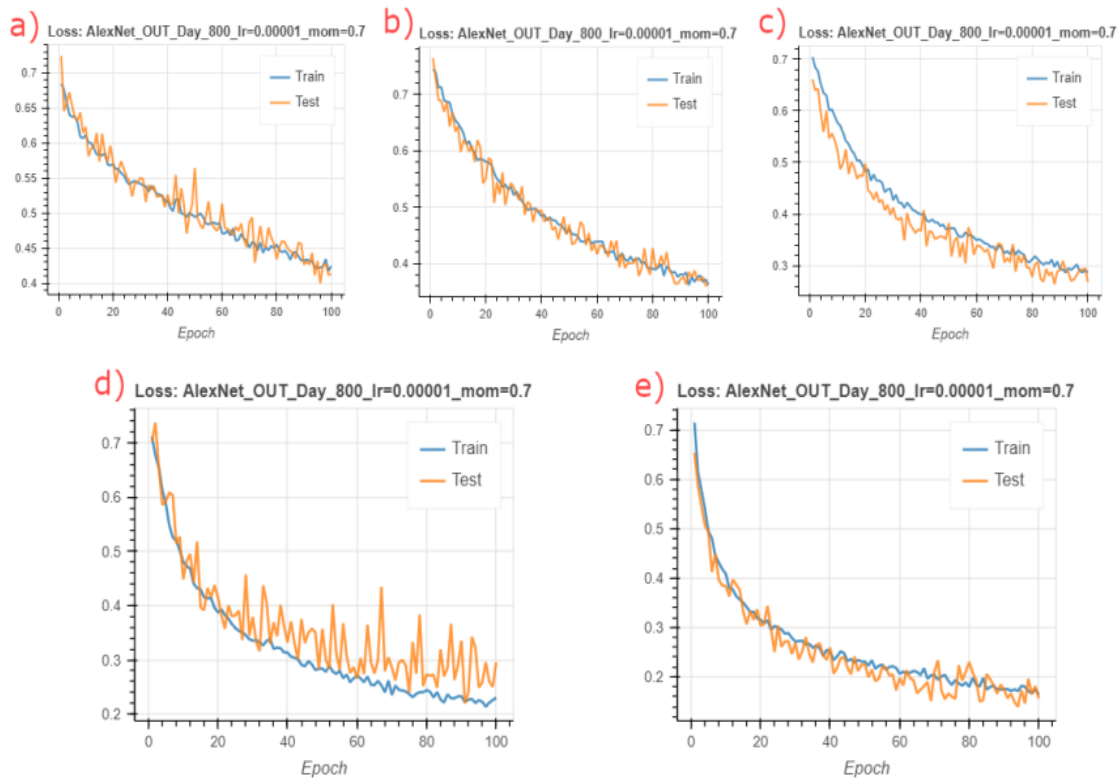
2.8. Optymalizacja sieci neuronowych

Projekt Jetbot AI obejmuje predefiniowane parametry sieci neuronowych ustalone przez firmę Nvidia oraz korzysta z biblioteki PyTorch. Ta biblioteka oferuje funkcje obliczeń tensorowych z silnym przyspieszeniem na GPU, a także wykorzystuje system tape-based autograd do efektywnego obliczania gradientów w procesie propagacji wstecznej podczas uczenia modelu. W ramach pracy dyplomowej przeprowadzono badania mające na celu optymalizację parametrów w celu osiągnięcia lepszych wyników uczenia modelu. Parametry podlegające optymalizacji obejmują między innymi: `transforms.normalize`, `torch.utils.data.random_split`, `batch_size`, `num_workers`, `num_epochs`, `learning_rate`, oraz `momentum`. Wybór optymalnych hiperparametrów takich jak: współczynnik uczenia, wartość pędu, wielkość partii i liczba warstw jest kluczowy dla skutecznego szkolenia modelu. Te wartości powinny być monitorowane i dostosowywane profilaktycznie, ponieważ zmiany w danych lub użycie nowego GPU/CPU mogą sprawić, że wcześniej dobrze dobrani parametry nie będą już optymalne. Proces ten jest czasem określany jako starzenie się hiperparametrów [24]. Wartości hiperparametrów zostały szczegółowo opisane w pracy magisterskiej. Do określenia właściwych wartości współczynników uczenia przeprowadzono eksperymenty z ręcznym dostrojeniem parametrów. Proces uczenia sieci obejmował zakres parametru `learning_rate` od 0.1 do 0.000001 oraz wartością `momentum` 0.7 lub 0.9. Po wyborze optymalnych wartości i uzyskaniu zbieżnej funkcji kosztu, algorytm został zaimplementowany na platformie robota eksploracyjnego. W przypadku szkolenia sieci rezydualnych zastosowano hiperparametry zastosowane w architekturze AlexNet. Przeprowadzono 100 iteracji obliczeń dla każdego zbioru danych, ucząc sieć w zakresie parametru `learning_rate` od 0.1 do 0.000001 oraz wartością `momentum` 0.7 lub 0.9. Ze względu na błąd `RuntimeError: CUDA out of memory`, wielkość partii ustalono na wartość 8. Po porównaniu wyników uczenia różnych architektur stwierdzono, że sieć ResNet 18 uzyskała lepsze wyniki na danych z torów testowych w warunkach wewnętrznych oraz w warunkach nocnych na torze zewnętrznym. Architektura AlexNet osiągnęła nieznacznie lepsze wyniki w warunkach dziennych na torze zewnętrznym. Przykładowe wyniki krzywych uczenia się trenowania i walidacji architektury AlexNet w zależności od wielkości partii przedstawiono na rys. 2.12.

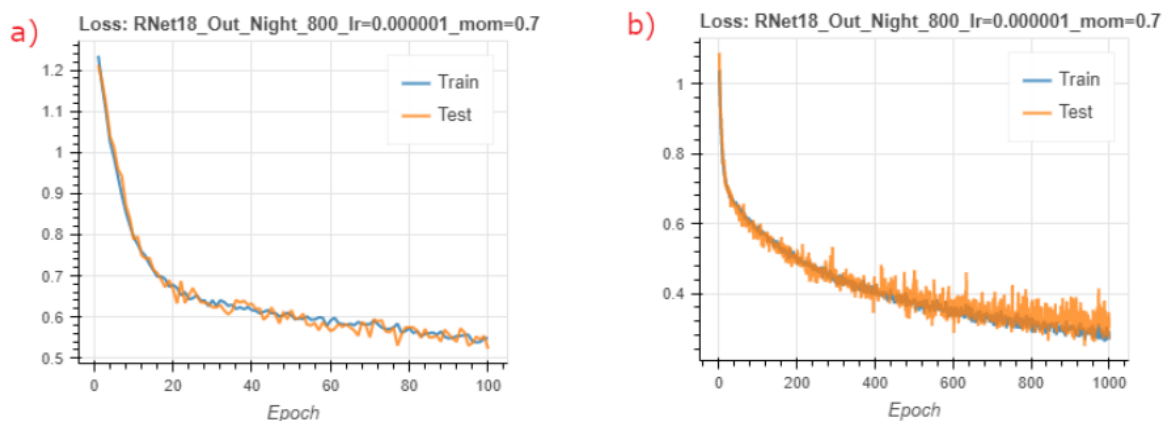
2.9. Trenowanie modeli z użyciem większej liczby epok

Analizując otrzymane wykresy wybrano po jednym zestawie parametrów z architektury AlexNet oraz ResNet 18, gdzie wyniki sugerowały polepszenie efektów nauki poprzez zwiększenie liczby epok. Wykresy ukazały, że modele osiągnęły swoje najlepsze rezultaty w ostatniej epoce co sugeruje, że zwiększenie

liczby epok może prowadzić do nieznacznej poprawy skuteczności. W związku z tym przeprowadzono dodatkowe szkolenie modelu tym razem na 1000 iteracjach obliczeń aby sprawdzić czy taka modyfikacja wpłynie na osiągnięcie lepszych wyników. Analiza wyników nie wykazała znaczącej poprawy w skuteczności na skutek zwiększenia liczby epok. Jedynie odnotowano minimalne zmniejszenie wartości straty w przypadku sieci ResNet, co przedstawiono na rys 2.13.



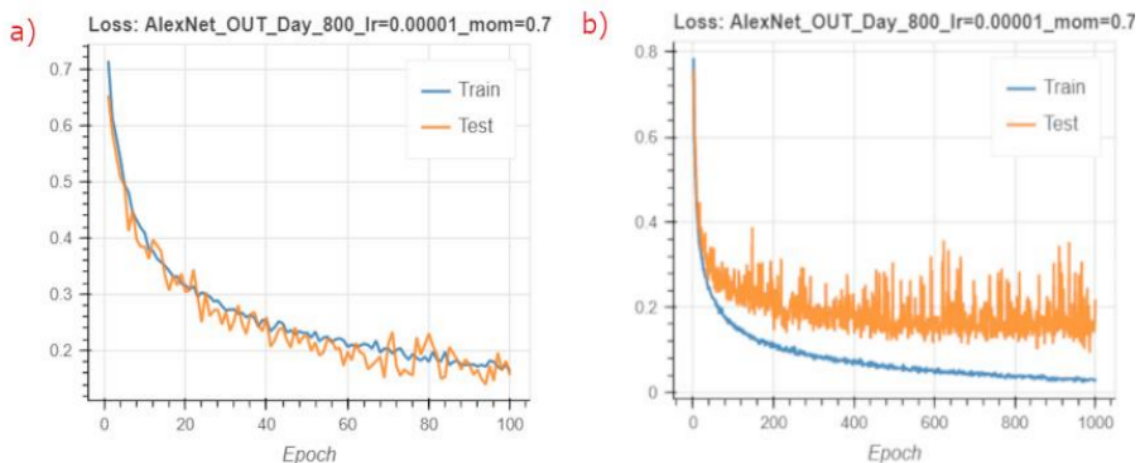
Rys 2.12 Przykładowe wyniki krzywych uczenia się trenowania i walidacji architektury AlexNet w zależności od wielkości partii



Rys. 2.13 Wyniki krzywych uczenia się trenowania i walidacji architekturze ResNet 18 po zastosowaniu od lewej a) 100 iteracji b) 1000 iteracji

W architekturze AlexNet (rys. 2.14) zanotowano pogorszenie uzyskanego wyniku, co sugeruje wystąpienie tzw. overfittingu. Overfitting to zjawisko, w którym

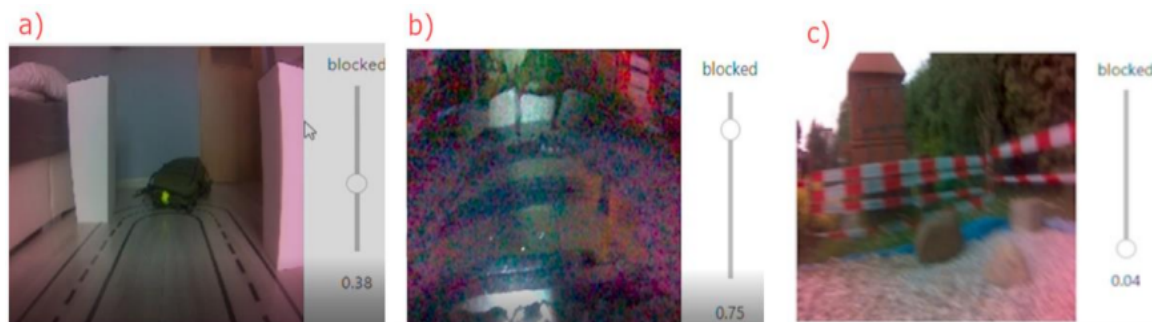
model zbyt dokładnie dopasowuje się do uczącego zestawu danych co prowadzi do trudności w uogólnieniu na nowe dane i wzrostu błędu uogólnienia. W przypadku tych wyników nauki zauważono, że modele zbyt mocno dostosowały się do danych treningowych. Analiza wyników wskazuje, że przy trenowaniu modeli głębokiego uczenia nawet przy tych samych hiperparametrach można uzyskać różne rezultaty. Problem ten jest związany z każdorazową inicjalizacją wag oraz tasowaniem danych treningowych [25]. Z tego powodu archiwizowano wszystkie wyuczane modele ponieważ nawet najlepiej dobrany zestaw parametrów nie gwarantuje uzyskania ponownie równie dobrze wytrenowanego modelu.



Rys. 2.14 Wyniki krzywych uczenia się trenowania i walidacji architekturze AlexNet po zastosowania od lewej a) 100 iteracji b) 1000 iteracji

2.10. Podsumowanie

Celem przeprowadzonych badań było stworzenie platformy robotycznej o określonych właściwościach terenowych, a także implementacja systemu sterowania opartego na głębokich sieciach neuronowych. Ten system umożliwia klasyfikację zajętości drogi oraz prowadzenie robota po określonej trajektorii korzystając z informacji dostarczanych przez kamerę. Ostateczny efekt działania systemu widoczny zarówno w warunkach nocnych jak i dziennych na torze testowym w środowisku wewnętrznym i zewnętrznym został przedstawiony na rys. 2.15 wraz z wartościami klasyfikacji zajętości drogi.



Rys 2.15 Widok z pracy robota w określonych warunkach od lewej – a) wewnętrznych dziennych; b) zewnętrznych nocnych; c) zewnętrznych dziennych

Wyniki pracy zostały udostępnione publicznie na stronie Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn [27] stanowiąc inspirację dla kolejnych studentów i badaczy do rozwijania tematyki projektu. Dodatkowo, przygotowano krótki film prezentujący osiągnięcia projektu, dostępny pod adresem [27][28].

BIBLIOGRAFIA

1. J.Anderson, N.Kalra, P.Sorensen „Autonomous Vehicle Technology”, Rand Comrporation
2. Article „Hisotry of Autonomous Cars” <https://www.tomorrowstoday.com/2021/08/09/history-of-autonomous-cars>
3. Oficjalna strona Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych w Obszarze Obronności – DARPA <https://www.darpa.mil/>
4. M.Buehler, K.Lagnemma, S.Singh The 2005 DARPA Grand Challenge: The Great Robot, Springer 2007
5. Navlab: The Carnegie Mellon University Navigation Laboratory
6. J.Ocón, E.Rivero, A.Sanchez „Multi-agent Frameworks for Space Applications”.
7. C.Clifford There Will Be 20 Million Self-Driving Cars On the Road by 2025
8. P.Polnik Koncepcja systemu sterowania robotem eksploracyjnym. Praca przejściowa. 2022.
9. P.Polnik System sterowania robotem eksploracyjnym bazujący na głębokich sieciach neuronowych . Praca dyplomowa magisterska. 2022.
10. Caban: Projekt zawieszenia typu rocker-bogie <https://www.thingiverse.com/thing:3576552>
11. Dokumentacja techniczna firmy KORAD Power Supply Specification Sheet KORAD Single Chanel 90W-150W
12. Dokumentacja techniczna firmy NVIDIA DATA SHEET NVIDIA Jetson Nano System-on-Module Maxwell GPU + ARM Cortex-A57 + 4GB LPDDR4 + 16GB eMMC
13. Strona internetowa produktu FLUKE 87V <https://www.fluke.com/plpl/produkt/testowanie-instalacji-elektrycznych/multimetry-cyfrowe/fluke-87v>
14. Oficjalna strona zawodów European Rover Challenge (ERC) - <https://roverchallenge.eu/zawody-robotyczne-erc/>
15. Strona internetowa oprogramowania Jupyter. <https://jupyter.org/>
16. Dokumentacja projektu JetBot AI <https://github.com/NVIDIA-AI-IOT/jetbot/>
17. M. Szuster Z. Hendzel. Sieci neuronowe i systemy rozmyte, Rzeszów 2010
18. Fully Connected Layers in Convolutional Neural Networks: The Complete Guide.
19. A. Horzyk Sztuczna inteligencja. Uczenie głębokie i głębokie sieci neuronowe
20. Ying S. Xiyang, H. Wang. Autonomous mobile robot navigation using machine learning., 2012.
21. Karta techniczna produktu FormLabs Flexible <https://cadxpert.pl/wpcontent/uploads/2020/07/2001419-SDS-PL-0.pdf>
22. A.Kwasigroch, M.Grochowski. Rozpoznawanie obiektów przez głębokie sieci neuronowe
23. K.He, X.Zhang, S.Ren, J.Sun Deep Residual Learning for Image Recognition – 2015

24. Y. LeCun, Y.; Boser, B.; Denker, J. S.; Henderson, D.; Howard, R. E.; Hubbard, W.; Jackel, L. D. (December 1989). "Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition". *Neural Computation*
25. Article „ALEX Net: ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Network”
<https://www.google.com/search?q=ALEX+Net%3A+ImageNet+Classification+with+Deep+Convolutional+Neural+Network&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
26. Polnik, Paweł, Januszka, Marcin i Kosior, Mateusz, 2022. Dydaktyczny robot eksploracyjny z systemem autonomicznego omijania przeszkód. In: Fedeliński, Piotr, Dziańkiewicz, Grzegorz i Ptaszny, Jacek (red.), *Metody komputerowe - 2022. Studencka konferencja naukowa, Gliwice, czerwiec 2022*, p. 125–128.
27. Strona Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn z publikacją wyników pracy; dostępne pod adresem: https://www.polsl.pl/rmt6/ps_aktualnosci/platforma-robota-eksploracyjnego-orzel-7-z-systemem-sterowania/
28. Film promocyjny z platformą Orzeł-7 na kanale YouTube Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej; dostępne pod adresem: <https://youtu.be/INIGiWXTJw4>
29. Oficjalna strona kursu F1TENTH CourseKit <https://f1tenthcoursekit.readthedocs.io/en/latest/>
30. Oficjalna strona projektu AutoRally <https://autorally.github.io/>
31. Dokumentacja platformy Duckiebot MOOC Founder’s <https://docs.rsonline.com/c57a/A700000007343652.pdf>
32. Oficjalna strona internetowa Clearpath Jackal <https://clearpathrobotics.com/jackal-small-unmanned-ground-vehicle/>

Rozdział 3

ALGORYTM POZYCJONOWANIA UKŁADU STEROWANIA STELAŻA PANELI FOTOWOLTAICZNYCH

Matuszyński Rafał¹, Fidali Marek²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, rafamat567@student.polsl.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, marek.fidali@polsl.pl

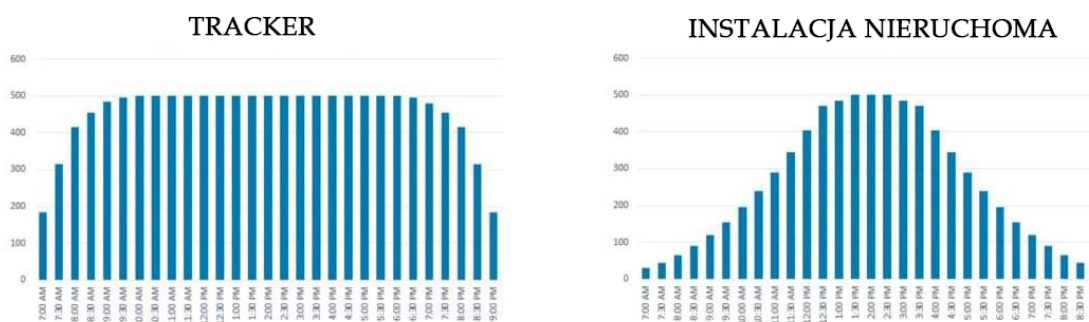
3.1. Wstęp

Współcześnie stosowane panele fotowoltaiczne w zależności od konstrukcji i rodzaju stosowanych ogniw zapewniają sprawność na poziomie od 16-22%. O tym czy stosunkowo niewielka sprawność przełoży się na maksymalną wydajność zależy od miejsca i sposobu usytuowania paneli względem słońca, pory roku, pogody oraz jeszcze kilka innych mniej istotnych czynników. Większość przydomowych systemów fotowoltaicznych instalowanych w Polsce bazuje na stałej lokalizacji paneli zwykle na dachach budynków lub stelażach umiejscowionych przy budynku. Przy tym sposobie postępowania wydajność paneli zmienia się w ciągu dnia, co jest związane z ruchem ziemi względem słońca. Na rys. 3.1. zaprezentowano zależność zmian efektywności paneli PV od kąta padania promieni świetlnych na jego powierzchnię.

		Kierunek zachodni				Kierunek południowy					Kierunek wschodni			
		90 °	75 °	60 °	45 °	30 °	15 °	0 °	- 15 °	- 30 °	- 45 °	- 60 °	- 75 °	- 90 °
Pionowo	90 °	56%	60%	64%	67%	69%	71%	71%	71%	71%	69%	65%	62%	58%
	80 °	63%	68%	72%	75%	77%	79%	80%	80%	79%	77%	74%	69%	65%
	70 °	69%	74%	78%	82%	85%	86%	87%	87%	86%	84%	80%	76%	70%
	60 °	74%	79%	84%	87%	90%	91%	93%	93%	92%	89%	86%	81%	76%
	50 °	78%	84%	88%	92%	95%	96%	97%	97%	96%	93%	89%	85%	80%
	40 °	82%	86%	90%	95%	97%	99%	100%	99%	98%	96%	92%	88%	84%
Pozwomo	30 °	86%	89%	93%	96%	98%	99%	100%	100%	98%	96%	94%	90%	86%
	20 °	87%	90%	93%	96%	97%	98%	98%	98%	97%	96%	94%	91%	88%
	10 °	89%	91%	92%	94%	95%	95%	96%	95%	95%	94%	93%	91%	90%
	0 °	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%

Rys 3.1 Efektywność instalacji solarnej w zależności od kąta padania promieni świetlnych [1]

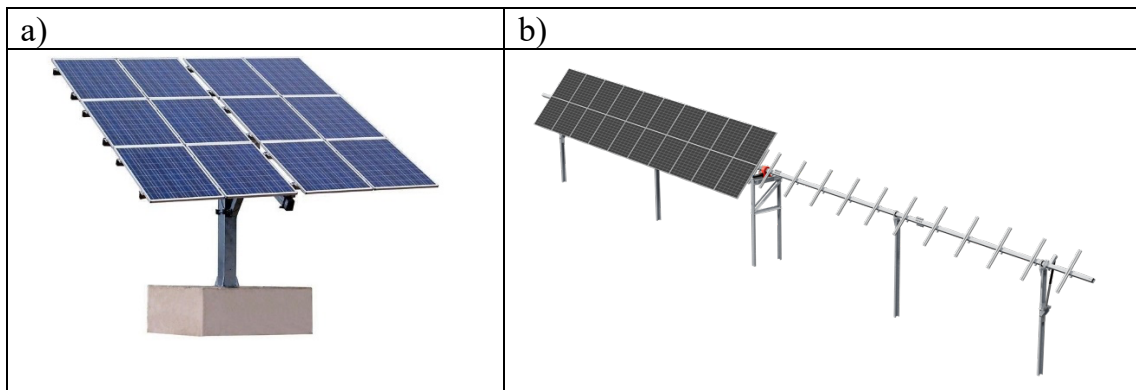
W inwerterach solarnych współczesnych systemów fotowoltaicznych moduły śledzenia mocy maksymalnej osiągają najwyższą skuteczność, rzędu 99,5% tylko w przypadku równomiernego ich oświetlenia światłem słonecznym pod odpowiednim kątem. Optymalnym kątem nachylenia paneli w kierunku pionowym jest przedział z zakresu od 15° do -15° w stosunku do kierunku promieni świetlnych. Natomiast w osi poziomej, w celu uzyskania maksymalnych uzysków z instalacji PV, panele powinny być ustawione w pozycji 30° do 40° w stosunku do powierzchni, na której został postawiony stelaż. Można zaobserwować, że w skrajnych, najbardziej niekorzystnych konfiguracjach nachylenia paneli fotowoltaicznych, efektywność instalacji może spaść nawet o blisko 50%. Naturalne wydaje się więc, dążenie do optymalizacji nachylenia paneli w stosunku do promieni słonecznych. W nieruchomych instalacjach mimo odpowiedniego nachylenia paneli maksimum energii można uzyskać tylko przez 2 do 3 godzin dziennie, w zależności od warunków atmosferycznych. Alternatywnym rozwiązaniem dla instalacji nieruchomych jest stosowanie stelaży ruchomych z nadążnymi układami śledzenia, tzw. „trackerów” solarnych. Jak można zaobserwować na rys. 3.2. zastosowanie układów śledzących, wydłuża czas optymalnego nasłonecznienia paneli w ciągu dnia nawet do kilkunastu godzin, co z kolei przekłada się na wzrost efektywności i mocy instalacji fotowoltaicznej nawet do 50%, powodując znaczący wzrost produkcji energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną.



Rys 3.2. Porównanie efektywności stacjonarnego systemu fotowoltaicznego oraz z układem śledzącym [2]

3.2. Nadążne systemy sterowania w fotowoltaice

Systemami nadążnymi w systemach fotowoltaicznych nazywa się konstrukcje (stelaże) do montażu paneli fotowoltaicznych pozwalające na automatyczną zmianę ustawienia zamontowanych paneli w celu maksymalizacji energii pozyskiwanej ze słońca. Na rynku istnieją różne rozwiązania w zakresie tego typu rozwiązań. Przykładowe z nich zaprezentowano na rys. 3.3.



Rys 3.3. Przykłady komercyjnie dostępnych trackerów solarnych a) ETATRACK active 1500-A. LORENTZ [3], b) Energy5 TR/V1/K [4]

W układach sterowania trackerów mogą być stosowane różne algorytmy sterowania [5]. Z reguły bazują one na wyznaczaniu chwilowego maksymalnego punktu mocy paneli (MPPt - Maximum Power Point tracking), zegarze słonecznym i astronomicznym oraz algorytmie różnicowym. Często stosuje się również kombinacje wymienionych sposobów sterowania.

Algorytm różnicowy

Algorytm bazuje na wyznaczaniu różnicy pomiędzy wskazaniami z czujników oświetlenia wchodzącymi w skład systemu fotowoltaicznego. Sygnał z czujników oświetlenia odczytywany jest przez sterownik systemu, w którym wyznaczone są różnice w oświetleniu między czujnikami. Na ich podstawie wyznaczone są przemieszczenia kątowe dla napędów układu śledzącego w celu ustawienia konstrukcji w optymalnym położeniu. Zaletami sterowania za pomocą algorytmu różnicowego są oszczędność energii i brak wymaganej wysokiej precyzji w ustawieniu kierunkowym konstrukcji, jednak czujniki są podatne na zakłócenia i zabrudzenia [5].

Algorytm wykorzystujący zegar słoneczny

Sterowanie panelami słonecznymi może być realizowane na podstawie wskazań zegara słonecznego podłączonego do sterownika. Działanie tego typu układu polega na tym, że dla danej chwili, co ustalony interwał czasowy, następuje pobieranie godziny i odczytywanie przyporządkowanej jej pozycji słońca na niebie. Na podstawie tych danych następuje aktywacja silników napędzających poszczególne osie i ustawienie konstrukcji w optymalnym położeniu. Takie rozwiązanie cechuje wysoka odporność na zewnętrzne zakłócenia środowiskowe i dużą powtarzalność sterowania. Z drugiej jednak strony wymagana jest duża precyzja ustawienia konstrukcji, co zwiększa koszty budowy całego układu, a sam układ nie reaguje na zmienne warunki pogodowe otoczenia, w tym występowanie chmur na niebie czy zabrudzenie powierzchni paneli fotowoltaicznych [5].

Algorytm maksymalnego punktu mocy (MPP)

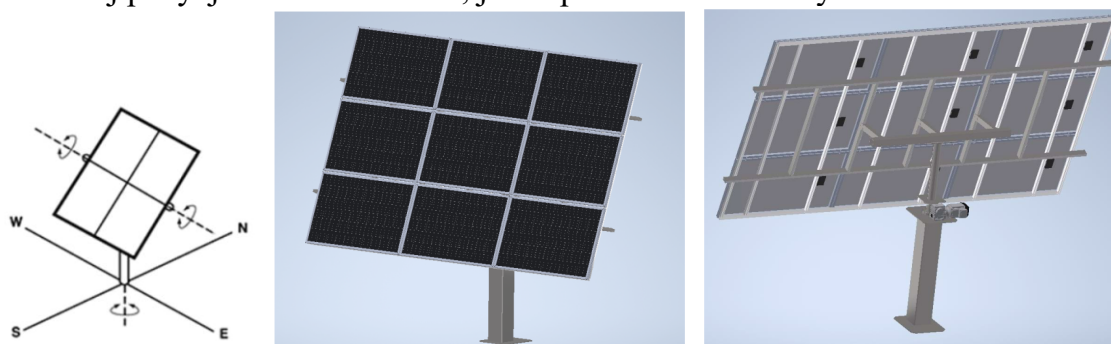
Działanie algorytmu MPP polega na wyznaczaniu i śledzeniu maksymalnego punktu mocy instalacji fotowoltaicznej. Jednostka sterująca układem nadążnym, co zadany czas zmienia położenie kątowe poszczególnych napędów osi

obrotowych o mały kąt. Następnie następuje porównanie wartości mocy zmierzonej przed i po zmianie położenia o dany kąt. Jeśli moc generowana dla drugiego położenia jest większa od poprzedniej, to jest ona zapamiętywana, a następnie realizowany jest ruch w tym samym kierunku (krok dodatni). Jeśli jednak wartość końcowa jest mniejsza, to realizowany jest ruch w przeciwnym kierunku (krok dodatni) i zapamiętywanie wartości. Elementem pomiarowym układu jest cała instalacja fotowoltaiczna, co skutkuje możliwością obrotu tylko w jednej osi – poziomej. W tym sposobie sterowania wymagana jest wysoka precyzja pozycjonowania paneli. Instalacja pobiera stosunkowo dużo energii elektrycznej, ze względu na ciągłe oscylacje wokół punktu mocy maksymalnej instalacji. Z drugiej strony, układ jednoosiowy jest tańszy w budowie od rozwiązań dwuosiowych, a brak czujników nasłonecznienia i położenia dodatkowo obniża cenę konstrukcji. Wykorzystywana do maksimum jest energia w okresach o małym nasłonecznieniu, a automatyczny stelaż nie reaguje niekorzystnie na zmienne warunki atmosferyczne w jego otoczeniu [5].

3.3. Opis konstrukcji zaprojektowanego stelaża oraz jego układu sterowania

W ramach prac przejściowej [6] i dyplomowej magisterskiej [7] realizowanej w Katerze Podstaw Konstrukcji Maszyn opracowano konstrukcję ruchomego stelaża wraz z układem sterowania a także zaproponowano algorytm sterowania nadeżnego.

Zaprojektowany stelaż automatyczny posiada dwie osie obrotowe, pionową do realizacji ruchu kąтового w kierunku wschód-zachód (E-W), oraz poziomą odpowiadającą za nachylenie powierzchni paneli w kierunku optymalnym do aktualnej pozycji słońca na niebie, jak zaprezentowano na rysunku 3.4.



Rys 3.4. Istota działania zaprojektowanego stelaża i modele bryłowe CAD przedstawiające zaprojektowany układ dwuosiowego pozycjonowania stelaża paneli fotowoltaicznych

Po przeprowadzeniu analizy literaturowej i optymalizacji wielokryterialnej wybrano koncepcję układu napędu i jego przeniesienia. Stwierdzono, że optymalnym rozwiązaniem konstrukcyjnym w świetle przyjętych kryteriów będzie zastosowanie dwóch napędów. Do napędzania osi pionowej dobrano

motoreduktor RGM T63B4TF z samohamowną przekładnią ślimakową o przełożeniu 70:1. Silnik motoreduktora o mocy 0,18 kW i prędkości obrotowej 1350 obr/min zasilany jest przez inwerter częstotliwości Omron JX-AB002-EF, co pozwoli na płynne sterowanie prędkością obrotową stelaża w osi pionowej. Do realizacji obrotu osi poziomej stelaża wybrano rozwiązanie bazujące na elektrycznym siłowniku liniowym Linak LA36.

Zdecydowano, że układ sterowania zrealizowany zostanie w oparciu o dostępny w KPKM programowalny sterownik logiczny PLC Turck TBEN-L5-PLC-11.

Uproszczony schemat układu sterowania napędami osi pionowej i poziomej stelaża zaprezentowano na rysunku 3.5.



Rys 3.5. Elementy układu pozycjonowania nadążnego stelaża paneli fotowoltaicznych

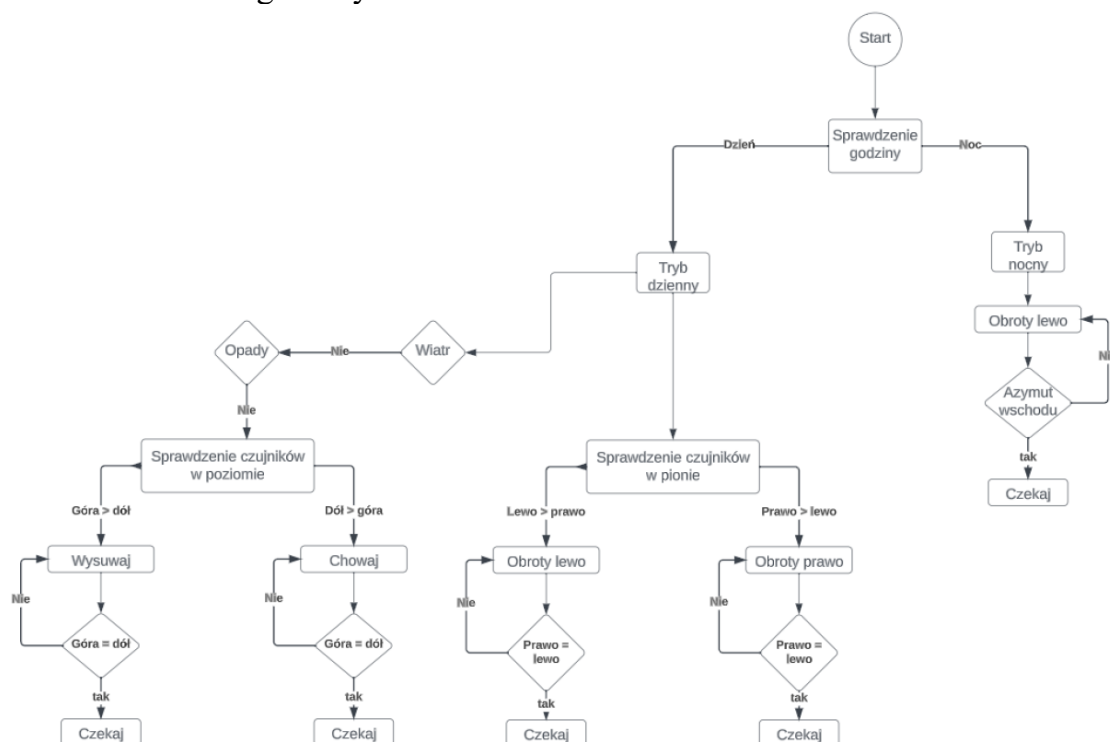
3.4. Algorytm sterowania

Po analizie algorytmów sterowania stosowanych w fotowoltaicznych układach śledzących zdecydowano się na opracowanie algorytmu hybrydowego łączącego zalety algorytmu różnicowego i algorytmu wykorzystującego zegar astronomiczny, przy jednoczesnym uwzględnieniu aspektów bezpieczeństwa użytkownika konstrukcji.

Zaproponowane rozwiązanie zakłada, że w ciągu słonecznego dnia, przy stabilnych warunkach atmosferycznych (brak mocnego wiatru) sterowanie napędami stelaża paneli fotowoltaicznych odbywać się będzie zgodnie z założeniami algorytmu różnicowego. W warunkach braku słońca przy dużym zachmurzeniu oraz w nocy, kiedy konieczny będzie powrót stelaża do pozycji, gdzie panele fotowoltaiczne skierowane są na wschód kontrolę nad napędami przejmie algorytm bazujący na zegarze astronomicznym. Dodatkowo zaproponowano dwa algorytmy bezpieczeństwa zapewniające ustawienie stelaża w pozycjach bezpiecznych w przypadku wystąpienia trudnych warunków atmosferycznych.

Pierwszy algorytm ma za zadanie sterowanie napędami, aby zapewnić ustawienie płaszczyzny paneli w pozycji pionowej w sytuacji, gdy wystąpią intensywne opady śniegu. Pozwoli to uniknąć przeciążenia konstrukcji zalegającym śniegiem oraz zapobiegnie przysłanianiu paneli przez śnieg. Drugi algorytm ma za zadanie takie sterowanie napędami, aby zapobiec przeciążeniu konstrukcji stelaża w trakcie bardzo silnego wiatru i zapewnić ustawienie powierzchni paneli tak, aby siły wynikające z naporu wiatru były jak najmniejsze. Przyjęto, że pozycją bezpieczną płaszczyzny paneli w takim przypadku będzie pozycja pozioma. Opracowany algorytm sterowania zakłada, że układ sterowania będzie wykorzystywał sygnały z dodatkowych czujników nasłonecznienia, czujnika kierunku i prędkości wiatru, czujnika opadów śniegu.

Opracowany hybrydowy algorytm sterowania zaprezentowano w postaci schematu blokowego na rys. 3.6.



Rys 3.6. Schemat algorytmu sterowania napędami automatycznego stelaża fotowoltaicznego

Sposób działania układu sterowania wg algorytmu zakłada ciągle porównywanie wartości sygnałów z czujników nasłonecznienia. Następnie obliczana jest różnica w ich wskazaniach i podejmowana decyzja o uruchomieniu napędów. Jeśli wskazania są identyczne, układ pozostaje w niezmienionej pozycji. Jeśli wskazania czujników są odmienne, wysyłany jest sygnał do inwertera napędu osi pionowej w celu wykonania ruchu stelaża w kierunku czujnika, którego wskazania były wyższe. Podobnie działa fragment algorytmu odpowiedzialny za sterowania ruchem w osi poziomej, za pomocą napędu liniowego. Algorytmy bezpieczeństwa, mimo ważnej funkcji, jaką pełnią w systemie sterowania, są oparte na prostych założeniach. W przypadku algorytmu zabezpieczającego stelaż przed mocnym wiatrem analizowana jest siła i prędkość wiatru, a następnie porównywana z założoną, uprzednio zdefiniowaną wartością dopuszczalną prędkości wiatru. Po przekroczeniu wartości granicznej sterownik PLC wysyła do

napędu liniowego osi poziomej sygnał o maksymalnym schowaniu tłoka siłownika do obudowy, przez co stelaż stawiany jest w pozycji jak najbardziej zbliżonej do pozycji poziomej. Na podobnej zasadzie działa algorytm zapobiegający osadzeniu się grubej warstwy śniegu, który po przekroczeniu wartości dopuszczalnej z czujnika opadów zapewnia maksymalne wysunięcie tłoczyska siłownika liniowego. Procedury bezpieczeństwa mają priorytet przed procedurą sterowaniem osią poziomą, co znaczy, że w momencie aktywacji którejś z dwóch procedur bezpieczeństwa nie jest możliwa praca napędu liniowego. Jednocześnie aktywacja pozycji bezpieczeństwa nie wpływa na obrót konstrukcji w osi pionowej. Kolejnym opracowanym elementem algorytmu sterowania jest jego podział na tryb dzienny i tryb nocny. W przypadku trybu dziennego sterowanie odbywa się w oparciu o sygnały z czujników nasłonecznienia. Po aktywacji trybu nocnego, czyli począwszy od zachodu słońca, do jego wschodu dnia następnego, pracuje tylko napęd osi pionowej zapewniając ruch obrotowy stelaża tylko w jednym kierunku – z zachodu na wschód. Z punktu widzenia sterowania w trybie nocnym ze względu na wykorzystanie zegara astronomicznego ważna jest również znajomość azymutów wschodu i zachodu słońca dla danego dnia, obliczane za pomocą operacji matematycznych na podstawie aktualnej daty. Za pomocą azymutów można wyznaczyć kąty skrętu osi pionowej stelaża i pozycje skrajne, między którymi realizowany jest ruch stelaża. Wartości położenia kątowych skrajnych są porównywane z położeniem aktualnym wyznaczonym na podstawie danych z enkodera absolutnego. Dzięki wykorzystaniu enkodera zawsze dostępna będzie informacja o bieżącym ustawieniu stelaża.

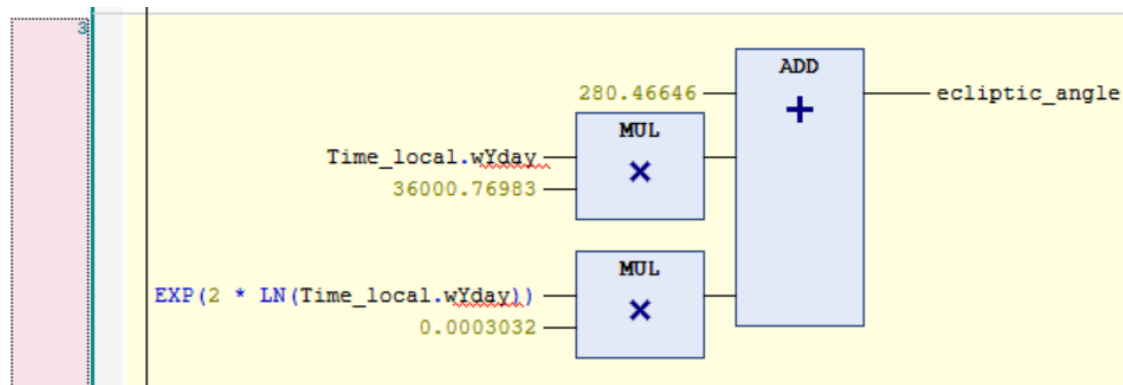
3.5. Implementacja i weryfikacja algorytmu w oprogramowaniu Codesys

Na podstawie zaprezentowanego wcześniej algorytmu sterowania opracowano oprogramowanie dla dobranego sterownika PLC. Oprogramowanie przygotowano w środowisku Codesys i wykorzystano język programowania Ladder Diagram (LD). W celu implementacji bardziej złożonych obliczeniowo procedur sterowania zdecydowano się wykorzystać język programowania Structured Text (ST). Deklaracje zmiennych i funkcji przygotowanych w języku ST i stosowanych w programie sterującym zaprezentowano w tabeli 3.1. Natomiast na rysunku 3.7. zaprezentowano przykład funkcji w języku LD obliczającej kąta ekliptycznego wg wzoru (1). Kąt ten jest z kolei niezbędny do obliczania azymutów wschodu i zachodu słońca.

$$ecliptic_{angle} = 280,46646 + 36000,76983 \cdot Time_{local} \cdot wYday + 0.0003032 \cdot Time_{local} \cdot wYday^2 \quad (1)$$

Tabela 3.1. Zmienne i funkcje zadeklarowane i wykorzystywane w programie sterującym

<pre> PROGRAM PLC_PRG VAR (*1. ODCZYT CZASU SYSTEMOWEGO*) time_ms: SYSTIME; // Czas systemowy w ms (*2. ODCZYT DATY*) time_local: SYSTIMEDATE; // Data systemowa (*3. KĄT EKLIPTYCZNY*) ecliptic_angle: LREAL; // Kąt ekliptyczny (*4. KĄT NACHYLENIA EKLIPTYKI*) pi: LREAL:=3.14159; // Wartość liczby pi ecliptic_obliquity: LREAL; // Kąt nachylenia ekliptyki (*5. DEKLINACJA SŁOŃCA*) declination: LREAL; // Deklinacja słońca (*6. AZYMUT WSCHODU SŁOŃCA*) latitude: REAL :=50.17; // Szerokość geograficzna umiejscowienia stelaża sunrise_azimuth: LREAL; // Azymut wschodu słońca (*7. AZYMUT ZACHODU SŁOŃCA*) sunset_azimuth: LREAL; // Azymut zachodu słońca (*8. WARUNEK AKTYWACJI SYSTEMU*) system_activation: BOOL; // Zmienna aktywacji systemu (*9. ZMIENNA DLA PRZYBYWANIA DNIA*) day_longer: BOOL; // Zmienna przechowująca informację o przybywaniu dnia (*10. ZMIENNA DLA UBYWANIA DNIA*) day_shorter: BOOL; // Zmienna przechowująca informację o ubywaniu dnia (*11. CZAS WSCHODU SŁOŃCA DLA PRZYBYWANIA DNIA*) sunrise_longer: TIME_OF_DAY := TOD#05:45:00; // Czas wschodu słońca dla dnia 20.03 sunrise_time: TIME_OF_DAY; // Czas wschodu słońca (*12. CZAS WSCHODU SŁOŃCA DLA UBYWANIA DNIA*) sunrise_shorter: TIME_OF_DAY := TOD#04:35:00; // Czas wschodu słońca dla dnia 21.06 (*13. CZAS ZACHODU SŁOŃCA DLA WYDŁUŻANIA DNIA*) sunset_longer: TIME_OF_DAY := TOD#17:59:00; // Czas zachodu słońca dla dnia 20.03 sunset_time: TIME_OF_DAY; // Czas zachodu słońca </pre>	<pre> (*14. CZAS ZACHODU SŁOŃCA DLA SKRACANIA DNIA*) sunset_shorter: TIME_OF_DAY := TOD#21:00:00; // Czas zachodu słońca dla dnia 21.06 (*15. CZAS DZIENNY*) // xday_time - zmienna globalna czasu dziennego (*16. CZAS NOCNY*) night_time: BOOL; // Zmienna czasu nocnego (*17. DOPUSZCZALNE KĄTY OBROTU STELAŻA*) frame_current_angle: REAL; // Obecny kąt płaszczyzny stelaża frame_perm_angle: BOOL; // Zmienna dopuszczalnego kąta obrotu stelaża (*18. POZYCJA BEZPIECZEŃSTWA WIETRZNEGO*) wind_curr_vel: REAL; // Obecna prędkość wiatru wind_perm_vel: REAL; // Dopuszczalna prędkość wiatru safe_posi_wind: BOOL; // Pozycja bezpieczeństwa wiatrznego actuator_hide: BOOL; // Chowanie siłownika (*19. POZYCJA BEZPIECZEŃSTWA OPADOWEGO*) drop_curr_vol: REAL; // Obecna objętość opadów drop_perm_vol: REAL; // Dopuszczalna objętość opadów safe_posi_drop: BOOL; // Pozycja bezpieczeństwa opadowego actuator_extend: BOOL; // Wysuwanie siłownika (*20. PRACA SIŁOWNIKA W OSI POZIOMEJ*) upp_light_sens: REAL; // Nasłonecznienie górnego czujnika down_light_sens: REAL; // Nasłonecznienie dolnego czujnika (*21. ZASADA DZIAŁANIA W DZIEŃ*) right_light_sens: REAL; // Nasłonecznienie prawego czujnika left_light_sens: REAL; // Nasłonecznienie lewego czujnika frame_right_rotation: BOOL; // Obroty stelaża w prawo frame_left_rotation: BOOL; // Obroty stelaża w lewo (*22. OBROTOWA W PRAWO*) motor_max_velocity: INT; // Maksymalna prędkość obrotowa motor_velocity: INT; // Prędkość obrotowa dla rodzaju ruchu (*25. MODBUS RTU*) MemoryInstance_ModbusCommunication: ModbusCommunication; // Blok komunikacji ModBus RTU END_VAR </pre>
--	---



Rys 3.7. Funkcje w języku LD obliczające kąt ekliptyczny

W oprogramowaniu uwzględniono również aspekty komunikacji sterownika PLC z inwerterem częstotliwości. Inwerter posiada interfejs RS485, który pozwala na komunikację z użyciem protokołu Modbus RTU. W celu zapewnienia obsługi inwertera, na podstawie dokumentacji technicznej zidentyfikowano rejestry wykorzystywane do sterowania a następnie zdefiniowano zmienne przekazujące wartości do rejestrów oraz procedury odczytu i zapisu danych. Na rysunku 3.8 zaprezentowano wykaz stosowanych zmiennych a w tabeli 3.2. zaprezentowano kod funkcji w języku ST wykorzystywany do obsługi komunikacji z inwerterem.

Variable	Mapping	Channel	Address	Type
		Zadawanie częstotliwości	%IW4	ARRAY [0..0] OF WORD
		Zadawanie częstotliwości	%QW1	ARRAY [0..0] OF WORD
		Zadawanie rozkazu ruchu	%IW5	ARRAY [0..0] OF WORD
		Zadawanie rozkazu ruchu	%QW2	ARRAY [0..0] OF WORD
		Częstotliwosc bazowa	%IW6	ARRAY [0..0] OF WORD
		Częstotliwosc bazowa	%QW3	ARRAY [0..0] OF WORD
		Kierunek obrotow	%IW7	ARRAY [0..0] OF WORD
		Czestotliwosc wyjsciova	%IW8	ARRAY [0..0] OF WORD
		Czestotliwosc wyjsciova	%QW4	ARRAY [0..0] OF WORD
		Rozkaz biegu	%IW9	ARRAY [0..0] OF WORD
		Rozkaz biegu	%QW5	ARRAY [0..0] OF WORD
		Rozkaz biegu FW/REV	%IW10	ARRAY [0..0] OF WORD
		Rozkaz biegu FW/REV	%QW6	ARRAY [0..0] OF WORD
		Wybór funkcji OPE / ModBus	%IW11	ARRAY [0..0] OF WORD
		Wybór funkcji OPE / ModBus	%QW7	ARRAY [0..0] OF WORD

Rys 3.8. Zmienne wykorzystywane do obsługi komunikacji szeregowej z inwerterem wg protokołu Modbus RTU

Tabela 3.2. Funkcja realizująca komunikację z inwerterem

```

%QW1 := 3; //Zadawanie częstotliwości (03 - ModBus)
%QW2 := 3; //Zadanie rozkazu ruchu (03 - ModBus)
%QW7 := 3; //Wybór funkcji ModBus

IF Zmienne_globalne.xNakazRuchLewo THEN
  %QW5 := 1; //Rozkaz biegu - ruch
  %QW6 := 0; //Rozkaz biegu FW/REV - lewo
ELSE
  IF Zmienne_globalne.xday_time THEN
    %QW4 := 5; //10% maksymalnej częstotliwości
  ELSIF Zmienne_globalne.xmotor_night_mode THEN
    %QW4 := 50; //Maksymalna częstotliwość bazowa (50 Hz)
  END_IF;
END_IF;

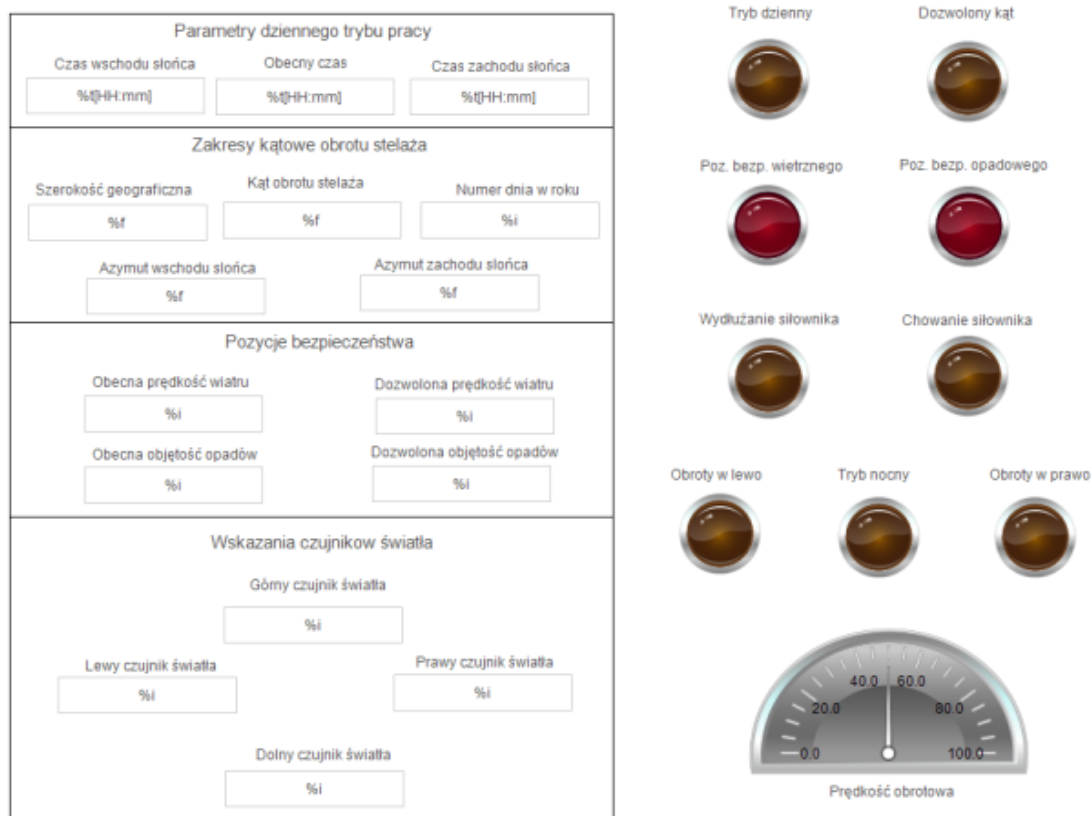
IF Zmienne_globalne.xNakazRuchPrawo THEN
  %QW4 := 5;
  %QW5:=1;
  %QW6 := 1; //Rozkaz biegu FW/REV - prawo
END_IF;

IF NOT Zmienne_globalne.xNakazRuchLewo AND NOT Zmienne_globalne.xNakazRuchPrawo THEN
  %QW5 := 0; //Rozkaz biegu - stop
END_IF

```

W celu weryfikacji poprawności działania oprogramowania opracowano wirtualny panel HMI pozwalający na zadawanie wartości wybranych parametrów i obserwację stanów logicznych na wyjściach poszczególnych funkcji w trakcie działania programu. Widok ekranu panelu zaprezentowano na rys. 3.9. Obszar panelu podzielono na dwie główne części, pierwsza, z lewej, zawiera obszary do wyświetlania lub wprowadzania wartości zmiennych liczbowych, a prawa część składa się z dziewięciu diod mających za zadanie obrazować momenty aktywacji zmiennych typu BOOL. Na panelu umieszczono również wskaźnik pozwalający kontrolować procent obecnej prędkości obrotowej stelaża.

Korzystając z opracowanego panelu HMI przeprowadzono szereg testów działania oprogramowania. Sprawdzone ogólną poprawność działania wszystkich funkcji zwracając uwagę m.in. na poprawność obliczeń czasu wschodu i zachodu słońca oraz poprawność funkcjonowania trybu działania dziennego i nocnego. Zweryfikowano działanie funkcji kontrolującej osiągnięcie dopuszczalnego kąta obrotu oraz przeprowadzono serię testów funkcji realizujących pozycjonowanie stelaża w pozycjach bezpiecznych. O poprawności funkcjonowania poszczególnych funkcji informowały zapalające się wirtualne wskaźniki świetlne umieszczone na panelu. Dzięki możliwości ręcznego wprowadzania wartości z czujników nasłonecznienia możliwa była weryfikacja wartości zadawanych dla napędów pozycjonujących stelaż poprzez obserwację sygnałów świetlnych generowanych przez wskaźniki. Wszystkie testy weryfikacyjne potwierdziły poprawność działania oprogramowania.



Rys 3.9. Wygląd opracowanego wirtualnego panelu HMI do celów weryfikacji poprawności działania programu sterownika PLC sterującego układem śledzenia słońca

3.6. Podsumowanie

Wraz z rozwojem układów fotowoltaicznych pojawiają się różne potrzeby związane z maksymalizacją uzyskiwanej energii elektrycznej ze słońca. Odpowiedzią na tego typu potrzeby są m.in. układy nadążnego sterowania pozwalające pozycjonować stelaże paneli fotowoltaicznych w taki sposób, aby „śledziły” one słońce.

W ramach pracy przejściowej i dyplomowej realizowanych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn opracowano projekt i konstrukcję stelaża oraz algorytm sterowania napędami pozycjonującymi panele w osi pionowej i poziomej. Opracowany algorytm ma charakter hybrydowy, ponieważ uwzględnia on aspekty sterowania w oparciu o różnicowe pomiary nasłonecznienia i w oparciu o zegar astronomiczny. Oryginalnym elementem algorytmu jest zastosowanie procedur bezpieczeństwa zapewniających ustawienie paneli w pozycjach bezpiecznych podczas bardzo silnego wiatru i intensywnych opadach śniegu lub gradu. Opracowany algorytm zaimplementowano w postaci programu sterownika PLC opracowanego w oprogramowaniu Codesys. Działanie algorytmu zweryfikowano symulacyjnie posługując się opracowanym panelem HMI. Na podstawie serii testów można stwierdzić, że wszystkie opracowane funkcje działają prawidłowo i program realizujący opracowany algorytm jest gotowy do aplikacji w sterowniku PLC.

Podjęte działania nie objęły wszystkich aspektów związanych ze sterowaniem i działaniem układu automatycznego śledzenia słońca, jednak są solidną podstawą do dalszych prac rozwojowych na zagadnieniach sterowania nadążnego dla potrzeb systemów fotowoltaicznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Biernaciak E. Fotowoltaika na trackerach, czyli system podążania za słońcem. <https://enerad.pl/aktualnosci/fotowoltaika-na-trackerach/> [Data uzyskania dostępu: 16.02.2024];
2. Opis trackera solarnego Tracker Solarny 15 x 370W = 5,55 kW [A15]. https://trackery-solarne.pl/stojak-fotowoltaiczny-6kw#user_opis, [Data uzyskania dostępu: 16.02.2024];
3. Tracker solarny LORENTZ ETATRACK active 1500-A – karta katalogowa. <https://www.technosun.com/descargas/LORENTZ-ETATRACK-ACTIVE-1500-A-ficha-EN.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 05.02.2023];
4. Strona internetowa firmy Energy5 - Tracker fotowoltaiczny tr/v1/r lub tr/v1/k. <https://energy5.pl/systemy-wolnostojace/tracker-fotowoltaiczny/>, [Data uzyskania dostępu: 05.02.2023];
5. Szymański B. Instalacje Fotowoltaiczne, Wydawnictwo Globenergia, 2023;
6. Matuszyński R. Projekt i konstrukcja stelaża paneli fotowoltaicznych z układem pozycjonowania. Praca przejściowa. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn. Politechnika Śląska. Gliwice 2023.
7. Matuszyński R. Projekt i realizacja układu sterowania układu pozycjonowania stelaża paneli fotowoltaicznych. Praca dyplomowa magisterska. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn. Politechnika Śląska. Gliwice 2023.

Rozdział 4

PORÓWNANIE I OCENA WYBRANYCH METOD UCZENIA MASZYNOWEGO POD KĄTEM ICH ZASTOSOWANIA W KLASYFIKACJI STANU ŁOŻYSK TOCZNYCH

Rokita Aleksander¹, Fidali Marek²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, a.rokita@roch.pl

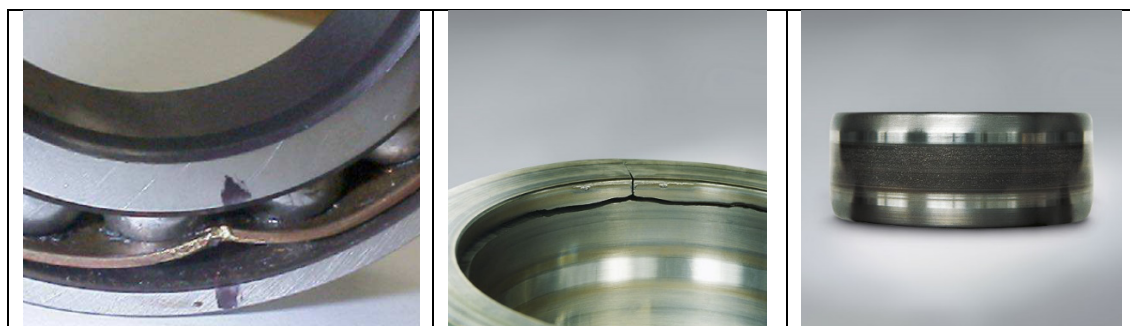
²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, marek.fidali@polsl.pl

4.1. Wstęp

Diagnostyka łożysk tocznych odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu niezawodności maszyn i urządzeń. Do standardowych metod stosowanych w diagnozowaniu łożysk tocznych należą m.in. pomiary i analiza drgań czy też pomiary temperatury m.in. z zastosowaniem kamer termowizyjnych [1]. Ze względu na wiele różnych czynników eksploatacyjnych takich jak m.in. różne parametry pracy oraz modele łożysk, możliwość uszkodzenia wielu elementów jednocześnie oraz charakter samych uszkodzeń, wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych nie jest zadaniem prostym. Przemysłowe procedury diagnostyczne głównie opierają się na doraźnych lub cyklicznych inspekcjach za pomocą ręcznych układów pomiarowych. Podejście tego typu wymaga wysokich kwalifikacji od diagnostów i nie zawsze pozwala skutecznie wykryć i zidentyfikować uszkodzenia łożysk przez to, że inspekcje mogą być prowadzone za rzadko. Wraz z pojawieniem się nowoczesnych i stosunkowo tanich czujników drgań z interfejsami cyfrowymi w przemyśle [2], pojawiła się tendencja do instalacji systemów ciągłego monitorowania stanu maszyn w tym stanu łożysk tocznych. Stosowanie układów ciągłego monitorowania wiąże się z wieloma korzyściami takimi jak możliwość wczesnego wykrywania uszkodzeń czy predykcji zmian stanu, co może przełożyć się na skrócenie przestojów i podniesienie kluczowych wskaźników eksploatacyjnych (KPI). Jednak przed użytkownikami układów ciągłego monitorowania stoi wiele wyzwań, wśród których jest m.in. konieczność śledzenia i interpretacji dużej ilości danych czy poszukiwanie relacji między różnymi parametrami diagnostycznymi. Nie jest to zadanie łatwe jednak może zostać zautomatyzowane dzięki stosowaniu metod sztucznej inteligencji.

4.2. Uszkodzenia łożysk tocznych

Jak każdy układ mechaniczny, łożyska toczne podatne są na procesy zużycia, co skutkuje powstawaniem różnego rodzaju defektów, które niewykryte na czas mogą poważnie odbić się na stanie technicznym całego obiektu technicznego doprowadzając do poważnej awarii przemysłowej. Do najczęstszych uszkodzeń łożysk tocznych zaliczamy: uszkodzenia zmęczeniowe elementów łożyska, pęknięcia bieżni pierścienia i elementów tocznych, odkształcenia przeciążeniowe koszyka, zużycie cierne wynikające z błędów w smarowaniu, przegrzanie łożyska i wiele innych [3]. Przykładowe uszkodzenia łożysk zaprezentowano na rysunku 4.1. Wystąpienie uszkodzenia w łożysku skutkuje powstawaniem drgań, które są proporcjonalne do rozmiaru łożyska, rodzaju i skali niesprawności i prędkości obrotowej wału, na którym osadzono łożysko. Niektóre z uszkodzeń mogą mieć charakter nagły lub postępujący



Rys 4.1 Przykłady uszkodzeń łożysk elementów łożysk tocznych

4.3. Zastosowanie metod sztucznej inteligencji w diagnostyce łożysk tocznych

W ostatnich latach zastosowanie sztucznej inteligencji (ang. Artificial Intelligence - AI) w sektorach przemysłowych uległo głębokiej transformacji, rewolucjonizując konwencjonalne metody diagnostyki i utrzymania ruchu. Wśród licznych dziedzin czerpiących korzyści ze sztucznej inteligencji jest m.in. diagnostyka łożysk tocznych. Dla przykładu, w przemyśle lotniczym systemy diagnostyczne oparte na sztucznej inteligencji wykorzystują dane z czujników do przewidywania uszkodzeń łożysk, co pozwala na terminową konserwację i oszczędności. Podobnie w energetyce wiatrowej algorytmy sztucznej inteligencji przetwarzają dane z łożysk turbin w celu prognozowania potencjalnych problemów, zapewniając nieprzerwane wytwarzanie energii. Integracja metod sztucznej inteligencji w systemach diagnozujących zapoczątkowała nową erę predykcyjnego utrzymania ruchu, zwiększając wydajność, niezawodność i opłacalność eksploatacji wielu maszyn.

Spośród stosowanych metod sztucznej inteligencji szerokie zastosowanie znajdują sztuczne sieci neuronowe (ang. Artificial Neural Networks - ANN) a w szczególności splotowe sztuczne sieci neuronowe (ang. Convolutional Neural Networks - CNN) i rekurencyjne sztuczne sieci neuronowe (ang. Recurrent Neural Networks - RNN). Istnieje wiele przykładów zastosowania sztucznych sieci neuronowych. W jednej z publikacji [4], autorzy zastosowali sieć głębokich przekonań (ang. Deep Belief Network), głęboką maszynę Boltzmanna (ang. Deep Boltzmann Machine) i autoenkodery (ang. Stacked Auto-encoders) w celu zbudowania algorytmu do porównania ich zdolności do identyfikacji i klasyfikacji takich uszkodzeń łożysk tocznych jak uszkodzenie pierścienia zewnętrznego, wewnętrznego i elementów tocznych. Najlepsze wyniki klasyfikacji, bo wynoszące 99,62% uzyskano z zastosowaniem autoenkoderów wytrenowanych za pomocą wektora cech spektrogramów i wektora cech statystycznych przebiegów czasowych oraz widm sygnałów drgań. Z kolei w pracy [5] do klasyfikacji stanu łożysk tocznych wykorzystano wielowarstwowe różnicowe rozmyte konwolucyjne sieci neuronowe (Differential Fuzzy Convolutional Neural Network, DFCNN) do uczenia których również zastosowano spektrogramy sygnałów drgań łożysk tocznych pozyskane w wyniku eksperymentu oraz z obiektów rzeczywistych. Opracowany klasyfikator osiągnął wskaźnik dokładności na poziomie aż 99,22 %.

W artykule [6] autorzy wykorzystali zdolność konwolucyjnych sieci neuronowych (ang. Convolutional neural network - CNN) do przetwarzania cech oraz połączyli ją z maszyną wektorów wspierających (ang. Support vector machine - SVM) do uogólniania w celu stworzenia hybrydowego algorytmu CNN-SVM. Klasyfikator wykorzystywał jako dane wejściowe przebiegi czasowe sygnałów drgań łożysk. Sieci głębokie CNN służyły jako ekstraktor cech, które służyły do realizacji zadania klasyfikacji z zastosowaniem metody wektorów wspierających SVN. Połączenie tych dwóch metod sztucznej inteligencji pozwoliło osiągnąć dokładność klasyfikacji na poziomie 99,44% dla zbioru testowego.

Zaprezentowane przykłady wykorzystania metod sztucznej potwierdzają ogromny potencjał sztucznych sieci neuronowych głębokiego uczenia w automatyzacji diagnozowania stanu łożysk tocznych. Istnieje jednak kilka problemów, które mogą stanowić organicznie w ich zastosowaniu w warunkach przemysłowych. Jednym z nich jest konieczność posiadania dużej ilości danych uczących. Inny problem wynika z ograniczonej liczby cech sygnałów, które są dostępne do uczenia sieci i budowy modelu. Czujniki z interfejsami cyfrowymi tzw. Smart Sensors, przetwarzanie i analizę sygnałów realizują samoczynnie dzięki wbudowanemu przetwornikowi analogowo cyfrowemu i mikroprocesorowi. Wynikiem tej analizy jest organiczna liczba podstawowych cech punktowych sygnału drgań takie jak m.in. wartość skuteczna RMS, wartość szczytowa Peak, Kurtoza czy Skośność.

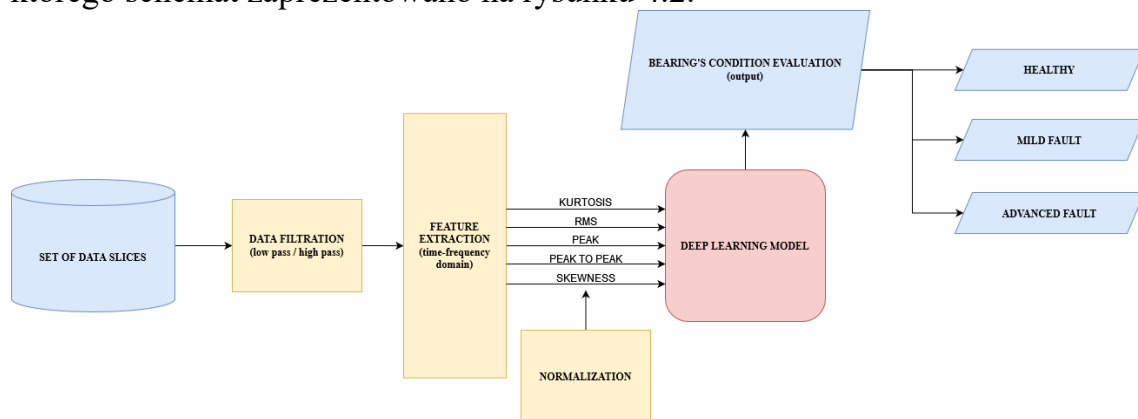
W ramach realizacji pracy dyplomowej magisterskiej w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn [7] zdecydowano się na opracowanie metody klasyfikacji wykorzystującej proste cechy sygnałów udostępniane przez współczesne czujniki z wyjściami cyfrowymi jako dane wejściowe dla niezbyt złożonych sieci

neuronowych w celu oceny ich potencjału w klasyfikacji uszkodzeń łożysk tocznych. W wyniku przeglądu literatury zdecydowano, że stosowanymi metodami sztucznej inteligencji będą:

- Długoterminowa pamięć krótkoterminowa – LSTM (ang. Long Short-Term Memory),
- Jednokierunkowa sieć neuronowa – FNN (ang. feedforward neural network - FNN),
- Prosta rekurencyjna sieć neuronowa – SRNN.

4.4. Opracowana metoda klasyfikacji stanu łożysk tocznych

Biorąc pod uwagę wcześniej przyjęte założenia, co do stosowanych metod klasyfikacji i cech sygnałów opracowano ogólny algorytm postępowania [7], którego schemat zaprezentowano na rysunku 4.2.



Rys 4.2 Zaproponowany algorytmu klasyfikacji stanu technicznego łożysk tocznych [7]

Algorytmu został podzielony na trzy etapy. W pierwszym etapie konieczne jest pozyskanie, wstępne przetworzenie i pogrupowanie danych reprezentowanych przez przebiegi czasowe sygnałów przyspieszeń drgań. W drugim etapie konieczne jest przetwarzanie sygnałów i wyznaczanie cech punktowych. Trzeci etap związany jest z realizacją procesu uczenia i testowania każdego z wybranych klasyfikatorów.

4.5. Pozyskiwanie i przetwarzanie danych

Dla potrzeb badań zdecydowano się na pozyskiwanie danych z ogólnodostępnych repozytoriów i materiałów badawczych dostępnych w Internecie. Przy wyborze repozytoriów zwracano uwagę na szczegółowość opisu eksperymentów, podczas których pozyskiwano sygnały drgań, dane o stanie łożysk, opis przyjętych

procedur badawczych. Po pracochłonnych poszukiwaniach i analizach wytypowano następujące repozytoria sygnałów drgań łożysk:

- zestaw danych XJTU-SY [8],
- zbiór danych Uniwersytetu w Ottawie z łożyskami kulkowymi [9],
- dane Uniwersytetu Case Western Reserve (CWRU) [10].

Wytypowane repozytoria sygnałów powstały podczas eksperymentów przeprowadzonych na różnych typach łożysk tocznych z różnymi stanami technicznymi przy różnych obciążeniach i prędkościach obrotowych. Sygnały zapisane w repozytoriach reprezentują sprawne łożyska, a także łożyska z różnymi rodzajami uszkodzeń (defekt bieżni wewnętrznej, zewnętrznej i elementu tocznego oraz uszkodzenia koszyka). Charakterystyczne parametry danych i warunki, w jakich zostały pozyskiwane zaprezentowano w tabeli 4.1.

Tabela 4.1 - Zestawienie repozytoriów wybranych.

Nazwa repozytorium	Model łożyska	Symulowane defekty	Wielkości mierzone	Częstotliwość próbkowania [kHz]	Prędkość/Obciążenie
XJTU-SY	LDK UER204	<ul style="list-style-type: none"> • Prawidłowa praca (sprawne łożysko), • Uszkodzenie bieżni zewnętrznej, • Uszkodzenie bieżni wewnętrznej, • Uszkodzenie elementu tocznego, • Uszkodzenie koszyka. 	Przyspieszenia w osi pionowej i poziomej	25,6	2100-2400 RPM/ 10-12 kN
University of Ottawa Ball-bearing Dataset	NSK 6203ZZ, FAFNIR 203KD	<ul style="list-style-type: none"> • Prawidłowa praca (sprawne łożysko), • Uszkodzenie bieżni zewnętrznej, • Uszkodzenie bieżni wewnętrznej, • Uszkodzenie elementu tocznego, • Uszkodzenie koszyka. 	Przyspieszenia promieniowe w osi pionowej	42	1750 RPM/ 0-400 N
CWRU Dataset	6205-2RS JEM SKF/ 6203-2RS JEM SKF	<ul style="list-style-type: none"> • Prawidłowa praca (sprawne łożysko), • Uszkodzenie bieżni zewnętrznej, • Uszkodzenie bieżni wewnętrznej, • Uszkodzenie elementu tocznego. 	Przyspieszenia w osi pionowej i poziomej	12 i 48	1797 -1720 RPM/ 0-3 KM

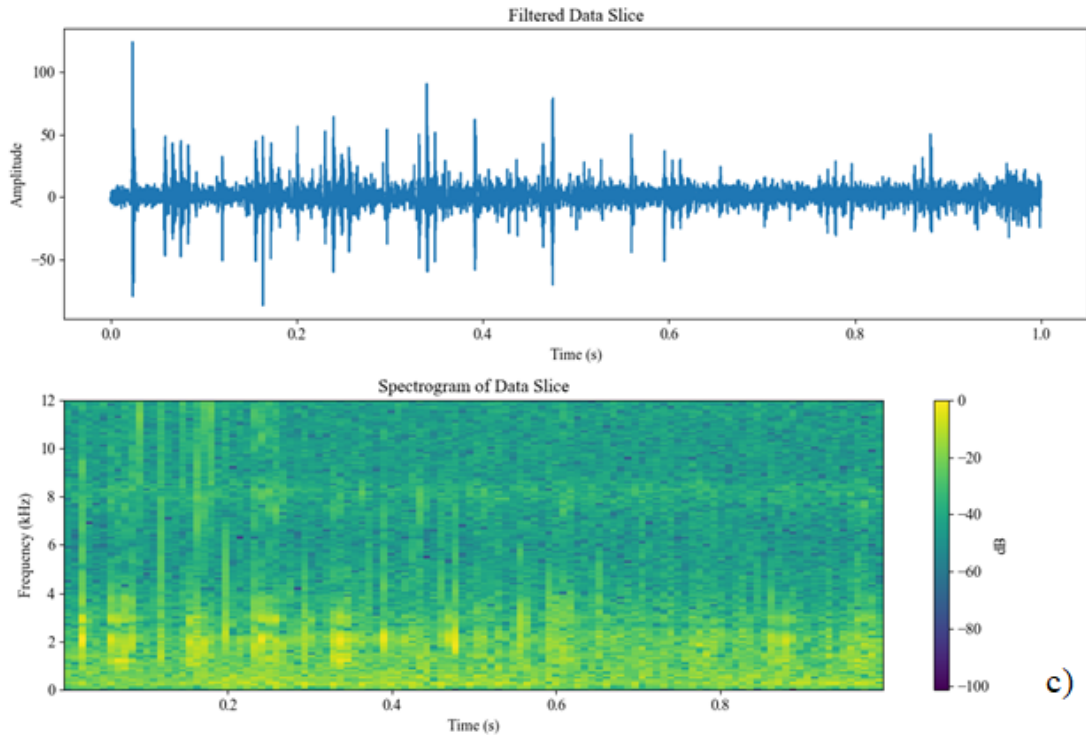
Jak widać warunki eksploatacyjne, w jakich były gromadzone dane różnią się od siebie, co z jednej wymaga przyjęcia ogólnych klas stanu a z drugiej strony pozwala na budowę klasyfikatora o wszechstronnych możliwościach, tym bardziej, że w przypadku głębokich sieci neuronowych pożądane jest wykorzystanie danych niehomogenicznych. Biorąc pod uwagę praktyczne aspekty diagnostyki łożysk tocznych, zdecydowano, że dla potrzeb klasyfikacji stanu technicznego dane zostaną pogrupowane na trzy następujące klasy:

1. Łożysko sprawne
2. Uszkodzenie – stadium początkowe
3. Uszkodzenie – stadium zaawansowane

W kolejnym kroku ze względu na różne warunki pozyskiwania sygnałów zgromadzonych w repozytoriach konieczne było m.in. sprawdzenie spójności danych, ujednoczenie częstotliwości próbkowania i podział sygnałów na podrealizacje. Przyjęto, że wspólną dla wszystkich sygnałów częstotliwością próbkowania będzie 25600Hz a każdy z zarejestrowanych sygnałów zostanie podzielony na podrealizacje o długości 1 sekundy, z których w dalszym etapie wyznaczane były cechy punktowe. Podział na podrealizacje jest niezbędny w celu zwiększenia liczby danych dla potrzeb uczenia klasyfikatorów stanu. Aby zmaksymalizować liczbę podrealizacji sygnałów zastosowano operację zakładkowania (ang. overlapping). Operacja zakładkowania pozwala na podział spróbkowanych danych na segmenty zawierające określony procent nowych próbek i określony procent próbek z poprzedniego segmentu. Pozwala to m.in. na wygładzenie wartości cech w czasie. W przypadku rozpatrywanych sygnałów każda podrealizacja zawierała 25600 próbek sygnału co odpowiadało 1 sekundzie a przyjęta wartość zakładki wynosiła 50% czyli 12800 próbek. Każdą z podrealizacji sygnału zapisano do pliku tekstowego o rozszerzeniu *.csv.

4.6. Przetwarzanie sygnałów i wyznaczanie ich cech

Podrealizacje sygnałów wyodrębnione na etapie wstępnego przetwarzania danych poddano przetwarzaniu polegającemu na filtracji górnoprzepustowej. Operacja ta jest niezbędna w celu stłumienia składowych niskoczęstotliwościowych nieistotnych dla oceny stanu łożyska a pozostawienie składowych wysokoczęstotliwościowych niosących informacje o uszkodzeniach łożyska. Oryginalne sygnały zgromadzone w repozytoriach zarejestrowano w pełnym paśmie częstotliwości. Operację filtracji przeprowadzono za pomocą górnoprzepustowego filtra Butterworth'a z częstotliwością odcięcia 1000 Hz, Przykładowy przebieg wybranej podrealizacji sygnału po filtracji wraz z jego spektrogramem dla łożyska o zaawansowanym uszkodzeniu zaprezentowano na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Przykładowy przebieg czasowy oraz spektrogram sygnału przyspieszeń drgań reprezentujący łożysko o zaawansowanym uszkodzeniu po filtracji górnoprzepustowej

W kolejnym, kroku przygotowania danych dla potrzeb klasyfikacji konieczne było wyznaczenie cech punktowych z podrealizacji przefiltrowanych sygnałów.

Dla potrzeb badań zdecydowano, że wyznaczanych będzie pięć następujących cech punktowych sygnałów przyspieszeń drgań:

- Wartość skuteczna (RMS) – będąca miarą energii sygnału

$$RMS(X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

gdzie: x_i – chwilowe wartości amplitudy sygnału,

N – całkowita liczba wartości amplitud sygnału.

- Wartość szczytowa (Peak) - reprezentująca najwyższą amplitudę osiągniętą przez sygnał w danym zakresie czasowym.

$$Peak(X) = \max(|x_1|, |x_2|, |x_3|, \dots, |x_N|) \quad (2)$$

gdzie: x_i –chwilowe wartości amplitudy sygnału,

N – całkowita liczba wartości amplitud sygnału.

- Wartość międzyszczytowa (Peak-Peak) - opisująca ilościowo zakres pomiędzy maksymalną i minimalną amplitudą sygnału.

$$Peak - Peak(X) = \max(X) - \min(X) \quad (3)$$

gdzie: $\max(X)$ – maksymalna wartość amplitudy sygnału,

$\min(X)$ – minimalna wartość amplitudy sygnału.

- Kurtosa (K) – będąca miarą spłaszczenia rozkładu Gaussa sygnału i wynosząca wartości 3 dla sygnału pochodzącego z łożyska sprawnego.

$$K(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 \quad (4)$$

gdzie: x_i – chwilowe wartości amplitudy sygnału,

\bar{x} – średnia wartość sygnału,

σ – odchylenie standardowe wartości amplitud sygnału,

- Skośność (S) - będąca miarą asymetrię rozkładu prawdopodobieństwa sygnału.

$$S(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^3 \quad (5)$$

gdzie:

x_i – chwilowe wartości amplitudy sygnału,

\bar{x} – średnia wartość sygnału,

σ – odchylenie standardowe wartości amplitud sygnału,

N – całkowita liczba wartości amplitud sygnału.

Wartości cech sygnałów mają różne zakresy wartości co z punktu widzenia uczenia maszynowego może stanowić problem, dlatego zbiory wartości cech punktowych poddano normalizacji. Normalizację przeprowadzono metodą Min-Max wg zależności (6). Implementując to rozwiązanie założono, że skalowanie danych przyniesie największą korzyść tylko, jeśli każda cecha (dla każdej próbki z osobna) zostanie przeskalowana globalnie względem minimalnych i maksymalnych wartości w całym zbiorze wartości tej cechy.

$$x_{norm} = \frac{x - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (6)$$

gdzie: x_{norm} – znormalizowana wartość cechy x ,

x – pierwotna wartość cechy,

$\min(X)$ – minimalna wartość cechy w całym zbiorze danych,

$\max(X)$ – maksymalna wartość cechy w całym zbiorze danych.

Efektom normalizacji jest transformacja zbioru wartości cech należącym do zbioru liczb rzeczywistych do zbioru liczb posiadających wartości w zakresie $[0; 1]$, zachowując względne relacje między punktami danych w ramach każdej cechy. Taka dystrybucja wartości cech zapewnia spójność danych w zakresie przedziału wartości, szybszą konwergencję i wysoką sprawność klasyfikacji.

Wszystkie operacje przetwarzania sygnałów oraz wyznaczania cech sygnałów realizowano w środowisku Python z wykorzystaniem m.in. biblioteki Numpy, Scipy, scikit-learn.

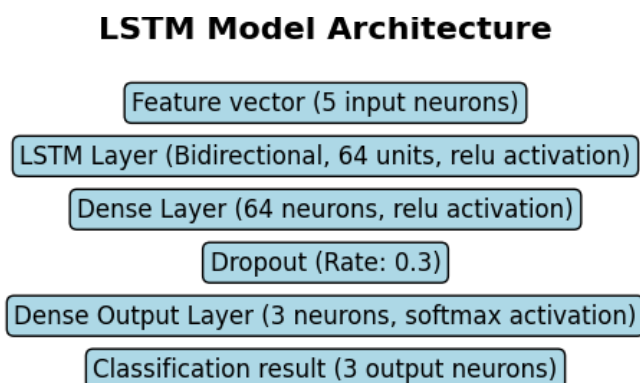
4.7. Stosowane klasyfikatory

Założono, że do badań zastosowane zostaną trzy klasyfikatory, których wyniki zostaną następnie porównane między sobą. Są to:

- długoterminowa pamięć krótkoterminowa – LSTM,
- jednokierunkowa sieć neuronowa – FNN,
- rekurencyjna sieć neuronowa prosta – SRNN.

Długoterminowa pamięć krótkoterminowa - LSTM

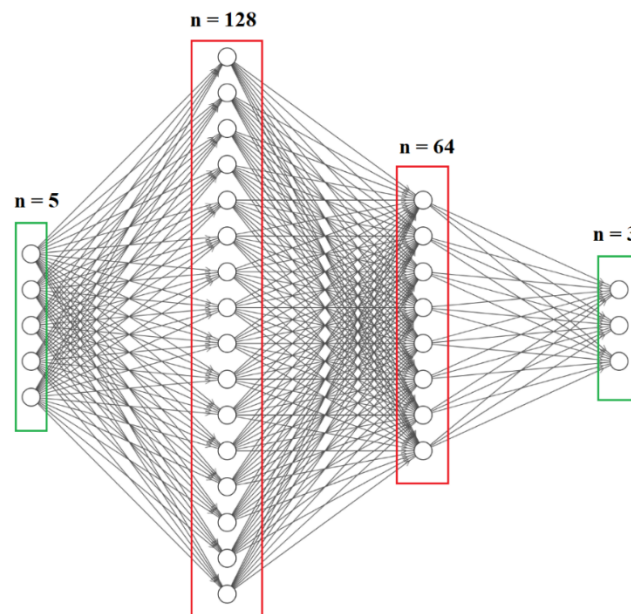
W pierwszym klasyfikatorze wykorzystano sieć neuronową należącą do grupy rekurencyjnych sieci neuronowych (RNN) o nazwie LSTM (ang. Long Short-Term Memory). Warstwa wejściowa posiadała pięć neuronów. Liczba ta odpowiadała rozmiarowi wektora wyznaczonych cech. Podstawą funkcjonowania sieci są dwukierunkowe warstwy LSTM, które przetwarzają sekwencje wejściowe zarówno w przód, jak i w tył, skutecznie przechwytyjąc długoterminowe zależności i wzorce w danych sekwencyjnych. Zastosowano w niej 64 neurony oraz funkcje aktywacji „relu”. Wyniki operacji w warstwach LSTM są przekształcane w jednowymiarowy wektor, gotowy do dalszej obróbki. Kolejnymi warstwami w topologii sieci były dwie warstwy gęste. Pierwsza gęsta warstwa zawiera 64 neurony i wykorzystywała funkcję aktywacji „relu”, aby wprowadzić do modelu nieliniowość, umożliwiając mu wychwycenie złożonych wzorców danych. Druga gęsta warstwa służyła jako warstwa wyjściowa. Pomiędzy nimi znajduje się warstwa porzucenia o wskaźniku rezygnacji wynoszącym 0,3. Zadaniem tej operacji jest zapobieganie nadmiernemu dopasowaniu (ang. overfitting) poprzez losową dezaktywację części neuronów podczas treningu, co sprzyja lepszemu uogólnianiu modelu. Warstwa wyjściowa składa się z trzech neuronów odpowiadających liczbie klas w zadaniu klasyfikacyjnym oraz wykorzystuje funkcję aktywacji „softmax” do generowania prawdopodobnych stanów technicznych łożysk. Uproszczony schemat modelu został przedstawiony na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Architektura zaimplementowanego modelu LSTM

Sieci neuronowe jednokierunkowe – FNN

Do budowy drugiego klasyfikatora stanu łożysk wykorzystano sieci neuronowe jednokierunkowe (ang. Feedforward Neural Network - FNN) z gęsto połączonymi warstwami (rys. 4.5.). Warstwa wejściowa modelu przyjmuje wektor z pięcioma wcześniej wyodrębnionymi cechami z sygnałów drgań. Po warstwie wejściowej zaproponowano dwie warstwy ukryte. Pierwsza warstwa ukryta składa się ze 128 neuronów, druga warstwa ukryta ma 64 neurony. Każdy z tych neuronów wykorzystuje funkcję aktywacji poprawionej funkcji liniowej (ReLU). Aby zapobiec nadmiernemu dopasowaniu, pomiędzy gęsto połączonymi warstwami wprowadzono warstwy porzucenia (ang. dropout layer). Wskaźnik rezygnacji został ustawiony na 0,3 w każdej warstwie porzucenia. Porzucanie to technika regularyzacji, która podczas każdej aktualizacji losowo ustawia część jednostek wejściowych na zero, co pomaga w lepszym uogólnianiu modelu. Warstwa wyjściowa modelu składa się z trzech neuronów, z których każdy odpowiada jednej z możliwych klas w zadaniu klasyfikacyjnym. Funkcja aktywacji używana w tej warstwie wyjściowej to softmax, która generuje rozkład prawdopodobieństwa w klasach. Klasa o największym prawdopodobieństwie jest przewidywana przez model.

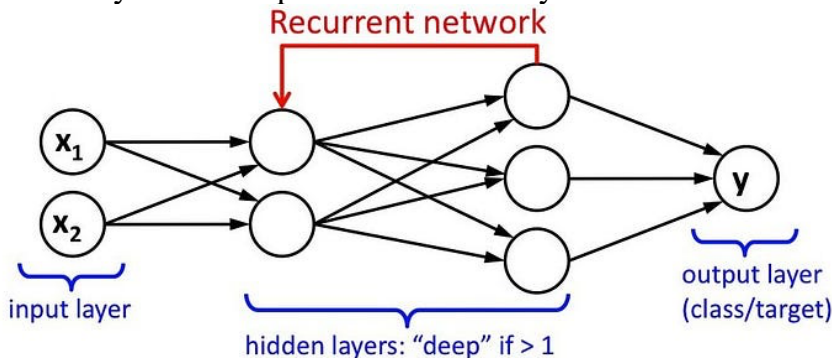


Rys. 4.5. Architektura zaimplementowanego modelu FNN

Prosta rekurencyjna sieć neuronowa - SRNN

Ostatni sposób klasyfikacji stanu łożysk oparty był na prostej rekurencyjnej sieci neuronowej (SRNN), która pod względem architektury jest mniej rozbudowana niż sieć LSTM. Podobnie jak we wcześniejszych sieciach warstwa wejściowa posiadała liczbę neuronów odpowiadającą liczbie cech. Następnie przekształcone dane wejściowe trafiały do warstwy ukrytej zawierającej 128 neuronów i wykorzystującej funkcję aktywacji „relu” by ostatecznie zwrócić sekwencje przed przejściem przez warstwę spłaszczającą. Kolejna warstwa gęsta, z 64 neuronami i funkcją aktywacji „relu” zamyka człon warstw ukrytych. Warstwa

wyjściowa modelu składa się z trzech neuronów odpowiadających przewidywanym klasom stanu wykorzystuje funkcję aktywacji „softmax” do oceny prawdopodobieństwa klas. Struktura modelu prostych rekurencyjnych sieci neuronowych została przedstawiona na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Budowa i zasada działania prostych modeli RNN [11]

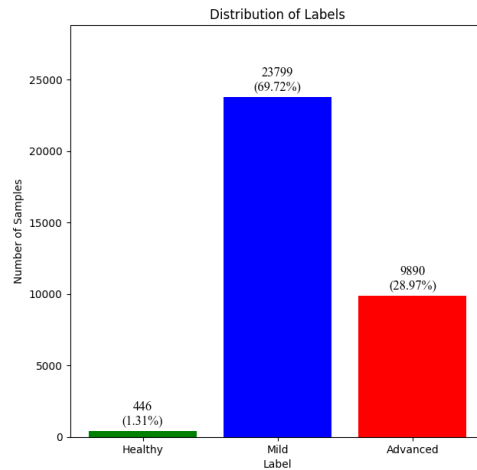
Schemat ten dobrze obrazuje kluczową zasadą działania RNN, jaką jest zdolność do utrzymywania ukrytego stanu lub pamięci, która przechwytyje informacje o przeszłych elementach w sekwencji wejściowej.

W implementacji wszystkich metod wykorzystano bibliotekę języka Python - Tensorflow z gotowymi rozwiązaniami z zakresu uczenia maszynowego.

Trenowanie i walidacja klasyfikatorów

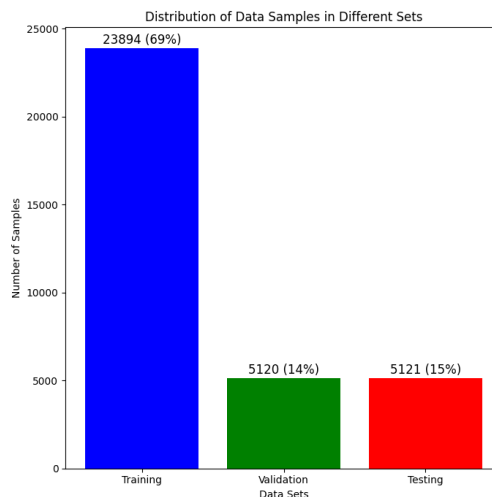
Proces uczenia sieci neuronowych wymaga odpowiedniego przygotowania danych. W wyniku przetwarzania danych pozyskanych z repozytoriów przygotowano ponad 34 000 wektorów po pięć cech, reprezentujących jednosekundową podrealizację sygnału przyspieszeń drgań łożyska tocznego.

Na rysunku 4.7. przedstawiono dystrybucje danych pomiędzy trzy zdefiniowane klasy stanu, czyli dane opisujące łożysko o lekkich lub zaawansowanych uszkodzeniach oraz łożysko w pełni sprawne. Można zauważyć, że wykorzystane w pracy dane charakteryzują się dużą dysproporcją. Klasa z uszkodzeniami łagodnymi stanowi ponad połowę dostępnych danych, natomiast dane reprezentujące łożyska sprawne posiada najmniej przykładów. Wszystko to stanowi o potencjalnym problemie braku równowagi klasowej, który może znacząco wpłynąć na wyniki klasyfikacji stanu technicznego łożyska. W przypadku słabej zdolności generalizacyjnej konieczne będzie zastosowanie metody straty ważonej klasami (ang. Class-Weighted Loss), która czyni model bardziej wrażliwym na klasy reprezentowane przez mniej liczne zbiory poprzez zwiększenie kosztów lub wag w przypadku błędnej klasyfikacji danej klasy.



Rys. 4.7. Rozkład przynależności danych do rozpatrywanych klas stanu

Dla potrzeb procesu uczenia klasyfikatorów zbiór wektorów cech został podzielony na podzbiór trenujący, podzbiór walidujący oraz podzbiór testujący. Zgodnie z dobrą praktyką stosowaną w dziedzinie uczenia maszynowego i inżynierii danych zastosowano proporcje 70% / 15% / 15% (rys. 4.8)

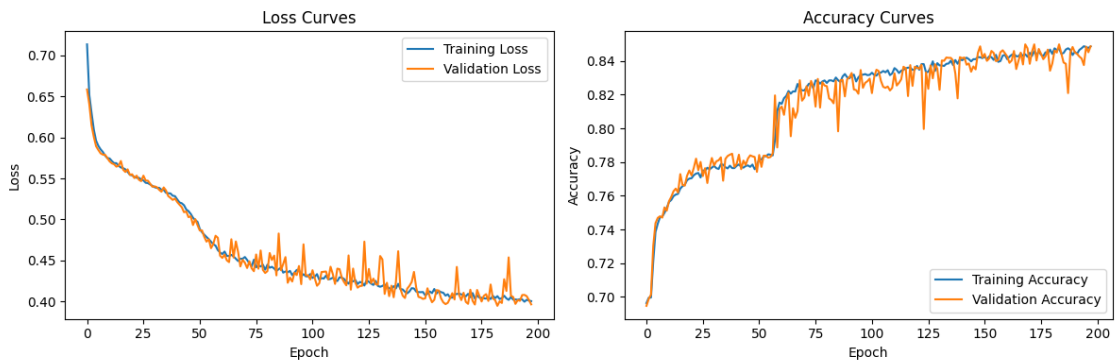


Rys. 4.8. Sposób podziału danych uczących na zbiory trenujący walidacyjny i testujący

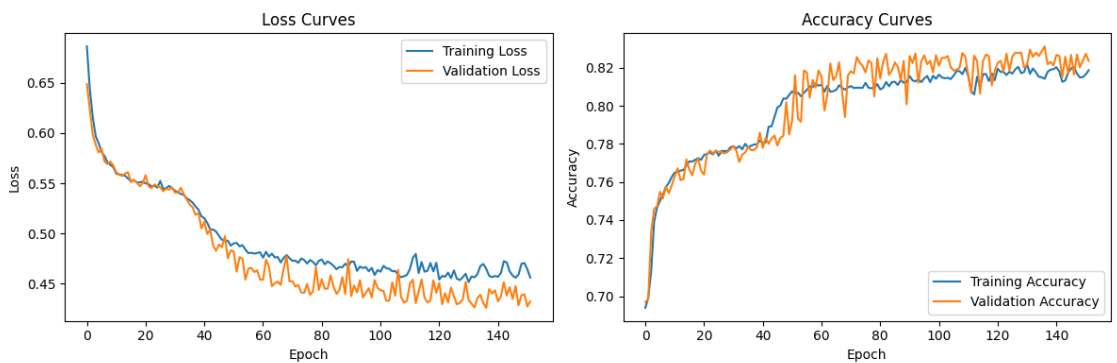
Procedura uczenia polegała na obserwacji wyników osiągniętych dla przygotowanych wcześniej klasyfikatorów wykorzystujących różne wartości hiperparametrów. Dodatkowo by dokonać weryfikacji poprawności procesu trenowania i walidowania modeli sugerowano się krzywą straty i dokładności oraz macierzami błędów. Następnie dostrajano hiperparametry w celu znalezienia optymalnego ustawienia.

Modele kompilowano przy użyciu optymalizatora „Adam” z szybkością uczenia równą 0,001. Jako funkcje straty wybrano kategorię entropii krzyżową (ang. sparse categorical crossentropy), która dobrze nadaje się do zadań klasyfikacji wieloklasowej. Aby zapobiec nadmiernemu dopasowaniu w procesie trenowania, wdrożono wczesne zatrzymanie, monitorując utratę walidacji z cierpliwością (ang. patience) 15 epok. Proces trenowania zakładał 200 epok z wartością wsadową równą 32 próbki w iteracji procesu trenującego. Wykresy

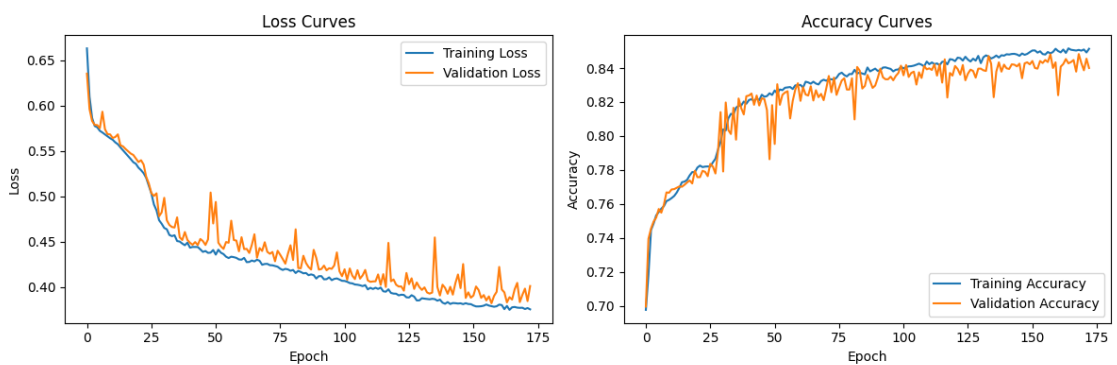
straty i dokładności dla rozpatrywanych klasyfikatorów neuronowych zostały przedstawione na rysunkach 4.9 – 4.11.



Rys. 4.9. Funkcje straty i dokładności dla procesu trenowania i walidacji modelu LSTM



Rys. 4.10. Funkcje straty i dokładności dla procesu trenowania i walidacji modelu FNN

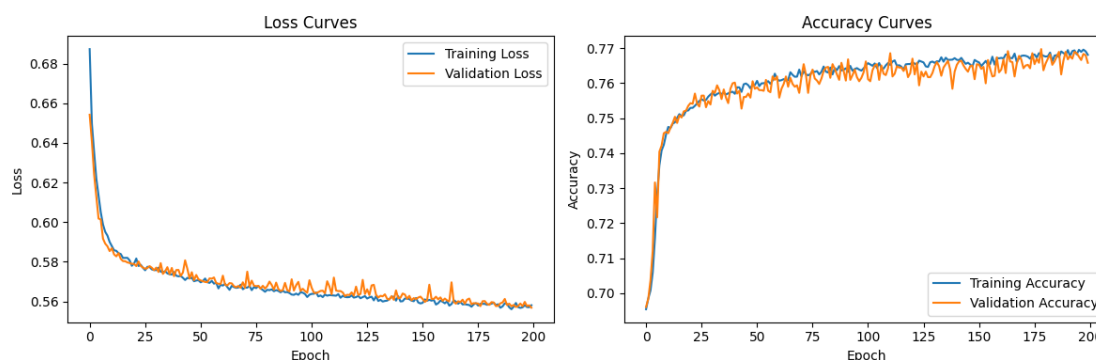


Rys. 4.11. Funkcje straty i dokładności dla procesu trenowania i walidacji modelu SRNN

Jak wynika z przedstawionych wykresów, w poszczególnych epokach zmniejszają się zarówno wartości straty w zakresie walidacji, jak i uczenia, a dokładność klasyfikacyjnych wzrasta. Wskazuje to na prawidłowy proces przebiegu uczenia. Równomierny spadek krzywej straty dla procesu trenowania i walidacji wskazuje na brak nadmiernego dopasowania do danych.

W celu porównania wpływu przyjętej topologii sieci FNN na zdolność rozpoznawania klas stanów dodatkowo zaimplementowano model sieci neuronowych jednokierunkowych zawierający tylko jedną warstwę ukrytą z 126

neuronami oraz funkcją aktywacji poprawionej funkcji liniowej (ReLU). Proces uczenia tego klasyfikatora zaprezentowano na rysunku 4.12



Rys. 4.12. Krzywe straty i dokładności dla procesu trenowania i walidowania modelu FNN z jedną warstwą ukrytą

Porównanie wyników klasyfikacji

Rozpatrywane klasyfikatory po procesie trenowania i walidacji podano testowaniu podając na wejścia sieci dane wcześniej nieprezentowane. Do oceny sprawności klasyfikacji posłużono się następującymi miarami:

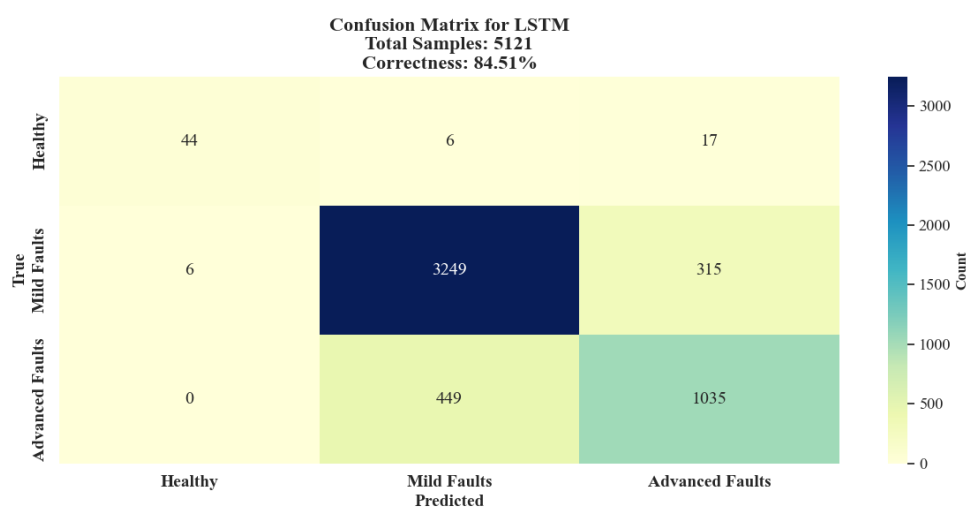
- Dokładnością - mierzącą stosunek poprawnie sklasyfikowanych przykładów spośród wszystkich przykładów w zbiorze testowym,
- Miarą F1 (ang. F1-score) wiążącą precyzję klasyfikacji z czułością w obrębie klasy,
- Wartością funkcji straty określającą ilościowo, jak dobrze przewidywania modelu odpowiadają prawdziwym etykietom podczas testowania,
- Macierzami pomyłek.

Porównanie wyznaczonych wartości miar oceniających dla rozpatrywanych klasyfikatorów zaprezentowano w tabeli 4.2. Łatwo zauważyć, że wyniki klasyfikacji dla sieci LSTM i SRNN są zbliżone, przy czym przewagę wykazuje klasyfikator SRNN. Dokładność w tym przypadku wynosiła 84,81%. Również dobre wyniki uzyskano dla dwuwarstwowej sieci jednokierunkowej FMM ponieważ dokładność wynosząca 82,97% była bardzo bliska sieciom LSTM i SRNN. Dla porównania sieć neuronowa jednokierunkowa (FNN) o jednej warstwie ukrytej pozwoliła uzyskać dokładność wynoszącą 76.45%.

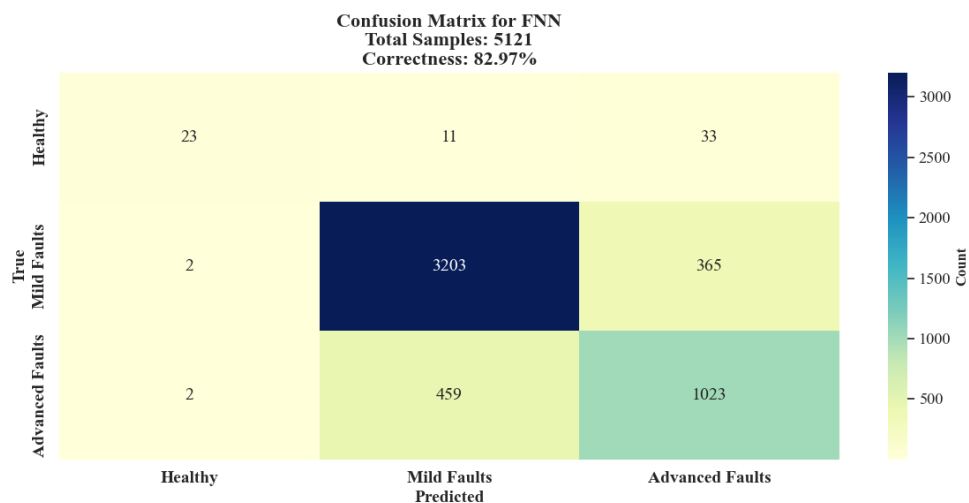
W celu oceny zdolności klasyfikatorów do rozpoznawania poszczególnych klas stanu wyznaczono i przeanalizowano macierze pomyłek dla sieci LSTM, FNN i SRNN, które zaprezentowano na rysunkach 4.13.-4.15. Model FNN z jedną warstwą głęboką z uwagi na gorsze wyniki klasyfikacji nie został wzięty pod uwagę w dalszej analizie.

Tabela 4.2. - Wyniki testu klasyfikacji dla wykorzystanych w pracy modeli uczenia głębokiego

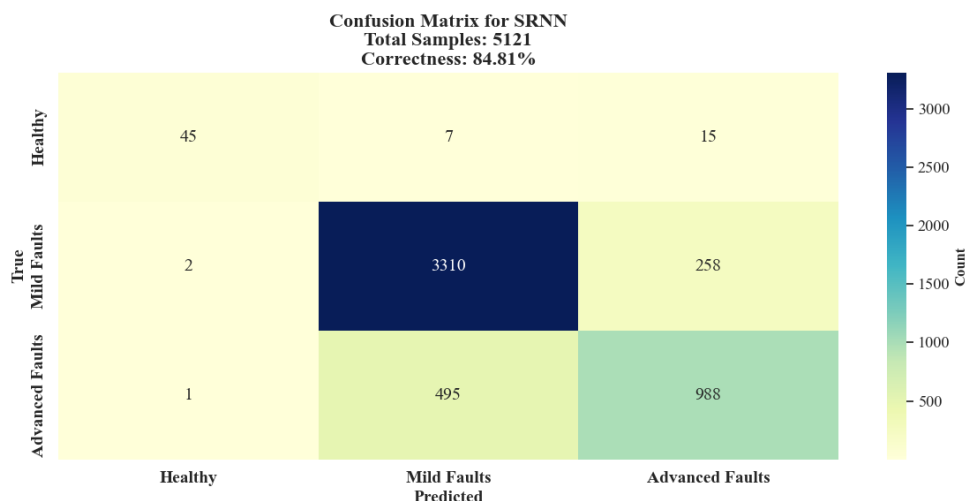
Metryka	LSTM	FNN _{2-warstwy}	SRNN	FNN _{1-warstwa}
Dokładność	84.51%	82.97%	84.81%	76.45%
Miara F1	0.8430	0.8271	0.8440	0.7479
Wartość straty	0.3932	0.4260	0.3921	0.5477



Rys. 4.13. Macierz pomyłek modelu LSTM



Rys. 4.14. Macierz pomyłek modelu FNN



Rys. 4.14. Macierz pomyłek modelu SRNN

Na podstawie analizy macierzy pomyłek można stwierdzić, że zdolność poprawnego rozpoznawania klasy stanu opisującej łożysko sprawne była wyzwaniem dla wszystkich rozpatrywanych klasyfikatorów, o czym świadczą stosunkowo niższe współczynniki dokładności. W przypadku zdolności klasyfikacji klasy stanu reprezentującej początkowe stadium uszkodzenia łożyska wszystkie klasyfikatory osiągały współczynniki dokładności przekraczające 89%. Klasa ta była czasami mylona z klasą „uszkodzeń zaawansowanych”. Sugeruje to subtelne różnice między tymi stanami, które mogą być niezauważalne dla modeli lub mogą wynikać z niejasności lub dwuznaczności w niektórych próbkach zbioru danych. Zaobserwowano również, że klasyfikatory wykorzystujące jednokierunkowe sieci neuronowe czasami błędnie klasyfikowały próbki dla łożysk pozbawionych defektów, jako próbki z zaawansowanymi uszkodzeniami.

4.4. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań opracowano metodę klasyfikacji stanu technicznego łożysk tocznych na podstawie prostych cech punktowych sygnałów przyspieszeń drgań i porównano wyniki klasyfikacji dla trzech różnych klasyfikatorów neuronowych. Głównym i najbardziej pracochłonnym etapem prac było zebranie, scharakteryzowanie i przygotowanie zbioru danych uczących. Ważnym etapem pracy był dobór klasyfikatorów neuronowych, który przeprowadzono na podstawie badań literaturowych. Rozpatrywano trzy klasyfikatory bazujące na sztucznych sieciach neuronowych LSTM, FNN i SRNN. Do oceny sprawności klasyfikacji posłużono się powszechnie znanymi miernikami oraz macierzami pomyłek.

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że są one bardzo dobre (dokładność klasyfikacji na poziomie 84%) biorąc pod uwagę fakt, że do uczenia

wykorzystano tylko wektor składający się z pięciu klasycznych cech punktowych stosowanych powszechnie w diagnostyce łożysk tocznych. Zaobserwowanym problem, mogącym wpłynąć na sprawność klasyfikacji była nierównomierność rozkładu danych uczących na poszczególne klasy. Ważnym wnioskiem płynącym z badań jest fakt, że rozpatrywanie danych różnych eksperymentów prowadzonych na różnych łożyskach przy różnych prędkościach obrotowych i obciążeniach nie wpłynęło na zdolność wykrywania defektów i ich klasyfikacji na trzy podstawowe klasy. Można się spodziewać, że zmniejszenie dysproporcji między liczebnością przykładów uczących reprezentujących poszczególne klasy stanu może doprowadzić do poprawy sprawności klasyfikacji, co będzie przedmiotem dalszych badań autorów.

BIBLIOGRAFIA

1. Fidali M. (red.), Przewodnik po technologiach Przemysłu 4.0. Elamed, Katowice 2021.
2. Fidali M., Czujniki zintegrowane i inteligentne w diagnostyce drganiowej maszyn – cz. I, Utrzymanie Ruchu 4/2017.
3. Bearing Damage and Failure Analysis, SKF Group, PUB BU/I3 14219/2 EN. June 2017.
https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968064c148/pdf_preview_medium/0901d1968064c148_pdf_preview_medium.pdf.
[Data uzyskania dostępu: 29.03.2024]
4. Wang, Ruixin, Jiang, Hongkai, Zhu, Ke, Wang, Yanfeng, Liu, Chaoqiang. "A deep feature enhanced reinforcement learning method for rolling bearing fault diagnosis." *Advanced Engineering Informatics*, 2022.
5. Zhang, Wendong, Zhang, Fan, Chen, Wei, Jiang, Yongquan, Song, Dongli. "Fault State Recognition of Rolling Bearing Based Fully Convolutional Network." *Computing in Science & Engineering*.
6. Ian Han, Longwen Zhang, Zhongjun Yin, Andy C.C. Tan, Rolling bearing fault diagnosis with combined convolutional neural networks and support vector machine, *Measurement*, Volume 177, 2021,
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109022>.
7. Rokita Aleksander, „Diagnozowanie stanu wybranego podzespołu maszynowego z wykorzystaniem uczenia maszynowego”. Praca dyplomowa Magisterska. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska. Gliwice, 2023.
8. Wang, Biao, Yaguo Lei, Naipeng Li, Ningbo Li. "A Hybrid Prognostics Approach for Estimating Remaining Useful Life of Rolling Element Bearings." *IEEE Transactions on Reliability*, 2018. <https://biaowang.tech/xjtu-sy-bearing-datasets/>.
[Data uzyskania dostępu: 29.03.2024]
9. Sehri, Mert, Patrick Dumond, Michel Bouchard. "University of Ottawa constant load and speed rolling-element bearing vibration and acoustic fault signature

- datasets." *Data in Brief*, Volume 49, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340923004456>. [Data uzyskania dostępu: 29.03.2024]
10. Case Western Reserve University (CWRU) Bearing Data Center. <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> . [Data uzyskania dostępu: 29.03.2024]
 11. Chandra Churh Chatterjee, "Implementation of RNN, LSTM, and GRU". *Towards Data Science*, 2019. <https://towardsdatascience.com/implementation-of-rnn-lstm-and-gru-a4250bf6c090>. [Data uzyskania dostępu: 29.03.2024]

Rozdział 5

IMPLEMENTACJA ROZMYTEGO WSKAŹNIKA DIAGNOSTYCZNEGO STURMA W KOMERCYJNYM MODULE MONITOROWANIA STANU MASZYN

Tatoj Wojciech¹, Fidali Marek²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, wojctat284@student.polsl.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, marek.fidali@polsl.pl

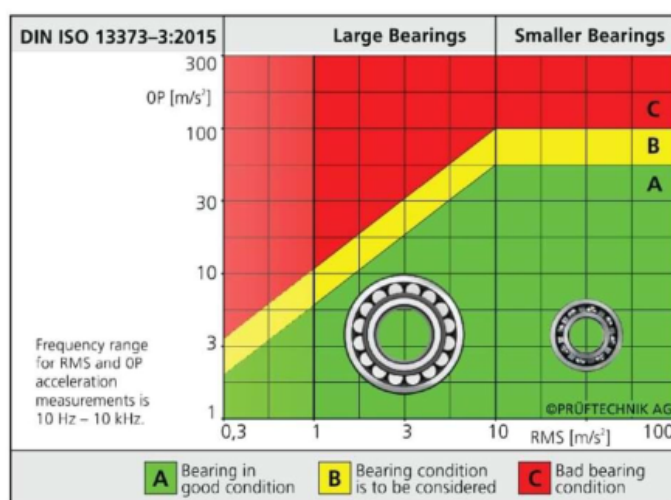
5.1. Wstęp

Łożyska toczne to kluczowy podzespół mechaniczny stosowany praktycznie we wszystkich maszynach działających w przemyśle. Niesprawności łożysk mogą prowadzić do awarii maszyn, co przekłada się na wzrost strat produkcyjnych. Z tego powodu istnieje ciągłe zapotrzebowanie na metody wczesnej detekcji niesprawności łożysk tocznych maszyn i urządzeń przemysłowych.

Jednym z obiecujących podejść w dziedzinie monitorowania i oceny stanu łożysk tocznych jest możliwość zastosowania przetwarzania brzegowego (ang. edge computing) [1, 2, 4, 8]. Przetwarzanie brzegowe polega na implementacji wybranych metod diagnostycznych w elementach torów pomiarowych zlokalizowanych jak najbliżej przetwornika pomiarowego. Mogą to być programowalne czujniki lub programowalne moduły pomiarowe współpracujące z nowoczesnymi czujnikami z wyjściami cyfrowymi [7] np. w standardzie IO Link [5]. Zaletą przetwarzania brzegowego jest możliwość natychmiastowego diagnozowania stanu technicznego łożysk bez konieczności przesyłania danych do zdalnych serwerów, i wzrostu ryzyka opóźnień w diagnozach oraz utraty ważnych informacji diagnostycznych. Jedną z metod oceny stanu technicznego łożysk, która może być zaimplementowana w urządzeniu brzegowym jest rozmyty klasyfikator stanu bazujący na współczynniku Sturma $K(t)$ zdefiniowany w normie VDI 3832 [15].

5.2. Ocena stanu technicznego łożysk

Stan łożysk tocznych może być oceniany na podstawie wyników badań diagnostycznych wykorzystujących pomiary temperatury, badania smaru, pomiary momentu oporowego, pomiary ultradźwiękowe i pomiary drgań oraz hałasu [6]. Ze względu na dużą dostępność sprzętu badawczego, pomiar i ocena drgań jest jedną z częściej stosowanych metod diagnozowania łożysk tocznych. W zakresie analizy sygnałów drgań pod kątem oceny stanu łożysk tocznych stosuje się mniej lub bardziej zaawansowane metody analizy i oceny sygnałów bazujące na transformacie Hilberta i analizie sygnałów obwiedni przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu i częstotliwości [8, 9, 11, 12]. Proste, ale jak pokazuje praktyka przemysłowa skuteczne metody diagnostyki stanu łożysk polegają na wyznaczeniu podstawowych cech punktowych sygnałów przyspieszeń drgań po wcześniejszej filtracji górnoprzepustowej a następnie obserwacji szeregów czasowych w funkcji czasu eksploatacyjnego i analizie trendów. Najczęściej wyznaczanymi cechami punktowymi są wartość szczytowa a_{Peak} i/lub wartość skuteczna a_{RMS} sygnału przyspieszeń drgań. Posługiwanie się parametrami liczbowymi, pozwala również odnosić się do wartości granicznych definiowanych w normach lub praktycznych zaleceniach diagnostycznych opracowanych przez diagnostów. Przykładem normy, w której zdefiniowano kryteria oceny stanu łożysk w oparciu o cechy punktowe jest norma DIN ISO 13373-3 [14] (Rys. 5.1.).



Rys 5.1 Kryteria oceny stanu łożysk wg ISO 13373-3:2015 [14]

Odzwierciedleniem przydatności stosowania cech liczbowych w ocenie stanu łożysk jest norma VDI 3832 [15], która definiuje m.in. parametr diagnostyczny przydatny do oceny stanu łożyska tocznych $K(t)$, nazywany także współczynnikiem diagnostycznym Sturma. Jest on obliczany zgodnie z równaniem (1) na podstawie iloczynu wartości szczytowych i skutecznych przyspieszeń drgań w zakresie częstotliwości od 1 do 10 kHz odnoszonych do iloczynu referencyjnych wartości skutecznej i szczytowej przyspieszeń drgań zmierzonych na początku eksploatacji łożyska.

$$K(t) = \frac{aRMS(0)*aPeak(o)}{aRMS(t)*aPeak(t)} \quad (1)$$

gdzie:

- aRMS (0) – Referencyjna wartość RMS przyspieszenia,
- aPeak (0) – referencyjna wartość peak przyspieszenia,
- aRMS (t) – aktualna wartość RMS przyspieszenia,
- aPeak (t) – aktualna wartość peak.

Wartość parametru K(t) wraz z pogarszaniem się stanu łożyska będzie malała, co pozwoliło zdefiniować zakresy wartości granicznych parametru i powiązać je z oczekiwanym stanem technicznym łożyska. Wartości graniczne parametru K(t) przedstawiono w tabeli 5.1.

Tab. 5.1. Klasyfikacja stanu łożysk według przedziałów parametru K(t)[20]

K(t)	Klasa stanu łożyska
>1	Poprawa stanu
1 – 0.5	Łożysko w normie
0.5 – 0.2	Pogarszający się stan łożyska
0.2 – 0.02	Zaawansowane uszkodzenie
<0.02	Awaria

5.3. Rozmyty klasyfikator stanu łożyska tocznego

Analizując wartości graniczne parametru K(t) można zauważyć, że aby sklasyfikować stan łożyska, wartość parametru K(t) powinna znajdować się w zakresie sugerowanych dla danej klasy stanu wartości. Jest to podejście nie ostre, które można wykorzystać do opracowania klasyfikatora rozmytego, który następnie może zostać zaimplementowany w urządzeniu brzegowym. W ramach badań opracowano klasyfikator rozmyty funkcjonujący wg klasycznego modelu wnioskowania rozmytego Mamdaniego-Zadeha [3, 10, 16, 20] wymagającego przeprowadzenia operacji fuzyfikacji (rozmywania), inferencji (wnioskowania) i defuzyfikacji (wyostrozania)

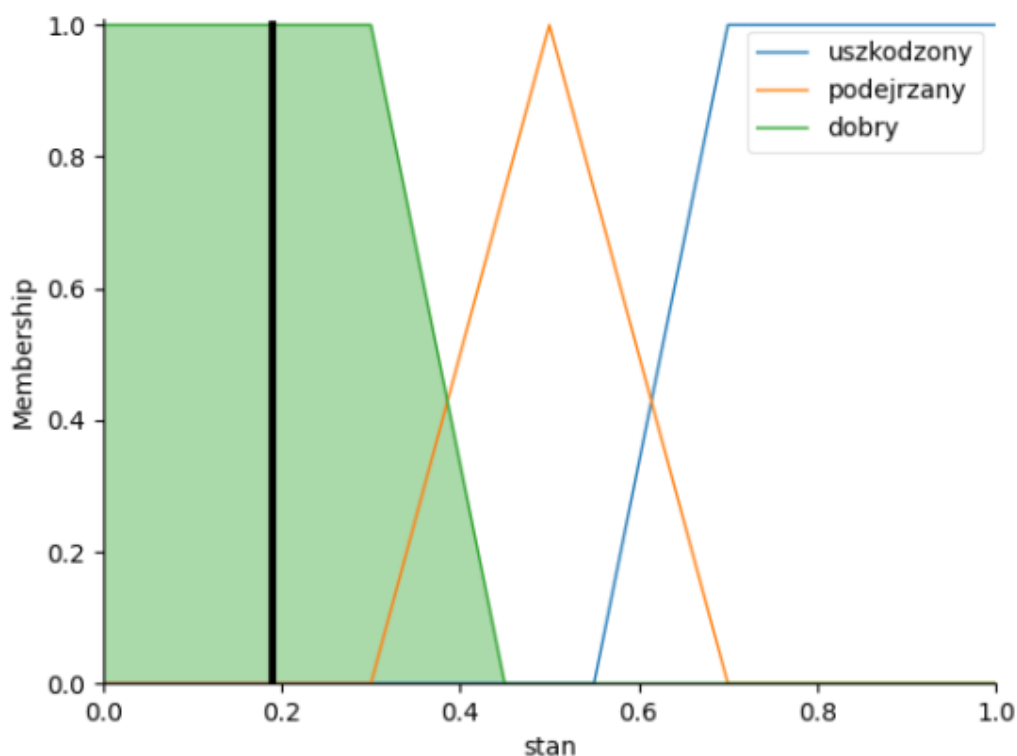
Dla celów przygotowania zbiorów rozmytych wartości współczynnika K(t) przypisano do trzech klas: „wysoki, średni, niski”. Stan łożysk opisywany jest również przez trzy etykiety, kolejno: „uszkodzony, podejrzany, dobry”. Zastosowano trapezoidalne funkcje przynależności dla stanów „dobry”, „uszkodzony” oraz trójkątną funkcję przynależności dla stanu „podejrzany”. Analogicznie przyjęto funkcje przynależności dla wartości parametru K(t), tzn. wartość „wysoki” i „niski” reprezentują funkcje trapezoidalne a wartość średni

opisana jest przez funkcję trójkątną. Na rysunku 5.2 zaprezentowano zbiory rozmyte zastosowane do klasyfikacji stanu łożyska na podstawie wartości wskazanych w normie VDI 3832

Na podstawie funkcji przynależności stworzone zostały trzy reguły, które pozwalają na zbudowanie relacji diagnostycznych między wartościami współczynnika $K(t)$ oraz klasami stanu. Reguły zdefiniowano w następujący sposób:

- Jeżeli wartość współczynnika diagnostycznego Sturma $K(t)$ jest wysoka to stan łożyska jest dobry,
- Jeżeli wartość współczynnika diagnostycznego Sturma $K(t)$ jest średnia to stan łożyska jest podejrzany
- Jeżeli wartość współczynnika diagnostycznego Sturma $K(t)$ jest niska to stan łożyska jest uszkodzony.

Wyostżanie przeprowadzono metodą środka ciężkości. Przyjęty sposób postępowania zweryfikowano symulacyjnie. Przykładowo, dla współczynnika diagnostycznego Sturma $K(t)$ o wartości równej 0,75, klasyfikator stanu łożysk po obliczeniach i wyostżaniu metodą środków ciężkości wskazał na etykietę stanu „dobry” z wartością 0,19 (rys. 5.2.). W tym przypadku wskaźnik stanu, który nazwano BCI (Bearing Condition Indicator) przyjmuje wartości w zakresie od 0 do 1 gdzie wartości bliskie 1 oznaczają łożysko uszkodzone a wartości bliskie 0 łożysko sprawne.



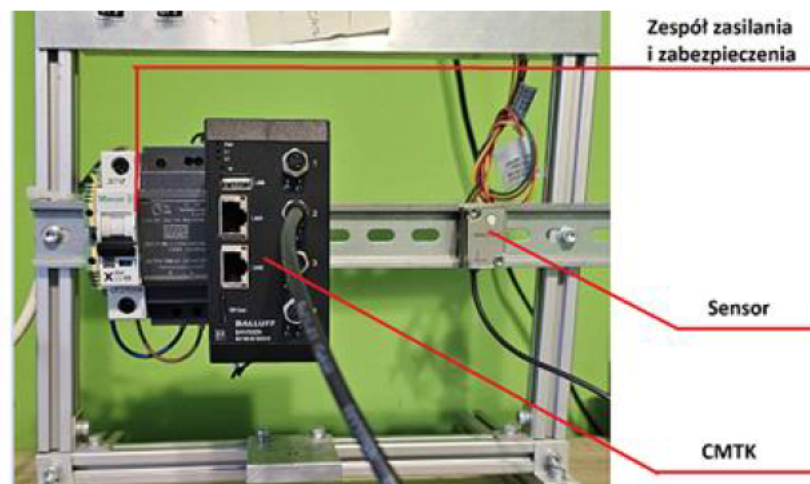
Rys 5.2. Zbiory rozmyte zastosowane w klasyfikacji stanu łożyska i przykład reprezentacji stanu dobry

5.4. Implementacja klasyfikatora rozmytego w module monitorowania stanu maszyn

Postęp w zakresie układów do pomiarów drgań zaowocował pojawieniem się rozwiązań bazujących na standardzie IO-Link [5]. Przykładem tego typu rozwiązania może być układ monitorowania stanu maszyn CMTK firmy Balluff [17, 18].

Głównym elementem układu monitorowania maszyn CMTK jest czterokanałowy moduł pomiarowy BAV002N [18] bazujących na standardzie IO Link zintegrowany z komputerem brzegowym i bazą danych oraz konfigurowany z poziomu przeglądarki internetowej. Z modułem BAV002N mogą współpracować dowolne czujniki z interfejsem IO Link w tym np. trójosiowy czujnik drgań BCM0002 [19] firmy Balluff.

Na rysunku 5.3 zaprezentowano układ pomiarowy wykorzystywany do weryfikacji poprawności działania rozmytego klasyfikatora stanu łożysk składający się z wyżej wymienionego modułu monitorowania stanu CMTK i czujnika BCM0002.

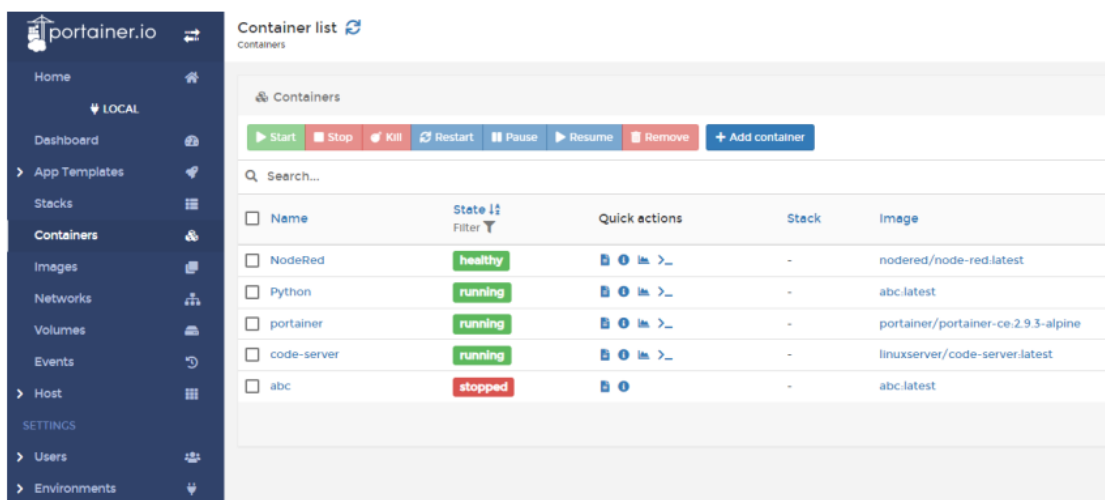


Rys 5.3. Widok układu pomiarowego stosowanego podczas realizacji badań

W module pomiarowym fabrycznie zainstalowano oprogramowanie, którego kluczowymi cechami są:

- Sieciowy interfejs graficzny dostępny z poziomu przeglądarki internetowej,
- Zautomatyzowana instalacja czujników z wykorzystaniem funkcji plug-and-play
- Dostęp do interfejsu programistycznego Rest API pozwalający na dowolną modyfikację funkcjonalności modułu pomiarowego,
- Obsługa technologii IIoT przez standardowy interfejs MQTT,
- Możliwość rozbudowy funkcjonalności oprogramowania z użyciem technologii konteneryzacji opartej na platformie Docker.

Docker pełni rolę platformy dla programistów i administratorów, umożliwiając tworzenie, wdrażanie i uruchamianie aplikacji rozproszonych na poziomie systemu operacyjnego. Docker umożliwia tworzenie aplikacji, które mogą działać w izolowanych kontenerach na różnych urządzeniach brzegowych, takich jak routery, bramki czy urządzenia IoT. Dzięki temu aplikacje te mogą działać w sposób niezawodny i bezpieczny, a także mogą być łatwo aktualizowane i zarządzane. Dodatkowo, Docker umożliwia tworzenie i dystrybucję obrazów kontenerów, które zawierają całe środowisko uruchomieniowe oraz aplikację, co ułatwia wdrażanie aplikacji na urządzeniach brzegowych. Obrazy te są przenośne i mogą działać na różnych platformach, dzięki czemu możliwe jest uruchamianie aplikacji w różnych środowiskach brzegowych. W przypadku układu monitorowania CMTK, aby móc korzystać z Dockera konieczne jest zainstalowanie dodatkowej karty MicroSD. Instalacja dodatkowych obrazów lub kontenerów odbywa się za pomocą hybrydowej platformy zarządzania kontenerami – Portainer dostępnej z poziomu aplikacji układu CMTK (Rys. 5.4)



Rys 5.4. Widok ekranu konfiguracyjnego aplikacji Portainer do konteneryzacji oprogramowania

W celu implementacji rozmytego klasyfikatora stanu w układzie monitorowania CMTK posłużono się językiem programowania Python. Skrypt realizujący opisany wcześniej rozmyty klasyfikator stanu został zainstalowany na karcie MicroSD w module CMTK i osadzony oraz uruchomiony w oprogramowaniu modułu za pomocą platformy Portainer. Opracowane oprogramowanie składało się z graficznego interfejsu użytkownika (rys. 5.5) pozwalającego na prezentację szeregów czasowych wartości parametrów diagnostycznych, wraz z ich trendami. Interfejs użytkownika umożliwiał sterowanie pobieraniem rysowanych danych za pomocą przycisków start/stop. Wartości parametrów wyświetlane na wykresach aktualizowano, co 5 sekund.



Rys 5.5. Widok interfejsu użytkownika aplikacji zaimplementowanej w module monitorowania stanu CMTK

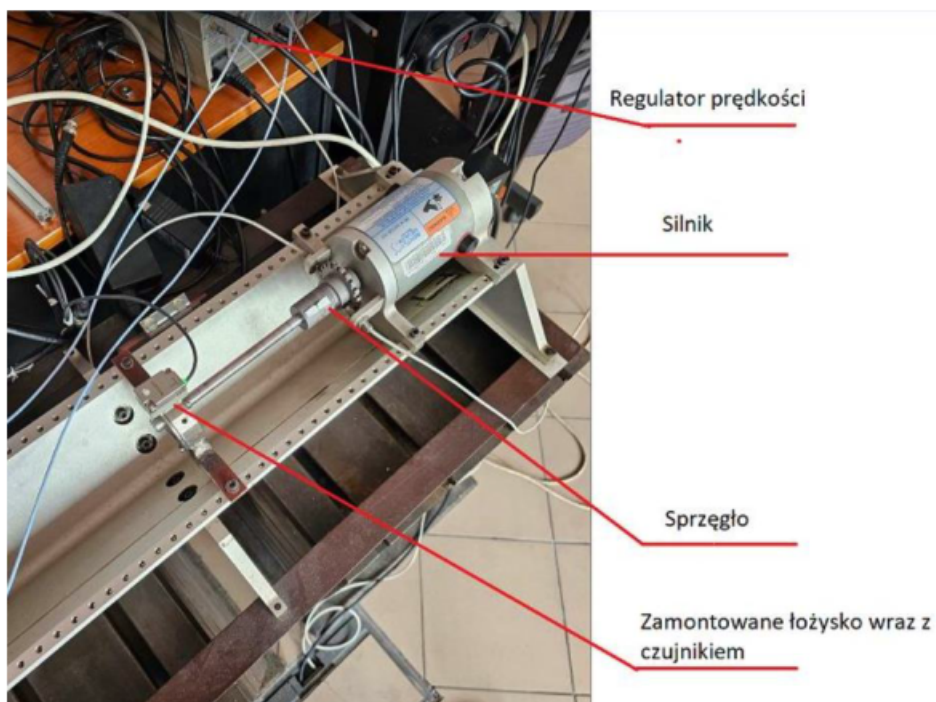
Opracowane oprogramowanie pozwalało na odczyt bezpośrednio z czujnika drgań BCM0002 wartości takich parametrów jak amplituda skuteczna przyspieszeń drgań (aRMS), amplituda szczytowa przyspieszeń drgań (aPeak), kurtoza (Kurt) oraz skośność (S). Zdecydowano, że parametry odczytywane będą tylko dla jednej osi pomiarowej. Na podstawie odczytywanych parametrów wartości szczytowej i skutecznej przyspieszeń drgań oraz zdefiniowanych parametrów referencyjnych oprogramowanie wyznaczało wskaźnik Sturma $K(t)$, którego wartości z kolei wykorzystywane były do obliczenia rozmytego wskaźnika stanu BCI wg wcześniej opisanej procedury.

Program został opracowany w taki sposób, aby oprócz wyświetlania wartości parametrów na wykresach, możliwe było również zapisywanie wartości do wbudowanej bazy danych w module monitorowania stanu CMTK. W celu implementacji zapisu do bazy danych wykorzystano bibliotekę influxdb, służącą do połączenia z bazą danych z poziomu opracowanego skryptu w języku Python. W bazie danych utworzono nowy rekord danych, zawierający nazwy pomiarów, tagi oraz pola zawierające wartości aPeak, aRMS, Kurt, S, $K(t)$, BCI.

Weryfikacja poprawności działania rozmytego klasyfikatora stanu

W celu weryfikacji poprawności działania opracowanego rozmytego klasyfikatora stanu łożyska zaplanowano i przeprowadzono czynny eksperyment diagnostyczny na stanowisku badawczym zlokalizowanym w Laboratorium Diagnostyki Technicznej Maszyn KPKM Politechniki Śląskiej. Stanowisko badawcze (rys. 5.6) składało się z modelu maszyny wirnikowej Bently Nevada RK 4 Rotor Kit, zaopatrzonego w oprawę łożyskową, która umożliwia montaż łożysk tocznych. Łożyska były osadzone na wale, który napędzany był przez silnik elektryczny z możliwością regulacji prędkości obrotowej. W skład stanowiska

badawczego wchodził również moduł monitorowania stanu CMTK z czujnikiem drgań BCM0002. W module CMTK zaimplementowano wcześniej opisaną aplikację pozwalającą wyznaczać parametry diagnostyczne do oceny stanu maszyn w tym rozmyty wskaźnik stanu łożyska BCI.



Rys 5.6. Stanowisko badawcze stosowane do weryfikacji poprawności działania rozmytego wskaźnika stanu łożysk

Badaniom poddano łożyska toczne kulkowe zwykłe 6303. Do badań przygotowano cztery łożyska nowe i trzy łożyska używane, w których celowo wprowadzono uszkodzenia mechaniczne symulujące pojedyncze uszkodzenie zmęczeniowe na bieżni wewnętrznej, zewnętrznej i na powierzchni elementu tocznego. Eksperyment polegał na pomiarach drgań łożysk podczas działania ze stałą prędkością obrotową wynoszącą 1500 obr/min. Pomiary drgań prowadzono przez okres czasu wynoszący 5 min. W pierwszym etapie badań wykonano pomiaru dla łożysk nowych, których stan sklasyfikowano jako dobry. W kolejnym etapie dokonano pomiaru dla łożysk z defektami a ich stan sklasyfikowano w następujący sposób:

- Uszk1 - łożysko z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną.
- Uszk2 - łożysko z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną.
- Uszk3 - łożysko z uszkodzonym elementem tocznym.

Do opisu stanu technicznego posłużono się parametrami diagnostycznymi wyznaczanymi przez oprogramowanie zaimplementowane w module monitorowania stanu CMTK. Wyznaczanymi parametrami były: aRMS, aPeak, Kurt, K(t) i BCI. Dane pomiarowe zapisane w bazie InfluxDB modułu monitorowania stanu CMTK zostały wyeksportowane do plików tekstowych w celu dalszych analiz.

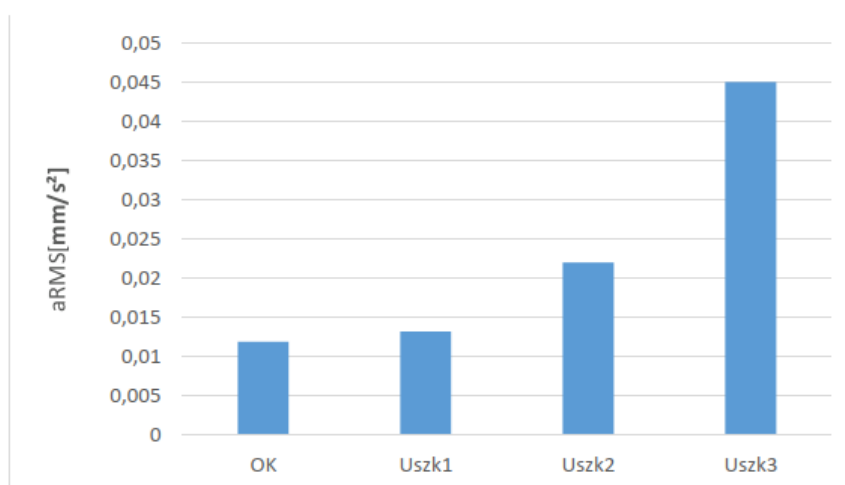
Wartości parametrów drganiowych dla sprawnych łożysk zaprezentowano w Tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Zestawienie wartości parametrów drganiowych wyznaczonych dla łożysk nowych

	łożysko1	łożysko2	łożysko3	łożysko4	Średnia	Odchylenie standardowe
aPeak	0,093	0,092	0,095	0,091	0,09275	0,00170
aRMS	0,0119	0,0121	0,0116	0,0123	0,01197	0,00029
Kurtoza	2,9674	2,9872	2,9724	2,9898	2,97910	0,01098
K(t)	0,8502	0,8518	0,8598	0,8472	0,85225	0,00538

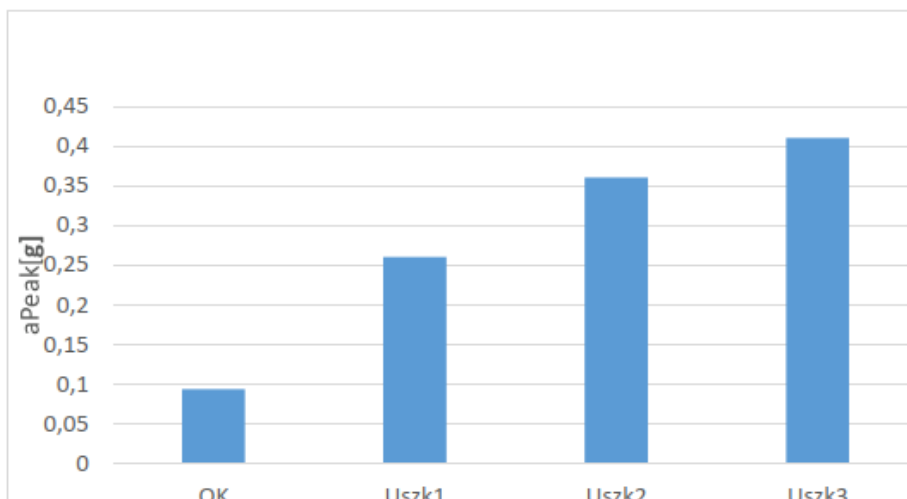
Wartości poszczególnych parametrów diagnostycznych, nie różniły się znacząco od siebie, co potwierdza wyznaczona wartość odchylenia standardowego. Największa zanotowana różnica pomiędzy łożyskiem nr 3 a łożyskiem nr 4 w przypadku wartości szczytowej przyspieszeń aPeak wynosiła 4,39%, natomiast dla wartości skutecznych przyspieszeń aRMS największa różnica wynosiła 6,03%. Uśrednione wartości parametrów diagnostycznych dla łożysk dobrych posłużyły jako wartości referencyjne do wyznaczanie współczynnika K(t) i do analizy porównawczej dla łożysk uszkodzonych .

Na rysunkach 5.7-5.11 przedstawiono porównanie wartości parametrów diagnostycznych wyznaczonych dla łożysk z uszkodzeniami i średniej wartości parametrów dla łożysk dobrych oznaczonych jako OK.



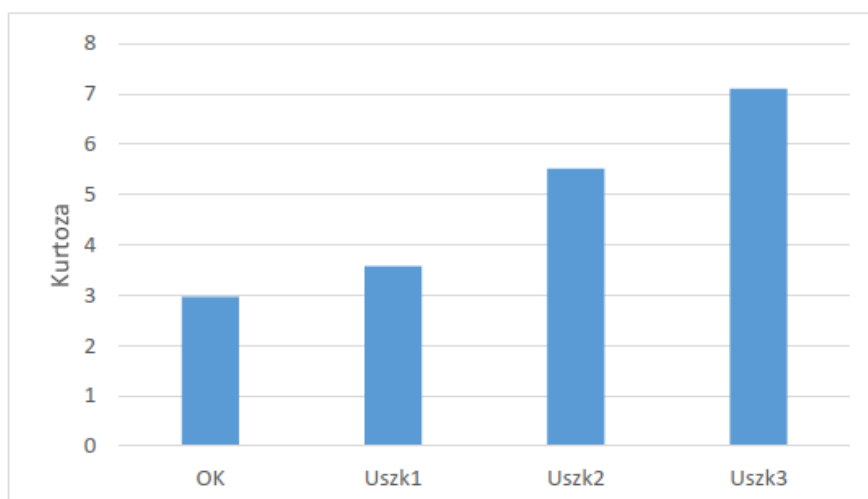
Rys 5.7. Porównanie wartości skutecznych przyspieszeń aRMS dla badanych łożysk

W przypadku wartości skutecznych przyspieszeń aRMS (rys. 5.7) najwyższą wartością cechuje się łożysko z uszkodzonym elementem tocznym, z kolei dwa pozostałe uszkodzenia posiadają znacznie niższe wartości aRMS, które w przypadku uszkodzenia bieżni zewnętrznej (Uszk1) są zbliżone do wartości parametru dla łożysk dobrych.



Rys 5.8. Porównanie wartości szczytowej przyspieszeń dla badanych łożysk

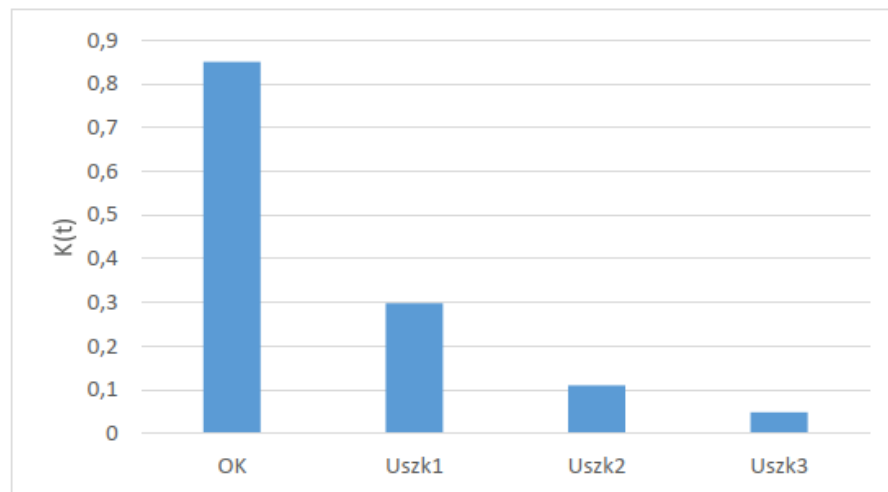
Porównanie wartości szczytowych przyspieszeń a_{Peak} (rys. 5.8) dla łożysk dobrych i uszkodzonych pokazują, że wartości parametru dla łożysk uszkodzonych odstają od wartości średniej parametru wyznaczonej dla łożysk dobrych. Różnica między wartością a_{Peak} dla łożyska z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną (Uszk1) a łożyskami dobrymi przekracza 150%. Dla łożyska z uszkodzeniem elementu tocznego (Uszk3) ponownie odnotowano najwyższą wartość parametru, lecz tym razem różnica pomiędzy łożyskiem z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną (Uszk2) a łożyskiem z uszkodzonym elementem tocznym (Uszk3) wynosiła 13,89%. Dla porównania w przypadku parametru a_{RMS} różnica ta wynosiła aż 104,55%.



Rys 5.9. Porównanie wartości Kurtozy dla badanych łożysk

Analiza wykresu wartości kurtozy (rys. 5.9) podobnie jak w przypadku wartości a_{RMS} pokazuje znaczne dysproporcje między stanem dobrym a uszkodzeniami Uszk2 i Uszk3. Wartości przekraczają, 5 co potwierdza istnienie uszkodzeń. W przypadku Uszk1 różnica między wartością kurtozy dla tego stanu

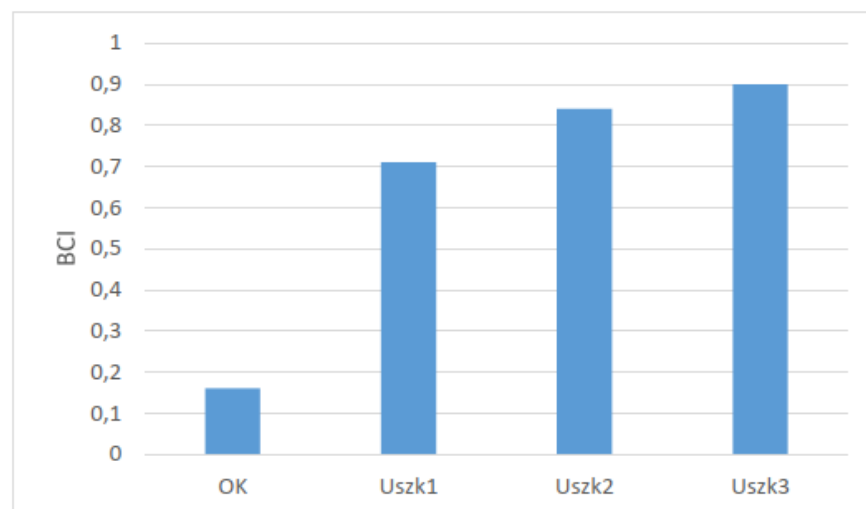
i stanu OK jest niewielka i wynosi 0,5 co powoduje, że uszkodzenie bieżni zewnętrznej (Uszk1) łatwo zaklasyfikować do stanu dobrego



Rys 5.10. Porównanie wartości współczynnika Sturma $K(t)$ dla badanych łożysk

Wartości wskaźnika diagnostycznego Sturma $K(t)$ zaprezentowane na rys. 5.10 zostały wyznaczone w odniesieniu do wartości średnich a_{RMS} i a_{Peak} dla łożysk dobrych. Porównując wyznaczone wartości z wartościami granicznymi z tabeli 5.1 można zaobserwować iż wszystkie uszkodzone łożyska można zaklasyfikować jako uszkodzone przy czym intensywność uszkodzenia jest zróżnicowana. Łożyska z uszkodzeniami Uszk2 i Uszk3 wg wskaźnika $K(t)$ należą do łożysk z zaawansowanym uszkodzeniem. Wartość wskaźnik $K(t)$ dla łożysko z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej Uszk1 wskazuje na postępujące uszkodzenie.

Ostatnim rozpatrywanym parametrem były wartości rozmytego klasyfikatora stanu łożysk BCI opracowanego na podstawie wartości kryterialnych dla współczynnika diagnostycznego Sturma $K(t)$. Wykres zawierający wartości klasyfikatora stanu BCI dla badanych łożysk przedstawiono na rysunku 5.11.



Rys 5.11. Porównanie wartości rozmytego wskaźnika stanu dla badanych łożysk

Patrząc na wyznaczone wartości rozmytego wskaźnika stanu można zaobserwować, że wszystkie łożyska z uszkodzeniami opisane były przez wysokie wartości wskaźnika BCI wynoszące od 0.71 (Uszk1) do 0.90 (Uszk3). Co można interpretować tak, że stopień zaawansowania uszkodzenia łożysk jest wysoki. Potwierdzeniem tego faktu może być porównanie wartości wskaźnika łożysk uszkodzonych z wartością wskaźnika dla łożysk sprawnych, która wynosiła niecałe 0,2.

5.5. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych prac zaprojektowano i korzystając z technologii konteneryzacji zaimplementowano w komercyjnym module monitorowania stanu CMTK rozmyty wskaźnik diagnostyczny, którego działanie zweryfikowano w ramach badań laboratoryjnych. Otrzymane wyniki potwierdziły poprawność implementacji klasycznych parametrów diagnostycznych oraz opracowanego na podstawie współczynnika Sturma rozmytego klasyfikatora stanu BCI. Sam współczynnik Sturma jest wskaźnikiem uszkodzenia łożyska zapewniającym dobrą wykrywalność uszkodzeń łożysk. Przy wykorzystaniu logi rozmytej udało się wypracować wskaźnik stanu, który odzwierciedla zarówno poprawne funkcjonowanie wskaźnika Sturma jak i niepewność w ocenie stanu wynikającą z nieprecyzyjnych granic wartości progowych dla $K(t)$ zaproponowanych w normie VDI 3832. Rozmyty wskaźnik Sturma jest doskonałym rozwiązaniem do budowy długoterminowych szeregów czasowych pozwalających na analizę trendu zmian stanu łożyska i tym samym predykcję zmian jego wartości oraz planowanie czynności remontowych. Jediną wadą wskaźnika Sturma jest konieczność wskazania wartości referencyjnych parametrów a_{RMS} i a_{Peak} dla łożyska nowego lub na początku jego eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Bessa M., Tsiourti C., Lazarakis F., Matthaiakis V., Atzori L., Iera A. Edge Computing in the Industrial Internet of Things” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 4, 2021
2. Cao K., Liu Y., Meng G. and Sun Q., An Overview on Edge Computing Research, in IEEE Access, vol. 8, pp. 85714-85728, 2020

3. Deore, K. S.; Khandekar, Mrs. M. A. Design Machine Condition Monitoring System for ISO 10816-3 Standard using Fuzzy Logic. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* 2015, 4(1), 726–729.
4. Fidali M. (red.), *Przewodnik po technologiach Przemysłu 4.0*. Elamed, Katowice 2021.
5. Fidali M., Szybkie tworzenie systemów ciągłego monitorowania dzięki technologii IO-Link. *Utrzymanie Ruchu* 4/2021
6. Fidali M., *Metody diagnostyki maszyn i urządzeń w predykcyjnym utrzymaniu ruchu*. Elamed, Katowice 2020.
7. Fidali M., Czujniki zintegrowane i inteligentne w diagnostyce drganiowej maszyn – cz. I, *Utrzymanie Ruchu* 4/2017.
8. Gandomi A.H., Zolfaghari S., Siahkamari A. Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings Using Deep Belief Networks and Edge Computing, *Measurement Science and Technology*. 26, 2019
9. Howard, I. (1994). A Review of rolling element bearing vibration "detection, diagnosis and prognosis". DSTO Aeronautical and Marine Research Laboratory
10. Khorasani, K., Kanellopoulos, I. (1998). Fuzzy modelling of rotating machinery for fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(2), 255-270.
11. Klimowski M. Diagnostyka łożysk tocznych silników elektrycznych przy wykorzystaniu metody analizy częstotliwościowej oraz metody detekcji obwiedni. *Zeszyty Problemowe–Maszyny Elektryczne* 2 (2014): 102.
12. Mathew, J., and Alfredson, R. J. (July 1, 1984). The Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Vibration Analysis. *ASME. J. Vib., Acoust., Stress, and Reliab.* July 1984
13. Norma ISO 15243:2017 Rolling bearings. Damage and failures. Terms, characteristics and causes.
14. Norma ISO 13373-3:2015 Condition monitoring and diagnostics of machines Vibration condition monitoring Part 3: Guidelines for vibration diagnosis
15. Norma VDI 3832:2013 Measurement of structure-borne sound of rolling element bearings in machines and plants for evaluation of condition.
16. Song, Y., Ni, J. Fuzzy Logic-Based Intelligent Fault Diagnosis for Rolling Bearings: A Review. *Journal of Control Science and Engineering*”, 2019
17. Strona internetowa, Condition Monitoring Toolkit (CMTK), <https://www.balluff.com/en-de/news/condition-monitoring-toolkit>. [Data uzyskania dostępu: 01.03.2024]
18. Strona internetowa producenta, <https://www.balluff.com/pl-pl/products/BAV002N> [Data uzyskania dostępu: 01.03.2024]
19. Strona internetowa producenta, <https://www.balluff.com/pl-pl/products/BCM0002> [Data uzyskania dostępu: 01.03.2024]
20. Zadeh, L. A. Is There a Need for Fuzzy Logic? *Information Sciences* 2008, 178 (13), 2751–2779. DOI: 10.1016/j.ins.2008.02.012.

Rozdział 6

SYSTEM ZDALNEGO STEROWANIA CHWYTAKIEM O CECHACH ANATOMICZNYCH LUDZKIEJ RĘKI

Pisula Kamil¹, Rzydzik Sebastian²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, kamipis017@student.polsl.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, sebastian.rzydzik@polsl.pl

6.1. Wstęp

Rozwój technologiczny przyczynia się do lepszego i bardziej komfortowego życia codziennego i pracy. Dzięki specjalnie zaprojektowanym protezom oraz różnego rodzaju chwytakom, które przypominają ludzkie ręce, można wykonywać czynności w środowiskach niesprzyjających człowiekowi lub innych wymagających zdalnego odwzorowania naturalnych ruchów ręki [1].

Przykładem takiego zastosowania jest medycyna, gdzie chwytaki mogą pomóc podczas operacji chirurgicznych w trakcie precyzyjnych czynności. W dodatku mają one różne kształty i rozmiary, które są dostosowane do wielu procedur oraz rodzajów tkanek. Niektóre chwytaki mają długie, cienkie końcówki, które umożliwiają chirurgom dotarcie do trudno dostępnych miejsc w organizmie pacjenta. Inne chwytaki mają szerokie, płaskie końcówki, które są odpowiednie do łapania dużych tkanek lub narządów. Większość z tych urządzeń jest wykonanych ze stali nierdzewnej, aby zapewnić bionutralność, trwałość mechaniczną i odporność na korozję. Niektóre modele mają powłokę z teflonu lub innych tworzyw, które dodatkowo zapobiegają uszkodzeniom tkanek podczas ich trzymania. Chwytaki są kontrolowane przez chirurga lub jego asystenta, który używa swoich rąk, aby uchwycić i przenieść tkanki lub narządy. W niektórych przypadkach te urządzenia są wyposażone w elektryczne lub pneumatyczne mechanizmy, które umożliwiają bardziej precyzyjne i kontrolowane ruchy.

Również w różnych gałęziach przemysłu możemy znaleźć zastosowania chwytaków. W przypadku procesu, w którym istnieje zagrożenie poparzenia rąk przez różnego rodzaju substancje możemy wykorzystać chwytaki, którymi człowiek z bezpiecznej odległości lub za osłoną, będzie sterował w równie efektywny, ale przy tym i bezpieczny sposób.

Urządzenia o kształtach przypominających ludzką rękę są obecne na rynku od dłuższego czasu, a w literaturze, artykułach naukowych czy forach internetowych można znaleźć wiele ciekawych inspiracji, które pomagają uniknąć podstawowych błędów w konstruowaniu tego typu chwytaków.

Chwytaaki o cechach anatomicznych mogą zostać także skonstruowane w taki sposób, aby symulować cechy geometryczne ręki poszkodowanej osoby pozbawionej palców, które zostały utracone wskutek nieszczęśliwego wypadku. Takie modele pomagają konstruktorom sprawdzić, czy budowane przez nich urządzenia mogą być obsługiwane przez osoby z takim rodzajem dysfunkcji.

W realizowanym projekcie wybór padł na chwytak zaciskowy, który będzie trzymał przedmiot za pomocą nacisku odpowiednich końcówek chwytanych [2]. Z racji że projekt odnosi się do chwytaków odwzorowujących cechy anatomiczne, to jego kształt powinien być zbliżony do ludzkiej ręki, czyli będzie wyposażony w pięć końcówek chwytanych, przypominających ludzkie palce. Przy takim wyborze układu wykonawczego, końcówki chwytne nie potrzebują dodatkowego zasilania, a uniwersalność chwytu będzie zbliżona do ludzkiej ręki.

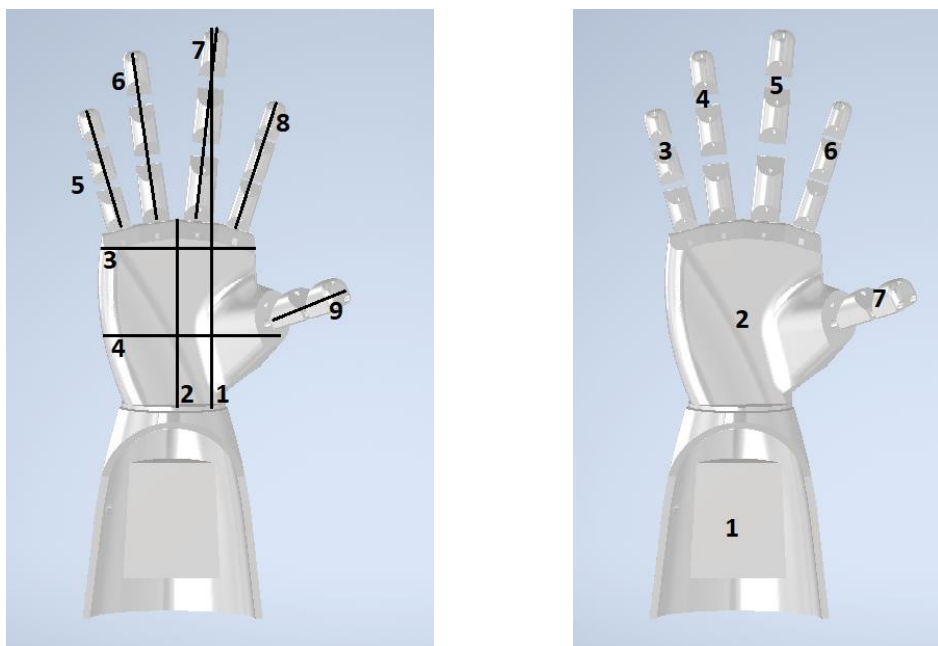
6.2. Model przestrzenny chwytaka

Ludzka ręka jest jednym z najbardziej złożonych i zróżnicowanych narządów w ciele człowieka zdolnym do precyzyjnej manipulacji i jest zbudowana z kości, stawów, mięśni i nerwów. Możemy wskazać następujące cechy anatomiczne ludzkiej ręki [3]:

- *liczba palców*: ręka składa się z pięciu palców, z których każdy jest unikalny i posiada specyficzne cechy,
- *unikalność budowy każdego z palców*: palce różnią się od siebie długością, szerokością, grubością i obwodem,
- *struktura kości*: budowa kości ręki obejmuje nadgarstek, kości śródrezcza oraz paliczki, czyli kości palców; duży palec składa się z dwóch paliczków, pozostałe cztery z trzech,
- *mięśnie*: ręka jest kontrolowana przez kilka mięśni, w tym mięsień serdeczny i mięsień promieniowy,
- *precyzja*: dzięki swojej złożonej budowie i zdolności do ruchu, ludzka ręka jest w stanie wykonywać bardzo precyzyjne ruchy i manipulować przedmiotami.

Utworzony model przestrzenny wzorowany jest na ręce statystycznego 50 centylowego mężczyzny (Rys. 6.1 i Tab. 6.1). Skupiono się na jak najdokładniejszym odwzorowaniu wymiarów ludzkiej ręki. W tym celu zamodelowano śródrezcze, do którego zostaną przyłączone wszystkie palce, uproszczoną część nadgarstkową razem z częścią przedramienia, gdzie przygotowano miejsce na montaż układów napędowych, oraz poszczególne paliczki palców, które po złożeniu dają nam pełny model danego palca. Podczas modelowania uwzględniano technologię w jakiej zostanie wyprodukowany model

fizyczny, tj. druk metodą FDM (ang. Fused Deposition Modeling), tworzywem PLA (polilaktyd) [4]. Każdy z elementów można swobodnie wydrukować na drukarce, a następnie zmontować w całość.



Rys. 6.1 Model przestrzenny ludzkiej ręki (1- przedramię, 2 - śródreczę, 3 - palec mały, 4 - palec serdeczny, 5 - palec środkowy, 6 - palec wskazujący, 7 - kciuk)

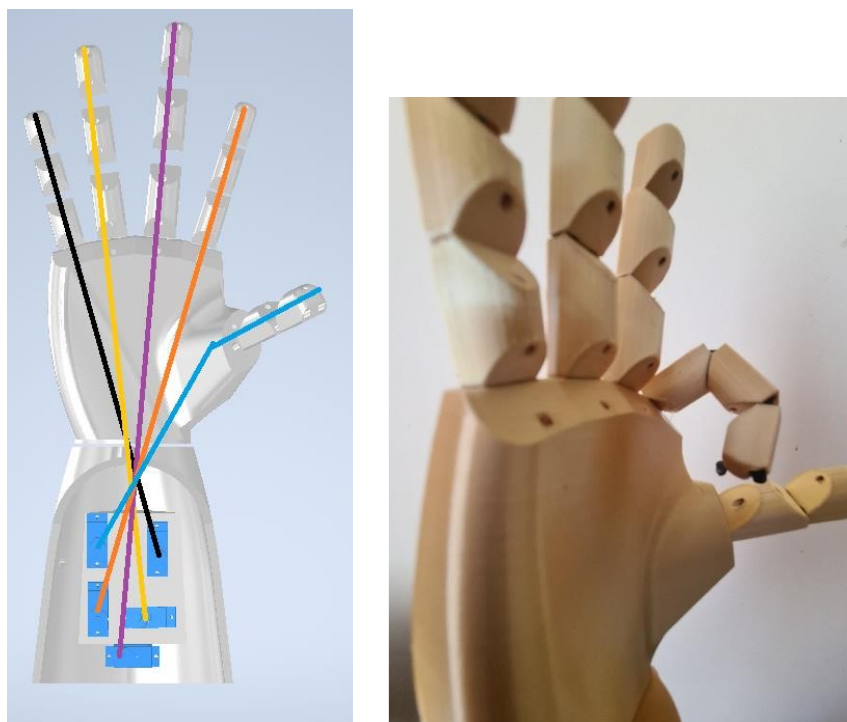
Tab. 6.1 Porównanie wymiarów modelu przestrzennego z wymiarami ręki 50c mężczyzny [3] (oznaczenia wymiarów są na Rys. 6.1)

<i>Id wymiaru</i>	<i>Wartość wymiaru odczytana z modelu [mm]</i>	<i>Wartość wymiaru odczytana z atlasu miar człowieka [mm]</i>
1	194,30	196
2	105,90	115
3	82,87	90
4	103,35	110
5	69,86	85
6	99,01	104
7	104,98	111
8	83,85	97
9	53,44	67

6.3. Układ napędowy

Układ napędowy zbudowano z cięgien i serwomechanizmów położenia, po jednym dla każdego z palców (Rys. 6.2). Użyto elastycznych linek, które zostały na jednym końcu przymocowane do orczyków serwomechanizmów, a na drugim

do czubka ostatniego paliczka. Linka jest prowadzona przez kolejne elementy (palczki) łańcucha kinematycznego danego palca. Ruch układu napędowego powoduje naprężenie linki, a to skutkuje ruchem palca. Ruch powrotny realizowany jest przez elastyczną linkę, która poprzez siłę sprężystości, spowoduje powrót palca do pozycji pionowej.



Rys. 6.2 Schemat układu napędowego i przykładowy ruch palców

Zastosowanie serwomechanizmów ma wiele plusów i jednym z istotniejszych jest precyzja, z którą można obrócić serwomechanizm do zadanej pozycji kątowej, oraz to, że do sterowania położeniem wystarczy użyć jednego przewodu sygnałowego. Serwomechanizmy zamontowano w części modelu znajdującej się pod nadgarstkiem, co pozwoliło je ukryć i zabezpieczyć przed przypadkowym dostępem. Ruch każdego palca odbywa się niezależnie.

6.4. System zdalnego sterowania

Metoda śledzenia ruchu ręki

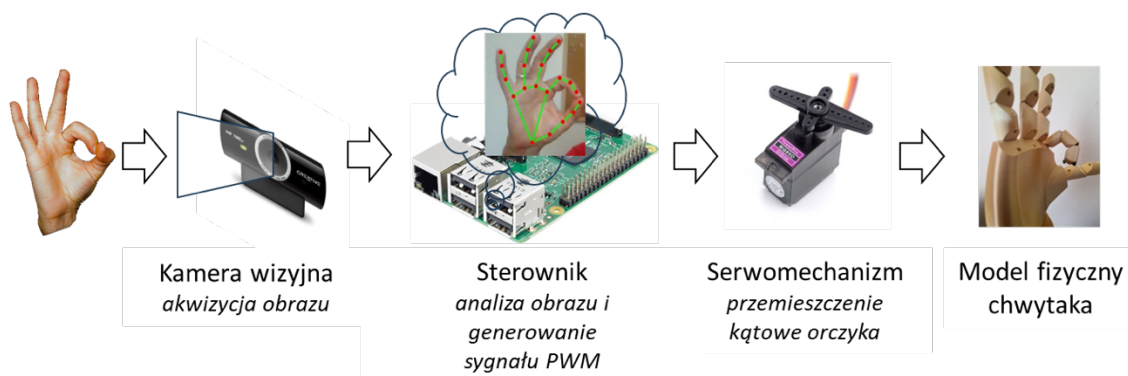
Przegląd różnych sposobów detekcji i pomiaru przestrzennego położenia palców ludzkiej ręki wykazał, że w przypadku realizowanego projektu najlepszą opcją będzie korzystanie z systemu wizyjnego oraz analizy obrazu na podstawie danych zarejestrowanych z kamery wizyjnej (Rys. 6.3). Wybrany sposób gwarantuje największą uniwersalność, ponieważ nie ma potrzeby wykorzystywania skomplikowanego układu czujników śledzących ruch.



Rys. 6.3 Przykład detekcji ruchu ręki za pomocą kamery wideo [5]

Elementy układu sterowania

Na Rys. 6.4 pokazano schemat systemu zdalnego sterowania. Można na nim wyróżnić: kamerę wizyjną, sterownik i serwomechanizmy.



Rys. 6.4 Schemat systemu zdalnego sterowania chwytakiem o cechach anatomicznych

Działanie systemu opiera się na analizie obrazu wideo, której celem jest detekcja ręki i obliczenie kątów ugięcia palców. Następnie, informacja ta jest konwertowana do wartości kąta obrotu jaki powinien wykonać orczyk serwomechanizmu, tak żeby odwzorować ten sam ruch na modelu fizycznym.

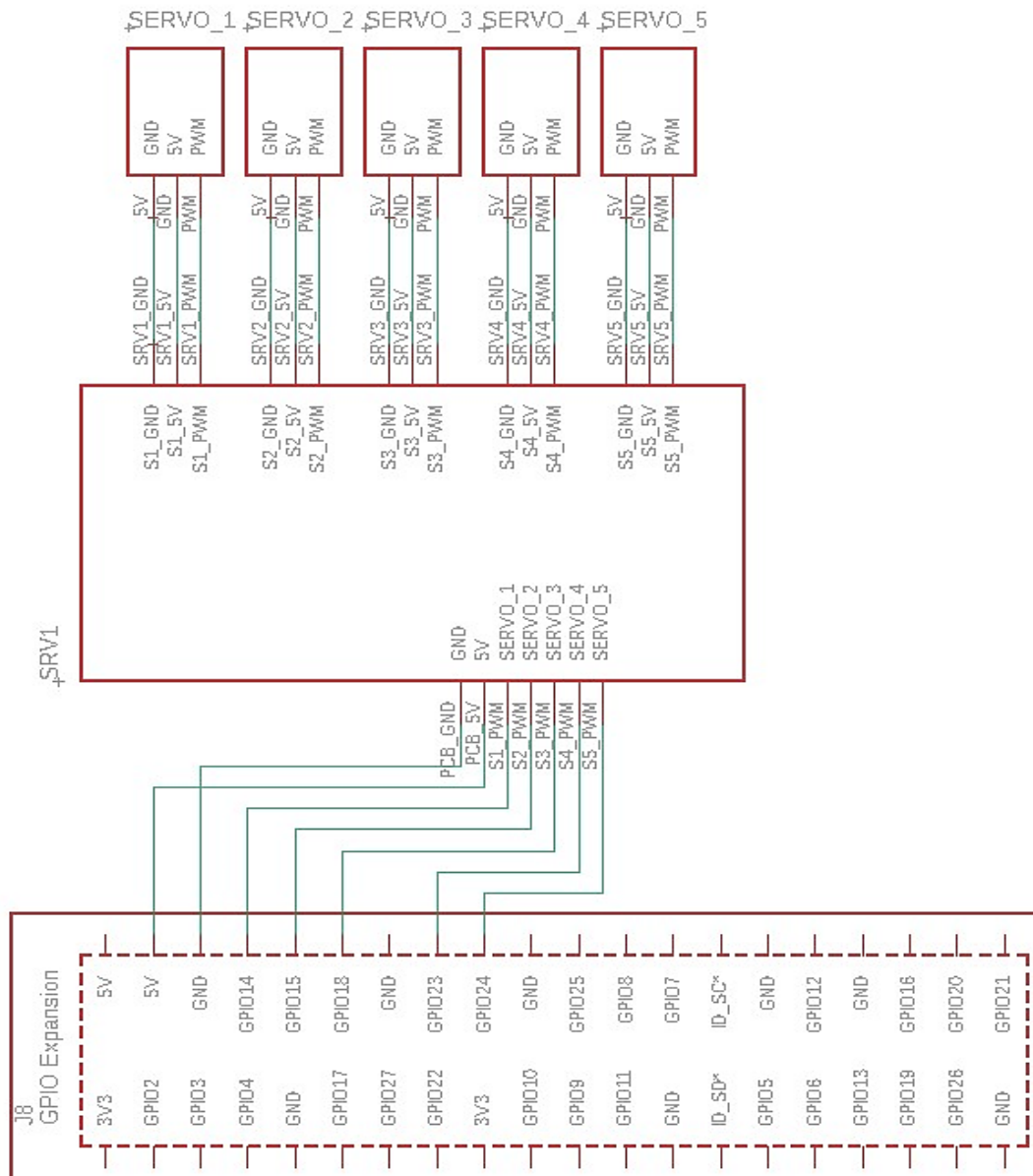
Układ sterowania zbudowano stosując następujące elementy:

- kamerę internetową Creative Live! Cam Sync HD (rozdzielczość 720p),
- sterownik Raspberry Pi 3 w wersji B (CPU Broadcom BCM2837, 1GB RAM),
- serwomechanizm położenia TowerPro MG90D (2.1kg/4.8V, 0.6sek/60°).

Zastosowany sterownik Raspberry Pi 3 w wersji B posiada wystarczającą moc obliczeniową do wykonywania ciągłej analizy obrazu wideo. Posiada on również złącza USB, które pozwalają na podłączenie do niego kamery oraz złącze HDMI, które pozwala na podłączenie monitora ekranowego. Dodatkowym atutem jest instalowany razem z systemem operacyjnym interpreter języka Python, w którym postanowiono utworzyć oprogramowanie.

Na Rys. 6.5 pokazano schemat ideowy układu elektronicznego. Serwomechanizmy zostały podłączone do specjalnej płytki drukowanej ze

złączami przystosowanymi do podłączenia takich elementów. Na płycie znajdują się również złącza ułatwiające podłączenie sterownika. Do sterowania używanych jest 5 wyjść sygnałowych sterowanych sygnałem PWM i linia zasilania 5V.

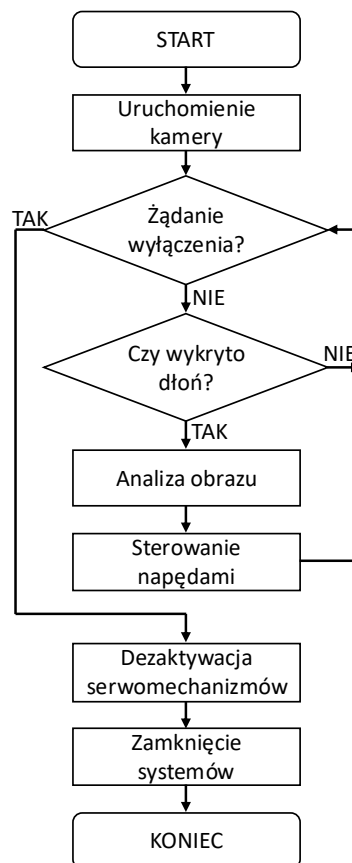


Rys. 6.5 Schemat ideowy układu elektronicznego

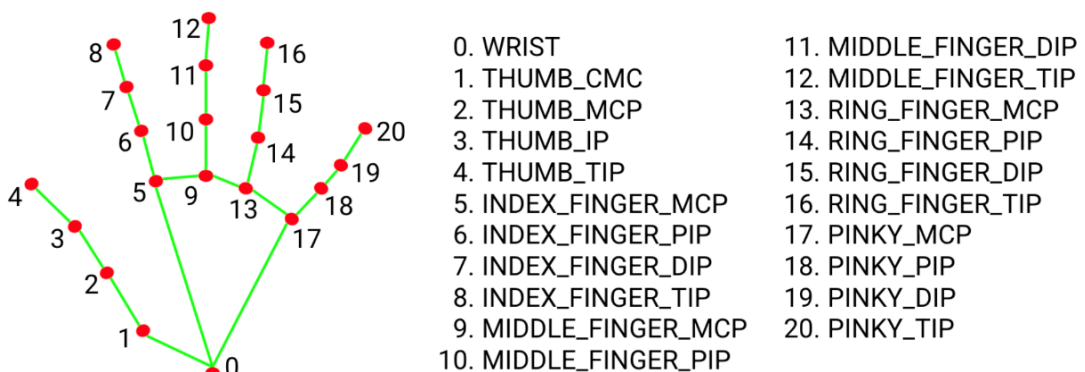
Algorytm programu sterownika

Algorytm programu sterownika pokazano na Rys. 6.6. Po uruchomieniu oprogramowania system nawiązywane jest połączenie z kamerą wizyjną, która w sposób ciągły wysyła do sterownika ramki obrazu, gdzie przesyłany strumień wideo jest poddawany analizie. Gdy analiza nie wykazuje detekcji ręki, to nie są uruchamiane żadne inne algorytmy obliczeniowe. W momencie wykrycia ręki dokonywana jest analiza jej charakterystycznych punktów (Rys. 6.7.) w celu określenia odkształceń kątowych poszczególnych palców. Następnie na podstawie tej analizy zmieniają się pozycje serwomechanizmów o odpowiedni kąt.

Detekcja oraz analiza położenia przestrzennego ręki na obrazie wizyjnym oparta jest na klasach i metodach dostępnych w bibliotekach MediaPipe [6]. Użycie modelu obliczeniowego HandLandmarker pozwala uzyskać tablicę z wartościami współrzędnych punktów charakterystycznych ręki. Na podstawie sąsiednich punktów charakterystycznych danego palca obliczane jest jego całkowite ugięcie wyrażone w procentach (0-100%). Ostatecznie wartość ta jest konwertowana i przekazywana, za pośrednictwem sygnału PWM, do serwomechanizmu powodując jego obrót do zadanej pozycji kątowej, tak żeby odwzorować rzeczywisty ruch danego palca.



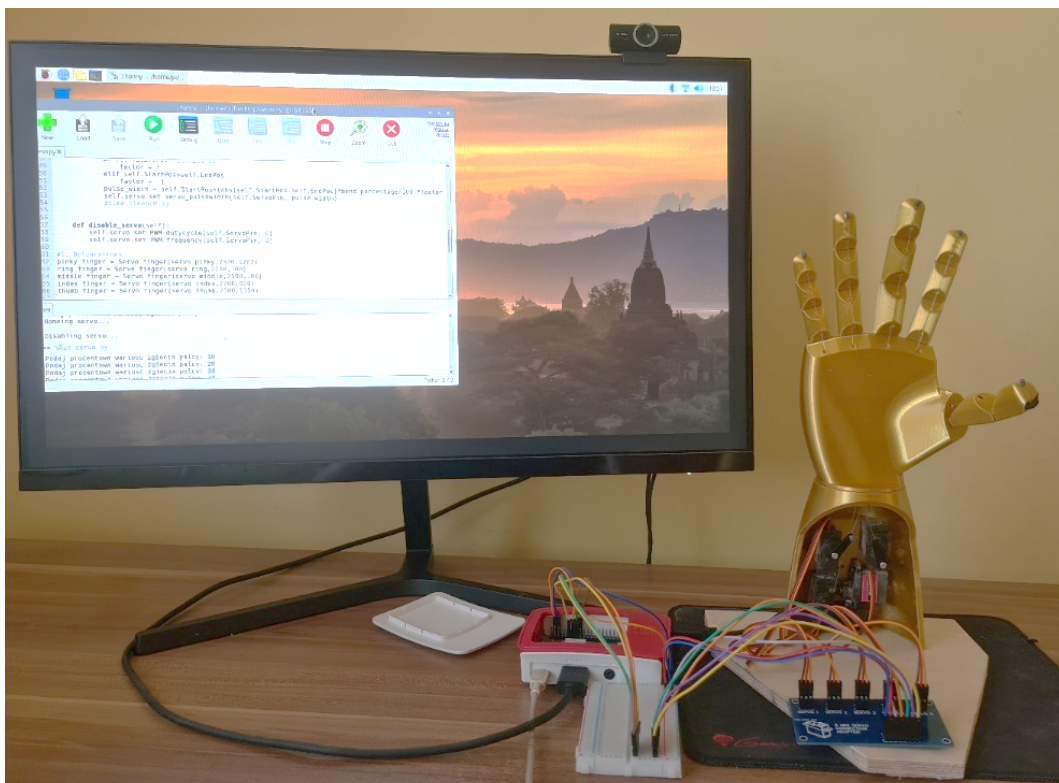
Rys. 6.6 Algorytm programu sterownika



Rys. 6.7 Charakterystyczne punkty ręki wyznaczone metodą HandLandmarker [6]

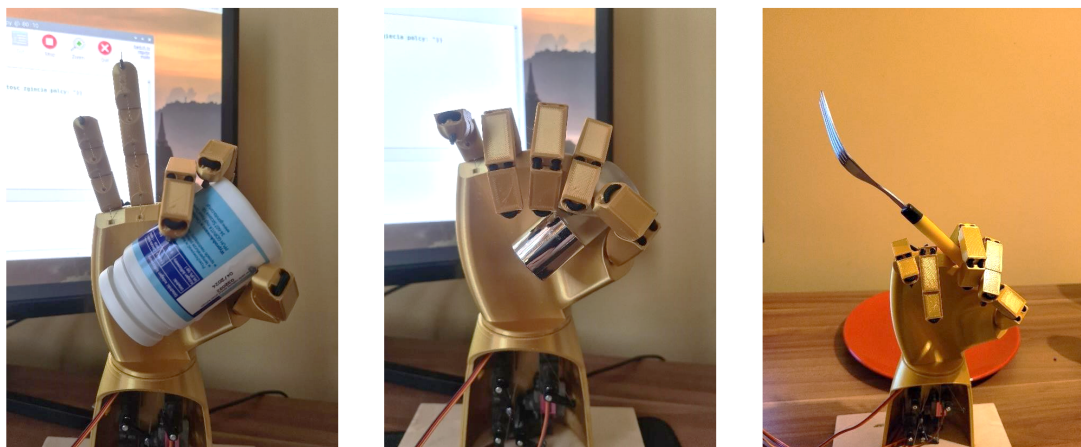
6.5. Testy opracowanego systemu

Testy weryfikacyjne wykonano na stanowisku pokazanym na Rys. 6.8 i podzielono je na 3 etapy.



Rys. 6.8 Stanowisko testowe

W pierwszym etapie sprawdzono poprawność odwzorowania wykonywanych ruchów i w miarę potrzeb dokonano strojenia parametrów sygnałów zadających położenie kątowe serwomechanizmów. W tym celu uruchomiono oprogramowanie, a następnie przed obiektywem kamery pokazywano różne ułożenia palców. W tym samym czasie obserwowano ułożenie chwytaka oraz oceniano poprawność odwzorowania ułożenia ręki obserwowanej przez kamerę.



Rys. 6.9 Test uchwycenia i trzymania różnych przedmiotów

W drugim etapie postanowiono przetestować możliwości chwytaka w przypadku chwytania różnych przedmiotów. W tym celu przetestowano, czy przedmioty: opakowanie po lekach, lakier do paznokci i widelec, zostaną poprawnie utrzymane przez chwytak. Wszystkie testy przebiegły pomyślnie, a ich przykładowe wyniki zostały pokazane na Rys. 6.9.

Ostatni, trzeci etap testów polegał na sprawdzeniu możliwości wykonania złożonej czynności manualnej. Postanowiono sprawdzić, czy za pomocą chwytaka i trzymanego widelca jest możliwe nabicia kawałka owocu. Test zakończył się sukcesem. Przykład realizacji tego testu pokazano na Rys. 6.10.



Rys. 6.10 Test złożonej czynności manualnej

6.6. Podsumowanie

Celem podjętych prac było zbudowanie systemu zdalnego sterowania chwytakiem o cechach anatomicznych zbliżonych do ludzkiej ręki. System stosuje ciągłą analizę obrazu wideo do ustalenia wychyleń kątowych palców. Do realizacji obliczeń użyto mikrokomputera Raspberry Pi 3 w wersji B. Opracowane w języku Python oprogramowanie współpracuje z modelem fizycznym chwytaka, wykonanym w technologii druku 3D.

Wszystkie cele określone w założeniach projektowych zostały zrealizowane. Testy podzielone zostały na kilka etapów i wszystkie z nich dały wynik pozytywny. Utworzone oprogramowanie pozwoliło na poprawne odwzorowanie ruchów ręki obserwowanej przez kamerę.

Podczas realizacji pracy pojawiło się wiele trudności, zarówno podczas rozwoju układu mechanicznego jak i podczas tworzenia oprogramowania. Wiele z nich rozwiązano na drodze wykonania prób praktycznych (np. problem doboru tworzywa cienien) lub zaznajomienie się z dokumentacją techniczną sprzętu oraz bibliotek użytych w trakcie pisania oprogramowania.

BIBLIOGRAFIA

1. Nowosadzki, Michał and Typiak, Andrzej and Muszyński, Tomasz. „Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych manipulatorów i głównych obszarów ich zastosowań”. In Biuletyn WAT, Volume: LXX, Nr 3, 2021.
2. Pisula, Kamil. „System zdalnego sterowania chwytakiem o cechach anatomicznych”, Praca Dyplomowa Magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2023.
3. Gedliczka, Adam (Red.). „Atlas miar człowieka, dane do projektowania i oceny stanowisk pracy”, CIOP, Warszawa, 2001.
4. Bernasconi, Roberto (Ed.). "3D Printing Technologies". MDPI Books, 2022.
5. Sagar Bounsley, R. and Thanuja, JC. "Gesture volume control using OpenCV". In International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. Volume: 04. Issue: 06. June, 2022.
6. MediaPipe. Hand landmarks detection guide.
https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker [Data uzyskania dostępu: 24.01.2024]

Rozdział 7

OPTYMALIZACJA AERODYNAMICZNA GONDOLI PODSKRZYDŁOWEJ

Rodak Bartosz¹, Skarka Wojciech²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, bartrod797@student.polsl.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, wojciech.skarka@polsl.pl

W artykule opisano metody tworzenia sparametryzowanej geometrii i przedstawiono modele CAD wykorzystane w badaniu. Opisano metody optymalizacji aerodynamicznej w kontekście optymalizacji kształtu. Przedstawiono problem optymalizacji kształtu wspornika gondoli pod skrzydłowej bezzałogowego statku powietrznego. Kompleksowo opisano metodologię badania zakładającą dwa procesy optymalizacji. Pierwszy zakłada optymalizację kształtu profilu, natomiast drugi zakłada optymalizację wysokości wspornika. Zastosowano dwie metody optymalizacji, a mianowicie metodę projektowania eksperymentów (ang. design of experiments) i metodę optymalizacji gradientowej. Porównano wyniki optymalizacji obu metod i wyciągnięto wnioski.

7.1. Wstęp

W dobie rosnącego zapotrzebowania na bezzałogowe statki powietrzne, optymalizacja ich struktury aerodynamicznej staje się kluczowym zagadnieniem badawczym. W celu zwiększenia efektywności i niezawodności działania tych urządzeń konieczne jest opracowanie skutecznej metodologii optymalizacji ich konstrukcji¹.

W niniejszej pracy omówiona zostanie koncepcja metodologii optymalizacji struktury aerodynamicznej bezzałogowych statków powietrznych. Zastosowanie tej metody pozwala na precyzyjne dostrojenie kształtu powierzchni do potrzeb konkretnego zastosowania, co prowadzi do poprawy właściwości aerodynamicznych i zwiększenia efektywności energetycznej.

Niepomijalną dziedziną, jeśli chodzi o dostosowywanie kształtu powierzchni, jest geometria parametryczna. Geometria parametryczna jest gałęzią matematyki, która zajmuje się opisywaniem i modelowaniem kształtów za pomocą funkcji matematycznych. W przeciwieństwie do tradycyjnej geometrii, w której figury są

opisywane przez stałe współrzędne, w geometrii parametrycznej figury są opisywane przez zmienne parametry. Geometria parametryczna jest szczególnie przydatna w dziedzinach takich jak projektowanie, inżynieria i grafika komputerowa, gdzie konieczne jest dokładne i precyzyjne modelowanie kształtów. W geometrii parametrycznej figury są opisywane przez funkcje, co ułatwia zmianę ich kształtu poprzez zmianę wartości parametrów. W konsekwencji, dzięki parametryzacji, algorytmy optymalizacyjne mogą być łatwo łączone z edycją geometrii².

W niniejszym artykule przedstawione zostaną teoretyczne podstawy metodologii optymalizacji i jej zastosowanie w praktyce, z uwzględnieniem różnych problemów, które mogą wystąpić podczas procesu optymalizacji.

7.2. Parametryzacja i geometria

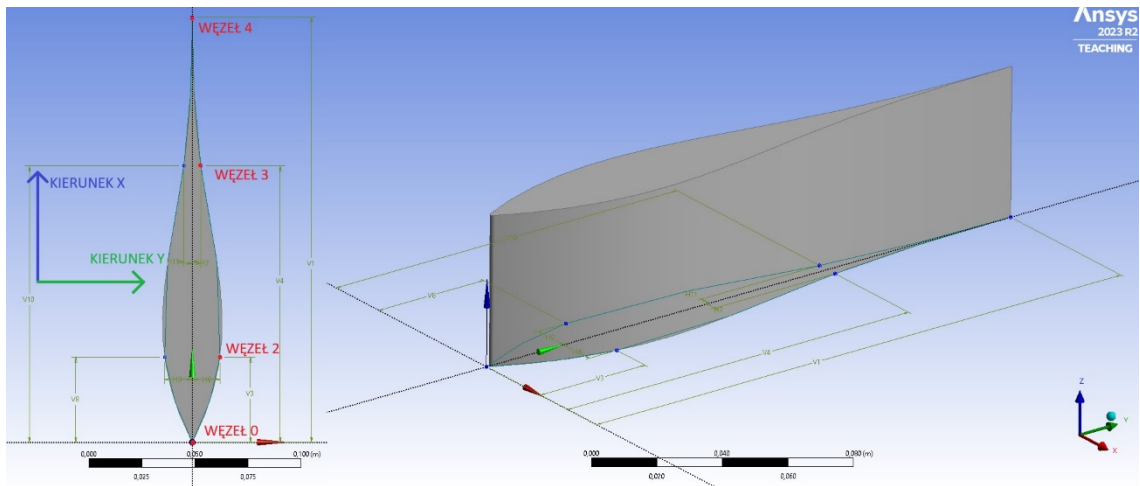
Geometria parametryczna umożliwia opisywanie i modelowanie kształtów za pomocą funkcji matematycznych. W problemach optymalizacyjnych funkcje te są używane do opisanego wielu zmiennych, które mogą mieć wpływ na końcowy wynik. W ten sposób łatwo jest zmienić wartość zmiennych i określić najlepsze rozwiązanie dla danego problemu. Biorąc to pod uwagę, wygenerowanie w pełni sparametryzowanego modelu geometrycznego jest kluczowe dla problemu optymalizacji.

Jednym z głównych narzędzi geometrii parametrycznej jest równanie krzywej. Krzywa jest opisana równaniem parametrycznym, które definiuje położenie punktu na krzywej w zależności od wartości parametru. Możliwe jest również tworzenie brył przy użyciu równań krzywych w celu modelowania bardziej złożonych kształtów.

Liniowy splajn zostanie wykorzystany do rozwiązania problemu optymalizacji przy użyciu metody projektowania eksperymentów (DOE), która zostanie szczegółowo opisana w dalszej części artykułu³.

7.3. Modele CAD

Stworzono model CAD połączenia pomiędzy skrzydłem a gondolą. Oddzielnie - model samego elementu łączącego oraz model całości ze skrzydłem i gondolą w celu uproszczenia symulacji i późniejszej weryfikacji całej konstrukcji. Element łączący pokazano na rysunku 7.1 a, natomiast współrzędne węzłów jego szkicu oraz promień zaokrąglonej krawędzi natarcia pokazano na rysunku 7.1 b.

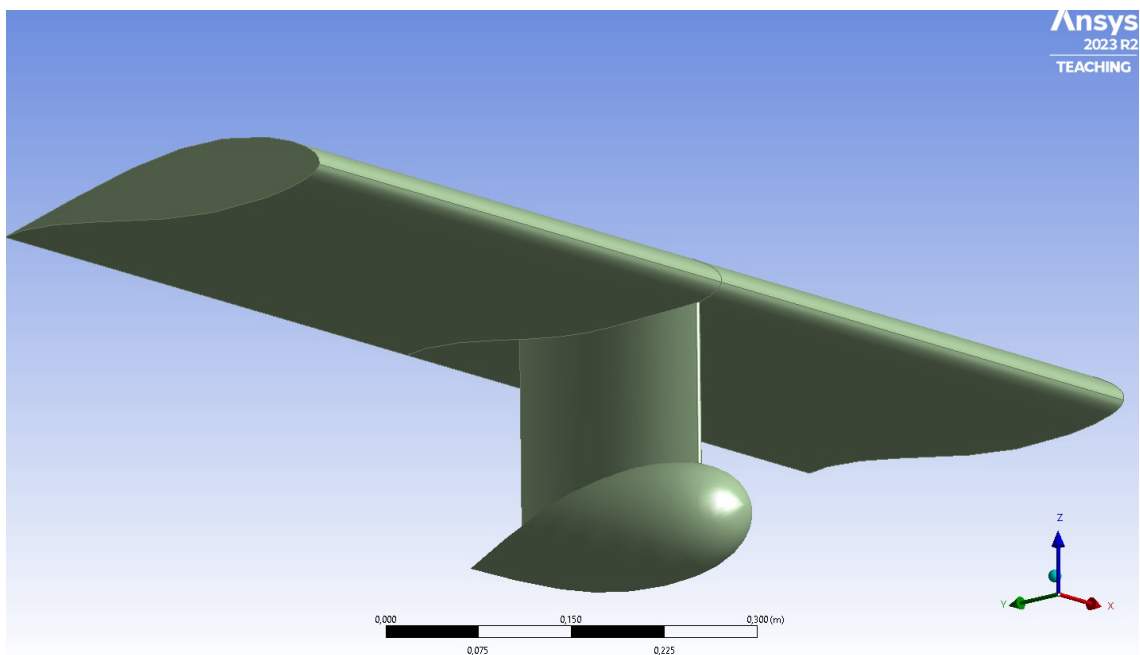


Rys. 7.1 (a) element łączący; (b) współrzędne węzłów jego szkicu i promień zaokrąglenia krawędzi natarcia

Współrzędne węzłów szkicu są parametrami wejściowymi w geometrii parametrycznej. Liniowy splajn jest oparty na tych węzłach. Parametryzując węzły szkicu, można dowolnie modyfikować kształt krzywej splajn.

W oddzielnej symulacji dla optymalnej wysokości elementu łączącego, parametrem wejściowym będzie wysokość elementu łączącego. W tej symulacji zostanie przeprowadzona analiza całej konstrukcji w celu określenia optymalnej długości elementu łączącego między skrzydłem a gondolą.

Taka procedura pozwoli zaoszczędzić czas i zasoby mocy obliczeniowej. Rysunek 7.2 przedstawia model CAD całej konstrukcji. Zakłada się, że kształt i rozmiar skrzydła i gondoli są stałe. Gondola jest symetryczna w każdej osi.



Rys. 7.2 Model CAD całej konstrukcji skrzydła, gondoli oraz łącznika

7.4. Metody optymalizacji aerodynamicznej

Optymalizacja aerodynamiczna to proces znajdowania kształtu obiektu, który zapewnia minimalny opór aerodynamiczny. Opór aerodynamiczny to siła, która przeciwstawia się ruchowi obiektu w powietrzu. Im niższy opór aerodynamiczny, tym szybciej i wydajniej obiekt może się poruszać. W tym przypadku zastosowano metodę elementów skończonych w środowisku ANSYS Fluent w połączeniu z modulem optymalizacji. Zastosowane metody to design of experiments oraz metoda gradientowa.

7.5. Optymalizacja profilu łącznika metodą design of experiments

Pełną symulację aerodynamiczną elementu łączącego skrzydło z gondolą przeprowadzono w środowisku ANSYS Fluent. Wymiary poszczególnych punktów i ich dopuszczalne wartości w module projektowania eksperymentów przedstawiono w tabeli 7.1. Zamiast pierwszego punktu zastosowano zaokrąglenie na krawędzi natarcia o promieniu będącym parametrem wejściowym. Wysokość elementu łączącego w tym teście ustalono na 50 mm, zaś prędkość powietrza ustawiono na 30 m/s.

Tabela 7.1. Wymiary węzłów oraz ich graniczne wartości

Węzeł	Kierunek	Wymiar nominalny	Wymiar maksymalny	Wymiar minimalny
0	X	0	0	0
0	Y	0	0	0
2	X	40 mm	36 mm	44 mm
2	Y	13 mm	11,7 mm	14,3 mm
3	X	130 mm	117 mm	143 mm
3	Y	4 mm	3,6 mm	4,4 mm
4	X	200 mm	180 mm	220 mm
4	Y	0	0	0
Zaokrąglenie		1mm	0,5mm	8mm

Po przeprowadzeniu symulacji obliczono, że opór aerodynamiczny dla geometrii wejściowej wynosi 0,0681 N. Po przeprowadzeniu symulacji elementu łączącego z geometrią bazową przystąpiono do procesu optymalizacji. Pierwszym krokiem w optymalizacji przy użyciu metody projektowania eksperymentów jest utworzenie planu optymalizacji w oparciu o parametry wejściowe. Plan eksperymentu został utworzony w module projektowania eksperymentów w oprogramowaniu ANSYS. Uwzględniono maksymalne i minimalne wartości współrzędnych każdego węzła splajnu, czyli parametry wejściowe. Plan

eksperymentu miał na celu uzyskanie maksymalnej entropii dla parametrów wejściowych. Dla każdego eksperymentu przeprowadzono identyczną symulację jak dla geometrii bazowej.

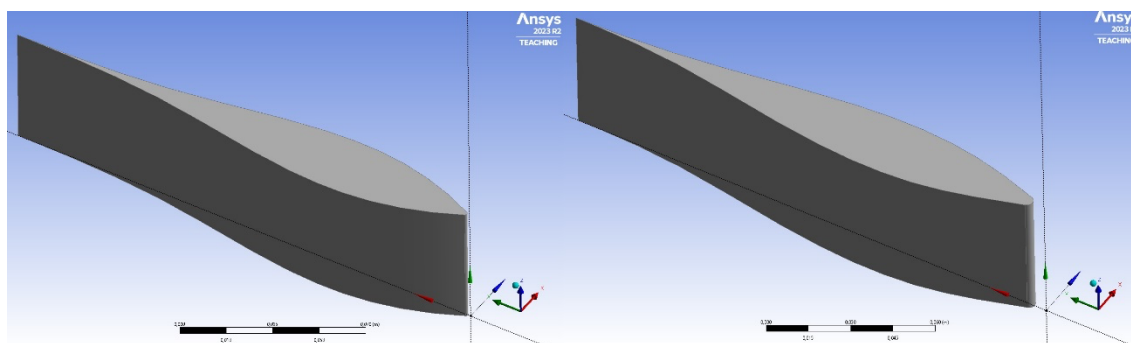
Tabela 7.2 poniżej pokazuje, które parametry wejściowe dały najlepszy wynik pod względem najmniejszej wartości parametru wyjściowego, czyli oporu aerodynamicznego.

Tabela 7.2 Wymiary węzłów przed i po optymalizacji

Węzeł	Kierunek	Wymiar nominalny	Wymiar zoptymalizowany
0	X	0	0
0	Y	0	0
2	X	40 mm	43,7 mm
2	Y	13 mm	11,8 mm
3	X	130 mm	140,5 mm
3	Y	4 mm	3,7 mm
4	X	200 mm	194,2 mm
4	Y	0	0
Zaokrąglenie		1 mm	2,3 mm

Nowa geometria osiągnęła opór aerodynamiczny na poziomie 0,0617 N. Oznacza to spadek o 9,39% w porównaniu z modelem początkowym.

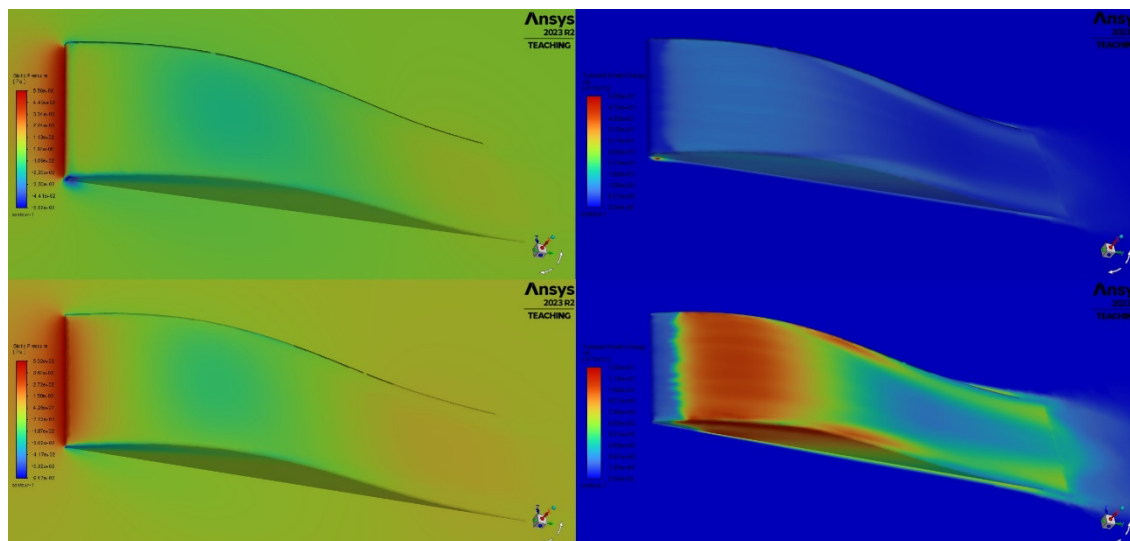
Poniżej przedstawiono różnice między modelami wejściowym i wyjściowym. Porównując geometrię wejściową z geometrią wyjściową, na rysunku 7.3 widać, że geometria wyjściowa ma znacznie smuklejszy profil i bardziej zaokrągloną krawędź natarcia. Również w tabeli 2 powyżej można zauważyć, że węzeł numer dwa jest umieszczony bliżej osi symetrii i przesunięty bardziej w kierunku krawędzi spływu, dzięki czemu element łączący jest smuklejszy, a tym samym bardziej aerodynamiczny.



Rys. 7.3 Porównanie geometrii wejściowej i wyjściowej (od lewej)

Jeśli chodzi o rozkład ciśnienia w osi symetrii, rysunek 7.4 a pokazuje, jaki wpływ ma zaokrąglenie krawędzi natarcia na ciśnienie generowane przed elementem łączącym.

Analizując przepływy turbulentyne na rysunku 7.4 b, można zauważyć, że ze względu na bardziej smukłą sylwetkę i zaokrąglenie krawędzi natarcia, turbulencje zostały znacznie zmniejszone na powierzchni łączącej gondolę ze skrzydłem.



Rys. 7.4 (a) Porównanie rozkładu ciśnienia na elemencie i na płaszczyźnie symetrii (od góry: zoptymalizowany, początkowy); (b) porównanie wizualizacji przepływów turbulentych na powierzchni sprzęgającej (od góry: zoptymalizowany, początkowy)

7.6. Optymalizacja profilu łącznika metodą gradientową

Model CAD, siatka MES, warunki brzegowe, ustawienia solvera testowanej geometrii są takie same jak w przypadku optymalizacji metodą DoE opisaną w rozdziale 7.5.

Adaptive single Objective to algorytm oparty na gradientach, który zapewnia ulepszony wynik optymalizacji globalnej. Obsługuje pojedynczy cel, wiele ograniczeń i ma na celu znalezienie globalnego optimum. Jest ona ograniczona do ciągłych i możliwych do uzyskania parametrów wejściowych. W praktyce oznacza to, że program generuje dwadzieścia początkowych eksperymentów, rozwiązuje je, a następnie, w oparciu o zasady optymalizacji gradientowej, tworzy kolejne punkty zgodnie z kierunkiem $d^{(i)}$ i krokiem $h^{(i)}$. Łącznie przeprowadzono sto czterdzieści eksperymentów. Dla każdego eksperymentu przeprowadzono identyczną symulację.

Tabela 7.3 poniżej przedstawia wymiary dające najniższy opór aerodynamiczny znaleziony przy użyciu optymalizacji gradientowej.

Tabela 7.3 Wymiary węzłów przed i po optymalizacji

Węzeł	Kierunek	Wymiar nominalny	Wymiar zoptymalizowany
0	X	0	0
0	Y	0	0
2	X	40mm	43,6mm
2	Y	13mm	11,8mm
3	X	130mm	125,5mm
3	Y	4mm	4,4mm
4	X	200mm	186,7mm
4	Y	0	0
Zaokrąglenie		1mm	1,2mm

Nowa geometria osiągnęła opór aerodynamiczny na poziomie 0,06038N. To o 2,88% mniej niż geometria uzyskana przy użyciu optymalizacji DoE.

7.7. Porównanie obu metod optymalizacyjnych

Optymalizacja przy użyciu metody DoE zmniejszyła opór aerodynamiczny o 9,39%, podczas gdy optymalizacja przy użyciu metody gradientowej zmniejszyła opór aerodynamiczny o 12,27%. Metoda DoE ma tę zaletę, że dostarcza obszernych informacji o tym, jaki parametr wejściowy ma wpływ na parametr wyjściowy, dzięki czemu można oszacować, w jaki sposób zmiana parametru wejściowego wpłynie na wynik. W tabeli 7.4 poniżej można zobaczyć, jakie parametry zostały uzyskane obiema metodami. Rysunek 7.5 przedstawia różnice w sposobie, w jaki obie metody przeszukiwały zakres wartości parametrów wejściowych. Metoda DoE równomiernie przeszukiwała cały zakres parametrów, podczas gdy algorytm gradientowy z czasem zagęszczał poszukiwania coraz bliżej optimum.

Tabela 7.4 Porównanie współrzędnych węzłów uzyskanych za pomocą obu metod optymalizacyjnych

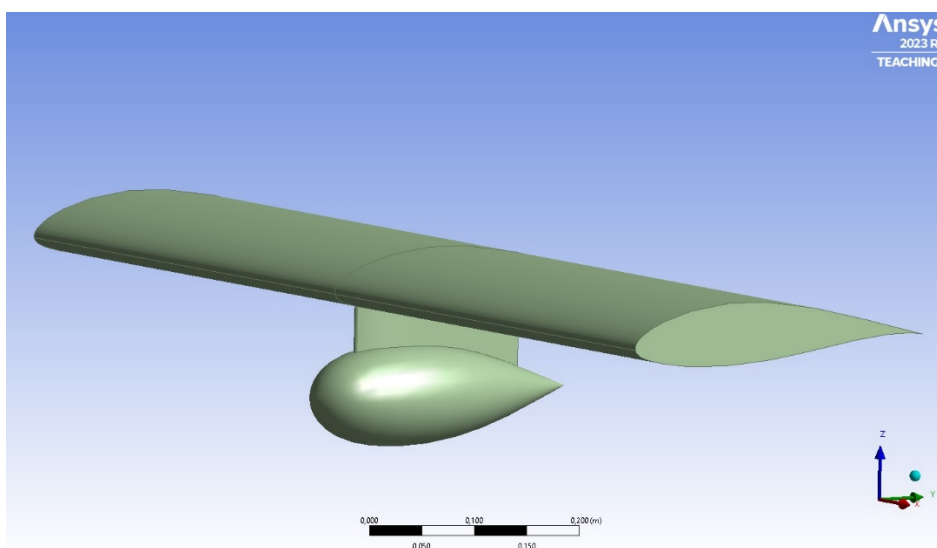
Węzeł	Kierunek	Wymiar uzyskany metodą DoE	Wymiar uzyskany metodą gradientową
0	X	0	0
0	Y	0	0
2	X	43,7 mm	43,6 mm
2	Y	11,8 mm	11,8 mm
3	X	140,5 mm	125,5 mm
3	Y	3,7 mm	4,4 mm
4	X	194,2 mm	186,7 mm
4	Y	0	0
Zaokrąglenie		2,4 mm	1,2mm

1		Enabled	Monitoring	1		Enabled	Monitoring
2	Optimization			2	Optimization		
3	Objectives and Constraints			3	Objectives and Constraints		
4	Minimize P9			4	Minimize P9		
5	Domain			5	Domain		
6	Fluid Flow (Fluent) (A1)			6	Fluid Flow (Fluent) (A1)		
7	P4 - P3_X	<input checked="" type="checkbox"/>		7	P4 - P3_X	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	P5 - P4_X	<input checked="" type="checkbox"/>		8	P5 - P4_X	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	P7 - P2_Y	<input checked="" type="checkbox"/>		9	P7 - P2_Y	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	P8 - P3_Y	<input checked="" type="checkbox"/>		10	P8 - P3_Y	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	P14 - P2_X	<input checked="" type="checkbox"/>		11	P14 - P2_X	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	P16 - zaokrąglenie	<input checked="" type="checkbox"/>		12	P16 - zaokrąglenie	<input checked="" type="checkbox"/>	

Rys. 7.5 Sposób poszukiwania optimum (od lewej: metoda DoE, metoda gradientowa)

7.8. Optymalizacja wysokości łącznika gondoli ze skrzydłem

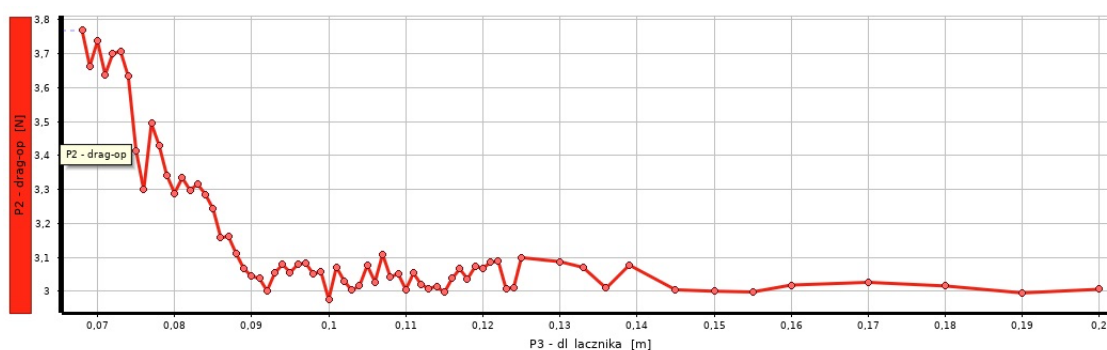
Przeprowadzono pełną symulację aerodynamiczną całego systemu zawierającego skrzydło, gondolę i zoptymalizowany element łączący. Parametrem wejściowym była odległość między cięciwą skrzydła a geometrycznym środkiem gondoli. Parametrem wyjściowym jest opór aerodynamiczny generowany przez całą strukturę. Model skrzydła został utworzony na znormalizowanym profilu NACA 633-618. Rozpiętość skrzydła dla symulacji wynosi 1m. Model gondoli pomiarowej został stworzony na podstawie symetrycznego profilu NACA EPPLER 863 STRUT 9. Model elementu łączącego jest zoptymalizowaną wersją elementu łączącego z poprzedniego rozdziału. Cała konstrukcja jest pokazana na rysunku 7.6. Ustawienia solwera są identyczne z ustawieniami dla symulacji podczas optymalizacji kształtu elementu łączącego.



Rys. 7.6 Model użyty w optymalizacji wysokości łącznika

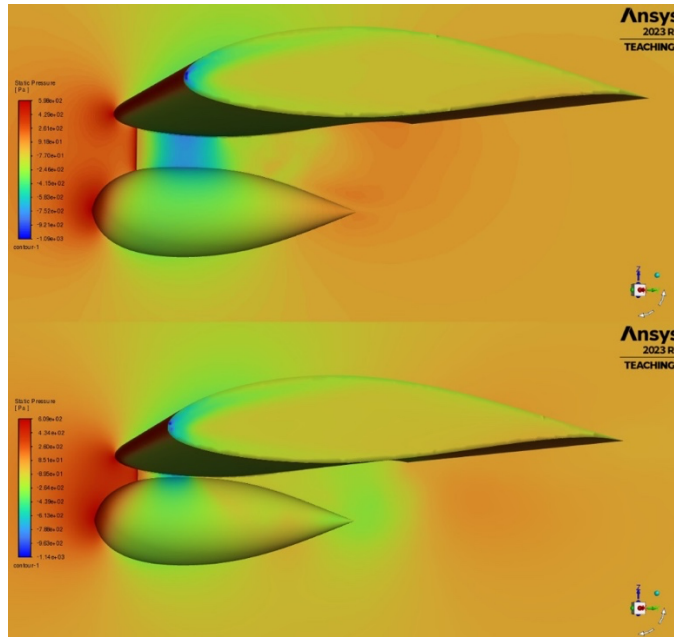
Optymalizacja została przeprowadzona przy użyciu metody DoE ze względu na fakt, że metoda ta daje więcej informacji o przebiegu procesu optymalizacji.

Proces optymalizacji dowiódł, że największy opór aerodynamiczny stawia konstrukcja z gondolą bardzo blisko skrzydła. Przy odległościach od 1 mm do 7 mm między powierzchniami gondoli i skrzydła opór aerodynamiczny wynosił około 3,7 N. Wyraźny spadek generowanego oporu aerodynamicznego można zaobserwować przy odległości powyżej 8 mm między powierzchniami gondoli i skrzydła, czyli gdy długość elementu łączącego liczona od cięciwy skrzydła do płaszczyzny konstrukcyjnej gondoli wynosiła 75 mm. Najniższy opór wykazał model geometrii z długością elementu łączącego od około 90 mm, podczas gdy minimalny opór 2,96 N uzyskano przy długości elementu łączącego 100 mm. Odpowiada to odległościom pomiędzy powierzchnią gondoli a powierzchnią skrzydła wynoszącym odpowiednio 23 mm i 33 mm. Poniżej przedstawiono wykres (Rysunek 7.7) pokazujący, jak długość elementu łączącego wpływa na generowany opór aerodynamiczny

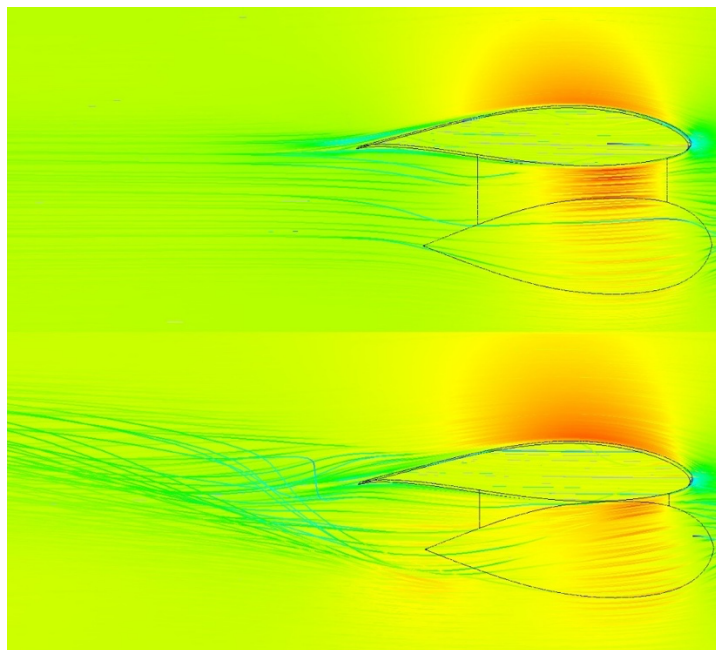


Rys. 7.7 Zależność pomiędzy wysokością łącznika a oporem aerodynamicznym

Analizując rozkład ciśnień na powierzchniach elementów i w płaszczyźnie symetrii, jak na rysunku 7.8, potwierdzono przypuszczenie o układzie niskiego ciśnienia generowanego za gondolą. Niskie ciśnienie powietrza w obszarze za gondolą skutecznie zwiększa opór aerodynamiczny generowany przez konstrukcję. Patrząc na porównanie przepływu powietrza na rysunku 7.9, zauważono, że gdy gondola znajduje się blisko skrzydła, generowane są znaczne turbulencje powietrza i turbulencje za gondolą.



Rys. 7.8 Porównanie rozkładu ciśnień na elementach oraz w płaszczyźnie symetri (od góry: optymalna, nieoptymalna)



Rys. 7.9 Porównanie wizualizacji strug powietrza ubarwionych w zależności od ich prędkości (od góry: optymalna, nieoptymalna)

Prowadzi to do wniosku, że aby nie tworzyły się turbulencje powietrza za obiektem, gondola powinna być odsunięta od skrzydła w celu oddzielenia prądów powietrza.

7.9. Podsumowanie i wnioski

Optymalizacja metodą DoE jest stosunkowo prosta do przeprowadzenia i daje odpowiedź na pytanie, jakie parametry wejściowe mają największy wpływ na wynik eksperymentu.

Optymalizacja kształtu metodą DoE zaowocowała zmniejszeniem oporu aerodynamicznego o 9,39% względem geometrii wejściowej. Geometria w wyniku optymalizacji uległa znacznemu wysmukleniu, co zmniejszyło generowany opór aerodynamiczny. Największy wpływ na zmniejszenie oporu ma parametr opisujący położenie drugiego węzła w osi Y. Dzięki temu parametrowi element zyskuje na smukłości. Zwiększenie smukłości miało również pozytywny wpływ na przepływy turbulentyne i zawirowania powietrza

Optymalizacja wysokości elementu łączącego wykazała, że osadzenie gondoli jak najbliżej skrzydła nie daje najlepszych rezultatów. Wraz ze wzrostem długości elementu łączącego wartość oporu spada, aż do 2,96 N przy 100 mm długości elementu łączącego, co odpowiada odległości 33 mm między powierzchnią gondoli a powierzchnią skrzydła. Dalsze wydłużanie elementu łączącego nie powoduje zmniejszenia oporu aerodynamicznego. Wynika to z generowanych turbulencji, zawirowań i przepływu wstecznego za gondolą przy małych odległościach między skrzydłem a gondolą. Ze względu na wyżej wymienione czynniki, przy małych odległościach między gondolą a skrzydłem, za gondolą występuje obszar niskiego ciśnienia.

Metoda optymalizacji gradientowej spowodowała zmniejszenie generowanego oporu aerodynamicznego o 12,27% w stosunku do geometrii wejściowej. Algorytm gradientowy wyszczuplił profil elementu łączącego w jeszcze większym stopniu niż metoda DoE. Spowodowało to dodatkowy spadek oporu aerodynamicznego o 2,88% w stosunku do DoE.

Algorytm optymalizacji gradientowej znacznie zagęszcza poszukiwanie optimum w obszarach, w których parametr wyjściowy ma najmniejsze wartości.

Optymalizacja gradientowa pokazuje, jak ważne jest prawidłowe wybranie obszaru wyszukiwania parametru wejściowego. Gdy algorytm usilnie poszukuje rozwiązań na granicy zakresu parametrów wejściowych. Oznacza to, że optimum znajdowało się poza obszarem poszukiwań.

Obie metody dobrze radzą sobie z poszukiwaniem optymalnych rozwiązań. Metoda DoE równomiernie przeszukuje cały zakres parametrów wejściowych, podczas gdy metoda gradientowa cały czas podąża w kierunku optymalnego rozwiązania.

Metoda DoE daje nam odpowiedź na pytanie, które parametry wejściowe mają jaki wpływ na parametr wyjściowy.

Podczas procesu optymalizacji napotkano problemy z generowaniem geometrii. Liniowe splajny mogą być czasami nieprzewidywalne. Dwa splajny z tymi samymi węzłami mogą mieć zupełnie inną ścieżkę.

Bardzo ważnym aspektem jest siatka elementów skończonych, im dokładniejsza, tym lepsze wyniki symulacji. Optymalizując wysokość elementu łączącego, użyto parametru wejściowego do opisanego liczby elementów

skończonych na krawędzi natarcia tego elementu. Zrobiono to w taki sposób, że im dłuższy element, tym więcej elementów skończonych na jego krawędzi natarcia. Zapobiegło to zmniejszeniu dokładności rozwiązania wraz ze wzrostem wysokości.

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.

BIBLIOGRAFIA

1. „Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań” – Jan Kusiak, Anna Danielewska-Tulecka, Piotr Oprocha
2. State-of-the-Art in Aerodynamic Shape Optimisation Methods S. N. Skinner and H. Zare-Behtash | University of Glasgow, School of Engineering, Glasgow, G12 8QQ, U K
3. de Boor, C. (2001). A Practical Guide to Splines. Springer.
4. Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons
5. Wasik, M and Skarka, W.: Aerodynamic Features Optimization of Front Wheels Surroundings for Energy Efficient Car. 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering 2016 | TRANSDISCIPLINARY ENGINEERING: CROSSING BOUNDARIES 4 , pp.483-492
6. 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
7. Skarka, W.; Nalepa, R.; Musik, R. Integrated Aircraft Design System Based on Generative Modelling. Aerospace 2023, 10, 677. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080677>

Rozdział 8

PROJEKT INTELIGENTNEJ OPASKI DO POMIARU PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW ŻYCIOWYCH CZŁOWIEKA

Kupczak Szymon¹, Chrzanowski Paweł²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, szymkup978@student.polsl.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, pawel.chrzanowski@polsl.pl

8.1. Wstęp

Współcześnie obserwuje się rosnącą liczbę ludzi w zaawansowanym wieku [1]. Jest powszechnie akceptowane, że proces starzenia się ściśle koreluje z postępującym pogorszeniem ich stanu zdrowia oraz zwiększa ryzyko wystąpienia różnorodnych chorób o potencjalnie groźnym charakterze [4][6]. Trudnością jest jednak precyzyjne określenie momentu, w którym te zmiany organizmu będą miały miejsce, stąd istotne staje się stałe monitorowanie fundamentalnych parametrów biologicznych.

W kontekście przemysłu oraz zastosowania nowych technologii, obserwuje się dynamiczny rozwój tej dziedziny, co generuje nowe wyzwania i wymusza poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań. Monitorowanie aktywności oraz stanu zdrowia pracowników staje się coraz bardziej powszechne, zwłaszcza w związku z rosnącą świadomością oraz priorytetowym traktowaniem bezpieczeństwa w miejscu pracy [2]. W rezultacie wzrasta potrzeba opracowywania inteligentnych urządzeń mobilnych, które pełnią istotną rolę w tych aspektach.

8.2. Koncepcja rozwiązania

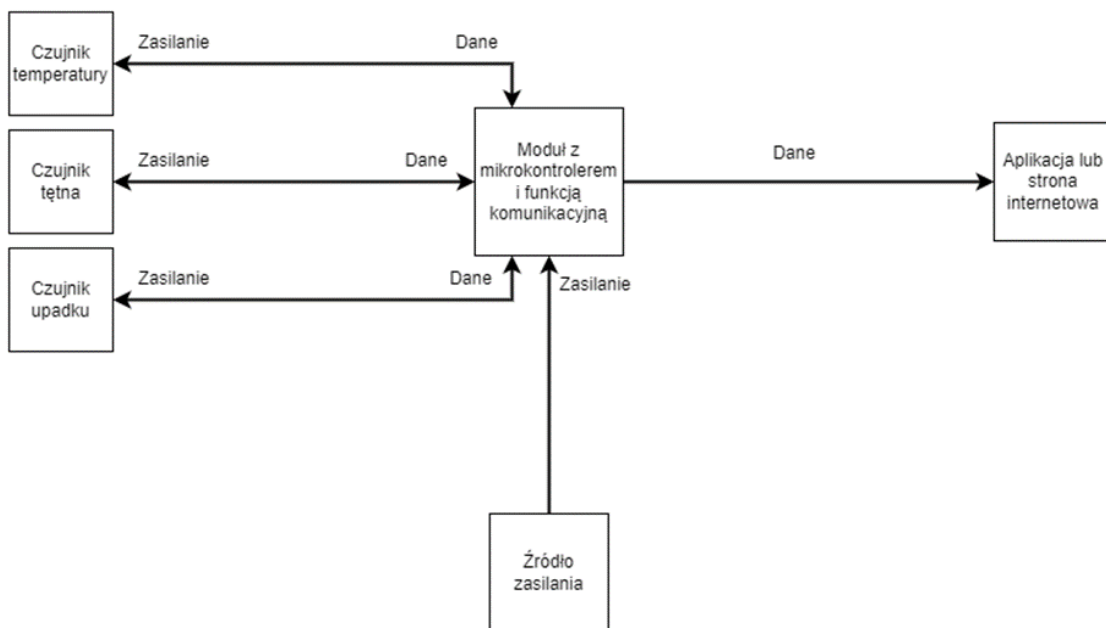
Celem projektu było stworzenie inteligentnej opaski przeznaczonej do monitorowania fundamentalnych parametrów życiowych człowieka oraz alarmowania użytkownika w przypadku przekroczenia bezpiecznych wartości tych parametrów. Dodatkowo, opaska miała transmitować zebrane dane do dedykowanej aplikacji mobilnej na zewnętrznym urządzeniu, prezentując wartości

pomiarów i stosowne komunikaty. Przyjęto, że pomiary będą dokonywane za pomocą odpowiednich czujników, kontrolowanych przez podłączony mikrokontroler. Następnie odczyty z czujników będą przesyłane poprzez technologię BLE (Bluetooth Low Energy) do telefonu z zainstalowaną aplikacją mobilną. Zdecydowano, że opaska będzie działać zdalnie, co będzie wymagać dostosowania i implementacji adekwatnego źródła zasilania, dostarczającego odpowiednie napięcie dla poszczególnych komponentów elektronicznych. Aby zapewnić bezpieczne funkcjonowanie systemu w otoczeniu użytkownika, konieczne było zachowanie kompaktowych rozmiarów i umieszczenie go w miejscu bezpiecznym.

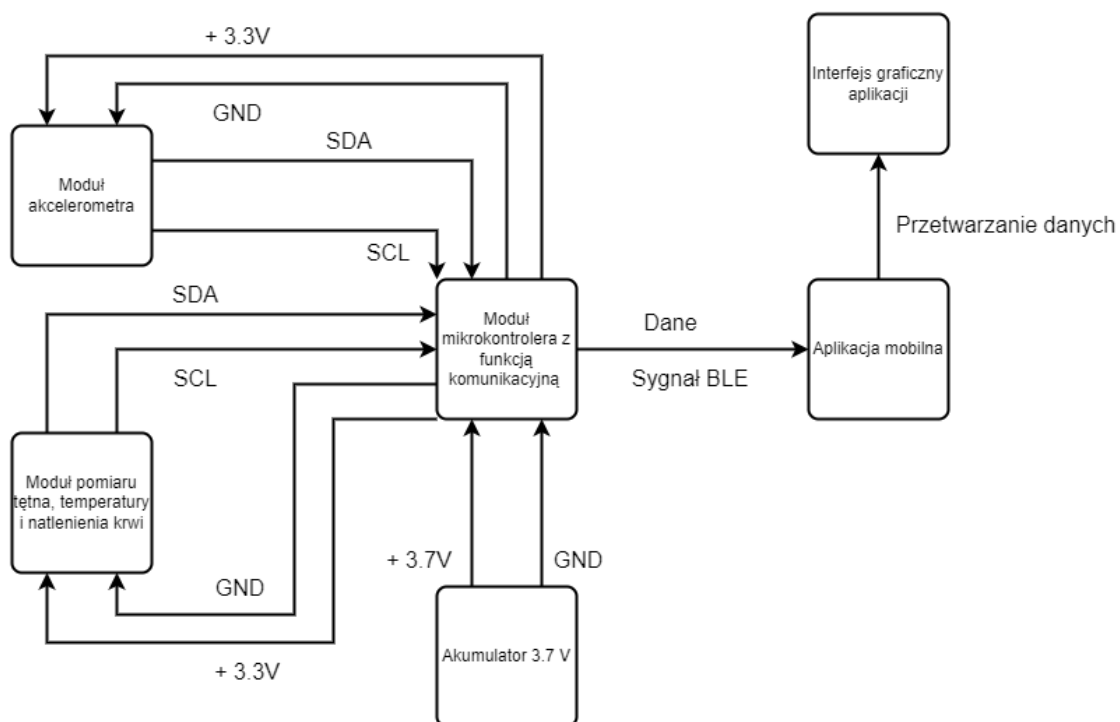
Ustalono, że wykorzystanie specyficznych czujników w opasce pozwoli na analizę parametrów życiowych bez konieczności korzystania z oddzielnych urządzeń, co jest kluczowe w kontekście ciągłego monitorowania funkcji życiowych. Ponadto, opaska oszczędzać będzie czas, który normalnie byłby poświęcany na regularne pomiary parametrów życiowych przy użyciu różnych przyrządów.

Podstawowym założeniem, było, że inteligentna opaska ma realizować pomiar temperatury, pomiar poziomu natlenienia krwi i pomiar tętna użytkownika. Zebrane dane miały być przesyłane razem z odpowiednimi komunikatami i informacją o nagłym upadku do dedykowanej aplikacji, umożliwiając szybką reakcję na ewentualne zmiany lub sytuacje krytyczne w parametrach życiowych człowieka. Z uwagi na zdalne działanie urządzenia, istotne było odpowiednie zastosowanie źródła napięcia. Dodatkowo, aby opaska była praktyczna, odczyty z czujników musiały być przekształcone i wyświetlane w aplikacji w sposób zrozumiały dla użytkownika.

Podstawą do skutecznej realizacji projektu był projekt koncepcyjny inteligentnej opaski do pomiarów podstawowych parametrów życiowych, opracowany w ramach pracy przejściowej autora (Rys. 1.1) [16]. Ta koncepcja wyznaczyła kierunek dla kolejnych etapów prac i ułatwiła ich realizację, składając się z głównego modułu mikrokontrolera z wbudowanym modułem komunikacyjnym obsługującym BLE, poszczególnych czujników pomiarowych, źródła zasilania podłączonego do mikrokontrolera oraz aplikacji mobilnej, która miała prezentować informacje użytkownikowi.



Rys 8.1 Koncepcja inteligentnej opaski opracowana w ramach pracy przejściowej autora



Rys 8.2 Uszczegółowiony schemat blokowy koncepcji

Zasilanie

Zgodnie z pierwotną koncepcją (Rys. 8.1), całe urządzenie ma być zasilane przez jedno przenośne źródło zasilania o minimalnych wymiarach, niskiej masie oraz wystarczającej pojemności umożliwiającej długotrwałą pracę. Ponadto, to źródło zasilania musi dostarczać odpowiednie napięcie elektryczne do mikrokontrolera, jednocześnie spełniając kryteria bezpieczeństwa dla użytkownika. Z tego powodu przeprowadzono analizę różnych modeli dostępnych na rynku źródeł zasilania, a wnioski wskazują na to, że optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie akumulatora o napięciu 3,7 V, wyposażonego w wbudowany moduł zabezpieczający PCM (Protection Circuit Module). Taki moduł eliminuje ryzyko nadmiernego rozładowania, przeładowania oraz zwarcia akumulatora, co przyczynia się do bezpiecznej i efektywnej pracy urządzenia.

Moduł mikrokontrolera

Kluczowym komponentem urządzenia jest moduł z mikrokontrolerem, który pełnić będzie rolę dystrybutora napięcia dla wszystkich podzespołów, zarządzając nimi oraz ustanawiając komunikację zarówno między nimi, jak i z aplikacją mobilną. Moduł ten będzie połączony zarówno z źródłem zasilania, jak i z poszczególnymi modułami elektronicznymi, co wymaga dostatecznej liczby wejść i wyjść, a także obsługi różnych typów komunikacji, np. interfejsu I2C służącego do przesyłania danych i komunikacji w urządzeniach elektronicznych. Ponadto, moduł powinien charakteryzować się компактowymi wymiarami oraz niską wagą, aby bezproblemowo można było go zastosować w opasce na rękę. W tym kontekście istotnym elementem jest również obecność komponentu umożliwiającego bezprzewodową komunikację, taką jak Bluetooth (standard bezprzewodowej komunikacji krótkiego zasięgu) czy BLE. Istnieje także ważna kwestia napięcia obsługiwanego przez moduł mikrokontrolera oraz jego poboru prądu. W przypadku inteligentnej opaski, zasilanej akumulatorem o napięciu 3.7V, konieczne jest dopasowanie modułu do tego napięcia lub mieścić się w przedziale napięć dopuszczalnych. Ponadto, w sytuacji, gdy w projekcie stosuje się wiele elektronicznych modułów, konieczne jest dostarczenie zasilania dla każdego z nich, co wymaga posiadania przez moduł mikrokontrolera odpowiedniej liczby wyjść zasilania.

Moduł akcelerometru

Za detekcję upadków odpowiedzialny będzie moduł akcelerometru. Główne kryteria, które zostały postawione przed tym modułem w ramach projektu, obejmują kompaktowe wymiary oraz niewielką wagę, analogicznie do modułu z mikrokontrolerem. Dodatkowo, kluczowym aspektem tego modułu jest obsługa komunikacji I2C, co umożliwia podłączenie różnych modułów elektronicznych do tych samych wyprowadzeń. To z kolei pozwala na redukcję rozmiarów, masy i kosztów całego urządzenia. Komunikacja z urządzeniami odbywa się poprzez przypisane im adresy w magistrali I2C. Kolejnym istotnym wymaganiem jest

minimalny pobór prądu, ponieważ cała opaska zasilana będzie z jednego źródła energii, jakim jest akumulator. W związku z tym kluczowe jest, aby moduł ten umożliwiał pracę w trybie niskiego poboru energii.

Moduł pulsoksymetru

Po dokładniejszej analizie dostępnych na rynku rozwiązań, okazało się, że istnieją technologie umożliwiające jednoczesny pomiar tętna, natlenienia krwi i temperatury. Ten fakt pozwolił na dalsze zminimalizowanie wagi, wymiarów i złożoności całego urządzenia poprzez zintegrowanie wszystkich tych pomiarów w jednym module elektronicznym. W przypadku pulsoksymetru, kluczowym aspektem jest zastosowanie jak najmniejszych rozmiarów i wagi, analogicznie do poprzednich urządzeń. Oprócz przeprowadzania pomiarów, moduł ten powinien również umożliwiać komunikację poprzez interfejs I2C oraz zapewniać efektywny tryb niskiego poboru energii, z tych samych powodów, co w przypadku modułu akcelerometru.

Moduł komunikacji bezprzewodowej

Kolejnym kluczowym elementem w koncepcji jest komunikacja bezprzewodowa, mająca na celu dostarczenie danych do aplikacji mobilnej bez konieczności korzystania z tradycyjnych fizycznych połączeń, takich jak przesył danych przez kabel za pomocą magistrali szeregowej. Taki sposób połączenia jest sprzeczny z przyjętą koncepcją i wymaganiami projektu. Wybór konkretnej technologii komunikacyjnej zależy głównie od funkcjonalności modułu komunikacyjnego zintegrowanego z modulem mikrokontrolera. Większość dostępnych na rynku urządzeń umożliwia komunikację na co najmniej dwa różne sposoby. Najczęściej stosowane to Bluetooth lub Bluetooth Low Energy (BLE), a także Wi-Fi (technologia sieci bezprzewodowych). Warto jednak zauważyć, że użycie Bluetooth lub Wi-Fi znacząco zwiększa pobór prądu w urządzeniu. Z tego powodu preferowane jest wykorzystanie technologii BLE, która umożliwia istotne ograniczenie zużycia energii. Trzeba jednak mieć świadomość, że to rozwiązanie niesie pewne wady, takie jak ograniczenia w przesyłanych danych dla jednego serwisu oraz wymaga bardziej skomplikowanej implementacji i konfiguracji niż standardowa komunikacja Bluetooth.

Aplikacja mobilna

Aplikacja mobilna ma przede wszystkim pełnić rolę odczytywania i prezentowania danych pochodzących z przeprowadzanych pomiarów przez sprzętową część systemu. Z uwagi na to, że inteligentna opaska jest projektowana z myślą o użytkownikach w starszym wieku, kluczowymi wymaganiami stawianymi przed implementacją aplikacji mobilnej są łatwość obsługi oraz intuicyjne poruszanie się po interfejsie, przy jednoczesnej właściwej konwersji danych. Aplikacja powinna efektywnie odbierać dane przesyłane za pomocą komunikacji BLE, a następnie przetwarzać je w sposób zrozumiały dla

użytkownika. Ponadto, aplikacja powinna umożliwiać powiadamianie użytkownika o aktualnych zmianach, stanach krytycznych, błędach oraz wyświetlanie istotnych uwag i informacji.

Interfejs graficzny stanowi warstwę projektu, która znajduje się najbliżej użytkownika w porównaniu do innych elementów. Powinien on zapewnić łatwe odczytywanie danych, na przykład poprzez dostosowanie elementów graficznych do odpowiednio dużych rozmiarów czy też użycie czytelnej czcionki. Interfejs powinien być przede wszystkim czytelny i zrozumiały dla użytkownika. Dodatkowo, elementy interfejsu powinny być odpowiednio dostosowane kolorystycznie, aby uniknąć męczenia i znużenia oczu użytkownika podczas korzystania z aplikacji.

8.3. Model symulacyjny

Kolejnym etapem projektu było stworzenie modelu symulacyjnego opracowanej koncepcji. Po precyzyjnej analizie i doprecyzowaniu koncepcji zdecydowano się na opracowanie modelu symulacyjnego, mającego na celu dokładniejszą analizę potencjalnych błędów oraz sytuacji wpływających na kolejne fazy projektu. Aby to osiągnąć, skorzystano z oprogramowania *KiCad*, które umożliwia tworzenie schematów obwodów, układów elektronicznych i płytek drukowanych.

Podczas pracy nad modelem zauważono brak odpowiednich rozwiązań w bibliotece narzędzia, które idealnie pasowałyby do elementów koncepcji. W związku z tym, zaprojektowano własne symbole o podobnych lub identycznych wyprowadzeniach, co pozwoliło zachować schemat połączenia dla poszczególnych elementów z koncepcji.

Pierwszym krokiem w opracowaniu modelu symulacyjnego było wybór dostępnego modelu modułu mikrokontrolera z funkcją komunikacyjną. Brakowało jednak w bibliotece modułu, który jednocześnie łączyłby mikrokontroler i moduł komunikacyjny, co skłoniło do zaprojektowania własnego symbolu.

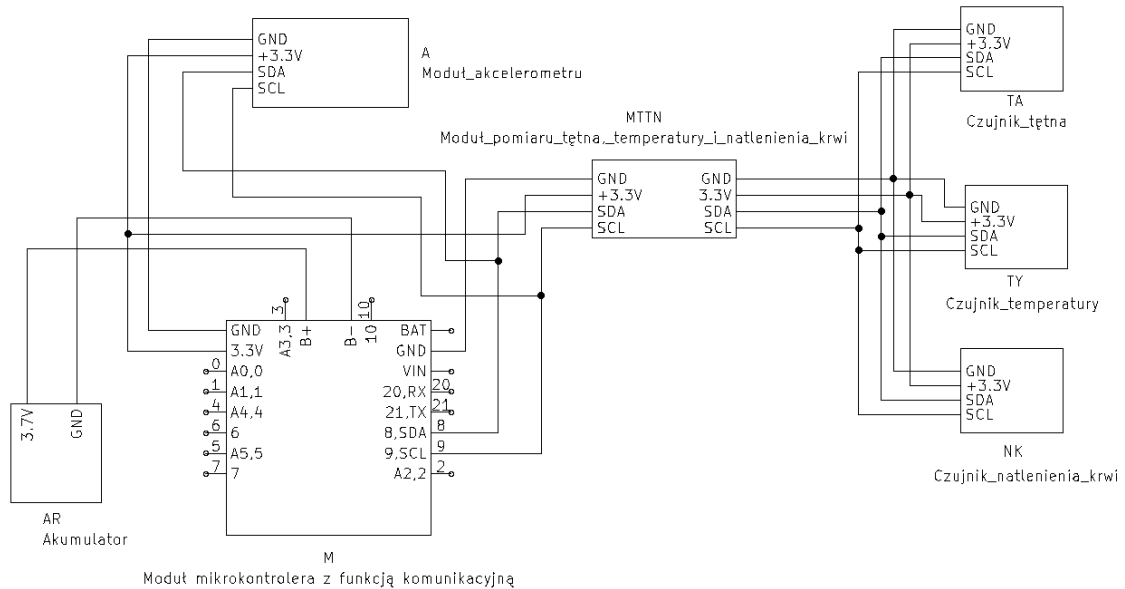
Następnie, skupiono się na wyborze modułu obsługującego pomiary tętna, temperatury i natlenienia krwi. Ponieważ w bibliotece brakowało odpowiednich rozwiązań spełniających te kryteria i obsługujących komunikację I2C, zdecydowano się na zaprojektowanie nowego symbolu dla tego modułu wraz z wyprowadzeniami dla komunikacji I2C i zasilania. Dodatkowo, opracowano osobne symbole dla każdego mierzonego parametru w postaci czujników.

Podobny proces zastosowano dla modułu akcelerometru, gdzie stworzono osobny symbol z wyprowadzeniami dla komunikacji I2C i odpowiedniego zasilania.

Po wyborze wszystkich modułów i podzespołów elektronicznych, przystąpiono do ich połączenia za pomocą przewodów. Skonfigurowano połączenia zasilające z akumulatora do modułu mikrokontrolera, a następnie

połączono wyprowadzenia zasilania i komunikacji między modułami, uwzględniając szczegółowy schemat blokowy koncepcji.

W ten sposób powstał model symulacyjny, którego przedstawienie przedstawiono na Rys. 8.3.



Rys 8.3 Model symulacyjny opracowanej koncepcji

Dzięki realizacji modelu symulacyjnego zaproponowanej koncepcji udało się opracować wstępny schemat połączeń dla całego układu. Jest to niezwykle pomocne w pracach nad praktyczną realizacją warstwy sprzętowej, zwłaszcza w przypadku projektów, gdzie występuje implementacja komunikacji I2C między modułami. Symulacja pozwoliła również na zobrazowanie ogólnego wyglądu rozwiązania po jego złożeniu oraz na identyfikację mocnych i słabych stron opracowanej koncepcji. Dodatkowo umożliwiła przybliżenie liczby przewodów, które będą niezbędne do połączenia poszczególnych modułów, co znacząco ułatwia przygotowanie do prac.

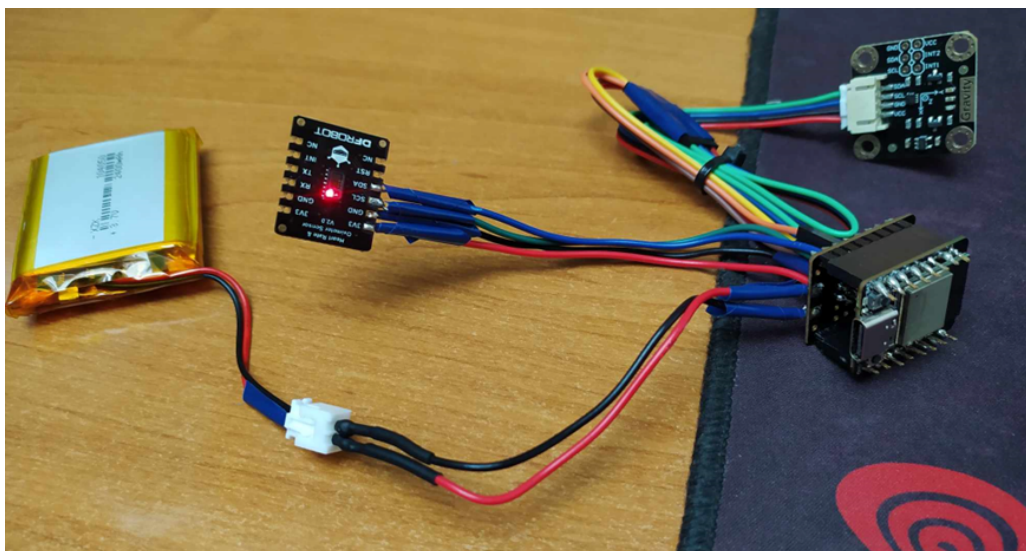
8.4. Dobór elementów gotowych

Po przeanalizowaniu wszystkich dostępnych rozwiązań, koncepcji oraz szczegółowych schematów i symulacji, dokonano wyboru elementów, które według autora najlepiej odpowiadają postawionym w projekcie wymaganiom i założeniom. Decyzja o wyborze konkretnych elementów oparta była również na dostępnych dokumentacjach technicznych oraz na analizie innych projektów referencyjnych, co umożliwiło dokładniejsze dostosowanie elementów do potrzeb projektu inteligentnej opaski. Poniżej przedstawiono wykaz wybranych elementów gotowych:

- Moduł mikrokontrolera: Beetle ESP32 - C3 z mikrokontrolerem Espressif ESP32-C3 producenta DFRobot z dedykowaną kartą rozszerzeń [7];
- Moduł pomiaru tętna, temperatury i natlenienia krwi: bioczuJNIk pulsoksymetryczny Fermion v2.0 [8];
- Moduł akcelerometru: 3 osiowy akcelerometr - I2C DFRobot Gravity LIS2DH [9];
- Akumulator litowo-polimerowy (Li-Pol) Liter Energy Battery 2400 [10];
- Elastyczna opaska sportowa na nadgarstek *Evial* [11].

8.5. Warstwa sprzętowa

Na wstępnym etapie prac nad warstwą sprzętową zostały przygotowane wszystkie niezbędne narzędzia i materiały, które były kluczowe dla kontynuacji projektu. Wśród nich znalazły się: stacja lutownicza, opalarka elektryczna, zestaw narzędzi, zestaw przewodów, odsysacz do cyny, nożyki budowlane, cyna, kalafonia, rurki termokurczliwe, taśma izolacyjna oraz uchwyt z lupą do stabilnego utrzymywania przedmiotów podczas procesu lutowania. Ten etap pozwolił na płynne i efektywne prowadzenie dalszych prac, eliminując potrzebę częstego poszukiwania sprzętu czy materiałów. Na Rys. 8.4 przedstawiono wygląd warstwy sprzętowej opaski, natomiast na Rys. 8.5 przedstawiono gotową opaskę.



Rys 8.4 Gotowa warstwa sprzętowa urządzenia



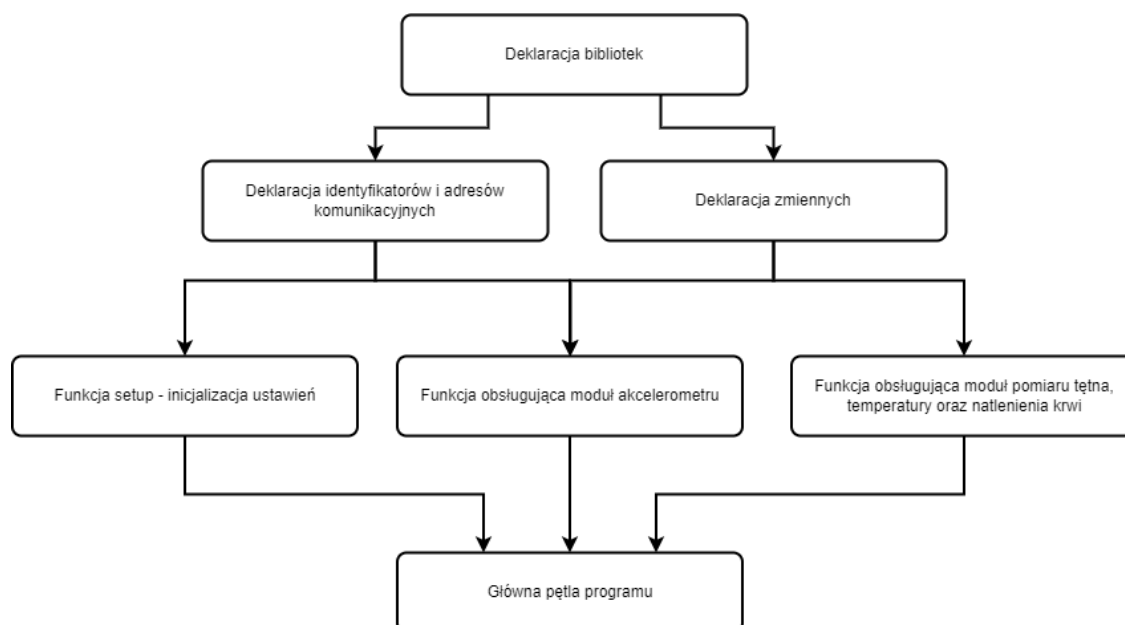
Rys 8.5 Finalny wygląd opaski

8.6. Warstwa aplikacji

Rozpoczęcie etapu praktycznej realizacji aplikacji wymagało wyboru odpowiednich środowisk programistycznych. Dla tworzenia aplikacji obsługującej warstwę sprzętową opaski, zdecydowano się na *Arduino IDE*. Jest to popularne środowisko programistyczne dla mikrokontrolerów, charakteryzujące się bogatą biblioteką funkcji oraz możliwością dodawania nowych, co sprawia, że jest wyjątkowo wszechstronne w programowaniu mikrokontrolerów.

Natomiast do tworzenia aplikacji mobilnej wybrano *MIT App Inventor*, darmowe narzędzie zaprojektowane specjalnie do tworzenia aplikacji na urządzenia mobilne. Pozwala ono na rozwijanie aplikacji zarówno na system *Android*, jak i *iOS*, i oferuje prosty interfejs graficzny do definiowania wyglądu i funkcji aplikacji.

Główny program składa się z różnych modułów, z których każdy zawiera wiele funkcji i elementów, realizujących określone operacje. Pierwszy rodzaj modułów to te, które odpowiadają za deklarację i inicjalizację ustawień oraz zmiennych. Drugi rodzaj modułów zajmuje się obsługą urządzeń elektronicznych. Na końcu programu znajduje się moduł głównej pętli programu, który zarządza wywołaniem i obsługą pozostałych modułów i funkcji.



Rys 8.6 Struktura modułowa głównego programu

Aplikacja mobilna

Opracowanie aplikacji mobilnej stanowił ostatni etap tworzenia systemu inteligentnej opaski. Pierwszym krokiem było skupienie się na opracowaniu interfejsu i wyglądu graficznego aplikacji. Ponieważ *MIT App Inventor* ogranicza się do jednego rozmiaru telefonu, na który projektuje się aplikację, opracowanie interfejsu wymagało wielokrotnego dostosowywania aplikacji, aby odpowiednio ustawić interfejs i wygląd. Ostateczny wygląd interfejsu został przedstawiony na Rys. 37.

Interfejs aplikacji składa się z przycisków umieszczonych na górze ekranu, które obsługują komunikację bezprzewodową BLE. Przycisk „*Szukaj*” uruchamia funkcję wyszukiwania dostępnych urządzeń w okolicy, które są wyświetlane na rozwijanym czarnym pasku. Przycisk „*Stop Szukaj*” służy do przerywania procesu wyszukiwania urządzeń, gdy użytkownik znajdzie pożądane urządzenie. Przycisk „*Połącz*” służy do nawiązywania połączenia z wcześniej wybranym urządzeniem z listy. Natomiast przycisk „*Rozłącz*” umożliwia zakończenie połączenia BLE z aktualnie połączonym urządzeniem. Poniżej, obok napisu „Status”, wyświetlany jest aktualny status połączenia. Niżej znajdują się brązowe pola, w których wyświetlane są informacje o pomiarach, komunikatach i błędach.



Rys. 8.7: Rzeczywisty wygląd aplikacji na telefonie

Interfejs został zaprojektowany tak, aby każdy użytkownik mógł łatwo odczytać wszystkie wartości i komunikaty. Dodatkowo zastosowanie kolorów zielonego i brązowego ma na celu zmniejszenie zmęczenia oczu użytkowników podczas korzystania z aplikacji. Ponadto, w interfejsie aplikacji zostawiono miejsce na ewentualne rozszerzenie o dodatkowe funkcje w przyszłości, takie jak informacje o pogodzie, przycisk SOS czy mapa z lokalizacją.

8.7. Testowanie

Testowanie wykonanego prototypu opaski obejmowało kilka etapów:

- Testowanie poprawności działania układów elektronicznych.
- Testowanie aplikacji mobilnej.
- Testowanie współpracy wszystkich warstw.
- Testowanie i symulacja opaski w warunkach rzeczywistych (Rys. 8.8).

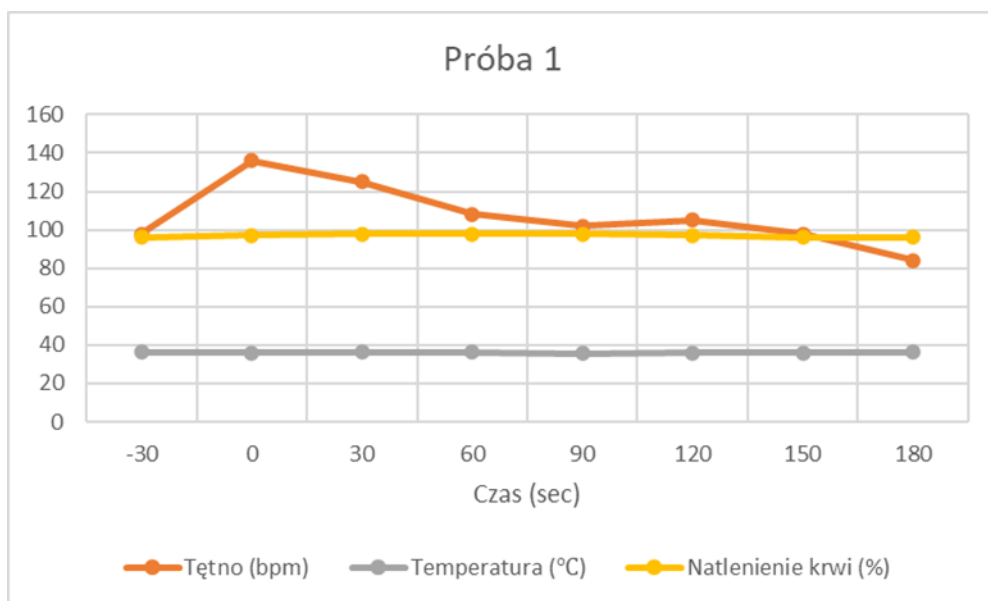


Rys. 8.8: Przykładowe okna aplikacji mobilnej z procesu testowania opaski

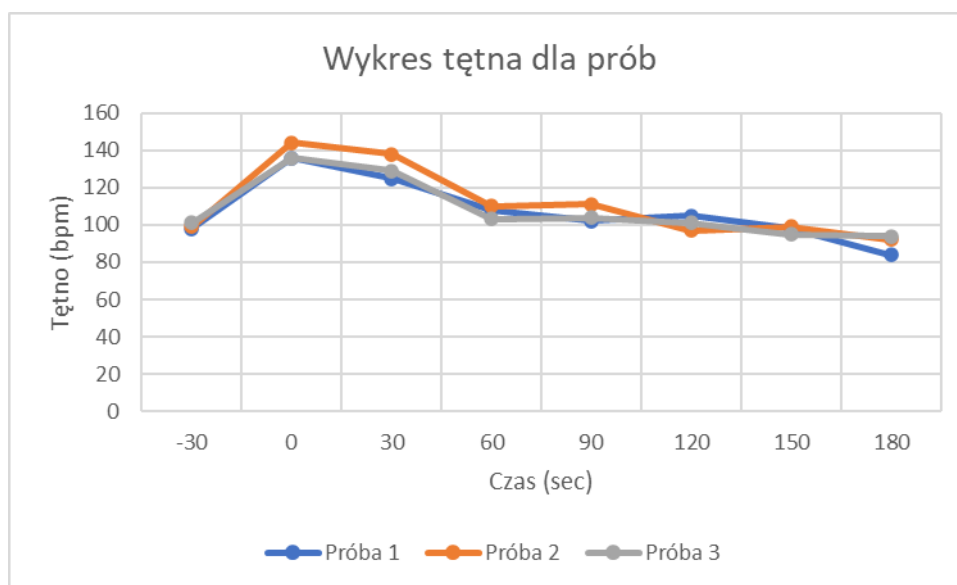
Badania symulacyjne w warunkach rzeczywistych

W celu pełnej weryfikacji działania prototypu opaski wraz z oprogramowaniem, opracowano plan badań z udziałem człowieka. Plan zakładał przeprowadzenie badania zmian parametrów życiowych człowieka podczas codziennych czynności oraz po niespodziewanym upadku. Parametry życiowe miały być mierzone w 30-sekundowych odstępach czasu przez 3 minuty po upadku. Parametry życiowe mierzone za pomocą opaski obejmowały tętno, temperaturę ciała oraz natlenienie krwi. Przeprowadzono 3 próby. Wykresy zarejestrowanych parametrów życiowych podczas pierwszej próby przedstawiono na Rys. 8.9.

Analiza wykresu tętna (Rys.8.10) pokazuje, że po każdym upadku obserwuje się wzrost tętna o około 30 uderzeń na minutę. Z biegiem czasu, w miarę uspokajania się, tętno powracało do stanu wyjściowego lub nawet niższego, szczególnie gdy użytkownik odpoczywał między kolejnymi próbami. Można zauważyć również, że reakcja serca na upadek jest konsekwentna, zawsze wzrastając tuż po zdarzeniu.



Rys. 8.9: Wykresy parametrów życiowych w czasie dla Próby 1



Rys. 8.10: Wykres tętna dla każdej z prób

Podczas przeprowadzania eksperymentu, który obejmował próby upadku oraz pomiar podstawowych parametrów życiowych człowieka za pomocą inteligentnej opaski, obserwowano różnorodne zależności, których analiza pozwoliła wyciągnąć kluczowe wnioski dotyczące badania. Najważniejszym z tych wniosków jest stwierdzenie, że upadek ma istotny wpływ na parametry życiowe człowieka. W trakcie tego badania zaobserwowano, że upadek znacząco wpływał na tętno, które w drugiej próbie wzrosło o 45 uderzeń na minutę. Jednakże w każdej z prób spowodował zmianę tętna o ponad 30 uderzeń na minutę. Natomiast wpływ upadku na zmianę temperatury ciała był minimalny, ponieważ temperatura

ciała zmieniała się w trakcie badania o bardzo niewielkie wartości. W odniesieniu do natlenienia krwi, badanie wykazało, że podczas upadku następuje jego wzrost, jednakże konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych badań, aby dokładnie zrozumieć przyczyny tego zjawiska. Warto jednak zauważyć, że wzrost natlenienia krwi wpływa pozytywnie na organizm człowieka.

Czy zatem potrzeba monitorowania parametrów życiowych człowieka po upadku jest uzasadniona? Tak, ponieważ na podstawie wniosków wyciągniętych z badania potwierdzono, że upadek ma istotny wpływ na podstawowe parametry życiowe człowieka. Zwłaszcza w przypadku osób starszych, niektóre z tych parametrów mogą zmieniać się gwałtownie o duże wartości zaraz po upadku. Dla osób powyżej 65 roku życia, nagłe zmiany w funkcjonowaniu organizmu mogą prowadzić do różnych niebezpiecznych sytuacji zdrowotnych. Dlatego też, u takich osób po upadku konieczne jest monitorowanie stanu zdrowia, nawet jeśli nie wystąpiły żadne zewnętrzne obrażenia lub złamania. Istnieje możliwość, że upadek mógł wpłynąć na ich stan zdrowia, co sprawia, że monitorowanie staje się istotnym działaniem w zapewnieniu opieki nad nimi.

8.7. Podsumowanie

Projekt inteligentnej opaski do pomiaru podstawowych parametrów życiowych człowieka stanowił wyjątkowo złożone przedsięwzięcie, które obejmowało szeroki zakres zagadnień z różnych dziedzin. Dla autora projekt ten był niezwykle wartościowym źródłem doświadczenia, które z pewnością będzie przydatne w przyszłych przedsięwzięciach. Na każdym etapie realizacji projektu pojawiły się zarówno większe, jak i mniejsze problemy, których rozwiązanie wymagało często znacznego nakładu czasu. Jednak to właśnie te trudności stanowiły najbardziej cenne lekcje, gdyż ich rozwiązanie wymagało zgłębienia wielu różnych artykułów, rozwiązań oraz dokumentacji. Dzięki nim autor mógł poszerzyć swoją wiedzę w różnych dziedzinach i zdobyć nowe umiejętności, szczególnie w zakresie pracy nad układami elektronicznymi, komunikacją bezprzewodową oraz tworzeniem aplikacji i programów dla urządzeń opartych na mikrokontrolerach.

W przyszłości planowane są dalsze prace nad opaską, które mają na celu dodanie dodatkowych funkcjonalności. Jedną z głównych zmian będzie zaimplementowanie bazy danych, do której będą zapisywane pomiary z opaski, umożliwiając użytkownikowi śledzenie historii swoich pomiarów poprzez wyświetlanie przebiegów czasowych w aplikacji. Dodatkowo przewiduje się opracowanie przycisku SOS, umożliwiającego użytkownikowi wezwanie pomocy w nagłych wypadkach. W zakresie aplikacji mobilnej planowane jest także wprowadzenie widżetu pogodowego oraz funkcji lokalizacji. Kolejną funkcjonalnością, którą zamierza się dodać w przyszłości, jest automatyczna analiza przebiegów czasowych pomiarów, która na podstawie zgromadzonych

danych będzie w stanie wstępnie zdiagnozować chorobę lub stan zdrowia użytkownika oraz poinformować go o wynikach, a w razie podejrzenia groźnej sytuacji powiadomić odpowiednie służby lub osoby bliskie.

BIBLIOGRAFIA

- 1 World Health Organization, „Ageing and health”, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health> [Data uzyskania dostępu: 08.02.2023]
- 2 Gralewicz G., „BHP w inteligentnym środowisku pracy 4.0”, https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P30001831335539182278&html_tresc_root_id=300009594&html_tresc_id=300009594&html_klucz=19558, Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy [Data uzyskania dostępu: 08.02.2023]
- 3 Szulik K., „Jaka jest prawidłowa temperatura ciała u człowieka? Dlaczego nie musi to być 36,6°C?”, https://www.doz.pl/czytelnia/a14889-Jaka_jest_prawidlowa_temperatura_ciala_u_czlowieka_Dlaczego_nie_musi_to_byc_366C, DOZ.pl Sp. z o.o. [Data uzyskania dostępu: 11.02.2023]
- 4 Czajkowska M., Rudnicki J., Czajkowski A., Pierzak-Sominka J., „MIKROKRAŻENIE KRWI, TĘTNO I FALA TĘTNA”, Polska Problemy Nauk Stosowanych, 2014, Tom 2, s. 143 – 148 Szczecin
- 5 Sobień B., Kopeć G., „Częstotliwość rytmu serca”, <https://www.mp.pl/pacjent/chorobawienkowa/zapobieganie/62324,czestotliwosc-rytmu-serca>, Melissa sp. z o.o. [Data uzyskania dostępu: 11.02.2023]
- 6 Juwan A., „Tętno i jego pomiar”, Zintegrowana Platforma Edukacyjna Ministerstwa Edukacji i Nauki
- 7 BOTLAND B. DERKACZ SP. K., „Beetle ESP32 - C3 RISC-V - z mikrokontrolerem Espressif ESP32-C3 RISC-V - WiFi - Bluetooth - DFRobot DFR0868” <https://botland.com.pl/plytki-zgodne-z-arduino-dfrobot/21227-beetle-esp32-c3-risc-v-z-mikrokontrolerem-espressif-esp32-c3-risc-v-wifi-bluetooth-dfrobot-dfr0868.html> [Data uzyskania dostępu: 29.08.2023]
- 8 BOTLAND B. DERKACZ SP. K., „Fermion v2.0 - pulsoksymetr i czujnik tętna - MAX30102 - I2C - DFRobot SEN0344”, <https://botland.com.pl/czujniki-medyczne/19196-fermion-v20-pulsoksymetr-i-czujnik-tetna-max30102-i2c-dfrobot-sen0344-5904422361648.html> [Data uzyskania dostępu: 03.10.2023]
- 9 BOTLAND B. DERKACZ SP. K., „DFRobot Gravity - LIS2DH - 3 osiowy akcelerometr I2C”, <https://botland.com.pl/gravity-akcelerometry-i-zyroskopy/8831-dfrobot-gravity-lis2dh-3-osiowy-akcelerometr-i2c-5903351243599.html> [Data uzyskania dostępu: 04.10.2023]
- 10 Mateusz Wójciak, „Akumulator litowo-polimerowy Liter Energy Battery 2400 mAh 1 szt.”, <https://allegro.pl/oferta/akumulator-li-polymer-3-7v-2400mah-pcm-8554335512>, Allegro sp. z o.o. [Data uzyskania dostępu: 04.10.2023]

- 11 Eviol, „Running Gym Wristband Sweatband Zipper Wallet”, <https://allegro.pl/oferta/running-gym-wristband-sweatband-zipper-wallet-12748019534>, Allegro sp. z o.o. [Data uzyskania dostępu: 02.06.2023]
- 12 RVLAD, „Free Fall Detection Using 3-Axis Accelerometer”, <https://projecthub.arduino.cc/RVLAD/free-fall-detection-using-3-axis-accelerometer-5467af>, Arduino S.r.l. [Data uzyskania dostępu: 05.10.2023]
- 13 Przybyłowicz W., „Zwykły upadek – niezwykle skutki”, <https://fizjomed.com.pl/zwykly-upadek-niezwykle-skutki/>, Fizjomed [Data uzyskania dostępu: 07.10.2023]
- 14 Stachura J., Kaliszewska A., „Upadki osób starszych – przyczyny, następstwa, profilaktyka”, <https://medihomecare.pl/upadki-osob-starszych/>, MH CARE sp. Z o.o. [Data uzyskania dostępu: 07.10.2023]
- 15 Edbom-Kolarz A., Marcinkowski J., „Upadki osób starszych – przyczyny, następstwa, profilaktyka”, *Hygeia Public Health* 2011, 46(3): 313-318
- 16 Kupczak S., „Koncepcja inteligentnej opaski do pomiaru podstawowych parametrów życiowych człowieka”, Praca Przejściowa, Politechnika Śląska 2023.
- 17 Kupczak S., „Projekt inteligentnej opaski do pomiaru podstawowych parametrów życiowych człowieka”, Praca Dyplomowa Magisterska, Politechnika Śląska 2023

Rozdział 9

TESTER EKRANÓW DOTYKOWYCH PANELI HMI

Górny Michał¹, Cholewa Adam²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, michgor244@student.polsl.pl

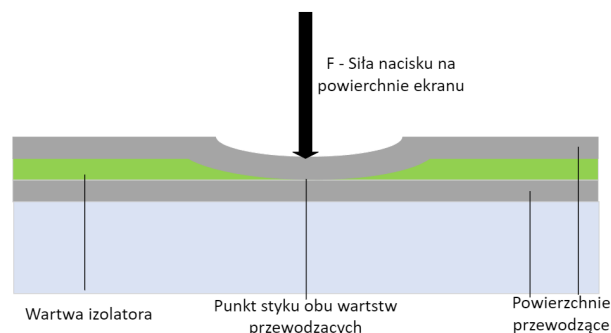
²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, adam.cholewa@polsl.pl

9.1. Wstęp

Panele HMI są powszechnie stosowane w zautomatyzowanych liniach produkcyjnych. Urządzenia te są przeznaczone do kontroli oraz podglądu parametrów pracy. Panele HMI są narażone na wiele szkodliwych czynników mogących doprowadzić do ich uszkodzenia. Skutkiem awarii panelu może być unieruchomienie linii produkcyjnej na czas serwisu, a każdy postój zautomatyzowanej linii produkcyjnej jest kosztowny. W związku z tym panele HMI muszą być jak najbardziej niezawodne.

W celu weryfikacji wytrzymałości ekranu dotykowego panelu, powstała potrzeba opracowania urządzenia testującego dotyki od różnych dostawców.

9.2. Analiza zagadnienia



Rys 9.1 Uproszczony schemat budowy ekranu dotykowego rezystancyjnego. Opracowanie własne.

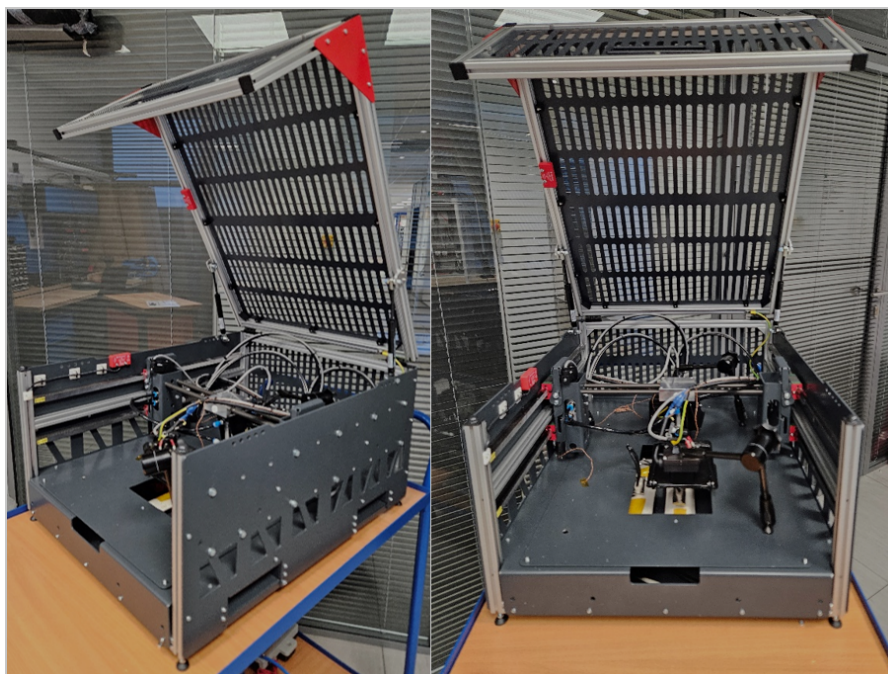
Dotyk panelu rezystancyjnego działa w oparciu o pomiar wartości napięcia elektrycznego. W momencie wywarcia nacisku na powierzchnię ekranu dwie elektrody oddzielone warstwą izolującą stykają się umożliwiając przepływ prądu. Na tej podstawie kontroler jest w stanie określić dokładną współrzędną, w której wystąpił nacisk. Sposób działania opisany jest szerzej w artykule [1].

Na podstawie analizy rozpoznano kilka głównych czynników, które mogą przyspieszyć starzenie się ekranu dotykowego. Pierwszym zagrożeniem, jest podwyższona temperatura na powierzchni ekranu dotykowego, która spowodowana jest oddziaływaniem promieniowania podczerwonego oraz ultrafioletowego przez padające na ekran światło słoneczne. Kolejnym niekorzystnym czynnikiem, jest wywieranie na powierzchni ekranu nacisku przez operatora. Połączenie tych czynników może doprowadzić do sklejenia się ze sobą dwóch warstw przewodzących opisanych wcześniej.

Aby odtworzyć w sposób kontrolowany rozpoznane niekorzystne warunki pracy powstała potrzeba opracowania testera do ekranów dotykowych HMI.

9.3. Tester do ekranów dotykowych HMI

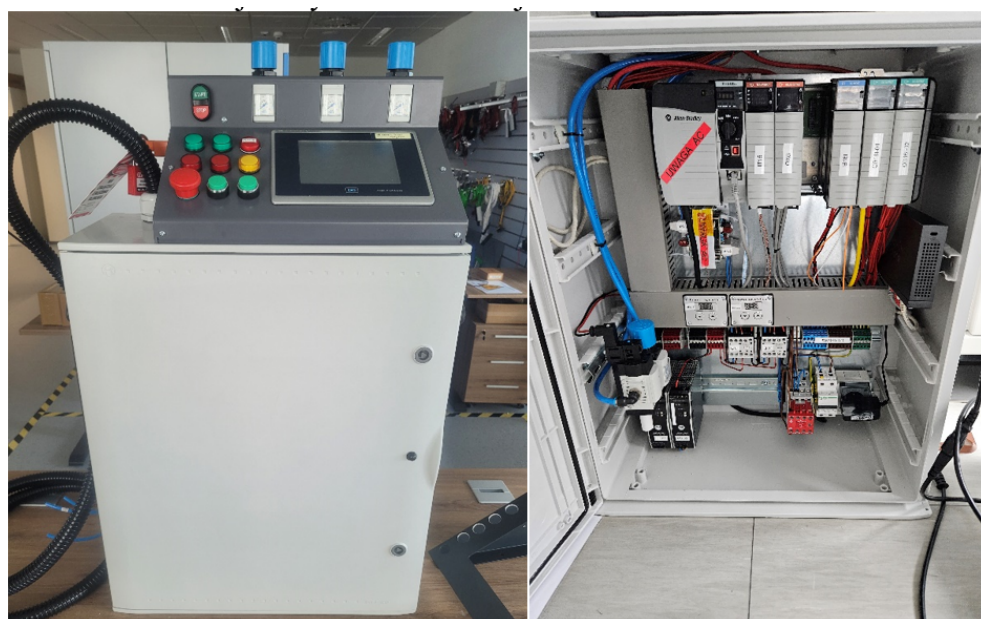
Główna część testera, w której montowany jest testowany panel przedstawiona jest na rysunku Rys 9.2.



Rys 9.2 Zbudowany na potrzeby kontroli jakości tester do ekranów dotykowych HMI – Część mechaniczna

Jednym z głównych wymogów była możliwość instalacji testera wewnątrz komory klimatycznej, która ma zapewnić stałą temperaturę otoczenia oraz wilgotność. W związku z tym zdecydowano na rozdzielenie części mechanicznej

od części sterującej, aby nie narażać układów automatyki na niekorzystne warunki, które mogą wystąpić podczas testu. Automatyka wraz z panelem kontrolnym została umieszczona w osobnej skrzyni sterowniczej.



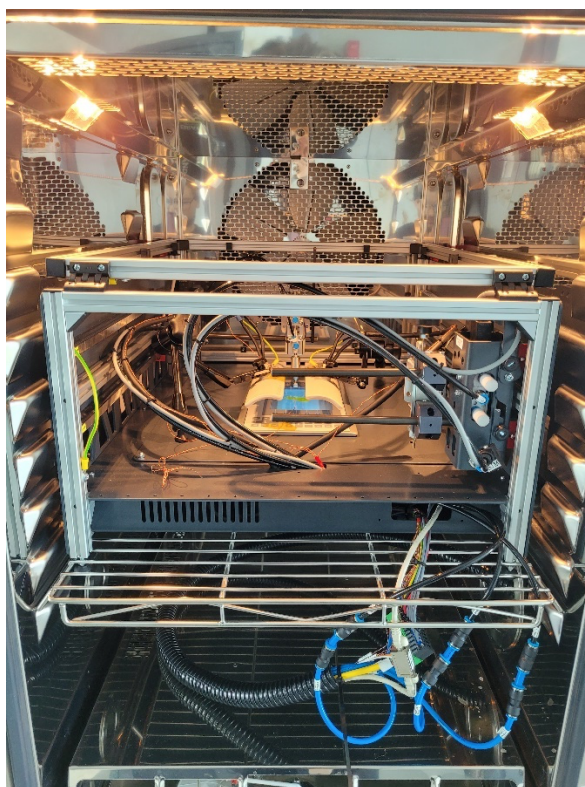
Rys 9.3 Skrzynia sterownicza testera do paneli

Media zasilające oraz sterujące pracą testera są podłączane do urządzenia poprzez złącze przemysłowe.



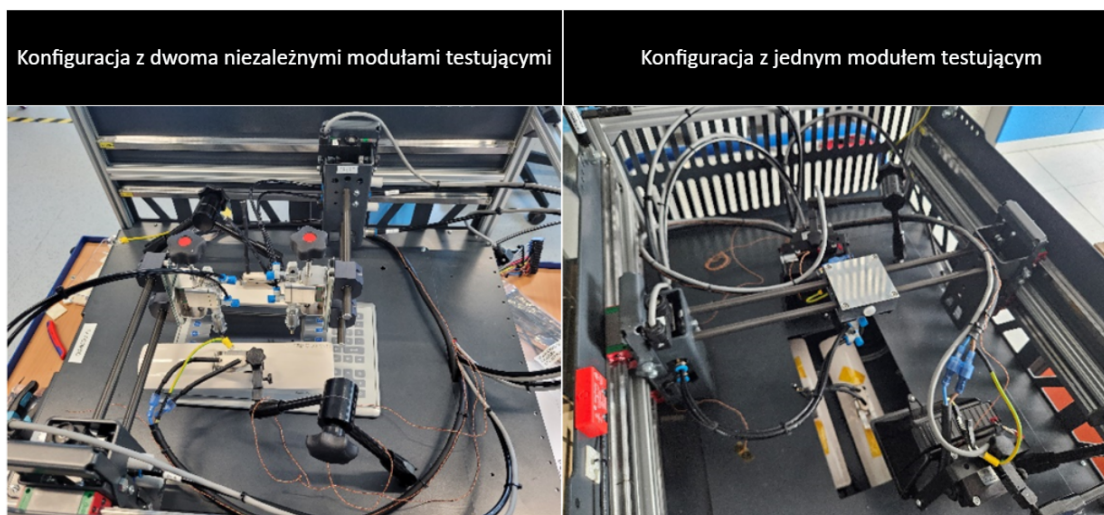
Rys 9.4 Złącze przemysłowe testera do ekranów HMI.

Zastosowanie takiego złącza było konieczne, aby umożliwić szybką instalację części mechanicznej wewnątrz komory klimatycznej. Komora posiada główne drzwi oraz przepust na kable, który zlokalizowany jest na w bocznej ścianie komory.



Rys 9.5 Część mechaniczna testera wewnątrz komory klimatycznej

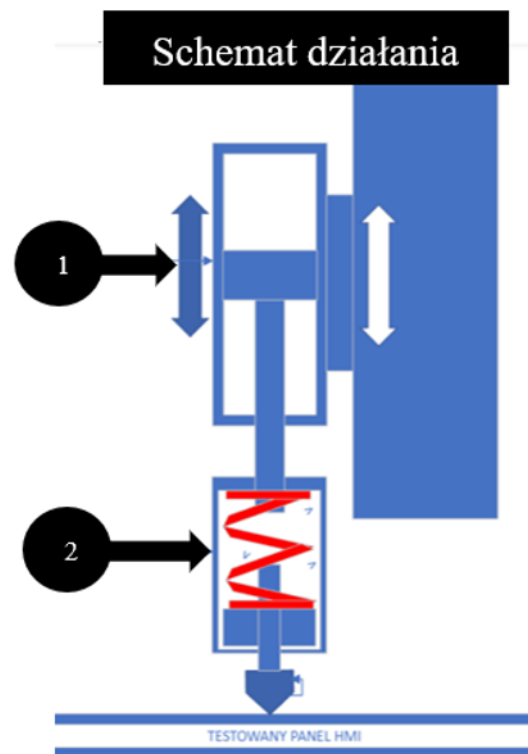
Cześć mechaniczna testera składa się z ramy głównej z osłonami, których zadaniem jest zabezpieczenie operatora przed nagrzanymi elementami oraz ruchomymi elementami. Dodatkowym wyposażeniem są dwie grzałki generujące promieniowanie podczerwone do ogrzewania powierzchni testowanego ekranu oraz ruchome moduły testujące.



Rys 9.6 Moduły testujące. Zestawienie obu konfiguracji

Głównym elementem modułu testującego jest siłownik pneumatyczny. Osobne moduły testujące które pracują niezależnie wyposażone są w specjalnie zaprojektowany kompensator siły nacisku służące do regulacji siły wywieranej na

ekran w zakresie od 0,3 N do 3 N. Schemat działania opisanego rozwiązania przedstawiony jest na rysunku Rys 9.7.



Rys 9.7 Schemat działania kompensatora siły. 1 -kompensator składający się cylindra wraz z tłoczkiem na sprężynie, 2 – Moduł z siłownikiem pneumatycznym z możliwością regulacji wysokości jego montażu.

Większy pojedynczy moduł testujący nie wymagał stosowania kompensatora, ponieważ jego przeznaczeniem jest wywieranie stałego nacisku o sile 30 N.

9.4. Przebieg testu

Dokumentacja testowa była wielokrotnie modyfikowana. Pierwsza wersja testu zakładała ogrzanie powierzchni panelu do 60°C. Po osiągnięciu wymaganej temperatury wykonaniu miliona naciśnień. Weryfikowane ekrany wytrzymały średnio dziesięć procent zadanej ilości naciśnień przy sile równej 0,5 N. Po szczegółowej analizie uzyskanych wyników stwierdzono, że test ten nie jest idealnym odzwierciedleniem warunków panujących na fabryce. W związku z tym zdecydowano się na modyfikację tego test planu.

Ostateczna wersja zakładała umieszczenie testera wraz z panelem HMI w komorze klimatycznej. Temperatura wewnątrz komory powinna wynosić 30°C, a wilgotność 0%. Tester wewnątrz komory z zamontowanym panelem HMI ma za zadanie stopniowo zwiększać moc grzania o 5% zaczynając od 30°C zadanych w

komorze klimatycznej. Następnie wygrzaniu w tej temperaturze przez 30 min i wykonaniu 50 naciśnień z siłą równą 30 N. Liczba wygenerowanych naciśnień ma być porównywana z liczbą odczytanych naciśnień z panelu HMI. Jeżeli liczba odczytanych naciśnień jest równa zadanym lub mniejsza o maksymalnie 2, tester ma powtórzyć całą opisaną sekwencję. Test kończy się przy 5000 wygenerowanych naciśnień lub w przypadku, gdy testowany panel HMI nie odczyta 10 naciśnień. Maksymalna temperatura, do której tester ma dogrzewać powierzchnię panelu została ustawiona na 70°C. Po osiągnięciu granicznej temperatury cykl zwiększania mocy grzania przestaje działać i wykonywane są tylko naciśnięcia z zadanym odstępem czasowym. Cykliczne zwiększanie mocy grzania miało za zadanie wykryć przy jakiej temperaturze dotyki przestaną działać poprawnie. Test z zastosowaniem grzałek podczerwonych nie przyniósł oczekiwanych rezultatów i każdy z przetestowanych ekranów wykazał dużą wytrzymałość na ten rodzaj promieniowania.

Następnym krokiem w celu dalszego rozwoju projektu będzie zamiana opisanych grzałek generujących podczerwień na promienniki światła ultrafioletowego.

9.4. Podsumowanie

Od momentu pojawienia się potrzeby przetestowania ekranów dotykowych po przeprowadzenie ostatniego opisanego testu weryfikacyjnego minął ponad rok. Proces projektowania oraz budowy testera był stosunkowo krótki, najwięcej czasu zajęło dopracowanie test planu na podstawie, którego opracowana została ostateczna wersja programu sterującego pracą testera. Projekt ten pokazał, ile tak naprawdę potrzeba poświęcić czasu na testy weryfikacyjne prototypu, aby spełnić on wszystkie wymagania stawiane przez współczesny przemysł.

BIBLIOGRAFIA

1. https://www.eizo.com/library/basics/basic_understanding_of_touch_panel/
[Data uzyskania dostępu: 06.02.2024]

Rozdział 10

BADANIE WPLYWU ZUŻYCIA MASZYNY OBRÓBCZEJ NA JAKOŚĆ WYTWARZANYCH ELEMENTÓW

Ledwoń Krzysztof¹, Loska Andrzej²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, kl255395@student.polsl.pl

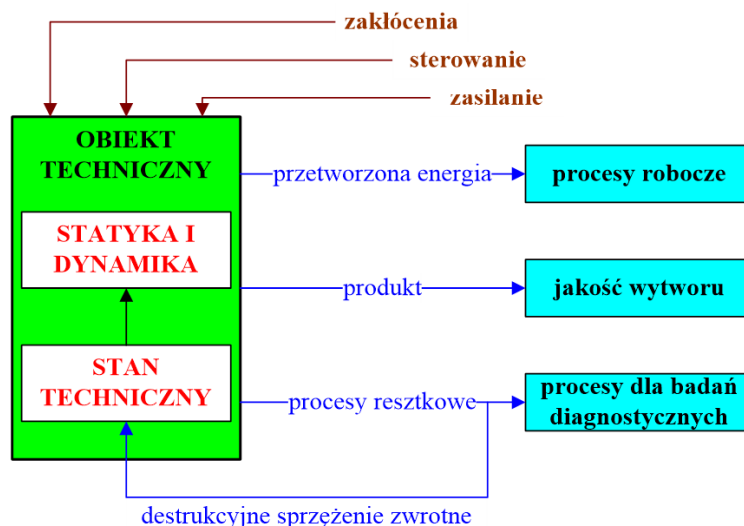
²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, andrzej.loska@polsl.pl

10.1. Wstęp

W dzisiejszym dynamicznym środowisku przemysłowym, zwłaszcza w branży maszynowej, jakość produkcji stała się kluczowym czynnikiem sukcesu. Wysoka jakość produktów ma bezpośredni wpływ na zaspokojenie potrzeb rynkowych oraz na spełnienie rygorystycznych wymagań dotyczących właściwości wyrobów [4]. Przedsiębiorstwa produkcyjne zmagają się z wyzwaniem równoważenia tych wymagań jakościowych z utrzymaniem opłacalności operacyjnej. W tym kontekście, zrozumienie wpływu zużycia maszyn obróbczych na jakość wytwarzanych elementów w procesach skrawania staje się niezwykle istotne. A to pozwala na bardziej świadome planowanie procesów produkcyjnych oraz na wybór odpowiednich technologii i urządzeń.

Zaawansowane maszyny obróbcze stają się kluczem do efektywnej produkcji w różnych sektorach przemysłu. Nie tylko wydajność, ale również niezawodność i długość życia tych maszyn mają bezpośredni wpływ na rentowność i produktywność przedsiębiorstw. W celu zapewnienia mocy produkcyjnej oraz zadowolenia klientów należy mieć na uwadze wiele czynników mogących wpłynąć na zdolności produkcyjne.

Typową maszyną obróbczą możemy postrzegać jako model układu działaniowego co przedstawiono na rys. 10.1.



Rys 10.1 Model maszyny jako układu działaniowego [1, 12]

Rezultat działania maszyny można rozpatrywać i analizować w trzech aspektach:

- procesów roboczych, obserwowanych za pomocą przetworzonej energii,
- jakości procesu wytwarzania, obserwowanych poprzez ocenę produktu,
- procesów diagnostycznych, obserwowanych za pomocą sygnałów i procesów resztkowych.

Każdy z powyższych aspektów stanowi odrębnie ważny czynnik w badaniach i ocenie stanu technicznego maszyny obróbczej, a tym samym element kryterium w eksploatacyjnym procesie decyzyjnym.

Obserwacja procesów roboczych, jak i procesów diagnostycznych skupia się na ocenie działania maszyny i zmienności jej cech stanu. Natomiast obserwacja jakości procesu i produktu ma charakter szerszy, który w kontekście podejmowania decyzji eksploatacyjnych znacznie wykracza poza klasyczne metody i procedury diagnostyczne. Należy stwierdzić, że produkt jest kluczowym rezultatem funkcjonowania linii technologicznej. Jakość wytworzonego produktu jest determinowana wieloaspektowo przez parametry wejściowe procesu produkcyjnego, technologię wytwarzania, jak i przez stan techniczny maszyny. To powoduje, że:

- identyfikacja i analiza jakości procesów i produktów może stanowić wartościowy aspekt w ocenie stanu technicznego maszyny obróbczej, ocena taka wymaga wyodrębnienia tych cech, które bezpośrednio przekładają się na eksploatacyjne procesy zużyciowe,
- identyfikacja wartości kluczowych cech stanu technicznego maszyny produkcyjnej, a przede wszystkim ocena stopnia i tempa zużycia poszczególnych jej podzespołów i elementów może mieć wpływ na proces otrzymywania produktów na założonym poziomie jakości.

Przyjmując powyższe argumenty, autorzy tego artykułu, przedstawili wyniki badań nad oceną wpływu zużycia maszyny obróbczej na jakość wytworzonych elementów. Przeprowadzone w tym zakresie prace miały w dużej mierze charakter

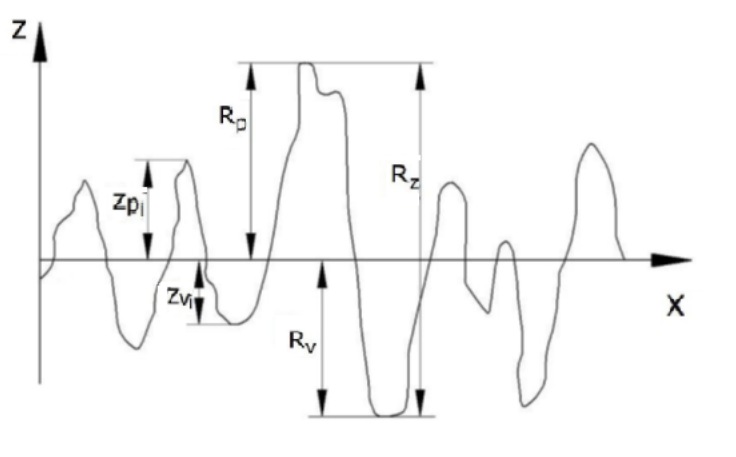
eksperymentu czynnego zrealizowanego na zbudowanym stanowisku obróbkowym, które zostało wyposażone w opracowany układ pomiarowy.

10.2. Pomiary metrologiczne w ocenie jakości wytwarzanych produktów

Obróbka skrawaniem jest jednym z najważniejszych procesów produkcyjnych, który wpływa na jakość wytwarzanych elementów. Proces ten polega na usuwaniu materiału za pomocą narzędzi tnących, takich jak frezy lub noże, aby uzyskać pożądany kształt i wymiary. Wpływ obróbki skrawaniem na jakość wytwarzanych elementów jest szeregiem czynników, w tym: parametry obróbki, cechy konstrukcyjne narzędzia, właściwości materiału obrabianego, stabilizacja procesu obróbki (chłodzenie i smarowanie) [6].

Obróbka skrawaniem charakteryzuje się występowaniem sił i składowych wibracji w miejscu kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym. Siły te mają dynamiczny charakter i ściśle zależą od właściwości materiału oraz parametrów obróbki [6]. W trakcie skrawania należy uwzględnić stabilność narzędzia, jego sposób zamocowania oraz podatność na odkształcenia. Dodatkowym powodem występowania wibracji są drgania wymuszone, które są rodzajem drgań niezależnych od układu mechanicznego maszyny lub urządzenia a ich geneza pochodzi z środowiska zewnętrznego (roboty drogowe, praca maszyn w pobliżu). Drgania takie mogą występować okresowo lub stale zależnie od źródła występowania [2].

Wibracje występujące w procesie skrawania mogą przełożyć się na dokładność wytworu, a w szczególności na strukturę geometryczną powierzchni. Struktura geometryczna powierzchni należy do najczęściej badanych właściwości warstwy wierzchniej w warunkach przemysłowych. Jest to spowodowane możliwością pomiaru metodami nieniszczącymi oraz relatywnie niską ceną urządzeń pomiarowych. Ilościowa ocena dokonywana jest na podstawie umownie przyjętych parametrów (rys. 10.2), które określone są dla profilu pierwotnego oraz wyizolowanymi z tego profilu poprzez filtrację profili chropowatości i falistości [10].



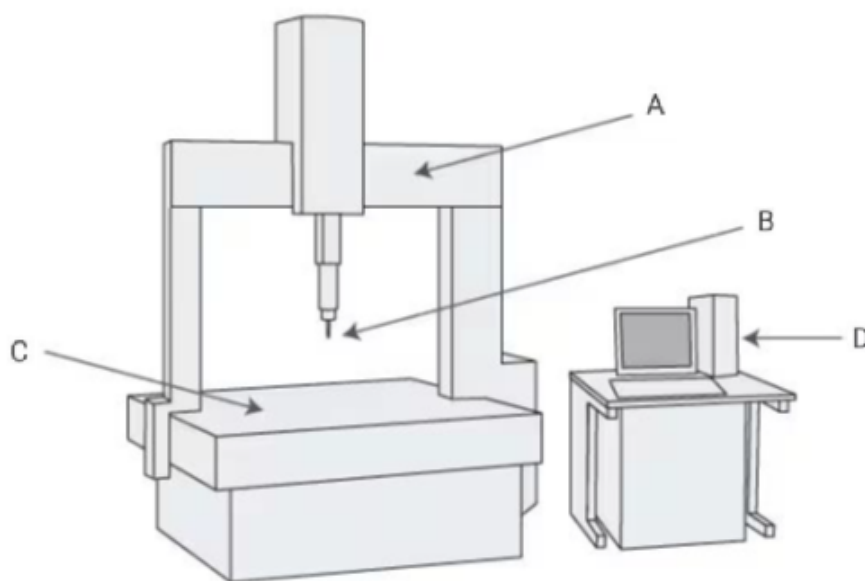
Rys 10.2 Profil chropowatości powierzchni [10]: R_p – wysokość najwyższego wzniesienia profilu
 R_v – głębokość najniższego wgłębienia profilu, R_z – największa wysokość profilu, Z_{pi} – wysokość wzniesienia, Z_{vi} – głębokość wgłębienia Model maszyny jako układu działaniowego

Chropowatość powierzchni to elementy struktury, które powstają w procesie formowania. Nierówności te są przede wszystkim śladami współdziałania rozpatrywanej powierzchni z narzędziem lub ze współdziałającym przedmiotem. Chropowatość powierzchni obrobionej zależy przede wszystkim od metody i schematu kinematycznego obróbki oraz od kształtu geometrycznego roboczej części narzędzia [10, 11].

Wpływ na profil mikrochropowatości mają również wibracje towarzyszące procesowi obróbki powodując nakładanie się składowych profilu kształtu. Składowa zdeterminowana drgań swoją przyczynę ma w parametrach procesu, dlatego jest stała i niezmienna, natomiast składowa losowa pochodzi z procesów reszkowych wynikłych ze sposobu działania maszyny oraz otoczenia i stanowi źródło informacji o stanie maszyny i procesu [2].

W procesie przeprowadzania pomiarów jakości powierzchni stosuje się różne narzędzia i urządzenia pomiarowe, takie jak gładkościomierze, profilometry, interferometry i inne. Powszechną podstawą w tym zakresie są warsztatowe metody pomiarowe, które pozwalają szybko określić wartości mierzonych cech geometrycznych. Jednocześnie, warsztatowe metody pomiarowe posiadają ograniczenia w wykrywaniu niektórych nieprawidłowości. Przykładowo, problemy z okrągłością czy walcowością mogą umknąć uwadze podczas pomiarów z użyciem narzędzi dwupunktowych, takich jak suwmiarki czy mikrometry [11]. Takie niedoskonałości, chociaż niewidoczne dla prostych pomiarów, mogą mieć wpływ na identyfikowane cechy geometryczne. W związku z tym, istotne znaczenie w omawianym obszarze mogą mieć maszyny pomiarowe współrzędnościowe, które umożliwiają bardziej pełną ocenę jakości elementów [7]. Maszyny takie są w stanie wykonywać pomiary przedmiotów o złożonej geometrii przy zapewnieniu wysokiej dokładności w stosunkowo krótkim czasie. Maszyny tego typu charakteryzuje różna konstrukcja, specyfikacja i sposób działania.

Najpopularniejszymi współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi są maszyny portalowe (rys. 10.3).



Rys 10.3 Współrzędnościowa maszyna pomiarowa o konstrukcji portalowej [7]: A - portal, B - końcówka pomiarowa, C - stół pomiarowy, D - układ sterowania

Istotą pomiarów realizowanych za pomocą maszyny pomiarowej współrzędnościowej jest proces zbierania wartości punktów powierzchni przedmiotu mierzonego w wybranym układzie współrzędnych, a następnie aproksymacji poszczególnych punktów. Aproksymacja dokonywana jest dla konkretnych figur geometrycznych a w jej wyniku wyznaczane są wymiary i położenie danej figury w przedmiocie mierzonym [7].

10.3. Procedura i przebieg eksperymentu badawczego

Zgodnie z przeprowadzoną analizą literaturową, w szczególności w oparciu o interpretację modelu maszyny jako układu działaniowego oraz w oparciu o praktyczne obserwacje autorów, zostaną przeprowadzone badania, zgodnie z postawioną hipotezą:

Zużycie maszyny manifestujące się wzmożonymi drganiami, może być obserwowane poprzez ocenę jakości wytworzonego produktu.

Eksperyment, który w zamierzeniu stanowił potwierdzenie powyższej tezy polegał na wytwarzaniu próbek w zaplanowanym procesie technologicznym, z dodatkowym kontrolowanym wzbudzeniem drgań maszyny wytwórczej. Próbkę te były przedmiotem pomiarów metrologicznych, a następnie analizy i oceny dokładności ich wykonania w kontekście poziomu wzbudzanych drgań maszyny technologicznej.

Takie podejście pozwoliło na zbadanie czy wpływ narastających wibracji w tokarce ma konsekwencje dla cech geometrycznych i powierzchniowych wytwarzanych elementów. Analiza ta może być kluczowa dla dalszego rozwoju

technologii obróbki, a także dla zwiększenia efektywności i jakości procesów produkcyjnych.

10.4. Przygotowanie stanowiska obróbkowo-pomiarowego

Działania podjęte i zrealizowane w kroku pierwszym dotyczyły dwóch aspektów: przygotowania stanowiska obróbkowo-pomiarowego oraz określenie cech geometrycznych i materiałowych próbek.

Proces wytwórczy stanowiący podstawę zaplanowanego eksperymentu polegał na wykonaniu próbek o kształcie walca na tokarce uniwersalnej w warunkach celowo wzbudzanych drgań. Tak zaplanowane badanie zostało zrealizowane na celowo do tego przygotowanym stanowisku. Stanowisko to składało się z trzech kluczowych składników.

- tokarki uniwersalnej marki Bułgaria ZMM-SILVEN CU360M,
- wzbudnika drgań NCR3 wraz z układem stabilizacji wibracyjnej SW-06,
- detektora wibracji FAG Detector III.

Zbudowane w ten sposób stanowisko zaprezentowano na rys. 10.4.



Rys 10.4 Obróbkowo-pomiarowe stanowisko badawcze

Wzbudnik został umieszczony na koniku, co z jednej strony pozwoliło na płynną regulację odległości źródła drgań od suportu narzędziowego, a z drugiej było techniczno-montażowym kompromisem i stanowiło o możliwości przeprowadzenia badania. Pomiar wibracji odbywał się w rejonie suportu narzędziowego, ponieważ drgania w tej lokalizacji mają największe przełożenia na obrabiany materiał.

Próbki dla potrzeb badań, przygotowano w procesie cięcia pręta ze stali NC6, o średnicy 25,8 [mm] na odcinki o długości 100 [mm], za pomocą piły taśmowej. Piła taśmowa została tutaj zastosowana ze względu na potrzebę zapewnienia stałych parametrów cięcia oraz możliwość chłodzenia cieczą, co zapobiega przypaleniu próbek. Wybór tworzywa próbek, był podyktowany kluczowymi

cechami zastosowanej stali, w tym: niskiego współczynnika rozszerzalności cieplnej, twardości na poziomie 250 HB oraz odpornością na korozję. Cechy te sprawiły, że powyższa stal narzędziowa stopowa do zastosowań na zimno była odpowiednim wyborem do precyzyjnego procesu toczenia.

10.5. Realizacja procesu wytwórczego

Druga faza badań miała charakter eksperymentu czynnego i obejmowała realizację procesu technologicznego w odniesieniu do wcześniej przygotowanych próbek w warunkach celowo wzbudzanych drgań.

Proces technologiczny polegał na toczeniu wzdłużnym próbek ma powierzchni walcowej bocznej, a także częściowemu planowaniu powierzchni czołowej (rys. 10.5).



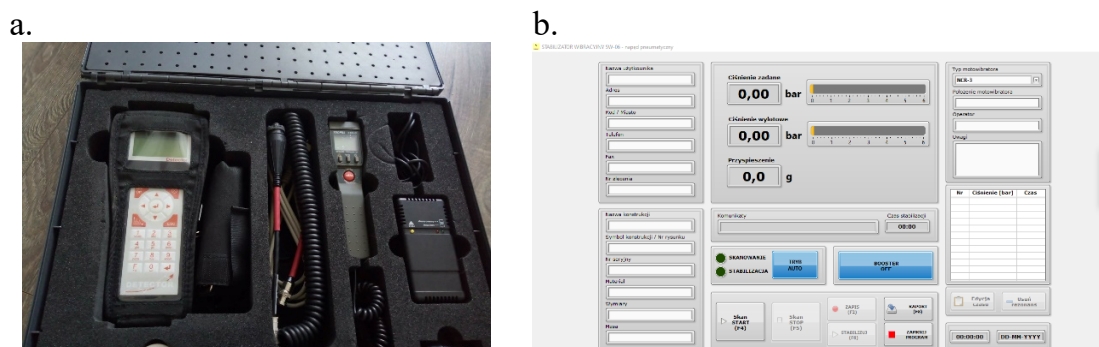
Rys 10.5 Przebieg procesu technologicznego toczenia próbki

Zastosowaniu następujące parametry obróbki:

- obroty wrzeciona: 600 [rpm],
- posuw suportu: 0,203 [mm/obr],
- głębokość skrawania: 0,5 [mm],
- materiał: stal narzędziowa stopowa NC6 do obróbki na zimno,
- mocowanie próbki w wrzecionie: 75 [mm] (3xD, czyli na maksymalną odległość nie wymagającą podparcia
- brak chłodzenia próbki podczas procesu toczenia.

Proces technologiczny był prowadzony bez użycia chłodzenia próbki. Chociaż chłodzenie jest zwykle stosowane w celu zwiększenia żywotności narzędzi i zapewnienia lepszej jakości obróbki, to autorzy zdecydowali się na jego pominięcie, w celu uzyskania bezpośredniej oceny eksperymentu niezakłóconej dodatkowymi czynnikami.

W ramach eksperymentu wykonano 13 próbek. Pierwsza została wykonana w procesie podstawowym bez użycia wzbudnika. Ten krok był potrzebny dla celów pozycjonujących. Kolejne 12 próbek było przetwarzanych z użyciem wzbudnika drgań, którego kontrola odbywała się za pośrednictwem systemu stabilizacji wibracyjnej, co zapewniało kontrolę ciśnienia powietrza napędzającego wzbudnik (rys. 10.6b). Pomiar wibracji występujących w trakcie procesu był mierzony każdorazowo za pomocą detektora wibracji FAG Detector III (rys. 10.6a). W trakcie wykonywania próby w okolicy 50 [m] od stanowiska pracowały inne maszyny obróbcze. Warunki te sprawiały, że do stanowiska mogły dochodzić również wibracje z pobliskich stanowisk roboczych. Nie udało się zarejestrować wartości drgań spowodowanych sąsiedztwem pracujących maszyn.



Rys 10.6 Zestaw oceny i kontroli wibracji przebiegu eksperymentu: a. detektor wibracji FAG Detector III [9], b. aplikacja systemu stabilizacji wibracyjnej SW-06 [8]

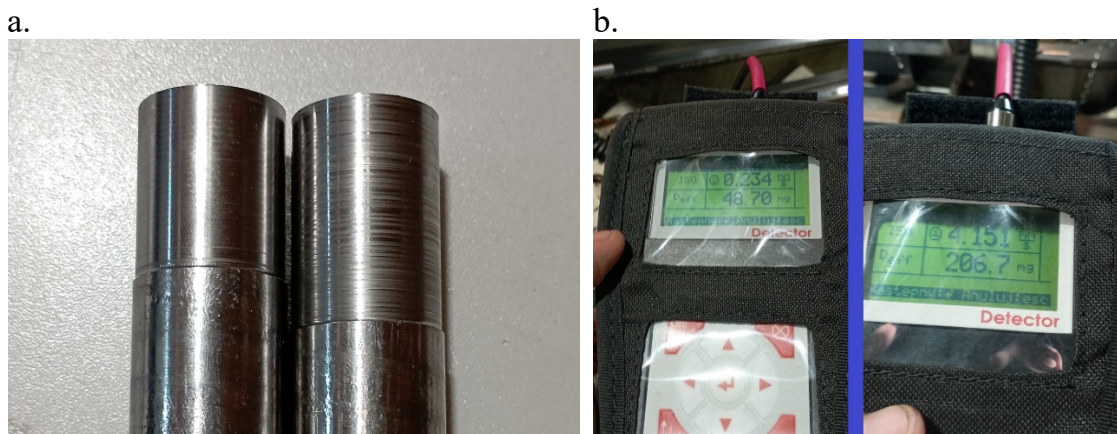
Parametry przebiegu eksperymentu, wartości zmierzonych drgań, jak również wyniki pomiarów metrologicznych, które zostaną omówione w kolejnym podrozdziale, zestawiono w tabeli 10.1.

Tabela 10.1 Zestawienie parametrów przebiegu eksperymentu, wartości zmierzonych drgań i wyników pomiarów metrologicznych

Nr próbki	Drgania		Wzbudnik drgań		Charakterystyki metrologii kształtu				Chropowatość powierzchni		
	RMS [mm/s]	Deff [mg]	Odległość wzbudnika od suportu [mm]	Ciśnienie pracy wzbudnika drgań [bar]	Płaskość [mm]	Okrągłość [mm]	Walcowość [mm]	Falistość [μm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
1	0,234	48,7	Brak	Brak	0,003	0,009	0,009	1,22	0,782	0,937	4,182
2	0,97	46,68	1500	0,95	0,003	0,007	0,007	1,036	0,675	0,862	4,133
3	2,813	64,04	1500	1,46	0,003	0,006	0,006	0,722	1,197	1,432	5,921
4	1,32	61,15	1500	1,95	0,003	0,011	0,011	0,947	1,432	1,696	6,869
5	2,056	60,2	1500	2,44	0,002	0,006	0,006	0,624	1,076	1,293	5,593
6	2,019	49,56	1000	1	0,003	0,012	0,012	0,92	1,148	1,399	6,080
7	2,699	52,16	1000	1,46	0,004	0,014	0,014	1,2	1,544	1,795	6,627
8	3,341	104,3	1000	1,96	0,003	0,01	0,01	0,858	1,104	1,352	5,844
9	3,236	141,8	1000	2,46	0,002	0,006	0,006	0,819	1,025	1,262	5,678
10	1,484	59,44	500	0,99	0,008	0,009	0,009	0,921	1,132	1,384	6,308
11	0,649	90,57	500	1,46	0,003	0,012	0,012	0,708	0,811	0,987	4,653
12	2,073	129,1	500	1,95	0,003	0,013	0,013	1,14	0,905	1,125	5,855
13	4,151	206,7	500	2,44	0,004	0,004	0,004	0,997	0,960	1,203	6,161

10.6. Pomiary i ocena metrologiczna wykonanych próbek

Przetworzone próbki zostały w pierwszej kolejności poddane ocenie porównawczej. Skoncentrowano się na dwóch aspektach: wyglądzie powierzchni oraz ogólnej jakości wykonania. Początkowe oględziny wykazały łatwo dostrzegalne różnice w fakturze powierzchni wytworzonych elementów, co było widoczne szczególnie w odniesieniu do próbek skrajnych nr 1 i nr 13.



Rys 10.7 Ocena porównawcza przetworzonych próbek: a. wygląd skrajnych próbek (nr 1 i nr 13), b. wartości poziomów wibracji

W dalszym etapie przetworzone próbki zostały poddane precyzyjnym pomiarom metrologicznym w trakcie których dokonano ich oceny w zakresie kluczowych błędów ich geometrii i chropowatości powierzchni.

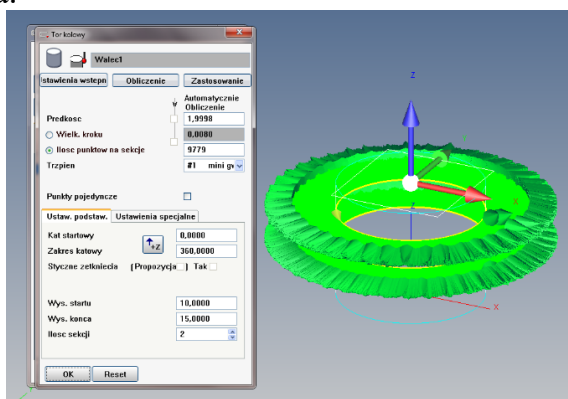
Ocena metrologiczna została przeprowadzona za pomocą maszyny pomiarowej współrzędnościowej Zeiss Accura 2 (rys. 10.8). Mierzone były następujące cechy geometryczne: walcowość, okrągłość, płaskość i falistość.



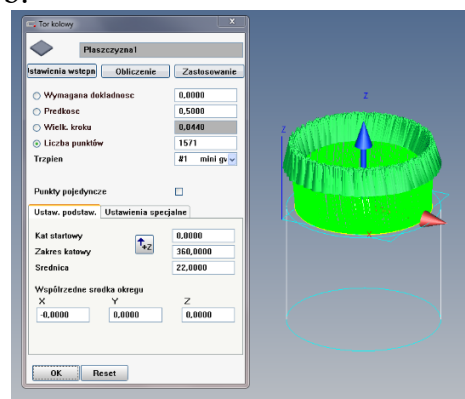
Rys 10.8 Ocena metrologiczna próbek za pomocą maszyny pomiarowej współrzędnościowej Zeiss Accura 2

Pomiary były przeprowadzane w kontrolowanych warunkach - przy ustalonej temperaturze i wilgotności, co miało na celu zminimalizowanie wpływu tych czynników na wyniki pomiarów, a tym samym zapewnienie najwyższej możliwej precyzji pomiarowej. Dokonano pomiarów dwóch cech pomiarowych, to znaczy walca (rys. 10.9a) oraz płaszczyzny (rys. 10.9b). Ilość pobranych punktów została dobrana tak by wykorzystać maksymalne możliwości maszyny pomiarowej co wymusiło zminimalizowanie prędkości pomiaru.

a.



b.



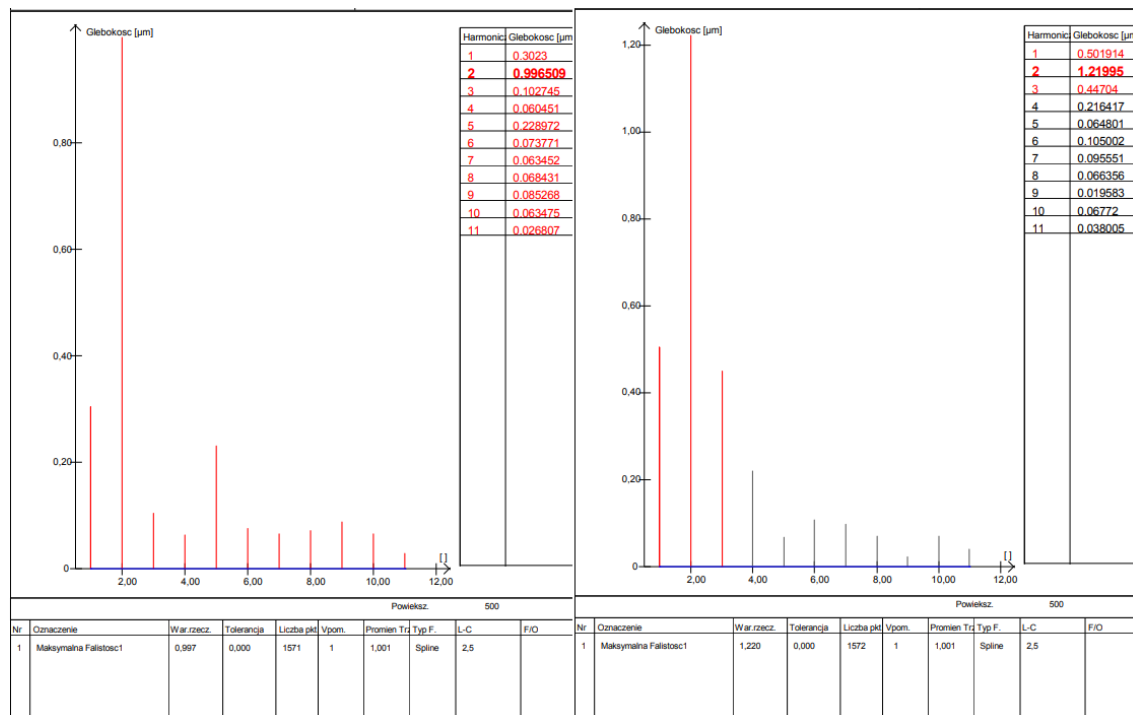
Rys 10.9 Definiowanie parametrów pomiarów cech geometrycznych: a. dla walca, b. dla płaszczyzny

Strategia pomiarów wałeczków wytworzonych na tokarce, przy stałej odległości wysunięcia próbek z wrzeciona, polegała na zastosowaniu stabilnych baz pomiarowych (rys. 10.9a). Bazy te zapewniały niezmiennie położenie skanowania punktów pomiarowych względem czoła próbki. Dzięki temu możliwe było uniknięcie błędów pomiarowych oraz nieścisłości, które mogłyby wynikać z kilku czynników:

1. Po pierwsze, stałość pozycji pomiarowej eliminowała wpływ potencjalnych zmian w geometrii łoża tokarki. Tokarki, zwłaszcza te starsze modele, mogą doświadczać drobnych deformacji lub przesunięć w swojej strukturze, co może mieć wpływ na dokładność obrabianego elementu. Stabilna baza pomiarowa minimalizowała ryzyko, że takie zmiany wpłyną na wyniki pomiarów.
2. Po drugie, w procesie toczenia, szczególnie przy większych prędkościach obróbki mogą wystąpić lokalne odkształcenia na powierzchni obrabianego elementu. Stała odległość pomiaru od czoła próbki zapewniała, że lokalne odkształcenia były odpowiednio uwzględniane i mierzone w sposób jednolity.

Zastosowanie takiej strategii pomiarowej pozwalało na bardziej efektywną i powtarzalną procedurę pomiarową. Utrzymując stałą odległość od czoła próbki, eliminuje się potrzebę ciągłego dostosowywania ustawień pomiarowych dla każdej obrabianej próbki.

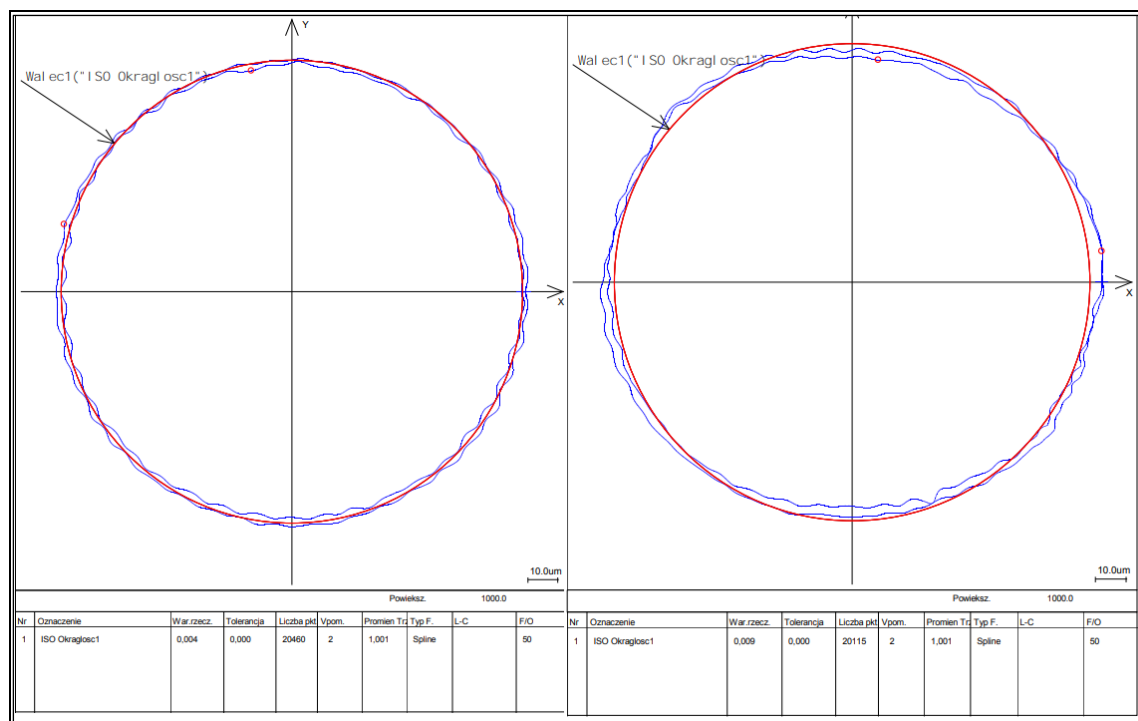
Pomiary metrologiczne przeprowadzono dla wszystkich 13 wałeczków. ich wyniki zestawiono w tabeli 1. Jednakże w dalszej części, zaprezentowana zostanie analiza porównawcza badanych cech geometrycznych dla skrajnych wałeczków nr 1 wytworzoną bez dodatkowego wzbudzenia drgań i próbką nr 13, która została obciążona z największą intensywnością.



Rys 10.10 Analiza falistości próbek nr 1 i nr 13

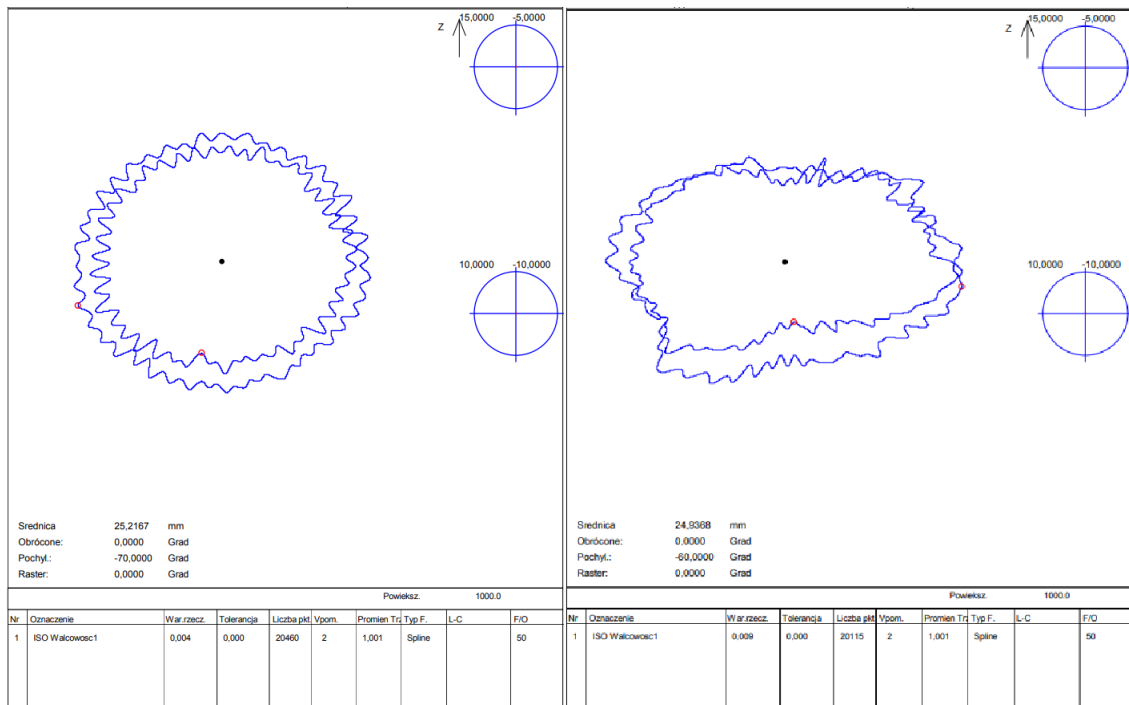
Analiza falistości (rys. 10.10) nie wykazała znaczącej różnicy pomiędzy próbką nr 1, która osiągnęła wartość 1,220 [μm], a próbką nr 13, która osiągnęła wartość 0,997 [μm].

Na rys. 10.11 zaprezentowano wyniki analizy okrągłości badanych próbek.



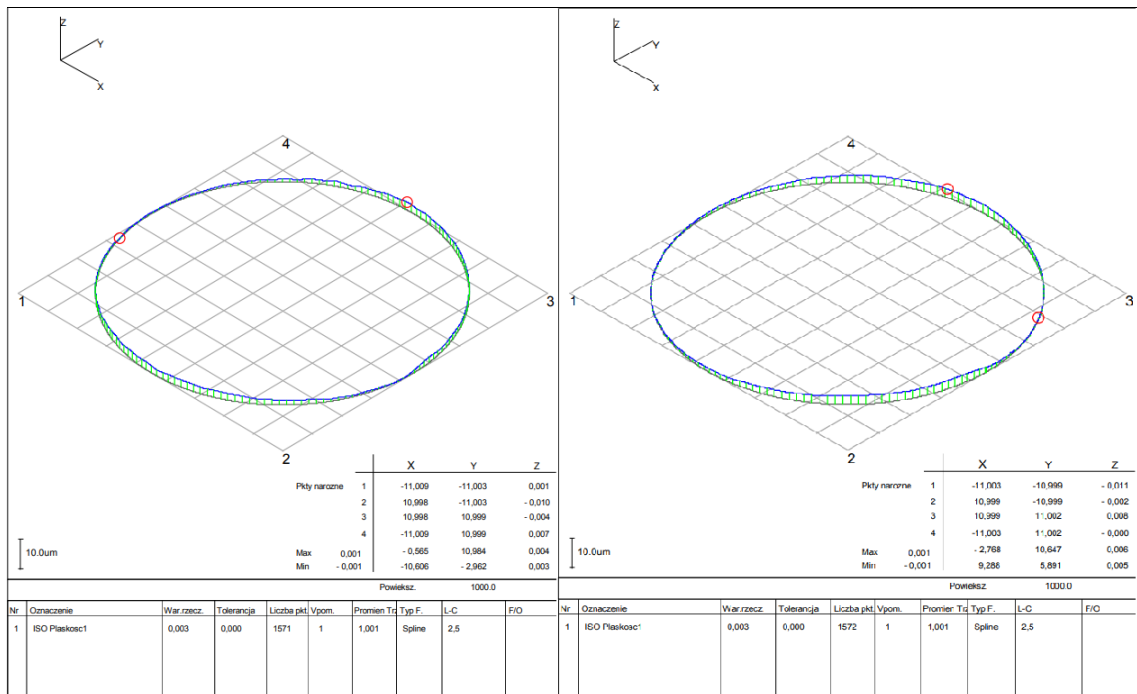
Rys 10.11 Analiza okrągłości próbek nr 1 i nr 13

Analiza okrągłości (rys. 10.11) wykazała znaczne różnice pomiędzy próbką nr 1 (0,009 [mm]), w porównaniu do próbki nr 13 (0,004 [mm]). Oznacza to, że próbka nr 13 osiągnęła niemal dwukrotnie lepszy wynik.



Rys 10.12 Analiza walcowości próbek nr 1 i nr 13

Analiza walcowości (rys. 10.12) wykazała takie same wartości jak w przypadku oceny okrągłości, to znaczy 0.009 [mm] dla próbki nr 1 i 0.004 [mm] dla próbki nr 13.



Rys 10.13 Analiza płaskości próbek nr 1 i nr 13

Analiza płaskości zmierzonych próbek (rys. 10.13) wykazała nieznaczną różnicę rzędu 0,001 [mm].

10.7. Pomiary i ocena chropowatości powierzchni badanych próbek

Po przeprowadzeniu analizy cech geometrycznych za pomocą maszyny współrzędnościowej, każda próbka została poddana pomiarom i ocenie chropowatości powierzchni. Podobnie jak wcześniej, badania te przeprowadzono w kontrolowanych warunkach, przy ustalonej temperaturze i wilgotności, aby zapewnić jak największą precyzję wyników. Pomiar był dokonywany ręcznie chropowatościomierzem Mitutoyo SJ-210 (rys. 10.14).

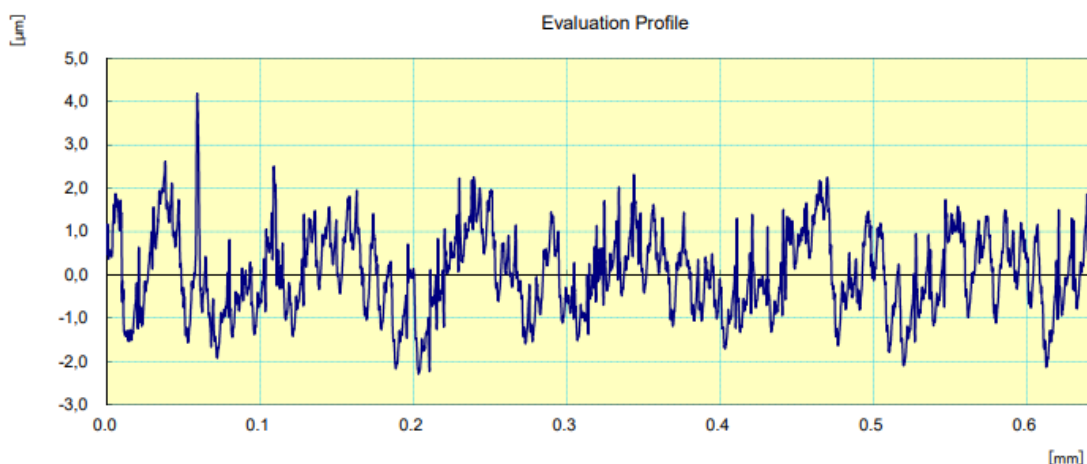


Rys 10.14 Chropowatościomierz Mitutoyo SJ-210 z zadanymi parametrami

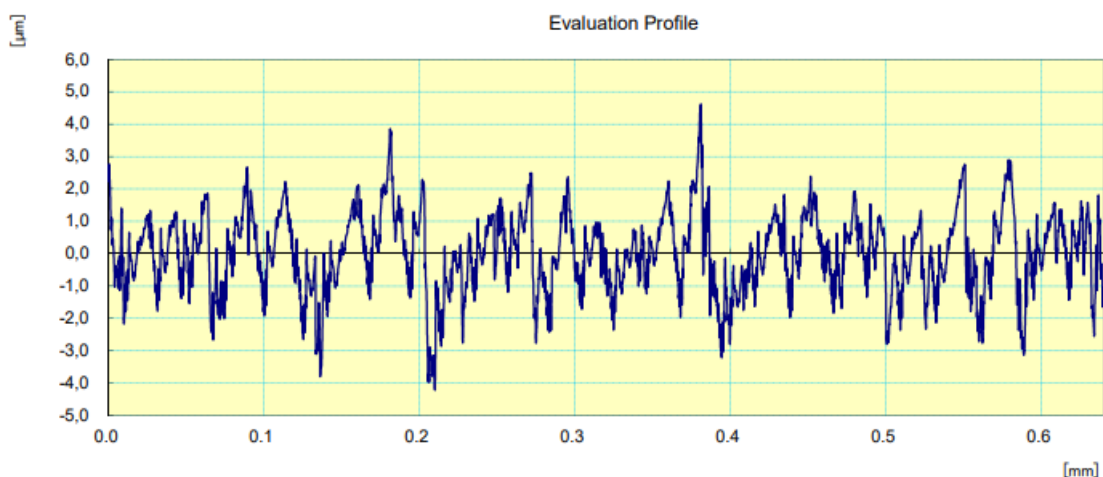
Każda próbka była mierzona na długości ośmiu odcinków pomiarowych. Badania były przeprowadzane przy długości odcinka pomiarowego (λ_c) wynoszącej 0,8 [mm] i prędkości 0,5 [mm/s]. Ustalenie tych parametrów pozwoliło na dokładne i powtarzalne pomiary na każdym wałeczku. Mierzono trzy kluczowe parametry chropowatości: Ra, Rq oraz Rz. Ra to średnia arytmetyczna wartości absolutnych odchyleń profilu rzeczywistego od linii średniej, Rq to średnia kwadratowa tych odchyleń, natomiast Rz to średnia różnica pomiędzy pięcioma najwyższymi wierzchołkami i pięcioma najgłębszymi dolinami profilu.

Na rys. 10.15 przedstawiono profile chropowatości próbki kontrolnej nr 1 i próbki nr 13 poddanej największym przeciążeniom wibracyjnym.

a.



b.



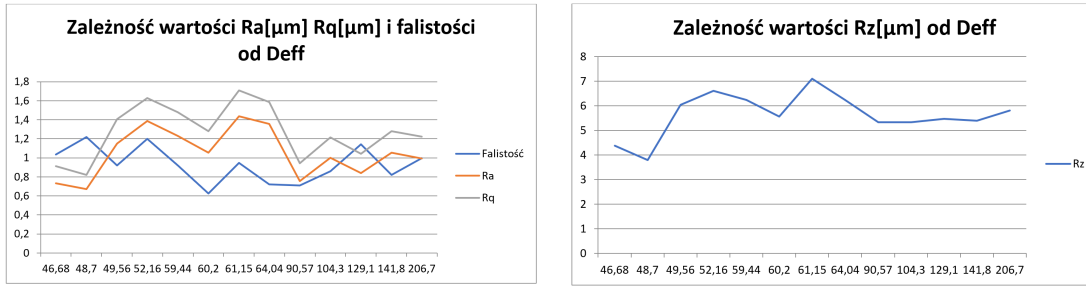
Rys 10.16 Profil chropowości Ra: a. dla próbki nr 1, b. dla próbki nr 13

Z porównania profili chropowości próbki nieobciążonej z maksymalnie obciążoną wykazała wyraźną różnicę w wysokości pików wzniesień jak również głębokość wgłębień profilu chropowości badanych próbek. Parametr Ra dla próbki nieobciążonej wyniósł $0,782 \text{ [}\mu\text{m]}$ natomiast dla próbki obciążonej z największą intensywnością wyniósł $0,960 \text{ [}\mu\text{m]}$.

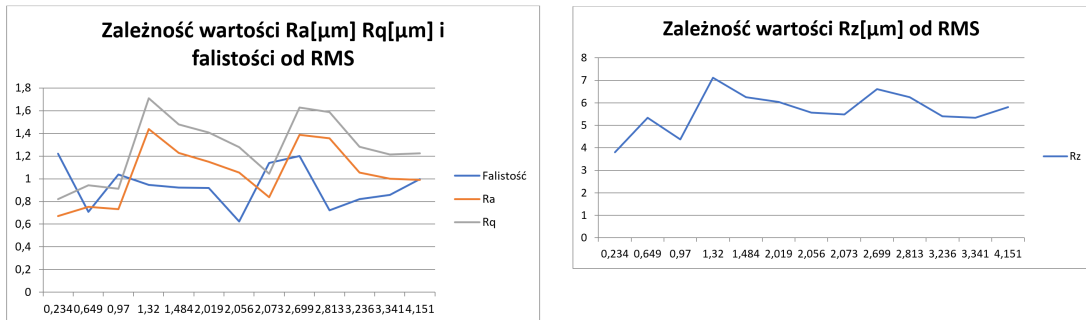
Dokonując oceny poziomu chropowości w kontekście wibracji maszyny, można zauważyć, że:

- wraz ze wzrostem poziomu drgań (RMS [mm/s]) oraz siły wzbudnika (D_{eff} [mg]), chropowość powierzchni, reprezentowana przez wskaźniki Ra, Rq i Rz, zdecydowanie rośnie dla wartości mieszczących się w granicach wibracji maszyny w stanie dobrym,
- dla większych wartości drgań chropowość powierzchni uległa poprawie względem wartości uzyskanych dla drgań średnich co przedstawiono na wykresach (rys. 10.17). Wszystkie uzyskane wyniki, jak również parametry procesu zostały zestawione w tabeli 10.1.

a.



b.



Rys 10.17 Zależności mierzonych cech od parametrów wibracji: a. dla próbki nr 1, b. dla próbki nr 13

Na przykład, w przypadku próbki nr 1, która była toczona bez wzbudzenia drgań, parametry chropowatości Ra, Rq i Rz wynoszą odpowiednio 0,782, 0,937 i 4,182 [μm]. Natomiast dla wałeczka nr 13, dla którego wzbudnik drgań pracował z największą siłą ($Deff$ [mg] = 206,7) oraz największymi drganiami (RMS [mm/s] = 4,151), parametry chropowatości wynoszą odpowiednio 0,960, 1,203 i 6,161 [μm]. Wynika stąd, że wzrost drgań jest związany większą chropowatością powierzchni.

Z drugiej strony, przeprowadzone pomiary metrologiczne nie wykazały w sposób jednoznaczny pogorszenia jakości geometrycznej próbek. Mimo wzrostu drgań, parametry takie jak płaskość, okrągłość, walcowość i falistość pozostały na porównywalnym poziomie dla wszystkich wałeczków lub nawet uległy poprawie na korzyść próbek obciążonych.

10.8. Podsumowanie

Badania, które zostały opisane w tym rozdziale miały na celu wskazanie istnienia relacji pomiędzy zużyciem maszyny a jakością wytwarzanych elementów. Taka relacja jest w literaturze przedmiotu znana, chociażby w ramach interpretacji modelu maszyny jako układu działaniowego [1, 12]. W tym celu, zbudowano stanowisko eksperymentalne, wytworzono próbki oraz wykonano pomiary metrologiczne, których wyniki poddano analizie. W ramach wykonanych badań udało się zidentyfikować cechy geometryczne oraz profile chropowatości

powierzchni wykonanych próbek. W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Współczesne standardy produkcji oraz oczekiwania klientów wymagają aby każdy komponent mechaniczny był wytworzony z precyzją odpowiadającą założonym cechom, gwarantującą jego odpowiednie działanie oraz zaplanowaną żywotność w skomplikowanych układach maszynowych.
2. Maszyny współrzędnościowe są szczególnie przydatne w procesie produkcji, ponieważ pozwalają na szybką (w przypadku dostępności programu pomiarowego) i skuteczną kontrolę jakości produktów na każdym etapie produkcji. Dzięki temu możliwe jest wczesne wykrycie i usunięcie ewentualnych nieprawidłowości, co znacznie zwiększa jakość produktów i obniża koszty produkcji.
3. Wyniki pomiarów cech geometrycznych i chropowatości powierzchni są z jednej strony kluczowym sposobem klasyfikacyjnej oceny jakości produktów, a z drugiej mogą być podstawą oceny stopnia zużycia elementów maszyn technologicznych.
4. Pomiary metrologiczne jakości wykonania produktów umożliwiają identyfikację i usunięcie potencjalnych problemów zarówno w procesie produkcyjnym, jak i w procedurach eksploatacji maszyn.

BIBLIOGRAFIA

1. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
2. Ciszewski A.: Ocena zużycia technicznego maszyn i urządzeń technicznych. Ośrodek Rzeczoznawstwa i Konsultingu SIMP-ZORPOT w Łodzi, Warszawa 2008.
3. Domagański M.: Metrologia techniczna. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2001.
4. Hamrol A.: Zarządzanie i inżynieria jakości. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
5. Jakubiec W.: Metrologia wielkości geometrycznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
6. Lipiński J.: Diagnostyka procesów wytwarzania. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2016.
7. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
8. Strona internetowa: <https://is.gliwice.pl/biblioteka-plikow/stabilizacja-wibracyjna-urzadzenia-technologie-uslugi>.
9. Strona internetowa: https://www.schaeffler.pl/pl/news_media/mediateka/?tab=mediathek-pub&uid=3512641&subfilter=app:dc;language-vid:167;language-pub:167;mediatyp-pub:all;referencetyp-pub:0.

10. Zalewski K.: Metrologia warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.
11. Zawada J.: Metrologia wielkości geometrycznych – zagadnienia wybrane. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 2011.
12. Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1996.

Rozdział 11

SYSTEM STEROWANIA GRUPĄ MIKROBUSÓW PODĄŻAJĄCYCH W TRYBIE PLATOONING

Kraczyk Witold¹, Panfil Wawrzyniec²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, witold.kraczyk@polsl.pl

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, wawrzyniec.panfil@polsl.pl

11.1. Wstęp

W ramach współpracy z firmą Blees sp. z o.o. powstała potrzeba opracowania algorytmu podążania jednym pojazdem za drugim w sposób autonomiczny, co w konsekwencji zapewni oszczędności finansowe poprzez zmniejszenie liczby wymaganych kierowców obsługujących pojazdy. Współpraca miała miejsce w ramach projektu „Autonomiczny mikrobus o napędzie elektrycznym przystosowany do poruszania się w trybie platooningu wraz z inteligentnym systemem informacji pasażerskiej” o numerze 10/060/FSB/150, dofinansowanego przez Śląskie Centrum Przedsiębiorczości. Konsorcjantami realizującymi projekt były Blees sp. z o.o. (lider projektu) oraz Politechnika Śląska (partner). Celem było zaproponowanie systemu platooningu dla autonomicznych mikrobusów firmy Blees, w oparciu o zastosowany w nich zestaw czujników. Powstały algorytmy implementujące zaproponowany system, których poprawność działania została sprawdzona w testach jednostkowych za pomocą symulatora Carla, umożliwiającym bardzo dokładne odzwierciedlenie warunków rzeczywistych, w których będą poruszały się rzeczywiste pojazdy.

11.2. Platooning

Platooning polega na zarządzaniu grupą pojazdów jadących za sobą w konwoju. Istnieje kilka poziomów złożoności platooningu, w zależności od stopnia autonomiczności oraz liczby kierowców. W przypadku najwyższego poziomu platooningu jeden kierowca steruje pierwszym pojazdem jako lider konwoju

złożonego ze sterowanych autonomicznie pojazdów. Taki rodzaj jazdy ma wiele zalet m.in.

- redukcja liczby kierowców, o których jest coraz trudniej w obecnych czasach,
- zmniejszenie oporu powietrza, co redukuje zużycie energii potrzebnej do napędu kół,
- zmniejszenie ruchu ulicznego [3],
- obniżenie emisji CO₂ [4],
- zmniejszenie zajmowanego miejsca na drodze przez pojazdy,
- zwiększone bezpieczeństwo.

Pojazdy poruszające się w konwoju komunikują się między sobą wymieniając dane (Rys.11.1) o prędkości, pozycji oraz wykrytych przeszkodach, dzięki czemu możliwe jest zachowanie optymalnego odstępu między pojazdami, a w razie potrzeby gwałtownego hamowania pierwszego pojazdu, pozostałe pojazdy niemal niezwłocznie powtarzają zachowanie pierwszego pojazdu.



Rys. 11.1 Komunikacja między pojazdami i centrum zarządzania flotą [2]

Korzyści dla grupy z poruszania się w trybie platooningu z wzajemną wymianą informacji:

- możliwość dynamicznej zmiany liczebności pojazdów w konwoju,
- zmniejszenie zużycia energii poprzez zmniejszenie oporu powietrza w pojazdach poruszających się blisko siebie, za liderem,
- ostrzeganie pozostałych pojazdów w plutonie o potencjalnym niebezpieczeństwie, szybsza reakcja w przypadku awaryjnego hamowania poprzez pominięcie czynnika ludzkiego.

11.3. Obiekt badań

Pojazdem, dla którego opracowano system platooningu jest mikrobus BB1 firmy Blees (Rys.11.2).



Rys. 11.2 Pojazd firmy BLEES

Pojazd ma wymiary 5x2.1 m, masę 2450 kg i jest w stanie pomieścić 12 osób. Mikrobus jest w pełni dostosowany do jazdy autonomicznej, ale istnieje również opcja przejścia nad nim kontroli przez zdalnego operatora z Centrum Zarządzania i Sterowania Pojazdami. Jest to możliwe dzięki wyposażeniu go w zestaw czujników takich jak: zestaw 10 kamer o polu widzenia 60,120 oraz 200 stopni, 3 radary, 7 laserowych czujników odległości LIDAR, nawigacja satelitarna GNSS oraz 3 anteny GPS.

Jego model zachowujący parametry fizyczne i dynamiczne został odwzorowany w programie Blender (Rys.11.3), a następnie przeniesiony do środowiska symulacyjnego Carla.



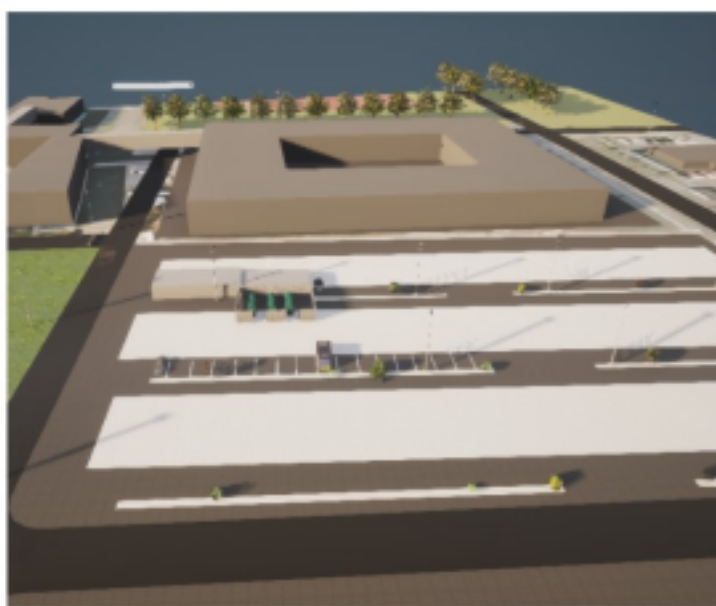
Rys. 11.3 Model mikrobusa w programie Blender

11.4. Symulator

Symulator Carla oparty na silniku Unreal Engine 4 jest otwartoźródłowym programem umożliwiającym rozwój oprogramowania i algorytmów autonomicznej jazdy. Pozwala na tworzenie map oraz dodawanie pojazdów, zachowując ich cechy fizyczne oraz na symulacje ruchu ulicznego w czasie rzeczywistym. Dodane w programie pojazdy można wyposażyć w cały zakres czujników wykorzystywanych przy autonomicznej jeździe pojazdami. W ramach pracy w projekcie “Autonomiczny mikrobus o napędzie elektrycznym przystosowany do poruszania się w trybie platooningu wraz z inteligentnym systemem informacji pasażerskiej” powstała uproszczona mapa (Rys.11.5) przedstawiająca parking znajdujący się na ul. Bojkowskiej 37A w Gliwicach (Rys.11.4).



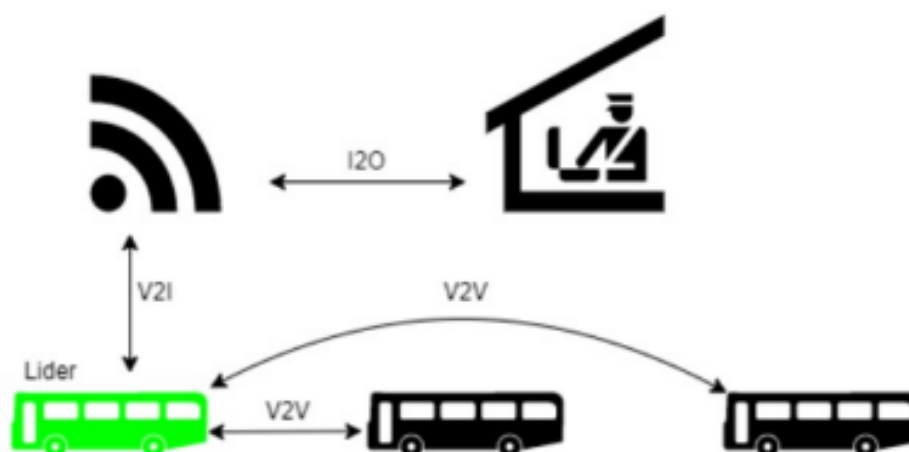
Rys. 11.4 Parking przed siedzibą firmy Blees



Rys. 11.5 Wirtualny model parkingu

11.5. Koncepcja systemu

Na podstawie analizy wielokryterialnej wykonanej w pracy [1] zostało wybrane następujące rozwiązanie systemu sterowania pojazdami w trybie platooningu: sterowanie plutonem odbywa się za pośrednictwem lidera, który wykonując manewry przesyła dane do pozostałych pojazdów (Rys.11.6). Pojazdy zwracają dane telemetryczne, w tym w szczególności o pozycji i odległości do pojazdu poprzedzającego, dzięki czemu system pozwala na zachowanie przez nich właściwego dystansu. Do centrum zdalnego sterowania wysyłane są dane telemetryczne w celu monitorowania i kontroli konwoju (Tab.11.1).



Rys.11.6 Schemat komunikacji między pojazdami i centrum zdalnego sterowania

Tab.11.1 Informacje wysyłane w obrębie systemu

Rodzaj komunikacji	Przesyłane informacje
Operator ->Lider	Sygnaly sterujące
Lider -> Operator	Dane pozycyjne plutonu, prędkość pojazdów
Lider -> pozostałe pojazdy	Prędkość docelowa
Pojazdy -> Lider	Prędkość aktualna, obraz z kamery, odległość do pojazdu poprzedzającego, dane pozycyjne

Taki rodzaj komunikacji niesie za sobą następujące zalety:

- zapewnienie szybkiego reagowania pojazdami,
 - ograniczona ilość przesyłanych danych,
- oraz następującą wadę:
- konieczność zapewnienia systemu bezpieczeństwa po utracie połączenia z liderem, ponieważ jako jedyny z pojazdów ma nawiązywać połączenie z centrum sterowania.

W systemie można wyróżnić komunikacje V2V (Vehicle to Vehicle), V2I (Vehicle to Infrastructure), I2O (Infrastructure to Operator). W zależności od rodzaju komunikacji wysyłane zostają następujące dane:

Dane przesyłane między pojazdami V2V:

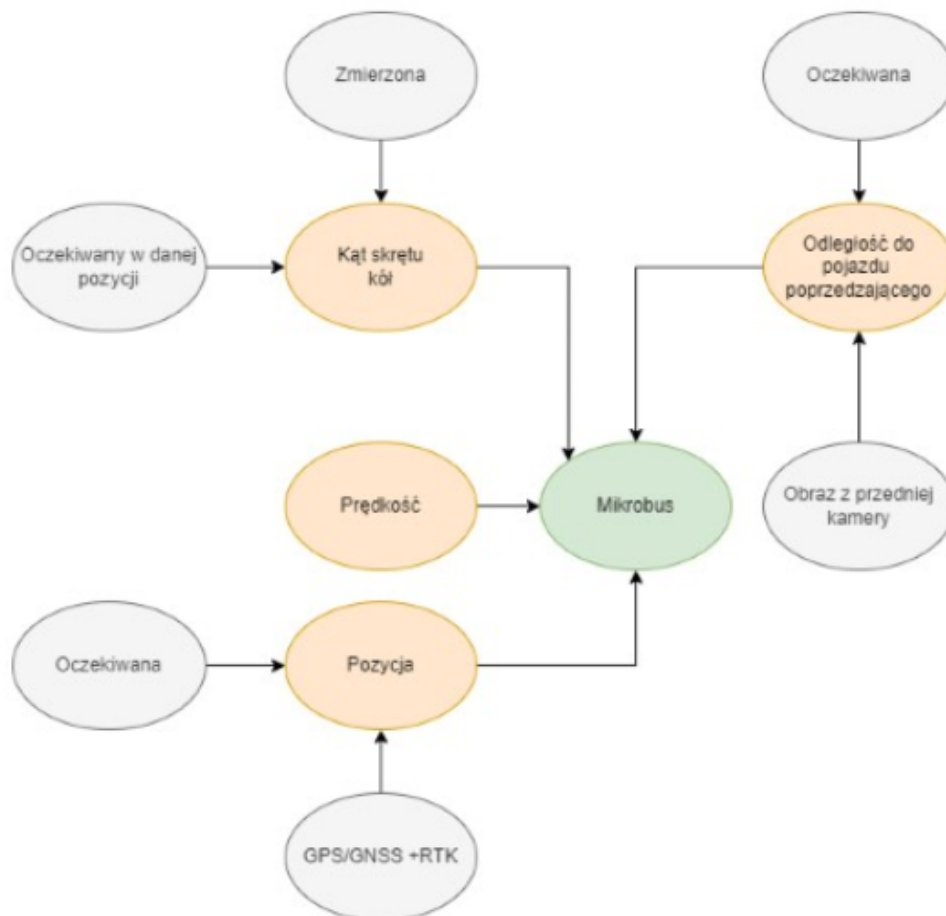
- prędkość pojazdu;
- pozycja pojazdu;
- obraz z kamer.

Dane przesyłane między pojazdami a operatorem (V2I i I2O):

- zadana prędkość jazdy;
- zadany kąt skrętu kół;
- pozycja pojazdu;
- ID pojazdu;
- aktualna prędkość jazdy.

11.6. Algorytm autonomicznej jazdy w kolumnie

Na Rys.11.7 przedstawiono algorytm, którego zadaniem jest zapewnienie bezpiecznej jazdy pojazdów autonomicznych poruszających się za liderem. Pojazdy mają podążać w odpowiedniej odległości (zgodnej z założeniami) między sobą oraz ich trasa ma się jak w największym stopniu pokrywać z trasą pierwszego pojazdu. Dane wejściowe są dostarczane z czujników pojazdów.



Rys.11.7 Wymagane dane do obsługi algorytmu

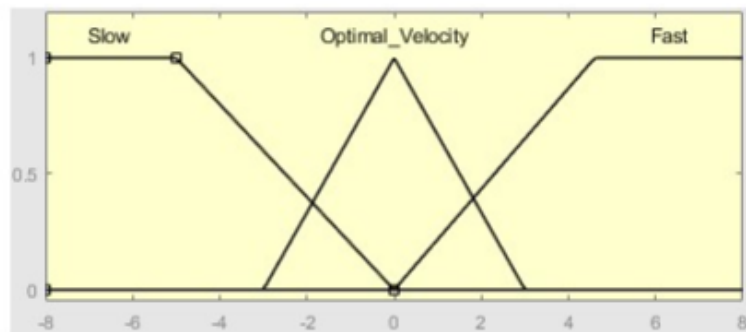
Algorytm nadrzędny przekazuje wyżej wymienione dane do odpowiednich zależnych od niego algorytmów służących do wyliczenia prędkości pojazdów podążających za liderem oraz kąta skrętu ich kół. Współrzędnych z GPS w osi X i Y zostają wysyłane do algorytmu odpowiedzialnego za kąt skrętu kół, natomiast różnica pozycji pojazdów (dystans między nimi) i różnica prędkości są wysyłane do algorytmu sterującego prędkością pojazdu. Wartości wynikowe otrzymane z tych programów są następnie wysyłane jako wiadomość w sieci ROS2 do wirtualnego pojazdu w symulatorze.

Zostały opracowane następujące algorytmy służące do sterowania prędkością i kątem skrętu kół:

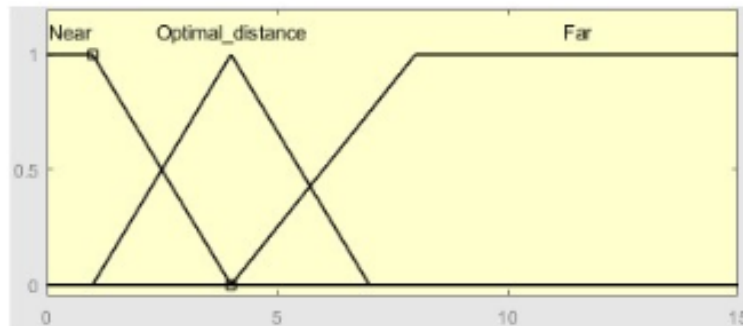
1. Algorytm logiki rozmytej – dane wejściowe (odległość między pojazdami oraz różnica ich prędkości) zostają rozmyte w oparciu o odpowiednie zbiory, następnie na podstawie ustalonych reguł następuje wnioskowanie, którego wynik zostaje otrzymany po operacji defuzyfikacji jedną z wybranych metod (np. minimum).
2. Algorytm analizy obrazu - obraz z przednich kamer pojazdu 2 oraz 3 jest wysyłany do algorytmu przetwarzającego obraz za pomocą OpenCV, wykrywającego położenie poprzedzającego pojazdu przed pojazdem bieżącym, względem pozycji kamery.
3. Algorytm punktów kontrolnych - algorytm ma na celu na podstawie aktualnych pozycji pojazdów i zapisanych ich poprzednich pozycji, dotarcie pojazdu śledzącego do punktu kontrolnego, wyznaczonego na bieżąco co przejechane 0,2 m przez lidera.

Testowane były następujące charakterystyki sterowników prędkości:

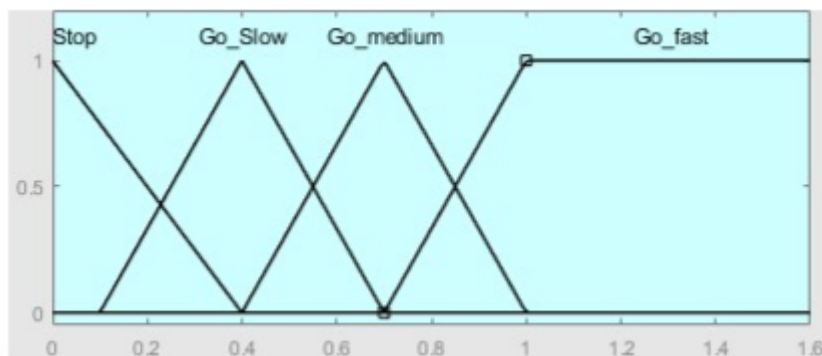
1. Sterownik liniowy - prędkość pojazdu jest równa prędkości pojazdu poprzedzającego, zmodyfikowana o różnicę w pozycji pomniejszoną o 5m (przyjęty optymalny dystans). Gdy odległość jest mniejsza, wartość zadanej prędkości zostaje obniżona. $Velocity2 = Velocity1 + (difference\ position - 5m)$.
2. Logika rozmyta, wariant 1 - Do sterownika wykorzystywane są informacje o różnicy odległości między pojazdami oraz o różnicy ich prędkości. Dane te są następnie rozmywane za pomocą dobranych poniżej zbiorów (Rys.11.8 i Rys.11.9), a następnie następuje defuzyfikacji (Rys.11.10).



Rys.11.8 Zbiór rozmyty prędkości dla sterownika logiki rozmytej nr 1

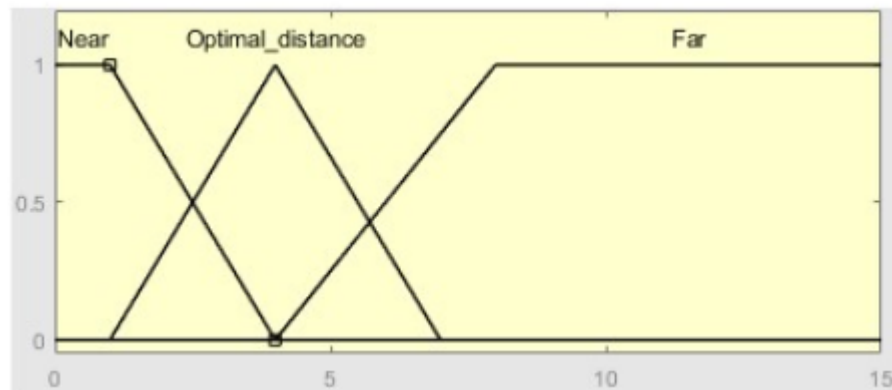


Rys.11.9 Zbiór rozmyty różnicy pozycji dla sterownika logiki rozmytej

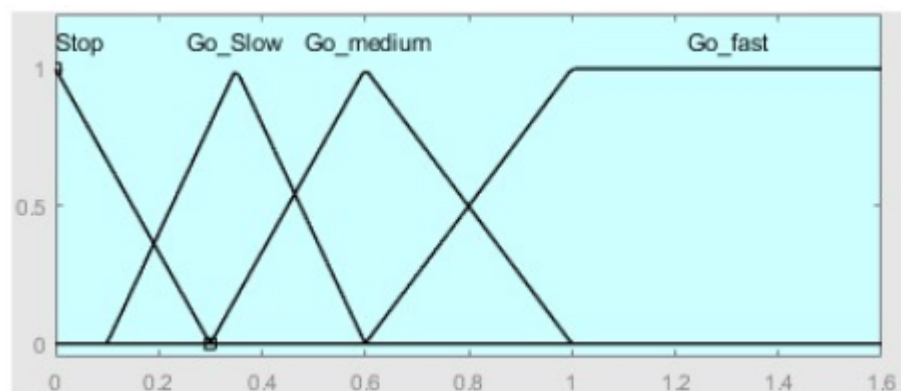


Rys.11.10 Zbiór rozmyty defuzyfikacji dla sterownika logiki rozmytej nr 1

- Logika rozmyta, wariant 2 - tak jak w poprzednim sterowniku, zmieniono natomiast zbiór rozmyty różnicy pozycji (Rys.11.11) oraz defuzyfikacji (Rys.11.12).



Rys.11.11 Zbiór rozmyty różnicy pozycji dla sterownika logiki rozmytej nr 2



Rys.11.12 Zbiór rozmyty defuzyfikacji dla sterownika logiki rozmytej nr 2

Sposoby sterowania kątem skrętu pojazdu:

1. Punkty kontrolne - kąt skrętu jest wyznaczany w oparciu o różnicę kąta między wektorem, wzdłuż którego porusza się aktualnie pojazd, a wektorem z wcześniejszej pozycji pojazdu, a najbliższym punktem kontrolnym, ustalonym na podstawie wcześniejszej pozycji lidera. Pozycje pojazdów są otrzymywane z czujnika GPS wspartego RTK.
2. Kamera, funkcja liniowa - wynikowa pozycja środka wykrytego obiektu w algorytmie analizy obrazu zostaje odpowiednio przeskalowana, tak aby zakres wartości jakie może przyjąć mieścił się od -1 do 1, a następnie jest mnożona razy 0,6 - maksymalną wartość skrętu, jaka może zostać wysłana przez wiadomość w sieci ROS2. $\text{Turning value} = ((\text{detected position horizontal} - 960)/960) * 0,6$.
3. Kamera, funkcja potęgowa - wynikowa pozycja środka wykrytego obiektu w algorytmie analizy obrazu zostaje odpowiednio przeskalowana, tak aby zakres wartości jakie może przyjmować mieścił się od -1 do 1, a następnie jest potęgowana do 3 potęgi i mnożona razy 3. Charakterystyka funkcji została dobrana tak, by w odpowiednich odległościach wykrycia środka obiektu od centrum, prędkość stopniowo rosła, osiągając coraz to

gwałtowniej wyższe wartości. $Turningvalue = 3 * ((detected\ position\ horizontal - 960)/960)^3$

W celu sprawdzenia, który sterownik jest optymalny, przetestowano ich działania badając następujące scenariusze sytuacji drogowych:

1. Jazda w przód z hamowaniem;
2. Skręt na skrzyżowaniu;
3. Rondo (Rys.11.13);
4. Wjazd u wyjazd z zatoczki.

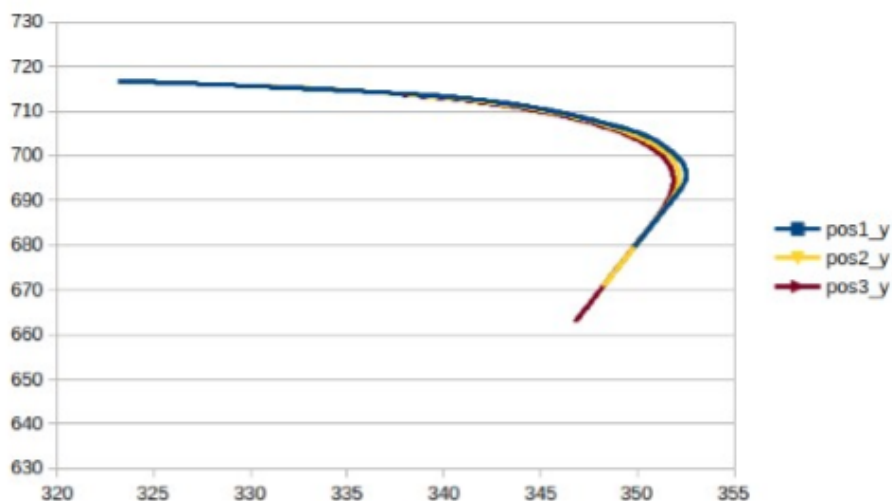


Rys.11.13 Scenariusz przejazdu pojazdów przez rondo

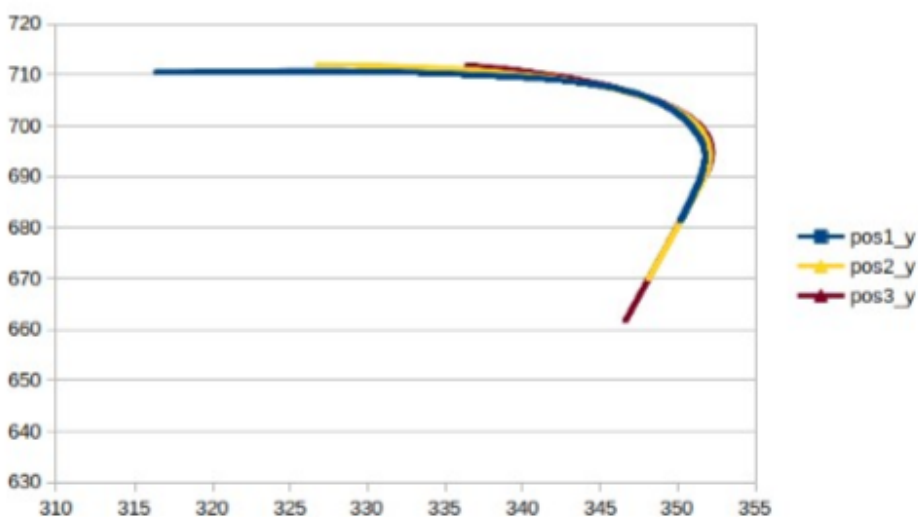
11.7. Badania weryfikacyjne

Dla każdego scenariusza przeprowadzono test weryfikujący odchyłkę od trasy oraz odległość od pojazdu poprzedzającego. Błędy sterowników określone są jako procentowa wartość stosunku pomiarów przekraczających wartość graniczną ustaloną w założeniach do całkowitej liczby pomiarów.

Przykładowe wyniki dla scenariusza nr 2 przedstawiono na Rys.11.14 i Rys.11.15).



Rys. 11.14 Ścieżka pojazdu z wykorzystaniem liniowego sterownika skrętu



Rys. 11.15 Ścieżka pojazdu z wykorzystaniem potęgowego sterownika skrętu

13.8. Podsumowanie

W ramach pracy magisterskiej został opracowany system platooningu grupy mikrobusów, zostały opracowane po 3 sterowniki prędkości oraz skrętu kół pojazdów. Testy weryfikacyjne poprawności działania systemu zostały przeprowadzone w symulatorze Carla, opartego na silniku Unreal Engine 4. Jako obiekt badań użyty został, opracowany przez autora niniejszej pracy, model mikrobusa z zaimplementowanymi czujnikami oraz model parkingu przed siedzibą firmy Bleeps. Przeprowadzono 30 testów, na podstawie których wybrano optymalne sterowniki prędkości i skrętu pojazdu, jakimi są dla prędkości sterownik logiki rozmytej numer 2 oraz sterownik kąta skrętu wykorzystujący

dane z GPS. Sterowniki oparte o logikę rozmytą lepiej radzą sobie z wyznaczeniem optymalnej prędkości dla pojazdów niż sterownik liniowy. Poprzez dodatkowe zmniejszenie optymalnego dystansu między pojazdami, co zostało zaimplementowane w sterowniku logiki rozmytej numer 2, uzyskano podobny efekt jak w przypadku sterownika numer 1, jednak powołując się na korzyści wynikające z bliskiej odległości między pojazdami, opisane w rozdziale 3, zdecydowano wybrać ten właśnie sterownik jako optymalny. Algorytm podążania za pojazdem wykorzystującego dane z RTK GPS ma niemal 100% dokładność odwzorowania ścieżki lidera.

Opracowany system sterowania pojazdami w trybie platooning oprócz testów w symulatorze może zostać wykorzystany w rzeczywistych pojazdach, ze względu na prostotę jego implementacji. Po dostosowaniu wiadomości w sieci ROS2 tak, aby zamontowane na pojeździe czujniki współpracowały z systemem, możliwe jest podążanie pojazdów jeden za drugim.

BIBLIOGRAFIA

1. Witold Krafczyk. Opracowanie koncepcji systemu sterowania grupą pojazdów podążających w trybie platooning. Praca przejściowa, Politechnika Śląska, 2022.
2. Seolyoung Lee, Cheol OH. A methodology to establish operational strategies for truck platooning on freeway on-ramp areas. *Journal of Korean Society of Transportation*, 36:67–85, 04 2018.
3. Teron Nguyen, Meng Xie, Xiaodong Liu, Nimal Arunachalam, Andreas Rau, Bernhard Lechner, Fritz Busch, and Y. D. Wong. Platooning of autonomous public transport vehicles: The influence of ride comfort on travel delay. *Sustainability*, 11(19), 2019.
4. Joachim Scholl, Nils Boysen, and Armin Scholl. E-platooning: Optimizing platoon formation for long-haul transportation with electric commercial vehicles. *European Journal of Operational Research*, 304(2):525–542, 2023.

Rozdział 12

MODEL WIRTUALNY URZĄDZENIA DO AUTOREHABILITACJI OSÓB PO ZABIEGU ENDOPROTEZOPLASTYKI STAWU ŁOKCIOWEGO

Froń Michał¹, Wyleżoł Marek²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, mfroni@live.com

²Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, marek.wylezol@polsl.pl

12.1. Wstęp

Problematyka poruszona w rozdziale wywodzi się z rozważań nad wykorzystaniem wiedzy z zakresu automatyki, robotyki, mechatroniki i szeroko pojętej inżynierii w zastosowaniu do wspomagania procesu rehabilitacyjnego pacjentów po wykonanych zabiegach endoprotezoplastyki stawów. Dotychczasowe badania pokazują, że rozwiązania automatyzujące wspomniany proces rehabilitacyjny dość dobrze wspomagają bądź całkowicie zastępują pracę fizjoterapeutów. Obecnie dostępne na rynku urządzenia tego rodzaju to w znakomitej większości wolnostojące roboty, które uwiązują pacjenta do miejsca wykonywania ćwiczeń rehabilitacyjnych. Przenośne urządzenia dające pacjentom nieco większą swobodę w wyborze miejsca użytkowania to nadal nisza, pokazująca bardziej potencjał takich rozwiązań aniżeli końcowy produkt, który mógłby zostać wprowadzony na rynek.

To daje szansę i motywację do realizacji badań nad tego typu urządzeniami, co może przybliżyć osiągnięcie celu jakim jest wdrożenie rozwiązania wspomagającego codzienną rehabilitację pacjentów, szczególnie poza placówkami rehabilitacyjnymi.

W związku z tym, postawiono sobie następujące cele realizacji badań: opracowanie urządzenia mechatronicznego mogącego uczestniczyć w procesie rehabilitacyjnym pacjenta po zabiegu endoprotezoplastyki stawu łokciowego. Wykonane prace objęły m.in.:

- opracowanie konstrukcji układu mechanicznego,
- opracowanie układu sterowania urządzenia,
- utworzenie modelu kasy CAD urządzenia,
- przeprowadzenie badań weryfikacyjnych w środowisku wirtualnym.

12.2. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Na podstawie przeprowadzonych analiz literaturowych oraz własnych przemyśleń, określone zostały szczegółowe założenia, które powinno spełniać projektowane urządzenie do wspomagania procesu rehabilitacji po zabiegu endoprotezoplastyki stawu łokciowego:

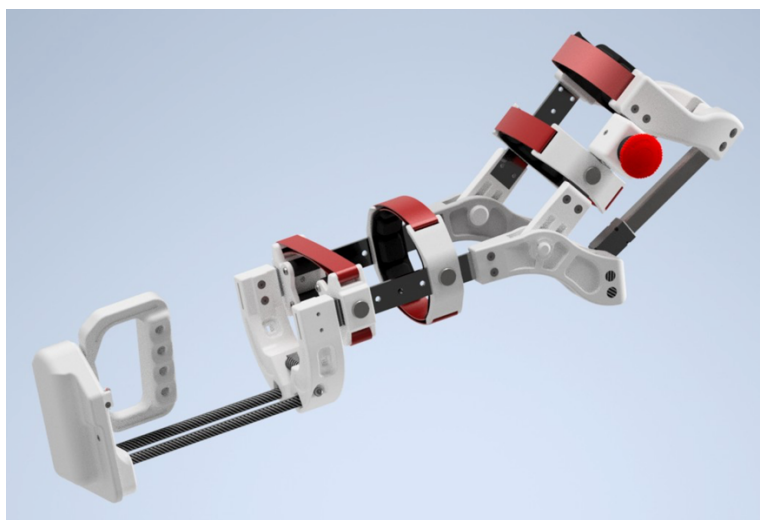
1. na podstawie zaleceń dotyczących terapii kończyn górnych zakłada się, że masa urządzenia nie powinna przekraczać 2 kg [9],
2. projektowane urządzenie musi posiadać min. dwa stopnie swobody - wymuszany ruch musi dotyczyć zgięcia stawu łokciowego oraz ruchu obrotowego przedramienia (supinacja/pronacja), gdyż tylko w ten sposób urządzenie będzie miało realny wpływ na powodzenie procesu rehabilitacji kończyny [11],
3. urządzenie powinno być bezpieczne oraz przyjazne w użytkowaniu dla potencjalnego pacjenta,
4. urządzenie powinno być mobilne - pacjent powinien mieć możliwość wyboru miejsca odbywania rehabilitacji,
5. konstrukcja urządzenia powinna umożliwić ograniczenia kątowe zakresów obu wspomaganych ruchów,
6. mocowanie urządzenia do kończyny powinno być odpowiednio sztywne, jednocześnie umożliwiając realizację ruch obrotowego (supinacja/pronacja) przedramienia,
7. musi zostać zapewniona możliwość regulacji mocowań urządzenia w zależności od wymiarów kończyny pacjenta.

12.3. Konstrukcja urządzenia do autorehabilitacji

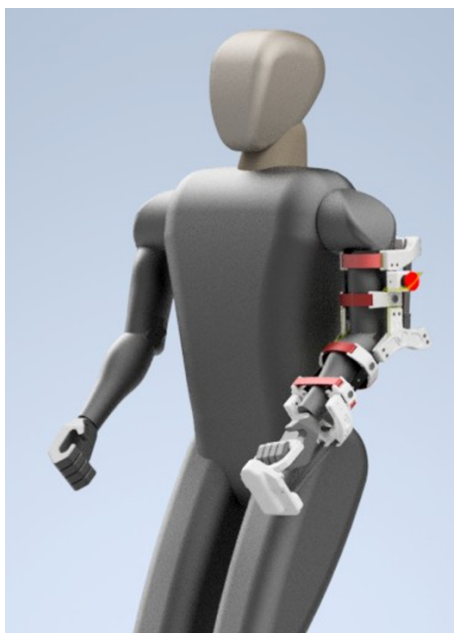
Opracowując konstrukcję urządzenia do autorehabilitacji rozwiązano szereg problemów technicznych o charakterze mechanicznym związanych m.in. z doбором połączeń ruchowych, mocowań oraz odpowiednim układem napędowym. Poszczególne rozwiązania zostały opracowane na podstawie przeprowadzonego wielokryterialnego wyboru koncepcji optymalnej na podstawie analizy obecnego stanu techniki [4], uwzględniając sformułowane w poprzednim rozdziale założenia projektowe. Osobno rozwiązano problem sterowania działaniem urządzenia.

Zapis konstrukcji urządzenia w postaci modelu klasy CAD dokonano z użyciem systemu Autodesk Inventor Professional 2020 [2]. Natomiast do opracowania systemu sterowania użyto Autodesk Tinkercad [3].

Widok docelowego modelu klasy CAD urządzenia zaprezentowano na rys. 12.1, a na rys. 12.2 pokazano urządzenie w kontekście docelowego użytkownika.



Rys 12.1 Widok docelowego modelu urządzenia

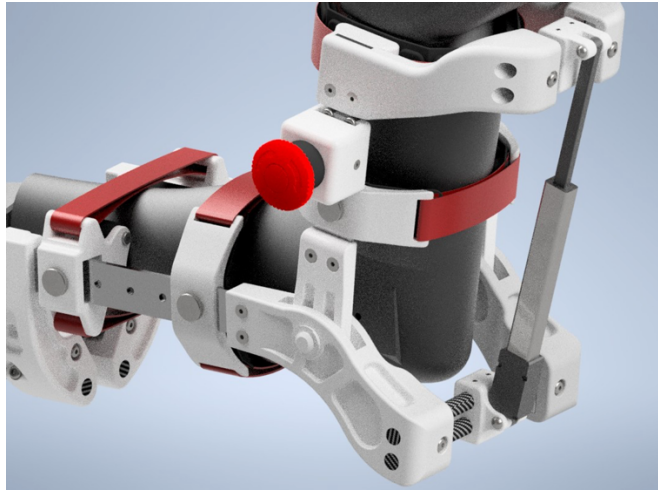


Rys 12.2 Widok docelowego modelu urządzenia w kontekście użytkownika

W kolejnych punktach rozdziału omówiono główne elementy składowe części mechanicznej urządzenia.

Połączenie ruchowe stawu łokciowego

Stosunkowo małe prędkości liniowe oraz kątowe występujące podczas działania urządzenia, pozwoliły na zastosowanie łożyskowania rozwiązania firmy IGUS: czop [6] wraz z tuleją ślizgową [7]. Łożyska te wykonane z materiałów polimerowych pozwalają na minimalizację masy przy zachowaniu wysokich własności mechanicznych komponentów (rys. 12.3).

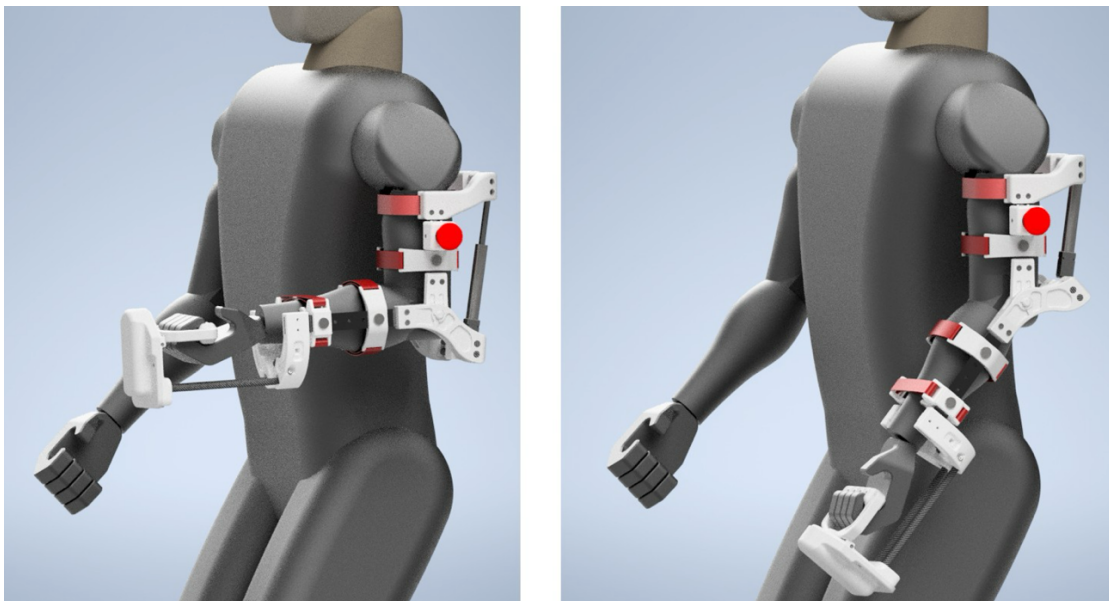


Rys 12.3 Widok połączenia ruchowego w osi stawu łokciowego wraz z siłownikiem

Wymuszenie ruchu zginającego kończynę

Na podstawie wcześniej wykonanej analizy wielokryterialnej możliwych napędów [4] określono, że optymalnym wyborem będzie dobór siłownika liniowego. Umożliwia on odpowiedni wysuw oraz pozycjonowanie mocowania siłownika. Odpowiednio długi wysuw siłownika powinien zapewnić wymagane kątowne zgięcie stawu. Jednakże zwiększenie wysuwu wymuszało większą długość siłownika w złożeniu, co jednocześnie ograniczało możliwy zakres prostowania kończyny.

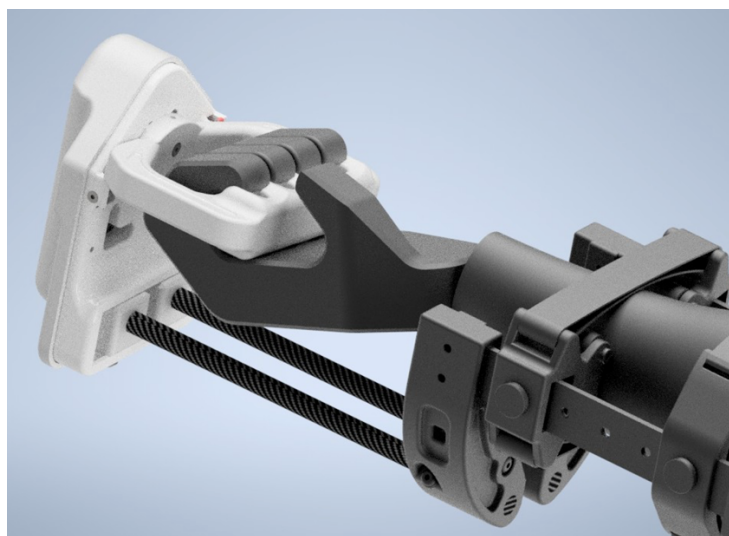
Dlatego też odpowiednie umiejscowienie dobranego siłownika pozwoliło na uzyskanie, przy wykorzystaniu siłownika o wysuwie 100 mm [10], zakresu pracy kończyny w zakresie od 30° do 100° (gdzie 0° oznacza kończynę w pełni wyprostowaną). Wizualizację wspomnianego ruchu przedstawiono na rys. 12.4.



Rys 12.4 Realizacja ruchu zginającego/prostującego kończynę

Wymuszenie ruchu obrotowego przedramienia

Wymuszenie ruchu obrotowego nadgarstka zrealizowane zostało za pomocą rękocyfki napędzanej przez silnik. Chwyty umieszczone bezpośrednio na wałku wyjściowym z przekładni napędu umożliwiły ruch obrotowy nadgarstka w zakresie od -65° do 65° . Ruch ten został ograniczony za pomocą czujników krańcowych, pełniących jednocześnie rolę mechanicznego ogranicznika. W ten sposób uzyskano pewność, że nawet w przypadku wystąpienia nieprzewidzianej awarii, urządzenie nie wykona ruchu spoza dopuszczalnego zakresu kąтового. Wizualizację układu realizującego ruch obrotowy przedstawiono na rys. 12.5.



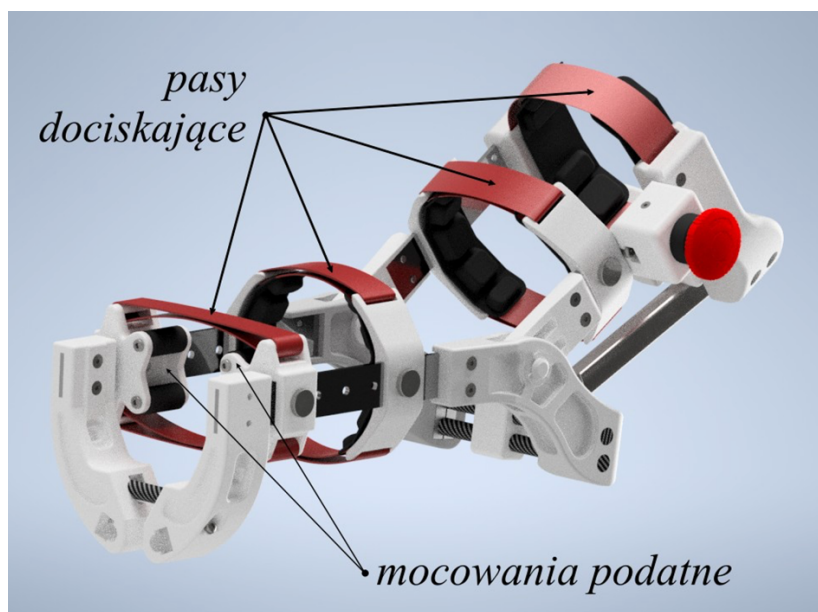
Rys 12.5 Widok rękocyfki wymuszającej ruch obrotowy kończyny

Mocowanie do kończyny

Na podstawie wykonanej analizy zachowania się tkanek miękkich kończyny podczas realizacji ćwiczeń rehabilitacyjnych [4] w urządzeniu zastosowano dwa rodzaje mocowań. Pierwsze z nich zakłada wykorzystanie elastycznych pasów zapinanych na rzep do uchwycenia kończyny. Dotyczy to miejsca, gdzie tkanki miękkie nie będą nadto uciskane w trakcie działania urządzenia.

Drugie mocowanie składa się zarówno z pasa dociskającego kończynę oraz podatnych rolek, obracających się wraz z ruchem kończyny. W ten sposób uzyskano jednoznaczne mocowanie kończyny, eliminując jednocześnie uciskanie tkanek miękkich podczas ćwiczeń. Wizualizację zaprojektowanych mocowań przedstawiono na rys. 12.6.

Ze względu na kontakt skóry ludzkiej z elementami konstrukcyjnymi, istotny był dobór materiałów nietoksycznych, takich jak aluminium, plastik czy poliester. Do wykonania wszystkich elementów mocujących kończynę zastosowano: ABS - elementy mocujące, podatne rolki; PET - pasy nośne oraz bawełna - wyściółka mocowań. Dzięki temu zminimalizowano ryzyko wystąpienia reakcji alergicznej przy jednoczesnym zachowaniu komfortu użytkowania.



Rys 12.6 System mocowania do kończyny

12.4. Układ sterowania

Opisany wcześniej układ mechaniczny urządzenia do autorehabilitacji zapewnia odpowiednie przeniesienie sił, współpracę z pacjentem, realizację ustalonych ruchów i ich zakresów, dobór napędów. Aby jednak układ mechaniczny mógł odpowiednio zadziałać, konieczne jest jego sterowanie. Zapewnienie sterowania zależne od jest od tzw. warstwy sprzętowej, jak i programowej.

Część sprzętowa

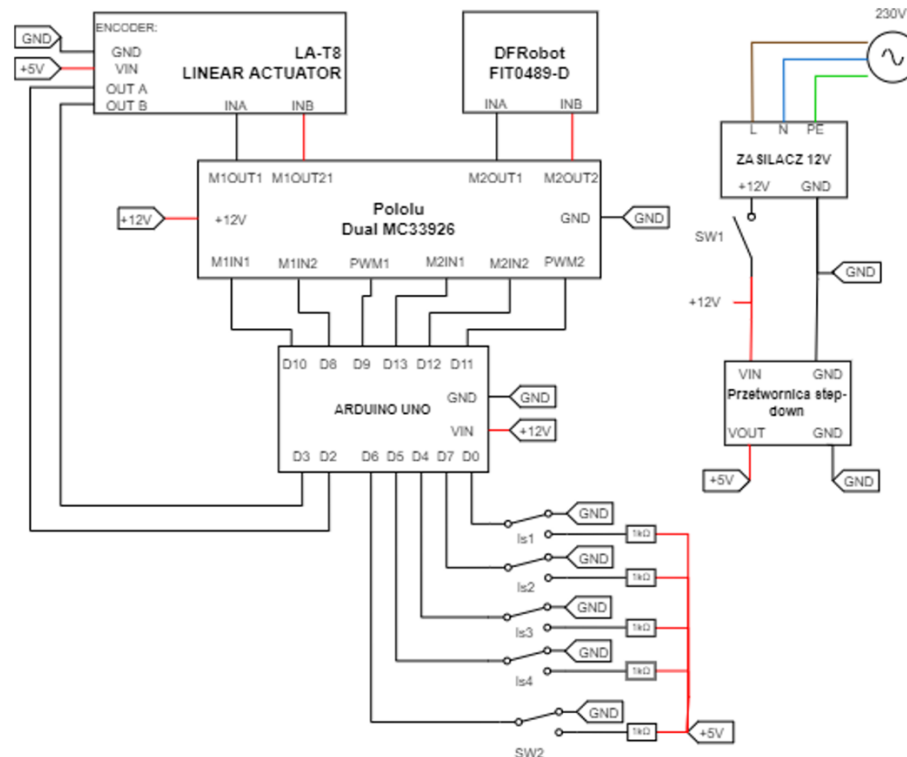
Założenia projektowe wymuszały m.in. ograniczenia masy urządzenia, która będzie obciążała rehabilitowaną kończynę pacjenta. Ze względu na względnie dużą masę układu mechanicznego, większość komponentów elektronicznych zostało umieszczonych w zewnętrznej obudowie umieszczonej poza urządzeniem.

W wyborze napędów wspomagano się badaniami i obliczeniami opisanymi w literaturze [8]. Na tej podstawie otrzymano przybliżone wartości potrzebne do wprawienia ludzkiej kończyny w ruch, co stanowiło podstawę w wyborze napędu dla połączeń ruchowych projektowanego urządzenia. Moduły sterowników silników dobrane zostały na podstawie maksymalnego obciążenia prądowego generowanego przez silnik DC przy zablokowanym wale. Dla napędu odpowiedzialnego za pronację/supinację [25] wartość ta nie powinna przekroczyć 1 A, natomiast wartość natężenia prądu elektrycznego w silniku siłownika elektrycznego [10] nie powinna przekroczyć 2 A, przy zasilaniu napięciu 12 V.

Główny kontroler urządzenia został wybrany spośród ogólnodostępnych płytek deweloperskich z rodziny Arduino. Ze względu na liczbę wyjść cyfrowych, wyjść PWM oraz magistralę komunikacyjną wybrany został układ Arduino Uno z mikrokontrolerem AVR ATmega328.

Do zasilania elektronicznych podzespołów urządzenia wybrano zasilacz sieciowy 12 V o mocy 100 W. Wybrany model zasilacza powinien zaspokoić zapotrzebowanie prądowego wymienionych wcześniej komponentów.

Na rys. 12.7 przedstawiono schemat elektryczny połączeń pomiędzy komponentami układu.



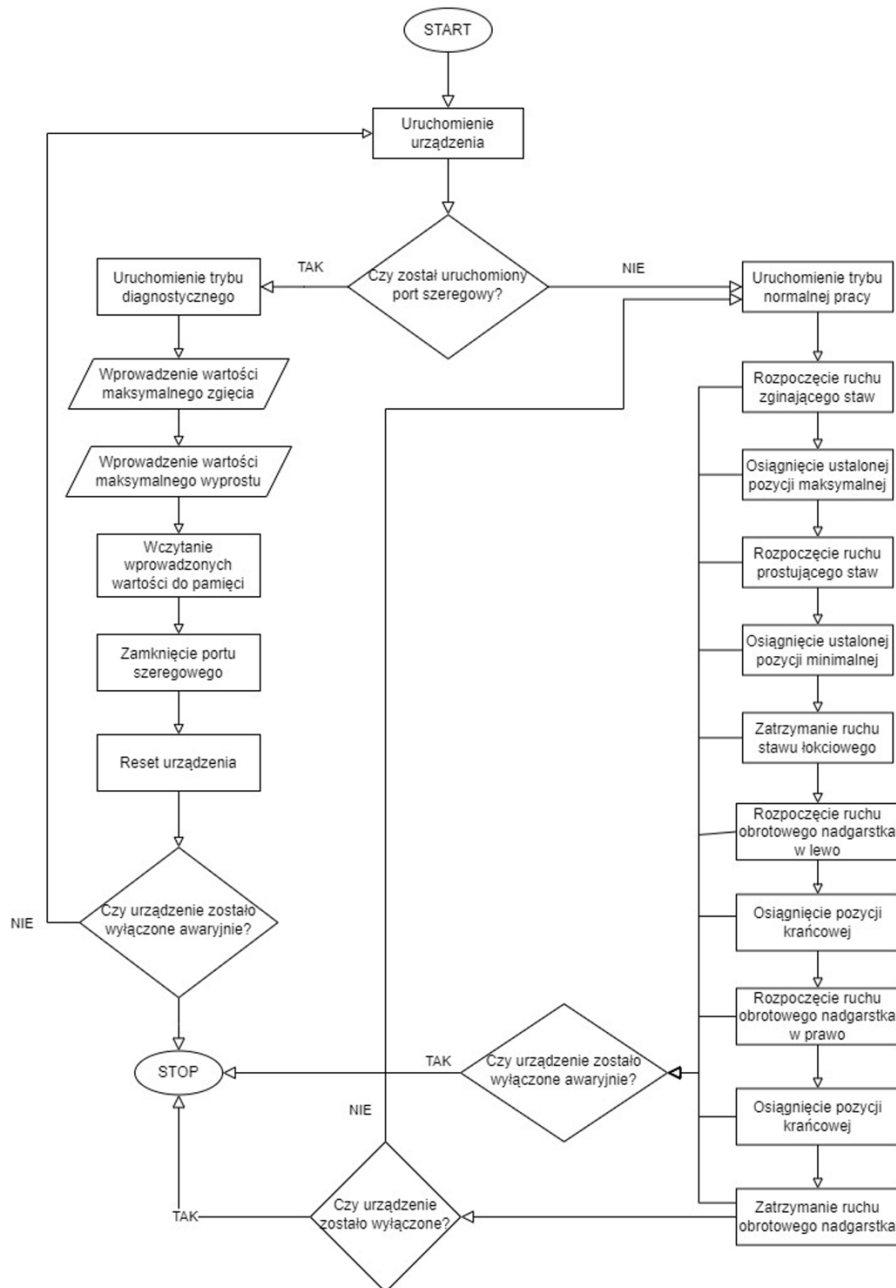
Rys 12.7 Schemat połączeń elektrycznych modułów

Część programowa

Schemat blokowy działania programu przedstawiono na rys. 12.8. Po uruchomieniu urządzenia sprawdzany jest warunek inicjalizacji portu szeregowego. Na tej podstawie włączany jest odpowiedni tryb pracy. Po zapoczątkowaniu komunikacji realizowany jest tryb diagnostyczny, w ramach którego ustala się z poziomu terminalu parametry ograniczające zakres ruchu stawu łokciowego. Po zapisaniu wszystkich parametrów do pamięci, urządzenie zostaje zresetowane i - jeśli w międzyczasie nie zostanie wyłączone (bądź awaryjnie wyłączone) - automatycznie przejdzie do trybu normalnej pracy.

Działanie rozpoczyna się od wymuszenia zginania kończyny. Po osiągnięciu ustalonej wartości maksymalnej ruch zostaje wstrzymany. Po czym rozpoczyna się prostowanie kończyny. W tej pozycji przedramię zostaje unieruchomione i urządzenie przechodzi do realizacji ruchów obrotowych. Po rozpoczęciu obrotu, ruch ten jest realizowany do momentu osiągnięcia pozycji skrajnej. Następnie ruch

nadgarstka zmienia zwrot i w analogiczny sposób powraca do pozycji początkowej. Po czym następuje chwila przerwy, jeśli w ciągu której nie nastąpi wyłączenie urządzenia, sekwencja ruchów rozpocznie się od początku.



Rys 12.8 Schemat blokowy działania urządzenia

12.5. Badania weryfikacyjne

W ramach badań weryfikacyjnych zaplanowano wykonanie szeregu testów sprawdzających przydatność urządzenia do realizacji ćwiczeń rehabilitacyjnych

oraz spełnienia założeń (wszelkie badania wykonano w środowisku wirtualnym). Testy dotyczyły trzech kluczowych zagadnień:

1. testy układu mechanicznego - analiza dynamiczna urządzenia,
2. testy układu sterowania - przeprowadzenie symulacji działania urządzenia,
3. testy komunikacji - sprawdzające komunikację z wykorzystaniem portu szeregowego.

Zastosowane środowiska programowe

1. Poprawność działania układu sterowania została sprawdzona z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Tinkercad [3], umożliwiającego przeprowadzanie symulacji złożonych układów elektronicznych. Pozwala ono również na interakcję z użytkownikiem podczas trwania symulacji, na przykład poprzez zmianę stanu przycisku. Dużą zaletą programu jest szeroka biblioteka zaimplementowanych komponentów elektronicznych: od prostych elementów (jak rezystor), przez silniki i sterowniki, aż po płytki deweloperskie z mikrokontrolerem i środowiskiem programistycznym Arduino IDE [1].
2. Do analiz ruchu użyto modułu Dynamic Simulation, który jest częścią pakietu Autodesk Inventor 2020 Professional [2]. Umożliwia przeprowadzanie symulacji ruchu z wykorzystaniem modeli komputerowych. Na podstawie obliczeń otrzymuje się m.in. charakterystyki ruchu, wartości sił i momentów działających na układ. Otrzymane w ten sposób wartości mogą być pomocne przy ocenie realizacji założeń projektowych czy pomóc w doborze napędów.
3. W testach komunikacji wykorzystany został terminal uniwersalny Hercules SETUP Utility [5]. Na potrzeby niniejszej pracy utworzony został również plik skryptowy (.bat) służący do uruchomienia terminala z odpowiednimi parametrami komunikacji (w tym: ustawienie odpowiedniego portu COM oraz prędkość transmisji - 9600 bit/s, 8N1).

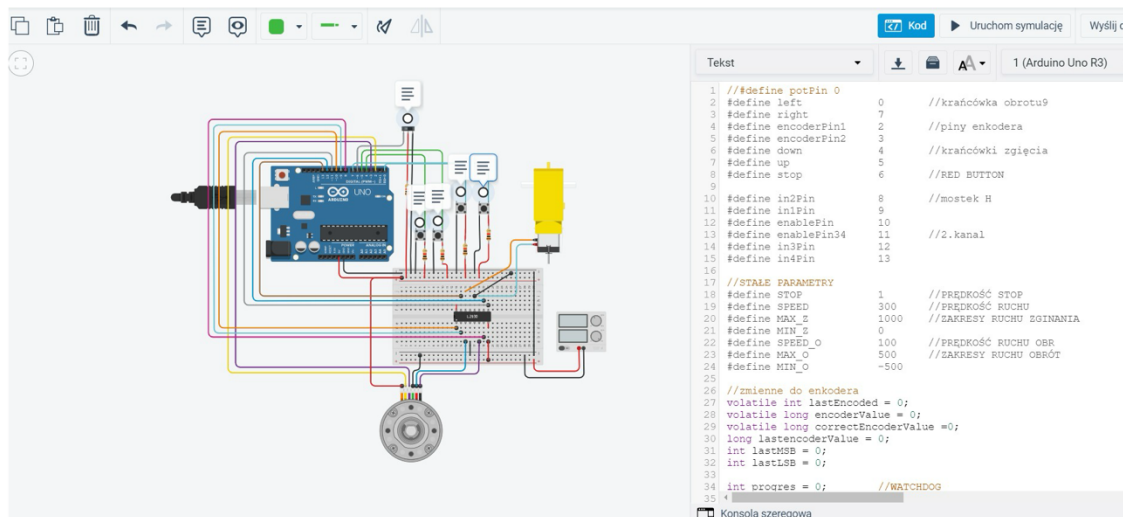
12.5.1 Wyniki badań weryfikacyjnych

Ocena działania układu sterowania

Na rys. 12.9 przedstawiony został projekt układu służącego do symulacji działania układu sterowania urządzeniem do autorehabilitacji. Ze względu na ograniczony zasób bibliotek komponentów, przyjęto pewne uproszczenia. Zespół napędowy siłownika liniowego został uproszczony do silnika obrotowego z enkoderem. Czujniki krańcowe zostały zastąpione przyciskami monostabilnymi. Z wykorzystaniem środowiska Tinkercad [3], przetestowany został zarówno algorytm sterowania urządzeniem jak i system awaryjnego zatrzymywania. W środowisku symulacyjnym układ prawidłowo realizować kolejne sekwencje ruchów algorytmu. Poprawnie analizowane były informacje zwrotne, gdzie na podstawie odczytów z czujników położenia wału oraz czujników krańcowych

(przycisków) porównywana była obecna pozycja z zadaną, co pozwalało na automatyczne działanie urządzenia.

Testowane awaryjne wyłączenie urządzenia było inicjowane w przypadku próby przekroczenia zadanych wartości ruchu zginającego kończynę lub włączenie przycisku (przełącznika) bezpieczeństwa. Próba wznowienia pracy po awaryjnym wyłączeniu powodowała reset urządzenia i rozpoczęcie sekwencji ruchów od początku.



Rys 12.9 Symulacja układu w Autodesk Tinkercad

Ocena komunikacji w trybie diagnostycznym

Testy komunikacji rozpoczęto od sprawdzenia poprawności inicjowania trybu diagnostycznego. Po potwierdzeniu prawidłowego działania funkcji wykrywającej port szeregowy, testowanie były kontynuowane.

Następnie weryfikacji poddano działanie funkcji zmieniającej zakres kątowy pracy urządzenia w trybie diagnostycznym. Na końcu testów sprawdzano czy w przypadku zapisu wartości do pamięci stałej, po odłączeniu zasilania wartości parametrów nadal będą zapisane pod odpowiednim adresem. Na potrzeby badań weryfikacyjnych komunikacji wykorzystana została rzeczywista płytką deweloperską Arduino UNO, na której zaimplementowano algorytm sterowania, symulując w ten sposób połączenie komputera PC z projektowanym urządzeniem rehabilitacyjnym. Na tej podstawie otrzymano prosty interfejs tekstowy pomiędzy urządzeniem a operatorem - fizjoterapeutą ustawiającym parametry ruchu dla konkretnego pacjenta. Choć otrzymane rozwiązanie, pomimo braku graficznego interfejsu graficznego (potencjalnie bardziej intuicyjnego w obsłudze) w zupełności powinno spełniać swoją rolę.

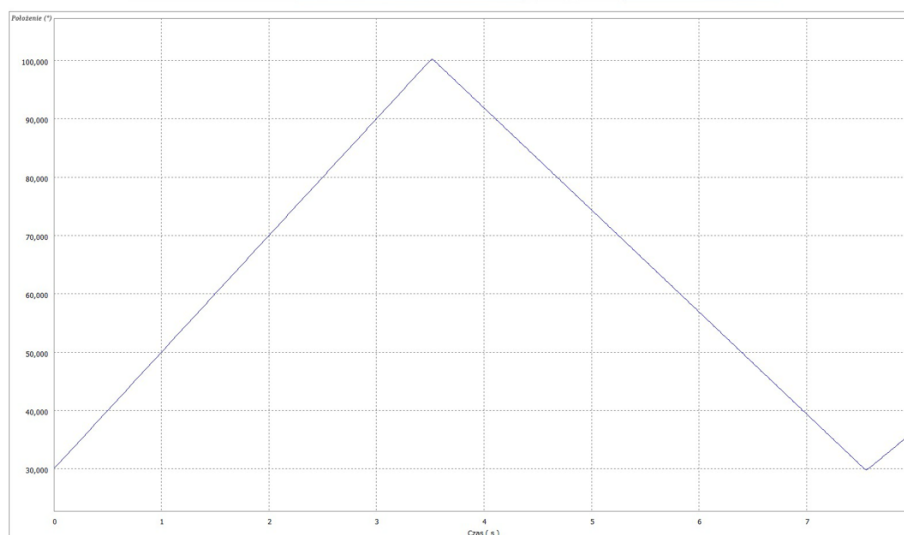
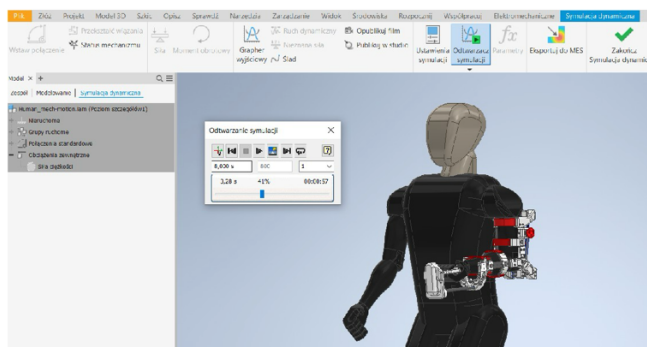
Ocena osiągniętych zakresów ruchu

Przygotowując model wirtualny urządzenia do przeprowadzenia symulacji dynamicznej, ograniczono ruch napędów w takim zakresie, aby nie spowodować

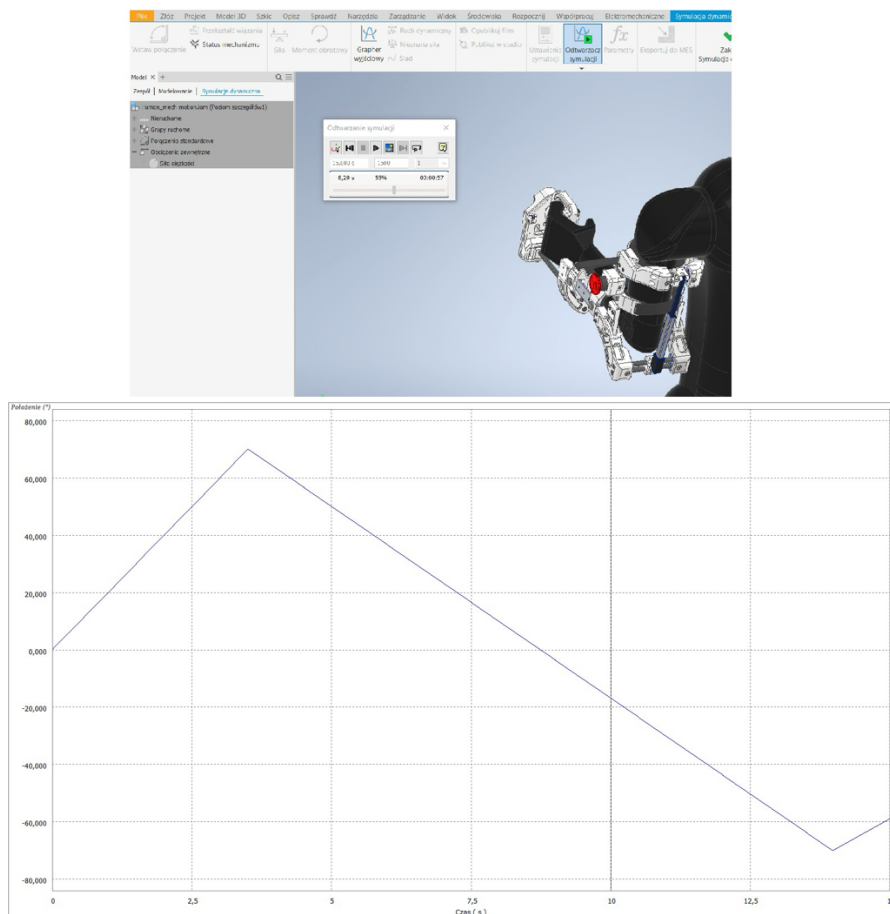
kolizji i badano położenie kątowne kończyny w trakcie realizacji ruchów zgodnie z algorytmem. Zakres kątowny działania siłownika uzależniony był od jego wysuwu. Zakres pracy silnika wymuszającego ruch obrotowy przedramienia - od czujników krańcowych.

W celu uzyskania bardziej czytelnych przebiegów obydwu ruchy rozdzielone zostały na dwie symulacje - osobno ruchu zginającego staw łokciowy oraz osobno ruch pronacja/supinacji przedramienia. W ten sposób uzyskano dwie osobne charakterystyki ruchu (rys. 12.10 i 12.11). Na przedstawionych wykresach, na osi pionowej przedstawiono pozycję kątowną kończyny podczas realizacji ćwiczeń. Dla ruchu z rys. 12.10, 30° to maksymalny wyprost, a 100° - maksymalne zgięcie stawu łokciowego. Wartości z 12.11 przedstawiają zaś wartości ruchu kątownego ($-65^\circ, 65^\circ$), gdzie -65° przedstawia maksymalną pronację przedramienia, a 65° - maksymalną supinację.

Otrzymane wartości kątowne nie odtwarzają idealnie wartości kątowych uzyskanych podczas realizacji ćwiczeń rehabilitacyjnych, ale w znacznym pewnym zakresie pokrywają się, co pozwala wnioskować, że urządzenie może zostać wykorzystywane w procesie rekonwalescencji.



Rys 12.10 Symulacja dynamiczna urządzenia: charakterystyka ruchu kończyny podczas zginania/prostowania



Rys 12.11 Symulacja dynamiczna urządzenia: charakterystyka ruchu przedramienia podczas supinacji i pronacji

BIBLIOGRAFIA

1. Arduino IDE. Strona producenta środowiska. <https://www.arduino.cc/en/software> (dostęp: 31.08.2022).
2. Autodesk. Strona producenta oprogramowania. <https://www.autodesk.pl/products/inventor/overview> (dostęp: 31.08.2022).
3. Autodesk Tinkercad. Strona producenta oprogramowania. <https://www.tinkercad.com/> (dostęp: 31.08.2022).
4. Froń M. Urządzenie do autorehabilitacji po zabiegu endoprotezoplastyki stawu łokciowego. Politechnika Śląska, Praca Przejściowa, 2022.
5. Hercules SETUP utility. Strona producenta oprogramowania.

- <https://www.hw-group.com/software/hercules-setup-utility>
(dostęp: 31.08.2022).
6. IGUS igubal. Strona producenta. <https://www.igus.pl/product/356> (dostęp: 31.08.2022).
 7. IGUS iglidur. Strona producenta. <https://www.igus.pl/product/64> (dostęp: 31.08.2022).
 8. Kyrylova A. Development of a wearable mechatronic elbow brace for postoperative motion rehabilitation. In *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, vol. 3019, 2015.
 9. Piotrowski M Błoński M. i in. Pomianowski S, Mazurek T. Endoprotezoplastyka głowy kości promieniowej i endoprotezoplastyka totalna stawu łokciowego. *Ortopedia i Traumatologia, Wyd. Naukowe Exemplum, Polskie towarzystwo Ortopedyczne i Traumatologiczne*, 3:523–554, 2017.
 10. Siłownik liniowy LA-T8. Strona producenta siłownika. <http://www.gomotorworld.com/pd> (dostęp: 31.08.2022).
 11. Wilcox RB Sayles J. Total elbow arthroplasty protocol. *Brigham and Women's Hospital Report*, 1:1–4, 2010.

