

Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Wrocławski im. prof. Kazimierza Idaszewskiego



Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej

**Trendy i rozwiązania technologiczne
w elektrotechnice**



edycja 2025

Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej 2025

Trendy i rozwiązania technologiczne w elektrotechnice

Redakcja: dr inż. Remigiusz Mydlikowski

KOMITET NAUKOWY:

- prof. dr hab. inż. Krzysztof Opieliński
- dr inż. Tomasz Grysiński prof. uczelni
- dr hab. inż. Paweł Wachel, prof. uczelni
- dr hab. inż. Ryszard Zieliński, prof. uczelni
- dr inż. Dariusz Banasiak
- dr hab. inż. Piotr Serkies
- dr inż. Grzegorz Kosobudzki
- dr inż. Remigiusz Mydlikowski
- dr inż. Damian Nowak
- dr inż. Wioletta Nowak
- dr inż. Mateusz Popek
- dr inż. Elżbieta Szul-Pietrzak
- dr inż. Adam Wąż

Skład i łamanie: Aleksandra Rzeszowska

Projekt okładki: Dominika Osadców-Będkowska

Wydrukowano na podstawie materiałów dostarczonych przez autorów

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsza książka, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2025

© Copyright by Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Wrocławski, Wrocław 2025

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<https://www.oficyna.pwr.edu.pl>

email: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN: 978-83-8134-014-4

DOI: https://doi.org/10.37190/SEP_Trendy_i_rozwiazania_2025

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

Spis treści

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, FOTONIKI I MIKROSYSTEMÓW	9
1. Sterowanie chodem sześcionożnego robota kroczącego <i>inż. Kamil Winnicki, opiekun: dr inż. Robert Muszyński</i>	11
2. System nadzoru przykładowego odcinka trakcji kolejowej <i>inż. Paweł Apostel, opiekun: dr inż. Michał Lower</i>	23
3. Układ programowalnego obciążenia elektronicznego prądu stałego <i>inż. Dominik Pluta, opiekun: dr inż. Jacek Jagodziński</i>	33
4. Mikroprocesorowy układ sterowania elektronicznym zamkiem z programowalnym systemem ograniczonego dostępu <i>inż. Mikołaj Przybylski, opiekun: dr inż. Michał Lower</i>	41
5. Opracowanie systemu diagnostyki akustycznej maszyn przemysłowych z wykorzystaniem zaawansowanych technik analizy dźwięku i sztucznej inteligencji <i>mgr inż. Damian Jarczok, opiekun: dr inż. Piotr Staroniewicz</i>	51
6. Control System for Two HOG Wheel Mobile Robot <i>mgr inż. Eryk Możdżeń, opiekun: dr inż. Robert Muszyński</i>	61
7. Analiza danych chmurowych w celu prognozowania jakości powietrza <i>mgr inż. Piotr Fiebig , opiekun: dr inż. Milena Kiliszkiewicz</i>	71
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY	83
8. Mikroprocesorowy sterownik silnika tarczowego z magnesami trwałymi <i>inż. Maciej Pankau, opiekun: dr inż. Krzysztof Dyrz, prof. uczelni</i>	85
9. Napęd fotoniczny układów mikromaszynowych <i>inż. Tomasz Nowak, opiekun: prof. dr hab. inż. Teodor Gotszalk</i>	93
10. Bin picking z zastosowaniem systemu wizyjnego 3DV oraz robota przemysłowego <i>inż. Adrian Grzyb, opiekun: dr hab. inż. Karol Wróbel</i>	103

11. Model symulacyjny sieci trakcyjnej kolejowej 3 kV prądu stałego uwzględniający zmiany wartości napięcia występującego w sieci	109
<i>inż. Kacper Kras, opiekun: dr inż. Marta Bątkiewicz-Pantuła</i>	
12. Rejestrator zużycia energii elektrycznej	125
<i>inż. Marcin Niezgodziński, opiekun: dr inż. Grzegorz Kosobudzki</i>	
13. Analiza wpływu fotowoltaicznych instalacji prosumenckich na warunki pracy sieci dystrybucyjnej	135
<i>mgr inż. Filip Roczyński, opiekun: dr inż. Robert Łukomski</i>	
14. Analiza współpracy zabezpieczeń odległościowych z wykorzystaniem łącza telekomunikacyjnego	145
<i>mgr inż. Michał Zelcer, opiekun: dr hab. inż. Marcin Habrych, prof. uczelni</i>	
15. Generator szeregowego zwarcia łukowego	155
<i>mgr inż. Rafał Chudy, opiekun: dr inż. Michał Czosnyka</i>	
16. Rozmyty regulator typu II zastosowany w pętli sterowania prędkością silnika prądu stałego	161
<i>mgr inż. Jakub Suszek, opiekun: dr hab. inż. Marcin Kamiński</i>	
17. Zasady projektowania i użytkowania farm fotowoltaicznych zgodnie z normami i przepisami prawnymi	165
<i>mgr inż. Eryk Synenko, opiekun: dr inż. Kazimierz Herlender, prof. uczelni</i>	
WYDZIAŁ INFORMATYKI I TELEKOMUNIKACJI	171
18. Podpisy w powietrzu jako nowa metoda uwierzytelniania osób fizycznych i zabezpieczenia danych w cyfrowym świecie	173
<i>inż. Bartłomiej Baut, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
19. Implementacja wybranych weryfikatorów normy biometrycznej jakości obrazu ISO/IEC 29794-5 i zaproponowanie alternatywnych rozwiązań	187
<i>inż. Paulina Otlík, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
20. Symulacja procesu sterowania przy zastosowaniu wybranego narzędzia oraz protokołu TwinCAT ADS lub/i OPC/UA	197
<i>inż. Barbara Sipa, opiekun: dr inż. Andrzej Jabłoński</i>	
21. Opracowanie rozwiązania opartego na introspekcji maszyn wirtualnych, służącego do wykrywania złośliwego oprogramowania typu rootkit	207
<i>mgr inż. Daria Pietraszko, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
22. System kontroli geometrii otulin polietylenowych	219
<i>mgr inż. Aleksander Kłak, opiekun: dr inż. Adam Ratajczak</i>	

- 23. Analiza zastosowania szkiców danych w algorytmach detekcji anomalii 225**
mgr inż. Krzysztof Wołkonowski, opiekun: dr inż. Karol Gotfryd

WYDZIAŁ PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI 237

- 24. Projekt i realizacja modułowego urządzenia umożliwiającego analizę ruchu kończyn z funkcją wieloosiowego pomiaru przyspieszenia 239**
inż. Michał Kimbar, opiekun: dr inż. Tomasz Grysiński

- 25. Projekt i realizacja urządzenia wspomagającego prowadzenie treningu sportowego z funkcją pomiaru sygnału elektromiograficznego 249**
inż. Maksymilian Steckiewicz, opiekun: dr inż. Tomasz Grysiński

- 26. Projekt i realizacja urządzenia do wspomagania treningu wspinaczkowego z funkcją wykonywania testów siłowych 259**
inż. Patrycja Wysowska, opiekun: dr inż. Tomasz Grysiński

- 27. Analiza numeryczna wpływu stosowania implantu w procesie leczenia palucha koślawego 267**
inż. Małgorzata Majta, opiekun: dr inż. Jakub Słowiński

- 28. Implementacja dynamicznej transformaty czasowej do oceny podobieństwa biosygnalów u pacjentów po krwotoku podpażęczynówkowym 277**
inż. Radosław Pławecki, opiekun: dr inż. Agnieszka Uryga

- 29. Ocena biochemiczna i biofizyczna procesu starzenia i eryptozy krwinek czerwonych w trakcie przechowywania 287**
mgr inż. Weronika Torończak, opiekun: dr inż. Agnieszka Uryga

Przedmowa

Oddajemy w ręce Czytelników kolejną monografię podsumowującą działalność Stowarzyszenia Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej w minionym roku akademickim. Publikacja ta od lat stanowi ważny element dokumentujący osiągnięcia młodych inżynierów, którzy na swoich wydziałach tworzą prace dyplomowe o wysokim poziomie merytorycznym. Spośród tych prac wyłaniane są najlepsze, które są nagradzane w konkursach organizowanych przez SEP Oddział Wrocławski. Konkursy te, zapoczątkowane w 1965 roku na Wydziale Elektrycznym, dziś realizowane są na czterech wydziałach Politechniki Wrocławskiej. Wydziały te reprezentują obszary badawcze związane z automatyką, elektroniką, elektrotechniką i technologiami kosmicznymi, informatyką techniczną i telekomunikacją oraz inżynierią biomedyczną.

Na Politechnice Wrocławskiej prowadzone są zaawansowane badania naukowe, w które aktywnie angażują się dyplomanci rozwijający swoje projekty pod okiem doświadczonych promotorów. Dzięki ich zaangażowaniu powstają prace o wysokiej wartości merytorycznej, podejmujące aktualne wyzwania technologiczne i badawcze, a jednocześnie pokazujące dojrzałość inżynierską oraz twórcze podejście autorów. W tegorocznej edycji monografii prezentujemy streszczenia prac nagrodzonych po weryfikacji i akceptacji promotorów, co dodatkowo podkreśla ich jakość i znaczenie.

Niniejsza publikacja stanowi więc nie tylko dokumentację wyników konkursu, ale również świadectwo innowacyjności, kreatywności i pasji młodych naukowców Politechniki Wrocławskiej. Jest także wyrazem uznania dla pracy promotorów oraz wszystkich osób wspierających rozwój młodej kadry inżynierskiej.

dr inż. Remigiusz Mydlikowski
Przewodniczący Komisji Młodzieży i Studentów
SEP Oddział Wrocławski

Wydział Elektroniki,
Fotoniki i Mikrosystemów

Sterowanie chodem sześcionożnego robota kroczącego

inż. Kamil Winnicki

Automatyka i Robotyka

dr inż. Robert Muszyński

Katedra Cybernetyki i Robotyki

1.1. Cel i założenia

Głównymi założeniami projektowymi realizowanej pracy były:

- zaprojektowanie i wykonanie mechanicznej konstrukcji robota, zapewniającej odpowiednią stabilność i mobilność,
- zaprojektowanie układów elektronicznych robota, w tym systemu zasilania oraz układów sterowania,
- wyprowadzenie matematycznego modelu kinematyki robota i jego odnóży,
- opracowanie metody planowania trajektorii ruchu kończyn robota,
- zaprojektowanie i implementacja systemu sterowania opartego na modelu, umożliwiającego płynny i stabilny chód.

1.2. Wstęp teoretyczny

W tym rozdziale omówione zostało teoretyczne podejście do planowania chodu robota kroczącego, a także opis wyliczenia kinematyki prostej i odwrotnej dla pojedynczej nogi robota.

1.2.1. Podstawy chodu robotów kroczących

Podstawowym elementem analizy chodu robotów kroczących jest rozróżnienie dwóch naprzemiennych faz ruchu każdej nogi retrakcji i protrakcji:

- faza retrakcji, zwana także fazą podparcia, to moment, w którym noga pozostaje w kontakcie z podłożem, wprawiając korpus robota w ruch.
- faza protrakcji to faza przenoszenia, podczas której noga jest unoszona i przemieszczana do nowego punktu podparcia. Przenoszenie końca nogi, patrząc od boku robota, odbywa się po trajektorii w kształcie przykładowo fragmentu okręgu, elipsy, lub sinusoidy.

Sekwencja ruchów nóg robota, określana jako algorytm chodu, definiuje kolejność, w jakiej nogi są przestawiane. Dla sześcionożnych robotów kroczących najbardziej efektywnym algorytmem jest chód trójpodporowy [1]. Polega on na tym, że w każdej chwili robot opiera się w trzech tworzących płaszczyznę punktach podparcia. W tym czasie pozostałe trzy nogi przenoszone są do nowych punktów kontaktu z podłożem. Takie podejście sprawia, że przemieszczenie wszystkich sześciu nóg trwa tylko dwie fazy chodu. Wadą tego algorytmu jest to, że w trakcie chodu ciężar robota jest unoszony tylko przez 3 nogi oraz, że zapewnia mniejszą stabilność w stosunku do algorytmów chodu, gdzie punktów podparcia jest więcej.

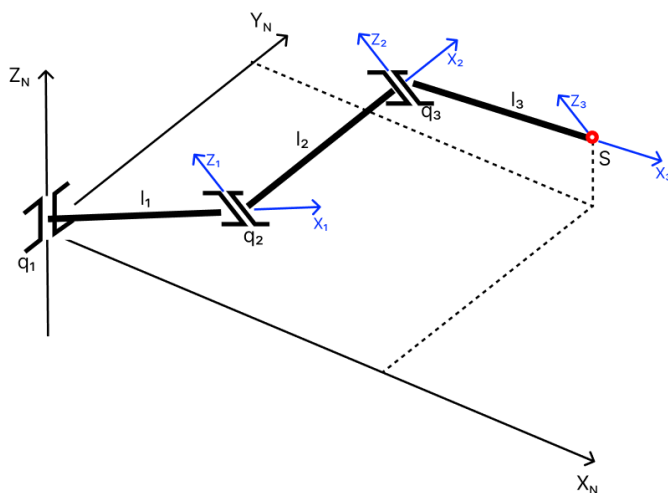
1.2.2. Kinematyka robota krocącego

W najprostszym przypadku zakłada się, że robot krocący porusza się po płaszczyźnie utrzymując korpus równolegle do niej. Macierz kinematyki takiego robota przedstawiono na równaniu (1.1). Współrzędne x_k , y_k , z_k oznaczają położenie środka korpusu robota w globalnym układzie współrzędnych, zaś kąt θ_k jego orientację względem osi prostopadłej do płaszczyzny ruchu.

$$K = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k & 0 & x_k \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k & 0 & y_k \\ 0 & 0 & 1 & z_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Kinematyka prosta nogi robota

Noga robota pokazana schematycznie na rysunku 1.1 stanowi manipulator o trzech członach obrotowych. Kinematyka prosta opisuje pozycję i orientację końca nogi względem korpusu w funkcji kątów w jej przegubach.



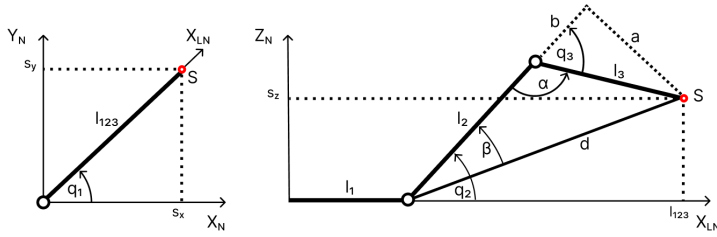
Rysunek 1.1. Kinematyka nogi robota

Na równaniu (1.2) przedstawiono macierz kinematyki nogi robota wyznaczoną na podstawie algorytmu Denavita-Hartenberga. [2]

$$K = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & -s_1 & c_1 (c_{23} l_3 + c_2 l_2 + l_1) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & c_1 & s_1 (c_{23} l_3 + c_2 l_2 + l_1) \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 & -(s_{23} l_3 + s_2 l_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Kinematyka odwrotna nogi robota

W rozpatrywanym przypadku kinematyka odwrotna pozwala na wyliczenie kątów w przegubach nogi dla zadanego położenia jej końca – stopy. Do jej wyliczenia zastosowano metodę analityczno-geometryczną, na podstawie schematycznego rysunku 1.2.



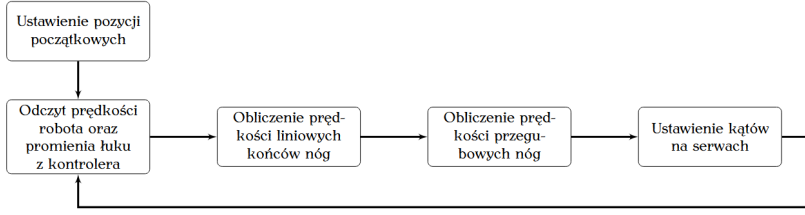
Rysunek 1.2. Widok nogi z góry i w jej płaszczyźnie

Na równaniu (1.3) przedstawiono wynik obliczenia kinematyki odwrotnej, z której otrzymano kąty w przegubach nogi $q_N = (q_1, q_2, q_3)^T$.

$$\begin{aligned} q_1 &= \arctg \frac{s_y}{s_x}, \\ q_2 &= \arctg \frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3} + \arctg \frac{s_z}{l_{23}}, \\ q_3 &= \arccos \frac{s_z^2 + (l_{123} - l_1)^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \end{aligned} \quad (1.3)$$

1.2.3. Planowanie ruchu robota krocącego

Planowanie ruchu robota krocącego jest złożonym procesem, który należy rozdzielić na kilka etapów zilustrowanych na rysunku 1.3. Przyjęto, że ruch ten odbywać się będzie wzdłuż trajektorii w kształcie łuku o zadanym promieniu z zadaną prędkością.



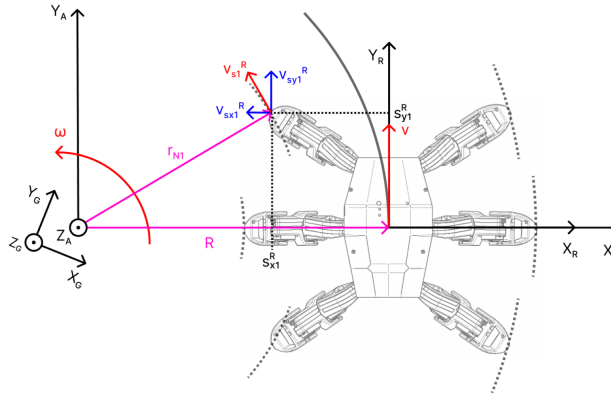
Rysunek 1.3. Diagram planowania ruchu

Pozycja startowa chodu

Przed rozpoczęciem chodu, korzystając z kinematyki odwrotnej, należy ustalić pozycje początkowe s_x , s_y , s_z dla wszystkich stóp robota, uwzględniając ograniczenia mechaniczne oraz unikanie kolizji nóg. Pozycja startowa powinna zapewnić stabilny rozkład nóg względem środka ciężkości, aby zapobiec opadaniu korpusu.

Wyliczenie prędkości liniowych nóg

Dla każdego końca nogi należy wyznaczyć wektory ich prędkości liniowych, które sprawiają że środek korpusu robota będzie poruszał się wzdłuż trajektorii w kształcie łuku. W tym celu wprowadzono dodatkowy układ współrzędnych, powiązany ze środkiem łuku. Relację między tym układem a układem współrzędnych związanym ze środkiem korpusu robota przedstawiono schematycznie na rysunku 1.4.



Rysunek 1.4. Ruch robota po łuku

Po przeprowadzeniu analizy uzyskano wzór (1.4), który opisuje prędkość liniową końców nóg robota w zależności od ich położenia względem środka korpusu oraz promienia skrętu, gdzie v_{si}^R to wektor prędkości końca i -tej nogi w układzie współrzędnych robota, ω oznacza prędkość kątową ruchu robota, s_{xi}^R i s_{yi}^R to współrzędne końca nogi w tym układzie, a R to promień skrętu.

$$v_{si}^R = \begin{pmatrix} -\omega s_{yi}^R \\ \omega(s_{xi}^R + R) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Obliczenia prędkości liniowej końca nogi zostały przeprowadzone dla fazy protrakcji. Dla fazy retrakcji przyjmuje się przeciwny zwrot wektora, jak pokazuje wzór (1.5), gdzie $v_{si_p}^R$ i $v_{si_r}^R$ oznaczają prędkości w fazach protrakcji i retrakcji. Dodatkowo, w fazie protrakcji uwzględnia się prędkość w osi Z_R .

$$\begin{aligned} v_{si_p}^R &= v_{si}^R, \\ v_{si_r}^R &= -v_{si}^R. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Wyliczenie prędkości przegubowych nogi

Zależność prędkości liniowej końca nogi (stopy) od prędkości kątowych opisuje równanie jakobianowe (1.6), gdzie $s = (s_x, s_y, s_z)^T$ to współrzędne położenia stopy, natomiast $q = (q_1, q_2, q_3)^T$ to kąty w przegubach nogi, $J_a(q)$ to jakobian analityczny nogi we współrzędnych położenia, wyznaczony na podstawie kinematyki prostej

$$\dot{S} = J_a(q)\dot{q} \quad (1.6)$$

W celu wyznaczenia zależności prędkości kątowych w przegubach od prędkości liniowych należy równanie (1.6) przekształcić do formy (1.7)

$$\dot{q} = J_a^{-1}(q)\dot{s}. \quad (1.7)$$

1.3. Projekt i wykonanie

Niniejszy rozdział zawiera szczegółowy opis konstrukcji fizycznego robota krocącego. Został on podzielony na dwie główne sekcje: pierwsza obejmuje budowę mechaniczną, uwzględniając zastosowane materiały, elementy konstrukcyjne oraz sposób montażu, natomiast druga koncentruje się na układach elektronicznych, opisując wykorzystane podzespoły, ich funkcje oraz integrację z całą konstrukcją. Ukończonego robota przedstawiono na rysunku 1.5.



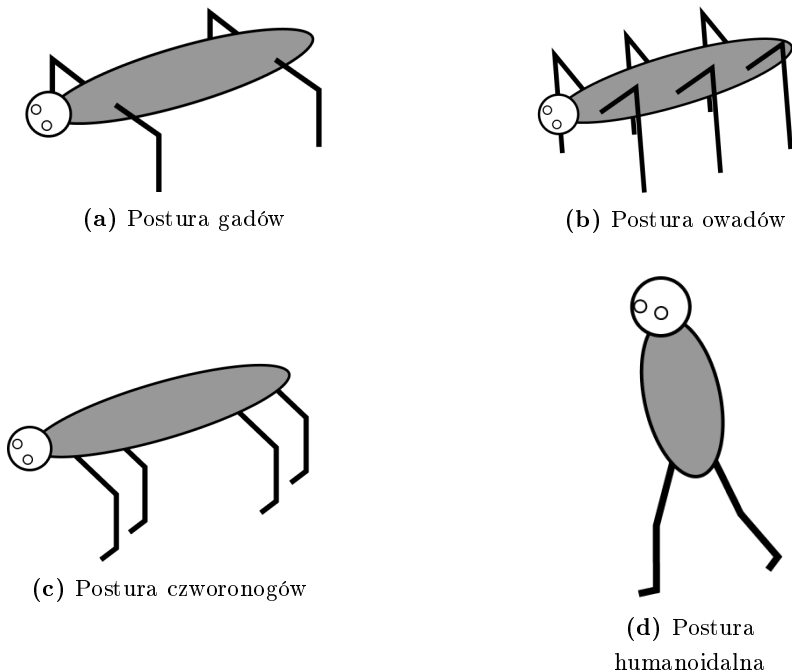
Rysunek 1.5. Sześcionożny robot krocący „Robal”

1.3.1. Konstrukcja mechaniczna

Konstrukcja mechaniczna robota krocącego powinna łączyć wytrzymałość i sztywność z niską masą. Stabilność i płynność ruchu zależą od doboru napędów, rozmieszczenia nóg oraz ich liczby i długości. Kluczowe jest także zapewnienie szerokiego zakresu ruchu odnóży.

Przegląd rozwiązań

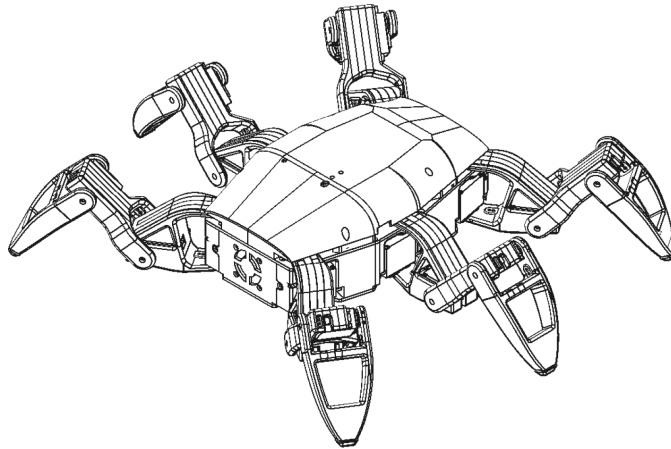
Według [3] roboty krocące można podzielić na podstawie postury, wzorowanej na biologii zwierząt. Postura gadów charakteryzuje się kątem kolan bliskim prostemu i zawieszonym na nogach korpusem, posiadając zwykle dwie pary odnóży. Postura owadów zapewnia wysoką stabilność dzięki nisko położonemu środkowi ciężkości i zazwyczaj obejmuje dwie lub trzy pary odnóży. Postura czworonogów, choć zapewnia dużą prędkość, może utrudniać stabilność, natomiast postura humanoidalna, nawiązująca do ludzkiej, wymaga większej liczby stopni swobody w nogach dla utrzymania równowagi. Podział ten został przedstawiony graficznie na rysunku 1.6.



Rysunek 1.6. Porównanie postur robotów krocących

Projekt mechaniki

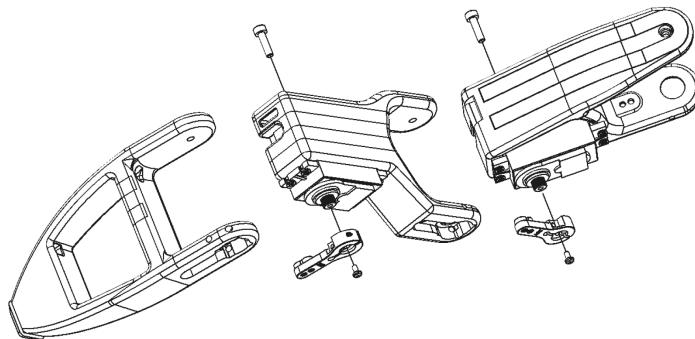
Przy projektowaniu robota krocącego zdecydowano się na posturę owada z sześcioma nogami, ze względu na niskie wymagania energetyczne oraz dużą stabilność. Konstrukcja mechaniczna robota, zaprojektowana została w programie Autodesk Inventor. Została ona wykonana w technologii druku 3D z materiału PLA. Projekt całej konstrukcji przedstawiony został na rysunku 1.7.



Rysunek 1.7. Projekt mechaniki sześcionożnego robota kroczącego

Korpus stanowi konstrukcję nośną robota. Składa się on z dwóch ścianek, do których przymocowane są nogi. Wewnątrz korpusu umieszczono płytkę zasilającą, akumulator i przetwornice, a także uchwyt na płytkę sterującą oraz Raspberry Pi.

Noga robota, widoczna na rysunku 1.8, składa się z trzech członów, z serwomechanizmami w dwóch pierwszych i czujnikiem dotyku podłoża w trzecim członie. Stopa wykonana została z materiału TPU który właściwościami przypomina gumę, co pozwoliło na zmniejszenie poślizgów między nogą a podłożem.

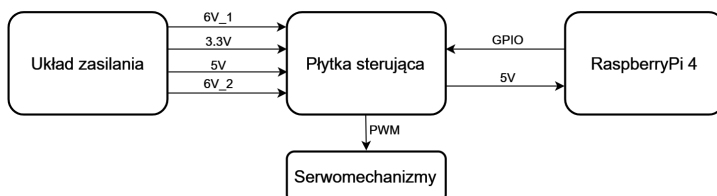


Rysunek 1.8. Złożenie nogi

W procesie projektowania mechaniki kluczowy był dobór napędów. Zdecydowano się na serwomechanizmy cyfrowe o momencie $40\text{kg}/\text{cm}^2$, zostały one umieszczone w przegubach q_2 i q_3 , ponieważ są one najbardziej obciążone, natomiast w przegubie q_1 zastosowano serwomechanizmy o momencie $20\text{kg}/\text{cm}^2$.

1.3.2. Elektronika

Projektowanie elektroniki robota kroczącego obejmowało stworzenie systemu który zagwarantuje wystarczająco dużo mocy dla napędów robota, oraz zapewni precyzyjne i szybkie sterowanie serwomechanizmami. Priorytetem była niezawodność, a system został zaprojektowany z myślą o prostocie i modułowości, umożliwiającej rozbudowę w przyszłości. Schemat elektroniki przedstawiono na rysunku 1.9. Projekt układów elektronicznych wykonano w programie KiCad.



Rysunek 1.9. Schemat elektroniki robota

Komputer główny

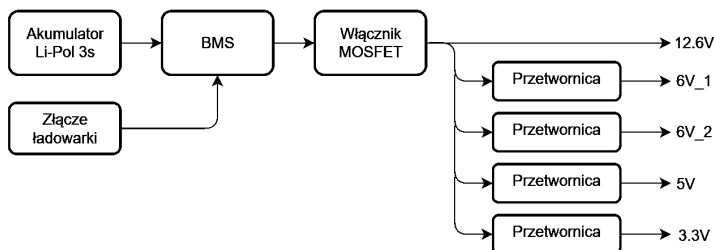
Jako główny sterownik robota zastosowano mikrokomputer Raspberry Pi 4b z 4 GB RAM, działający na systemie operacyjnym Raspberry Pi OS. Taki wybór zapewnia dużą moc obliczeniową, kompaktowe rozmiary oraz łatwą komunikację, w tym możliwość połączenia przez SSH po podłączeniu robota do sieci WiFi.

Układ sterowania serwami

Do sterowania serwomechanizmami użyto sterowników PCA9685, które umożliwiają kontrolowanie 16 serw każdemu z dwóch układów – po jednym dla prawej i lewej strony robota. Sygnały sterujące przesyłane są przez magistralę I2C.

Układ zasilania

Układ zasilania składa się z akumulatora litowo-polimerowego 3S (5000 mAh), układu BMS, tranzystorów MOSFET i czterech przetwornic. Układ dostarcza napięcia 3.3V dla sterowników serw, 5V dla komputera głównego oraz 6V dla serwomechanizmów. Schemat układu zasilania przedstawiono na rysunku 1.10. Moduł BMS zabezpiecza akumulator przed nadmiernym lub zbyt niskim napięciem oraz wyrównuje poziom naładowania ogniw.



Rysunek 1.10. Schemat elektroniki robota

1.3.3. Implementacja programu

Program sterujący robotem napisano w ANSI C na mikrokomputer Raspberry Pi, wykorzystując bibliotekę WiringPi do obsługi GPIO i komunikacji I2C. Kod został zaprojektowany modularnie, co ułatwia jego modyfikację i rozwój. Implementacja odbywała się w Visual Studio Code, które zapewniało wsparcie w postaci debugowania i integracji z systemami kontroli wersji. Do zdalnego połączenia z komputerem wykorzystano połączenie SSH.

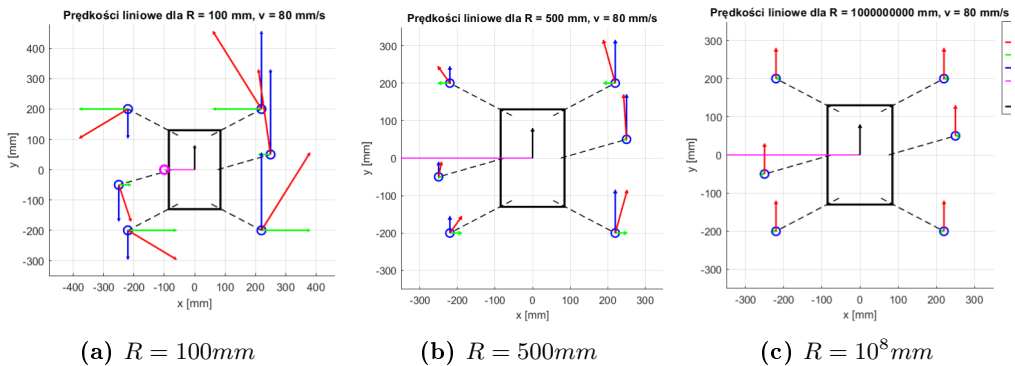
1.4. Uzyskane wyniki

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki testów obejmujących zarówno symulacje komputerowe, jak i eksperymenty na rzeczywistym robocie.

1.4.1. Testy symulacyjne

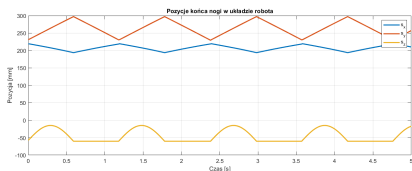
Testy przeprowadzono w MATLAB w celu sprawdzenia poprawności obliczeń przed implementacją w systemie rzeczywistym. Analizowano prędkości liniowe końców nóg dla różnych długości promieni łuku, po którym ma poruszać się robot. Wyniki przedstawione na rysunku 1.11 potwierdziły poprawność modelu:

- przy małym promieniu ruch przypomina obrót w miejscu,
- przy średnim promieniu robot porusza się po łuku,
- dla bardzo dużego promienia ruch jest prostoliniowy.

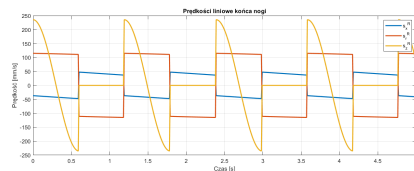


Rysunek 1.11. Wizualizacja wektorów prędkości dla różnych promieni łuku

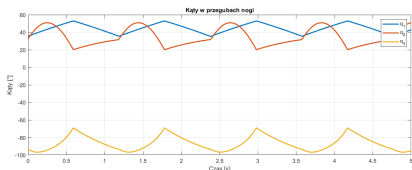
Przeprowadzono także analizę poprawności obliczania prędkości przegubowych w nodze robota dla obliczonych prędkości liniowych jej końca. Wykresy uzyskane w ramach przykładowej symulacji ruchu prawej przedniej nogi, dla prędkości środka korpusu robota $v = 80 \frac{mm}{s}$, promienia łuku $R = 500$, okresu chodu $T = 1,2s$ oraz dla czasu symulacji $t = 5s$, przedstawione zostały na rysunku 1.12. Uzyskano także ścieżkę tego ruchu widoczną na rysunku 1.13. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono poprawność metody obliczania prędkości przegubowych.



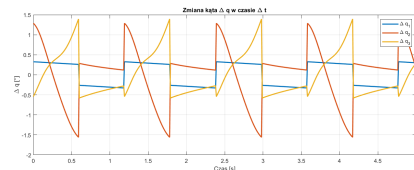
a) Pozycje końca nogi



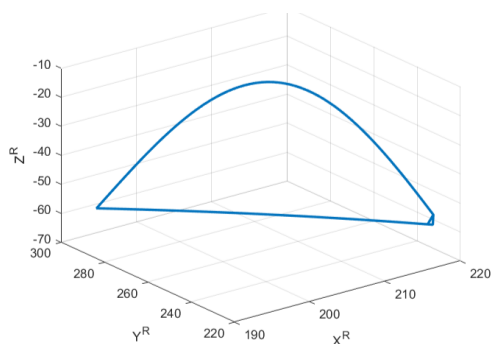
b) Prędkości liniowe końca nogi



c) Kąty w przegubach nogi

d) Zmiana kąta Δq **Rysunek 1.12.** Symulacja ruchu prawej przedniej nogi dla parametrów:

$$v = 80 \frac{mm}{s}, R = 500mm, t = 5s$$

**Rysunek 1.13.** Ścieżka ruchu końca nogi w symulacji dla parametrów:

$$v = 80 \frac{mm}{s}, R = 500mm, t = 5s$$

1.4.2. Testy na rzeczywistym robocie

Przeprowadzono serię testów fizycznych w celu oceny działania algorytmu sterowania chodem robota. Na początku zweryfikowano poprawność zaimplementowanej kinematyki odwrotnej, sprawdzając zgodność rzeczywistej pozycji końcówki nogi z założeniami. Następnie określono optymalną pozycję startową, zapewniającą stabilny rozkład środka ciężkości. Kolejne testy obejmowały analizę ruchu robota przy różnych wartościach prędkości i promienia łuku trajektorii.

1.5. Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie sześcionożnego robota krocącego oraz opracowanie systemu sterowania, zapewniającego płynny i stabilny chód. Zaprojektowano mechaniczną konstrukcję robota, dedykowaną elektronikę oraz oprogramowanie umożliwiające sterowanie ruchem na podstawie zadanych parametrów. Robot porusza się do

przodu i do tyłu, skręca po łuku oraz obraca się w miejscu, zachowując stabilność i płynność ruchu, co potwierdza osiągnięcie założonego celu. W przyszłości warto zwiększyć responsywność sterowania i umożliwić dynamiczną zmianę parametrów ruchu. Rozbudowa o czujniki dotyku, moduł IMU, system śledzenia trajektorii czy proste elementy autonomii (np. czujniki odległości, kamera) mogłaby poprawić mobilność. Opcjonalnym rozszerzeniem może być również montaż chwytaka.

Bibliografia

- [1] Gierczak R., Labolatoryjny robot kroczący. Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, 2012.
- [2] Wikipedia, Notacja Denavita-Hartenberga. Dostępny online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Notacja_Denavita-Hartenberga (dostęp: 23-10-2025).
- [3] Zielińska T., *Maszyny kroczące*; Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014.

System nadzoru przykładowego odcinka trakcji kolejowej

inż. Paweł Apostel

Automatyka i Robotyka

dr inż. Michał Lower

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

„Polskie kolejnictwo przeszło już wiele przełomowych zmian, takich jak zastosowanie silników spalinowych, elektryfikacja poszczególnych linii oraz automatyzacja. Ostatnia z wymienionych jest w trakcie realizacji, do jej ukończenia potrzebne są dopracowane systemy, w tym te nadzorujące (szerzej kojarzone jako systemy SCADA). W opisywanej pracy został zaimplementowany taki system, w InTouch, dla małej stacji kolejowej. Aplikacja ma służyć dyżurnemu ruchu, jednak na potrzeby lepszej wizualizacji zostały też odtworzone panele sterowania maszynisty oraz serwisanta urządzeń sterowania ruchem kolejowym (SRK). Wizualizacja została połączona z fizyczną makietą kolejki elektrycznej przez sterownik PLC marki Siemens. Cały system jest wyposażony w szereg nowoczesnych rozwiązań, m.in. dostęp do ekranów wymagający autoryzacji, baza danych alarmów, nawigacja między oknami, połączenie przez serwer OPC. Pracę, po drobnych modyfikacjach, można wykorzystać w rzeczywistych rozwiązaniach kolejowych, ponieważ większość szczegółów została wiernie odtworzona.

2.1. Cel i założenia

Cel pracy to zaprojektowanie w pełni funkcjonalnego systemu nadzoru odcinka kolejowego o małym/średnim natężeniu ruchu. Rozwiązanie ma być proste, przejrzyste i praktyczne. Działanie systemu oparto o projekt zespołowy [1] dotyczący sterowania makietą kolejki elektrycznej przy użyciu sterownika PLC. Projekt obejmował sterowanie lokomotywą, sygnalizatorami, rogatkami oraz alarmami. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- projekt oraz wykonanie systemu SCADA odcinka trakcji kolejowej,
- dostosowanie funkcjonalności systemu do aktualnych potrzeb rynkowych,
- dostosowanie sterowania pociągami bazując na rzeczywistych rozwiązaniach współczesnego kolejnictwa.

2.2. Wstęp teoretyczny

System został podzielony na 3 odrębne działy: panel operatorski maszynisty, panel operatorski dyżurnego ruchu oraz panel serwisanta. Zaczynając od panelu maszynisty, został wyposażony we wszelkie najważniejsze kontrolki, przełączniki oraz dźwignie stosowane w rzeczywistych rozwiązaniach. Większość z nich opisana jest na stronie dotyczącej transportu szynowego [2]. Rozróżnić należy szczególnie obwody WN (wysokiego napięcia) oraz NN (niskiego napięcia). Obwód WN odpowiada za zasilanie głównych części pociągu, tj. silniki, przetwornice itp. Obwód NN steruje natomiast zasilaniem oprzyrządowania pociągu, czyli panelami sterowania, ogrzewaniem, klimatyzacją, oświetleniem wewnętrznym i zewnętrznym. Napięcie wysokie pobierane jest z trakcji, natomiast napięcie niskie jest wytwarzane przez przetwornice. W kolejnictwie istnieją również pewne charakterystyczne sygnały kontrolno-ostrzegawcze, szczególnie te opisane jako SHP (Sygnał Hamowania Pociągu) i CA (Czuwak Aktywny), których działanie opisane jest dokładnie w artykule na stronie internetowej [3]. Panel operatorski dyżurnego ruchu jest swoistą innowacją, jednak pewne rozwiązania oparte zostały na informacjach powszechnie dostępnych [4]. Innowacją, w tym znaczeniu, jest informowanie dyżurnego ruchu o wykryciu ewentualnej przeszkody na przejeździe kolejowo-drogowym (np. samochód zaklinowany między torami). W tym przypadku dyżurny ruchu może zdalnie zahamować nadjeżdżające pociągi, by nie doszło do wypadku. Sam tor ruchu pokazany w pracy jest elipsą, ponieważ projekt i wykonanie są oparte na kolejce elektrycznej, której tory układają się w przybliżoną elipsę. Panel serwisanta jest dodatkiem uwzględnionym w celu wykonywania przeglądów urządzeń SRK oraz wymiany błędnie działających komponentów. Dodatkowo zapewnia wgląd w historię awarii oraz umożliwia jednoczesną pracę dyżurnego ruchu i serwisanta.

2.3. Projekt i wykonanie

Pierwsza faza projektu to określenie dokładnych funkcjonalności oraz opisanie działania systemu. Kolejnym krokiem było zaprojektowanie połączeń elektrycznych oraz zaplanowanie wyglądu wizualizacji. Po zaprojektowaniu systemu nadszedł czas na jego wykonanie, czyli podłączenie elektryczne, napisanie programu oraz implementację systemu wizualizacji. Najważniejsze kroki zostały opisane poniżej.

2.3.1. Funkcjonalności systemu SCADA

Niżej opisane są wszystkie funkcjonalności systemu SCADA, które zostały zaimplementowane. Opisane są: panel sterowania maszynisty, panel dyżurnego ruchu oraz panel serwisanta.

Panel maszynisty - tablica sterownicza maszynisty dzieli się na przełączniki oraz kontrolki, które zostały poniżej wymienione.

Przełączniki na panelu maszynisty: aktywator pociągu, nastawnik prędkości, przycisk hamowania awaryjnego, przycisk resetu alarmów, przycisk "czuwak" obsługujący SHP i CA, obsługa obwodu NN.

Kontrolki na panelu maszynisty: wskazywanie aktualnej prędkości pociągu, wskazy-

wanie napięcia i prądu obwodu WN, wskazywanie napięcia i prądu obwodu NN, kontrolka hamowania awaryjnego, kontrolki oraz raporty alarmów, kontrolki domknięcia drzwi oraz obsługa ich otwierania (tylko w pociągu pośpiesznym).

Panel dyżurnego ruchu - dyżurny ruchu ma przed sobą wyłącznie informacje oraz kontrolki, jedynym wyjątkiem jest stop awaryjny. Wszystkie funkcjonalności panelu dyżurnego ruchu to: wskazywanie bieżącej pozycji poruszającego się pociągu, wskazywanie alarmów, możliwość zdalnego zahamowania pociągu w przypadku wykrycia przeszkody na przejeździe, wskazywanie numeru pociągu, numeru maszynisty oraz bieżącej prędkości wybranego pociągu.

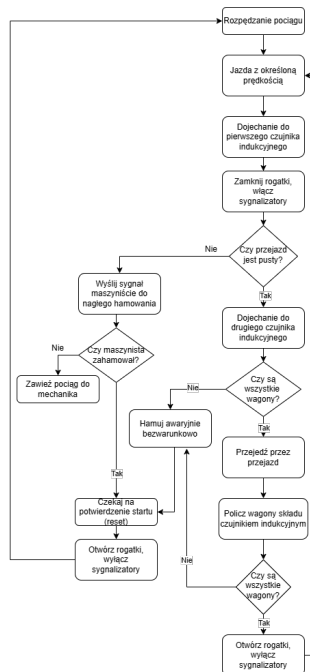
Panel serwisanta - serwisant nie ingeruje w działanie systemu, jednak ma dostęp do wielu informacji, a także możliwość stopu awaryjnego. Wszystkie funkcjonalności panelu serwisanta to: wskazywanie bieżących alarmów, dostęp do bazy danych alarmów z poprzednich 90 dni, dostęp do wskazówek ułatwiających naprawę oraz diagnozę urządzeń SRK przy przejeździe, możliwość zdalnego zahamowania pociągu w przypadku wykrycia przeszkody na przejeździe, wskazywanie numeru pociągu, numeru maszynisty oraz bieżącej prędkości jadącego pociągu.

2.3.2. Schematy opisujące działanie systemu

Poniżej przedstawione są schematy obrazujące, jak dokładnie działa i wygląda system SCADA.

Schemat działania głównego algorytmu

Czujniki indukcyjne opisane na rys. 2.1 oznaczają kolejne stacje pociągu.

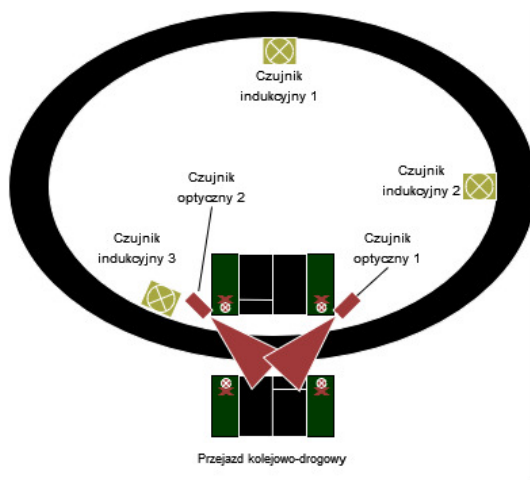


Rysunek 2.1. Dokładny algorytm przejazdu pociągu

Instrukcja warunkowa odnośnie pustego przejazdu to iloczyn logiczny dwóch optycznych czujników odbiciowych, które wykrywają przeszkodę na przejeździe.

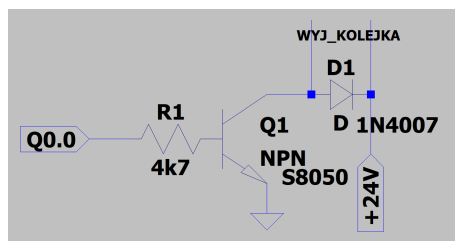
Schemat makiety przykładowego odcinka trakcji kolejowej

Widok makiety na rys. 2.2 ułatwia zrozumienie schematu blokowego z rys. 2.1. Czujniki indukcyjne wykrywają blaszki zamontowane na boku każdego wagonu, by liczyć integralność składu. Czujniki optyczne są ustawione z dwóch stron w kierunku jednego wspólnego obszaru, by ich iloczyn logiczny zdarzył się tylko, kiedy przeszkoda znajduje się na przejeździe.



Rysunek 2.2. Widok makiety z góry

Schematy elektryczne fizycznej części projektu



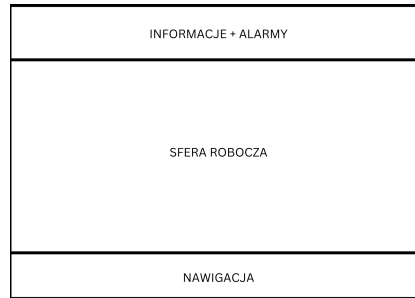
Rysunek 2.3. Schemat układu sterowania kolejką elektryczną

W projekcie został użyty sterownik Siemens S7-1516F-3 PN/DP z modułami wejść i wyjść cyfrowych. Na stykach COM i NO przekaźników są podłączone przetwornice step-down oraz urządzenia, by odizolować galwanicznie sterownik od elementów wykonawczych. Zasilanie kolejki elektrycznej jest realizowane za pomocą sygnału PWM, który jest podawany na układ pokazany na rys. 2.3. Czujniki optyczne są podłączone przez Arduino Uno R3, które przez przekaźnik podaje sygnał do sterownika PLC. Wszelkie połączenia urządzeń wejściowych i wyjściowych, które nie zostały wspomniane, są ukazane na schemacie wykonanym w programie QElectro Tech.

2.3.3. Projekt wizualizacji

Wizualizacja składa się z 6 widoków: widok dyżurnego ruchu, widok serwisanta, widok maszynisty pociągu pośpiesznego, widok maszynisty pociągu towarowego, widok nastawnika prędkości pociągu pośpiesznego, widok nastawnika prędkości pociągu towarowego.

Wszystkie okna (z wyjątkiem nastawników prędkości) mają rozkład, tj. na rys. 2.4. Okna nastawników prędkości zawierają jedynie sferę roboczą.



Rysunek 2.4. Widok okna podzielonego na trzy sekcje

2.3.4. Najciekawsze fragmenty programu głównego

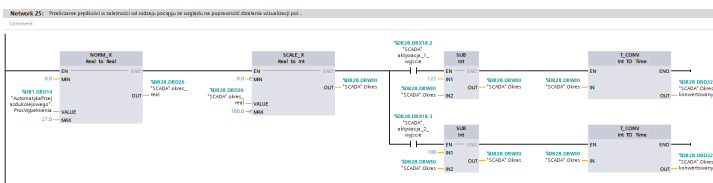
Zdecydowanie najciekawszym zagadnieniem w wizualizacji, które zajęło wiele czasu, jest wizualizacja ruchu pociągu po elipsie. Ostatecznie zdecydowano się na przybliżenie równaniem okręgu:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (2.1)$$

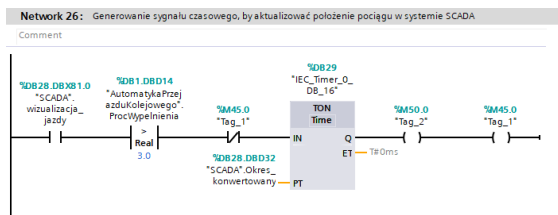
Liczby a i b to współrzędne środka okręgu, natomiast r^2 to kwadrat długości promienia okręgu. Z racji tego, że okrąg ma średnicę 1600 jednostek, środek okręgu znajduje się w punkcie (800,800). Równanie okręgu, które później zostało przekształcone do elipsy wyraża się równaniem:

$$(x - 800)^2 + (y - 800)^2 = 640000 \quad (2.2)$$

Kolejne wyzwanie to symulacja prędkości pociągu, czyli metoda uwzględniająca wypełnienie sygnału PWM zasilania pociągu. Rozwiązano to w sposób pokazany na rys. 2.5 i 2.6. Podzielono obliczanie prędkości na dwa rodzaje pociągów, ponieważ pociąg pośpieszny i pociąg towarowy mają różne dopuszczalne maksymalne prędkości. Na rys. 2.5 najpierw procent wypełnienia sygnału PWM jest skalowany i normalizowany, by można było na nim swobodnie pracować. Następnie wybierany jest pociąg na podstawie tego, który został aktywowany w wizualizacji. Ostatni krok to obliczanie okresu timer'a. W wizualizacji działa to w sposób dyskretny. Odpowiednią symulację prędkości uzyskują przez dobre dobranie kwantu czasu. Wizualizacja jazdy jest uruchamiana dopiero po przejechaniu pociągu nad czujnikiem nr 1, co pokazuje pierwszy styk na rys. 2.6. Następnie sprawdzana jest prędkość pociągu. Jeśli jest mniejsza niż 10% maksymalnej to wizualizacja nie pokazuje jazdy pociągu. Ostatni blok, timer TON odpowiada za wysyłanie impulsu co określony czas, który był obliczany na podstawie prędkości.

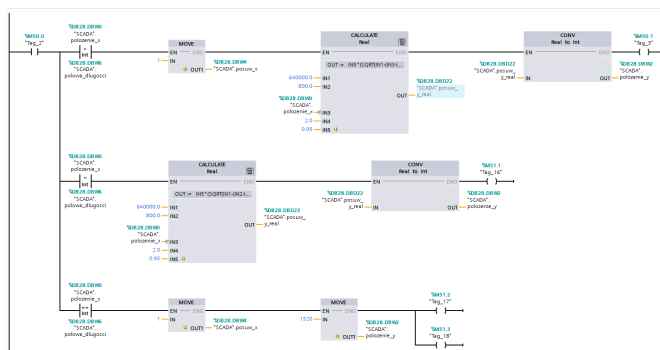


Rysunek 2.5. Network zajmujący się obliczaniem odpowiedniej prędkości pociągu zależnie od ustawienia nastawnika



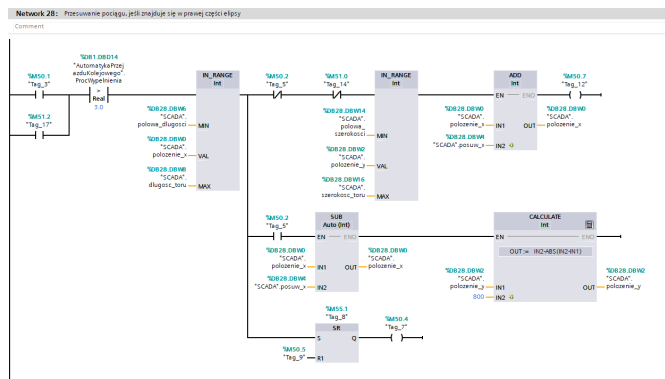
Rysunek 2.6. Network zajmujący się nadawaniem odpowiedniej dynamiki pociągu w wizualizacji

Kolejnym krokiem do efektywnej wizualizacji jest określenie położenia pociągu, tzn. czy znajduje się w prawej połowie elipsy czy w lewej. Pociąg po uruchomieniu wizualizacji znajduje się w lewym górnym rogu elipsy i jest to punkt (0,0) (punkt startowy), prawy dolny róg to (1600,1520). Mówiąc o rogach mam na myśli opisanie prostokąta na elipsie. Za to odpowiada network widoczny na rys. 2.7. Ta gałąź programu jest podzielona na 3 mniejsze. Górna gałąź odpowiada za czas, gdy pociąg jest po prawej stronie elipsy, środkowa, gdy jest po lewej, a dolna, gdy jest w środku. Górna i środkowa gałąź działają podobnie, ponieważ współrzędnej X nadają stały posuw, a współrzędna Y jest obliczana przez zmodyfikowane równanie okręgu (wartość Y wyliczona z równania okręgu jest mnożona przez 0.95, co pozwala tworzyć elipsę). Jedyna różnica jest taka, że raz pociąg znajduje się za środkiem, a raz przed środkiem i to jest rozróżnione przez bloki Calculate. Dolna gałąź odpowiada za lekki "przeskok" pociągu w obrębie środka, by zapobiec sytuacji, że pociąg raz zaliczy się do prawej strony, a raz do lewej, przez co ostatecznie będzie migał na ekranie. Wynika to z charakterystyki działania sterownika PLC.



Rysunek 2.7. Network odpowiedzialny za odpowiednie przeliczanie posuwu pociągu w wizualizacji

Ostatnim krokiem, który umożliwia poprawne działanie wizualizacji jest określenie, w której ćwiartce elipsy znajduje się pociąg, a więc na podstawie informacji z rys. 2.7 (prawo/lewo), a także z rys. 2.8 (górze/dół). Na poniższym rysunku jest pokazane ustalanie ćwiartki i ruch pociągu, gdy znajduje się z prawej strony elipsy. Najpierw sprawdzane jest, czy pociąg nie znajduje się przypadkiem po lewej stronie oraz to czy się porusza, co sprawdzają styki NO na początku, warunek oraz instrukcja IN_RANGE. Następnie na podstawie odpowiedniego blokowania stykami określane jest, czy pociąg znajduje się na górze czy na dole. Ostatnim krokiem jest obliczanie odpowiedniej pozycji pociągu. Rozwiązanie dość skomplikowane, wymagało dużo czasu, by działało bezbłędnie i działa bardzo dobrze.



Rysunek 2.8. Network odpowiedzialny za ustalanie, w której ćwiartce elipsy znajduje się pociąg, z prawej strony (górze/dół)

2.3.5. Osiągnięcia projektowe

W tym punkcie wypunktowane zostały najważniejsze osiągnięcia projektowe:

- Płynny, precyzyjny ruch pociągu w wizualizacji.
- Automatyczne wykrywanie przeszkody na przejeździe jako przyszłość kolei.
- Połączenie systemu nadzoru z symulatorem sterownika oraz z fizycznym sterownikiem przez program KepServer EX.

2.4. Uzyskane wyniki

Wynikiem pracy projektowej był system nadzoru odcinka trakcji kolejowej. Na rys. 2.9 pokazany jest widok panelu dyżurnego ruchu, kiedy pociąg dostaje sygnał SHP (kontrolka SHP miga z szarego na czerwony), pociąg znajduje się już blisko przejazdu, rogatki są zamknięte, sygnalizatory migają, a czujniki na przejeździe wykryły przeszkodę (migają czujniki przy przejeździe, miga znak STOP, którym dyżurny ruchu może zdalnie zatrzymać pociąg). Na rys. 2.10 po lewej stronie widać panel sterowania maszynisty w przypadku, gdy maszynista, dostając sygnał SHP, nie kliknął czuwaka i pociąg wyhamował do zera, a napęd został zablokowany. Natomiast po prawej stronie ukazany jest nastawnik prędkości w trakcie pracy, czyli nastawiania odpowiedniej mocy pociągu. Po 4 sekundach nieaktywności maszynisty okno nastawnika się zamyka i otwiera się ponownie panel

opinii ekspertów w tej dziedzinie. Przywołani eksperci ocenili, że praca jest zrobiona dobrze i wplata wiele szczegółów, które są ważne i używane we współczesnym kolejnictwie. Systemy nadzoru w Polsce są coraz szerzej stosowane, a ich wdrożeniem zajmuje się firma ELESTER. Autor poświęcił wiele czasu, by dopracować każdą dostępną funkcję i dostosować ją do standardów w kolejnictwie.

Podczas uruchomienia systemu wystąpiły problemy w poruszaniu się pociągu po elipsie, program w sterowniku PLC był źródłem błędów, wymagało to rozwiązania wielu problemów związanych z pracą rzeczywistego układu sterowania. Dzięki doświadczeniu zdobytemu na studiach (także w trakcie kursu programowania PLC) udało się wdrożyć wszystkie rozwiązania, które były założone. System po drobnych modyfikacjach można z powodzeniem zaproponować do prawdziwych rozwiązań automatyki kolejowej. Przy zastosowaniu czujników wykorzystywanych w kolejnictwie można określić, tzw. trawers pociągu, a więc to, w którą stronę pociąg porusza się po torze. System można rozdzielić na kilka osobnych części, by sekcja maszynisty znajdowała się w kabinie maszynisty, a sekcja dyżurnego ruchu i serwisanta przy stacji kolejowej. Takie podział aplikacji jest możliwy dzięki użyciu serwera OPC UA, który jest uniwersalnym narzędziem łączenia między różnymi systemami, a jego integracja jest prosta w implementacji. Projekt można również przystosować do większej liczby pociągów. Możliwe jest reagowanie tylko na pociągi nadjeżdżające. Należy dodać, że system posiada również funkcję wspomagającą dyżurnego ruchu w przypadku wykrycia przeszkody na przejeździe kolejowym. Po wykryciu przeszkody, w tym rozwiązaniu, można zdalnie zahamować składy w pobliżu. Można zaproponować dobrze szyfrowane rozwiązanie "Radio-Stop", czyli zdalne hamowanie pociągu, by zapobiec fałszywym alarmom, zwiększając bezpieczeństwo przejazdów kolejowo-drogowych. System po kilku modyfikacjach może współpracować z wieloma torami, zależnie od ilości czujników i komunikacji radiowej z nadjeżdżającymi pociągami. Praca nad projektem wymagała zapoznania się z interdyscyplinarną wiedzą techniczną, należało poznać specyfikę branży kolejowej w połączeniu z techniką programowania sterownika PLC i systemem SCADA. Szczególnie ciekawa okazała się wiedza z branży kolejowej i rozwiązań tam stosowane. Rozwiązania automatyki w kolejnictwie mają swoją specyfikę odróżniającą ją od innych procesów przemysłowych. Polska pod względem automatyzacji kolejowej czyni coraz większe postępy, jednak dalej pozostaje wiele stacji i pociągów do renowacji, co pokazuje, że rynek na systemy nadzoru stoi otworem.

Bibliografia

- [1] Apostel P., Dubowik K., Glaser P., Sobczak Ł., *Automatyzacja modelu przejazdu kolejowego przy pomocy sterownika PLC*, Projekt zespołowy, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, 2024.
- [2] Transport Szynowy. Dostępny online: <https://transportszynowy.pl/Kolej/14wekabina> (dostęp: 14-10-2024).
- [3] Transport Szynowy. Dostęp online: <https://www.transportszynowy.pl/Kolej/zabezpshp> (dostęp: 15-10-2024).
- [4] ELESTER. Dostępny online: <https://elester-pkp.com.pl/wp-content/uploads/2020/01/Systemy-SRK-ElesterPKP.pdf> (dostęp: 19-11-2024), s. 6.

Układ programowalnego obciążenia elektronicznego prądu stałego

inż. Dominik Pluta

Automatyka i Robotyka

dr inż. Jacek Jagodziński

mgr inż. Paweł Dobrowolski

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Praca opisuje proces projektowania, budowy i testowania programowalnego obciążenia elektronicznego prądu stałego, stworzonego jako wszechstronne narzędzie do testowania zasilaczy i akumulatorów. W ramach projektu opracowano dedykowaną płytkę drukowaną (PCB), którą zintegrowano z zaprogramowanym mikrokontrolerem sterującym pracą urządzenia. Kluczowe funkcjonalności obejmują różnorodne tryby pracy (stały prąd, moc, rezystancja) oraz możliwość zdalnego sterowania za pomocą dedykowanej aplikacji PC. Całość zamknięto w wytrzymałej, metalowej obudowie z panelem przednim wykonanym w technologii druku 3D. Przeprowadzone testy funkcjonalne i pomiarowe potwierdziły zgodność parametrów pracy urządzenia z założeniami projektowymi, w tym wysoką dokładność i stabilność. Powstałe rozwiązanie open-source stanowi wartościowe narzędzie dla inżynierów, studentów i hobbystów zajmujących się elektroniką. Projekt można znaleźć na platformie GitHub: <https://github.com/Dominik-Workshop/electronic-load>.

3.1. Cel i założenia

Niezawodność i wydajność źródeł zasilania prądu stałego, takich jak zasilacze czy akumulatory, jest kluczowa w wielu zastosowaniach elektronicznych, a ich rzetelna weryfikacja wymaga odpowiednich narzędzi testowych. Celem projektu było stworzenie elektronicznego obciążenia prądu stałego do testowania zasilaczy i akumulatorów. Urządzenie miało umożliwiać symulację różnych typów obciążenia oraz zapewniać wygodną obsługę i precyzyjne pomiary. Projekt ma charakter open-source, co pozwala na dalsze modyfikacje i rozwój przez społeczność. Finalny produkt stanowi wartościowe narzędzie zarówno w celach edukacyjnych, jak i praktycznych w testowaniu i rozwijaniu elektroniki.

Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- implementacja pięciu trybów pracy: stałego prądu, stałej mocy, stałej rezystancji, odpowiedzi skokowej oraz testowania akumulatorów,

- zastosowanie zabezpieczeń przed przeciążeniem, przegrzaniem oraz nadmiernym rozładowaniem testowanego akumulatora,
- wyposażenie urządzenia w interfejs umożliwiający wygodne wprowadzanie parametrów oraz wyświetlanie wyników pomiarów na ekranie LCD,
- zdalne sterowanie i monitorowanie parametrów za pomocą dedykowanej aplikacji PC,
- dynamiczne sterowanie chłodzeniem w zależności od temperatury radiatora dla zapewnienia cichej pracy i ochrony przed przegrzaniem,
- zastosowanie funkcji zdalnego pomiaru napięcia (remote voltage sense) eliminującej spadki napięcia na przewodach,
- zaprojektowanie i wykonanie PCB, obudowy oraz oprogramowania mikrokontrolera i aplikacji PC.

3.2. Wstęp teoretyczny

Elektroniczne obciążenie [1] prądu stałego to urządzenie, które pozwala na testowanie źródeł zasilania, takich jak zasilacze, akumulatory i baterie. Jego główną funkcją jest symulowanie rzeczywistego obciążenia elektrycznego przez kontrolowane pobieranie prądu lub mocy. Dzięki temu można precyzyjnie analizować wydajność oraz stabilność testowanego źródła.

Tradycyjne odbiorniki energii elektrycznej, takie jak żarówki czy silniki, pobierają prąd zgodnie ze swoimi właściwościami. Elektroniczne obciążenie działa w sposób odmienny – pozwala użytkownikowi określić dokładną wartość pobieranego prądu, napięcia lub mocy, niezależnie od charakterystyki źródła zasilania. Jest to realizowane przez zastosowanie tranzystorów mocy (np. MOSFET [2]), które regulują przepływ energii.

Elektroniczne obciążenie znajduje szerokie zastosowanie w inżynierii elektrycznej i elektronicznej, w szczególności do:

- Testowania zasilaczy – sprawdzania stabilności napięcia oraz prądu w różnych warunkach obciążeniowych.
- Badania akumulatorów – określania ich rzeczywistej pojemności i charakterystyki rozładowania.
- Symulacji rzeczywistych warunków pracy urządzeń elektronicznych.
- Analizy dynamicznych odpowiedzi źródeł zasilania na zmienne obciążenie.

3.3. Projekt i wykonanie

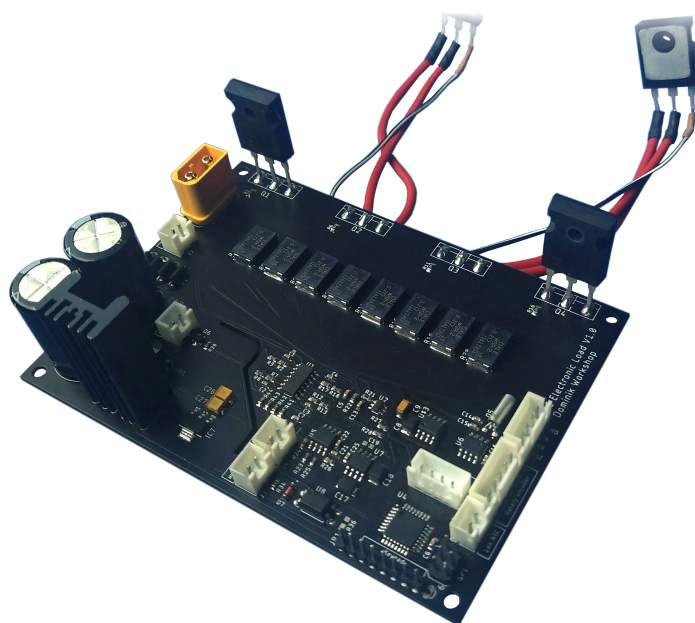
Projekt elektronicznego obciążenia prądu stałego obejmował trzy główne etapy: zaprojektowanie, montaż i testowanie elektroniki, opracowanie oprogramowania sterującego oraz wykonanie mechanicznej obudowy urządzenia. Zdjęcie ukończonej konstrukcji elektronicznego obciążenia przedstawiono na rys. 3.1.



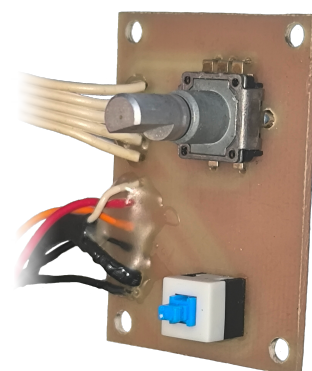
Rysunek 3.1. Zdjęcie zbudowanego urządzenia

3.3.1. Projekt i montaż elektroniki

Pierwszym krokiem było opracowanie schematu ideowego oraz zaprojektowanie płytki drukowanej (PCB). Wykorzystano oprogramowanie EDA do projektowania obwodów, a produkcja głównej płytki została zlecona firmie JLCPCB. Natomiast mniejsza płytka frontowa została wykonana samodzielnie metodą termotransferu. Po otrzymaniu PCB, wszystkie elementy elektroniczne zostały zamontowane i przylutowane, a następnie przeprowadzono testy funkcjonalne i diagnostykę ewentualnych błędów. Złożone już płytki PCB przedstawiono na rys. 3.2.

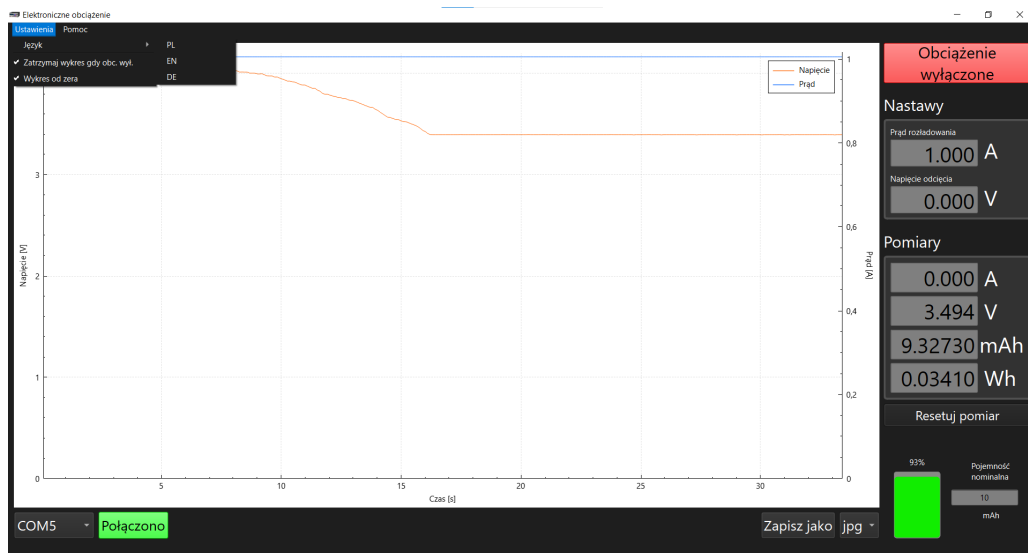


(a) płytka główna



(b) płytka frontowa

Rysunek 3.2. Zdjęcie zaprojektowanych PCB



Rysunek 3.3. Aplikacja na PC do elektronicznego obciążenia

3.3.2. Oprogramowanie mikrokontrolera

Do sterowania obciążeniem wykorzystano mikrokontroler, na który został napisany dedykowany program. Oprogramowanie zostało opracowane w języku C++. Zaimplementowano algorytmy regulacji obciążenia, odczytu parametrów pomiarowych oraz obsługi interfejsu użytkownika. Dodatkowo przewidziano możliwość komunikacji z komputerem, co pozwala na zdalne sterowanie urządzeniem oraz wizualizację zmierzonych parametrów.

3.3.3. Mechanika i obudowa

Aby zapewnić ochronę układów elektronicznych i wygodę użytkowania, wykonano obudowę z giętej blachy. Dodatkowo przedni panel został zaprojektowany i wydrukowany w technologii druku 3D, co umożliwiło precyzyjne dopasowanie elementów sterujących, takich jak enkoder, wyświetlacz oraz przyciski. Konstrukcja obudowy uwzględniała również odpowiednie chłodzenie, co było kluczowe dla bezpiecznej pracy urządzenia przy dużych obciążeniach cieplnych.

3.3.4. Aplikacja na PC

Stworzono aplikację na Windows do sterowania elektronicznym obciążeniem i monitorowania testów akumulatorów. Program umożliwia wizualizację zmian napięcia i prądu, zapis wyników oraz obsługę w trzech językach. Intuicyjny interfejs pozwala na łatwe zarządzanie ustawieniami i monitorowanie stanu akumulatora, a komunikacja odbywa się przez port szeregowy. Wygląd stworzonej aplikacji przedstawiono na rys. 3.3.

3.3.5. Testowanie i optymalizacja

Po ukończeniu montażu urządzenie zostało poddane testom w różnych warunkach pracy. Sprawdzono stabilność działania, dokładność pomiarów oraz skuteczność zabezpieczeń termicznych i przeciążeniowych. W razie potrzeby dokonano korekt w oprogramowaniu oraz w układzie elektronicznym, aby zapewnić optymalne parametry pracy. Finalne testy potwierdziły poprawne działanie urządzenia i jego zgodność z założeniami projektowymi.

3.4. Uzyskane wyniki

W celu oceny dokładności działania elektronicznego obciążenia przeprowadzono pomiary porównujące wartość zadaną i zmierzoną prądu oraz napięcia. Dodatkowo wykonano testy dynamiczne, analizując odpowiedź skokową urządzenia dla różnych wartości prądu i napięcia.

3.4.1. Dokładność regulacji prądu

Przeprowadzono testy mające na celu porównanie wartości prądu zadanej przez użytkownika z wartością zmierzoną przez układ. Do testów wykorzystano multimetr w trybie amperomierza oraz zasilacze o łącznej wydajności prądowej 10 A. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Porównanie prądu zadanego i zmierzonego

Wartość zadana [A]	Pomiar z obciążenia [A]	Pomiar z multimetru [A]
0.1	0.104	0.1032
0.5	0.500	0.4997
1.0	1.007	1.0065
5.0	5.002	5.0007
8.0	7.998	7.990

Analiza wyników pokazuje, że maksymalna różnica między wartością zadaną a zmierzoną nie przekracza 7 mA, co wskazuje na wysoką dokładność regulacji prądu.

3.4.2. Dokładność pomiaru napięcia

Testy dokładności pomiaru napięcia przeprowadzono w podobny sposób, wykorzystując multimetr w trybie woltomierza. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.2.

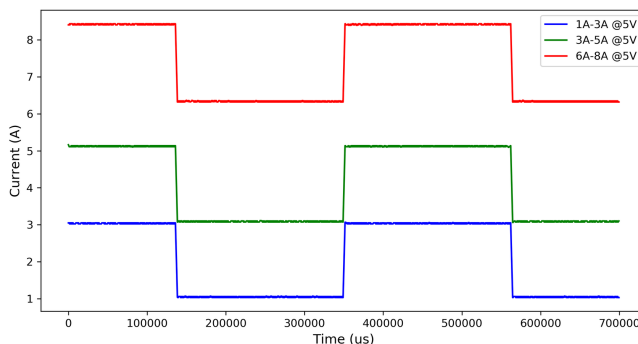
Tabela 3.2. Porównanie pomiarów napięcia z obciążenia i multimetru

Pomiar z obciążenia [V]	Pomiar z multimetru [V]
1.002	1.0022
5.006	5.0058
10.01	10.007
30.02	30.016
50.01	50.012

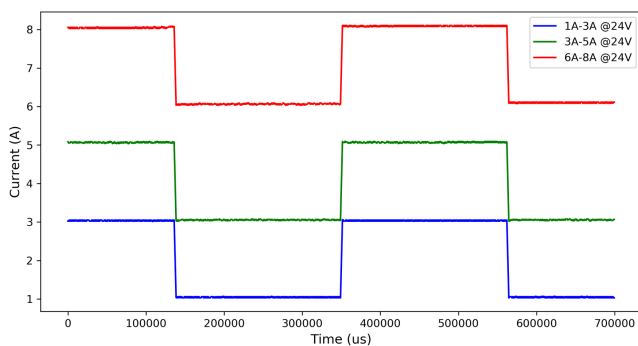
Otrzymane wyniki wskazują na niewielkie różnice między wskazaniami obciążenia i multimetru, co świadczy o prawidłowej pracy układu pomiarowego.

3.4.3. Odpowiedź skokowa

Testy dynamiczne polegały na analizie odpowiedzi skokowej urządzenia dla różnych wartości prądu przy napięciach zasilania 5 V oraz 24 V. Przykładowe przebiegi czasowe prądu przedstawiono na rysunkach 3.4 oraz 3.5.



Rysunek 3.4. Zestawienie przebiegów prądu dla różnych skoków przy 5 V



Rysunek 3.5. Zestawienie przebiegów prądu dla różnych skoków przy 24 V

Na podstawie analizy przebiegów stwierdzono, że układ nie wykazuje oscylacji ani znaczącego przeregulowania, co świadczy o stabilnej pracy układu regulacji prądu.

3.4.4. Podsumowanie wyników

Przeprowadzone testy wykazały, że elektroniczne obciążenie działa zgodnie z założeniami projektowymi. Urządzenie charakteryzuje się wysoką dokładnością regulacji prądu i napięcia oraz stabilną odpowiedzią dynamiczną, co potwierdzają wyniki pomiarów i analizy przebiegów czasowych.

3.5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania i testy jednoznacznie wykazały, że opracowane programowalne obciążenie elektroniczne prądu stałego skutecznie realizuje postawione cele projektowe, oferując wysoką precyzję i stabilność działania. Przeprowadzone testy funkcjonalne elektronicznego obciążenia prądu stałego wykazały jego wysoką precyzję oraz stabilność działania. W ramach badań porównano wartości zadane prądu z wartościami zmierzonymi zarówno przez samo obciążenie, jak i niezależny multimetr. Wyniki wskazują, że odchylenia nie przekraczają kilku miliamperów, co potwierdza wysoką dokładność układu. Pomiar napięcia również wykazał zgodność z wartościami odniesienia, co świadczy o poprawnym działaniu sekcji pomiarowej urządzenia.

Dodatkowo, analizowano odpowiedzi skokowe obciążenia, mierząc przebiegi napięcia na rezystorze pomiarowym. Obciążenie zachowało stabilność dla różnych skoków prądowych przy napięciach 5 V i 24 V, a uzyskane przebiegi prądu nie wykazały oscylacji ani przeregulowań. Pewne niewielkie odchylenia, zauważone przy wyższych prądach, można przypisać nagrzewaniu się rezystora pomiarowego, co wpłynęło na jego rezystancję. Jest to zjawisko spodziewane i może zostać skorygowane przez zastosowanie rezystorów o niższym współczynniku temperaturowym lub aktywnego chłodzenia.

W przyszłości możliwe jest dalsze doskonalenie konstrukcji przez zastosowanie przetworników DAC o wyższej rozdzielczości oraz implementację sprzężenia zwrotnego w celu kompensacji nieliniowości układu. Pomimo tych możliwości optymalizacyjnych, obecna wersja urządzenia jest w pełni funkcjonalna i sprawdzona w warunkach testowych.

Bibliografia

- [1] Obciążenie elektroniczne, co to jest i do czego służy?. Dostępny online: <https://www.amt.pl/pl/wns/obciazenie-elektroniczne-co-to-jest-i-do-czego-sluzy> (dostęp: 29-03-2025).
- [2] Tranzystor polowy MOSFET. Dostępny online: https://lpp.pwr.edu.pl/fcp/xGBUKOQtTKlQhbx08SlkTUgRKUWRuHQwFDBoIVURNWHtRFVZpCFghUHcKVigEQUw/_users/code_JE14VPxYXIVgiURczAUyFU0QFAWYpCRhMGSk/instrukcje/eiue/cw7_tranzystor_polowy_mosfet.pdf (dostęp: 29-03-2025).

Mikroprocesorowy układ sterowania elektronicznym zamkiem z programowalnym systemem ograniczonego dostępu

inż. Mikołaj Przybylski

Automatyka i Robotyka

dr inż. Michał Lower

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Zrealizowany projekt składa się z autorskich urządzeń, które są odpowiedzialne za autoryzację i kontrolę dostępu oraz rejestrację identyfikatorów i użytkowników systemu ograniczonego dostępu w kompleksie wypoczynkowym domków na wynajem. Opracowane procedury systemowe gwarantują obsługę autoryzowanego dostępu użytkowników oraz umożliwiają wybór opcji pozwalającej wskazać cel wejścia w zależności od przypisanych w procesie rejestracji uprawnień. System automatyzuje procedury, ściśle związane z funkcjonowaniem wynajmowanych obiektów, takie jak: dostęp w terminie rejestracji, sprzątanie, weryfikacja sprzątania, wysyłanie próśb o posprzątanie i wymeldowanie gości, a także zwiększa bezpieczeństwo dzięki opracowanej funkcjonalności powiadomień e-mail. Projekt realizuje wszystkie najważniejsze funkcjonalności dostępne w innych propozycjach rynkowych, a także wprowadza nowatorskie rozwiązania ukierunkowane na zaawansowane zarządzanie wynajmem oraz obsługą obiektów przeznaczonych na wynajem.

4.1. Cel i założenia

Celem projektu jest stworzenie funkcjonalnego systemu kontroli dostępu przeznaczonego dla obiektów na wynajem składającego się z urządzeń odpowiedzialnych za rejestrację oraz autoryzację dostępu użytkowników, jak i aplikacji web'owej umożliwiającej przechowywanie danych w arkuszu kalkulacyjnym na dysku w chmurze.

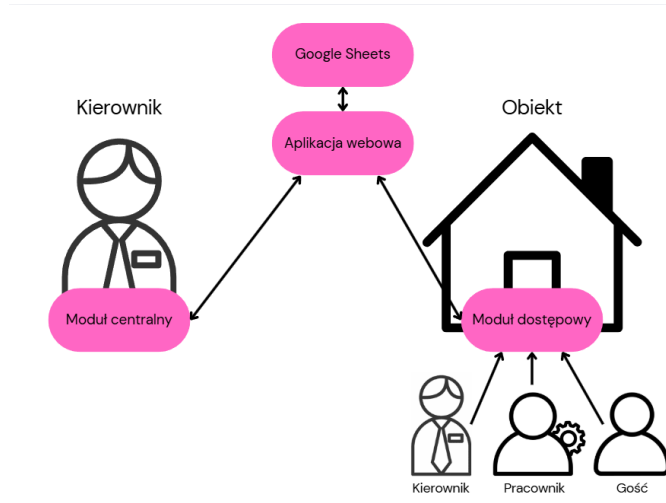
Przed rozpoczęciem realizacji projektu zdefiniowano następujące założenia projektowe:

- skonstruowanie dwóch rodzajów urządzeń: odpowiedzialnych za autoryzację dostępu oraz rejestrację,
- dane wejściowe, wyjściowe, autoryzacyjne oraz osób zarejestrowanych w systemie mają być przechowywane w aplikacji Microsoft Excel, Google Sheets lub podobnej,
- urządzenie odpowiedzialne za rejestrację ma umożliwiać zasilanie z 12 V, tak aby możliwe było jego używanie np. przez wejście gniazda zapalniczki samochodowej,

- urządzenie odpowiedzialne za autoryzację dostępu ma być wyposażone w sekcję zasilania umożliwiającą przyłączenie modułu do instalacji elektrycznej obiektu, w którym będzie używany,
- zagwarantowanie awaryjnego zasilania urządzenia odpowiedzialnego za autoryzację dostępu, wymagane podtrzymanie zasilanie co najmniej przez 1 godzinę,
- zapewnienie komunikacji modułów przez WI-FI oraz w funkcji klienta, komunikacji z serwerem SMTP w celu wysyłania wiadomości e-mail,
- minimalne napięcie zasilania zamka elektromagnetycznego 10 V,
- zastosowane rozwiązania technologii RFID mają gwarantować obsługę popularnych standardów identyfikatorów: ISO/IEC 14443 A/MIFARE, NTAG o częstotliwości 13,56 MHz,
- możliwość dostępu do danych rejestracyjnych i dostępowych z dowolnego urządzenia z dostępem do internetu,
- zagwarantowanie dwóch metod autoryzacyjnych: kodem dostępowym oraz identyfikatorami RFID,
- ograniczenie kodów autoryzacyjnych do 6-ciu cyfr, a ich wprowadzenie potwierdzone dodatkowym przyciskiem,
- zagwarantowanie wysyłania powiadomień e-mail z poziomu urządzeń informujących o nowych zdarzeniach w systemie, wyjątkowych sytuacjach oraz próbach nieautoryzowanego dostępu,
- zagwarantowanie wyświetlania: powiadomień dla użytkownika i informacji o aktualnym stanie systemu oraz aktualnie wykonywanych operacjach,
- ograniczenie ilości zarejestrowanych kierowników do czterech,
- zapewnienie możliwości rejestracji co najmniej 100 rezerwacji oraz 20 pracowników,
- umożliwienie dostępu z rozróżnieniem uprawnień: gości, pracownika oraz kierownika i przypisanie autoryzacji różnych opcji celu wejścia,
- zapewnienie możliwości uzyskania bezwarunkowego dostępu przez kierownika,
- ograniczenie dostępu pracowników do domku, gdy domek jest posprzątany lub nie została wysłana prośba o posprzątanie podczas trwania rezerwacji,
- ograniczenie dostępu gości do konkretnych dat i godzin rezerwacji, uwzględniając domyślną godzinę przyjazdu (domyślnie 14:00) oraz wyjazdu (domyślnie 12:00),
- opracowanie i zaimplementowanie w systemie procedury wymeldowania się gości,
- opracowanie i zaimplementowanie w systemie procedury sprzątania obiektów przez pracowników oraz kierowników,
- opracowanie i zaimplementowanie w systemie procedury wysyłania prośby o posprzątanie przez gości,
- opracowanie i zaimplementowanie w systemie kierowniczej procedury weryfikacji sprzątania obiektów przez pracowników,
- ograniczenie uniemożliwiające weryfikację sprzątania wykonanego przez kierownika,
- zabezpieczenie na wypadek braku finalizacji rozpoczętej procedury, umożliwiające zakończenia procedur, przez wszystkich pracowników i kierowników zarejestrowanych w systemie.

4.2. Wstęp teoretyczny

Propozycja rozwiązania projektowanego systemu oparta jest o zestaw urządzeń nazywanych modułami. Urządzenia te mają być zintegrowane z aplikacją Google Sheets (Arkusze Google). Całość proponowanego rozwiązania została przedstawiona za pomocą uproszczonego schematu na rysunku 26.1.



Rysunek 4.1. Schemat koncepcji rozwiązania

Moduły występują w dwóch wariantach - centralnym i dostępowym:

- moduł centralny odpowiada za rejestrację użytkowników w systemie oraz wysyłanie powiadomień e-mail do zarejestrowanych gości,
- moduł dostępowy odpowiada za przetwarzanie procedur autoryzacyjnych, udzielanie dostępu do obiektu oraz wysyłanie powiadomień e-mail do kadry.

W systemie można zdefiniować trzy rodzaje uprawnień użytkowników:

- kierownik – uprawnienie przypisywane kadrze kierowniczej,
- pracownik – uprawnienie przypisywane pracownikom sprzątającym obiekty,
- gość – uprawnienie przypisywane klientom odwiedzającym obiekt.

4.3. Projekt i wykonanie

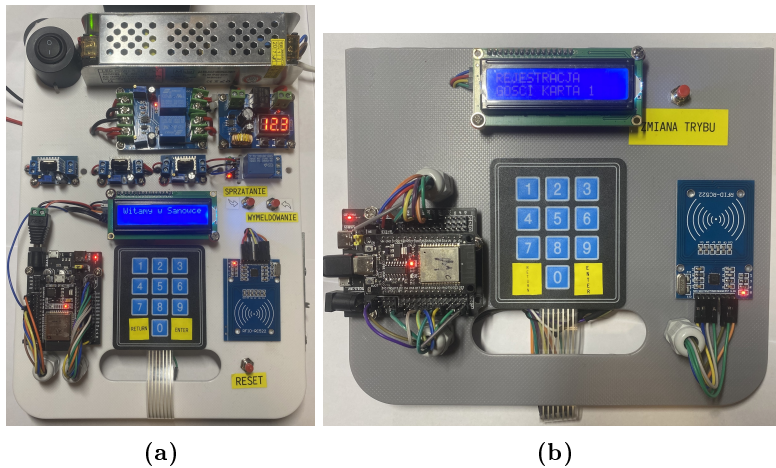
Projekt "Mikroprocesorowy układ sterowania elektronicznym zamkiem z programowalnym systemem ograniczonego dostępu" powstał przy użyciu ogólnodostępnych elementów, dzięki czemu, w przypadku awarii któregoś z komponentów, proces wymiany jest znacznie ułatwiony. Projekt składa się z modułu dostępowego i centralnego, przedstawionych na rysunkach 26.2 oraz 26.3. Najważniejszym elementem układów odpowiedzialnym za sterowanie jest mikrokontroler ESP32. Element został wykorzystany ze względu na: wielofunkcyjność, ilość pamięci, wydajność oraz możliwość komunikacji przez WI-FI, aby spełnić założenia projektowe. Środowisko, w którym zdecydowano się oprogramować układy to Arduino IDE, które zapewnia: szerokie spektrum bibliotek, możliwych do wykorzystania,

łatwość programowania oraz jest jednym z dedykowanych środowisk programistycznych dla mikrokontrolerów ESP32. Pozostałe elementy, wspólne dla obu modułów, które wykorzystano w projekcie to:

- adapter 30-pin do płytek ESP32 - wykorzystany ze względu na ułatwienie połączeń elementów oraz konstrukcji modułów, a w przypadku modułu centralnego umożliwienie zasilania 12 VDC, zgodnie z założeniami,
- membranowa, 12-przyciskowa klawiatura numeryczna - użyta ze względu na kompatybilność z mikrokontrolerem oraz umożliwienie spełnienia założenia autoryzacji dostępu kodem dostępowym,
- wyświetlacz LCD 2×16 - wykorzystany ze względu na kompatybilność, ułatwienie korzystania z systemu oraz umożliwienie spełnienia założenia wyświetlania powiadomień dla użytkownika i informacji o aktualnym stanie systemu,
- czytnik RFID RC522 - wykorzystany ze względu na kompatybilność oraz obsługę autoryzacji z wykorzystaniem identyfikatorów RFID wszystkich standardów wymienionych w założeniach projektu,
- przycisk monostabilny - wykorzystany ze względu na obsługę przełączania trybów urządzeń.

Moduł dostępowy charakteryzuje się wbudowaną sekcją zasilania, umożliwiającą zasilanie modułu przez połączenie z siecią energetyczną obiektu. Wykorzystany zasilacz modułowy Milio SLIM IP20 60 W gwarantuje napięcie zasilania 12 VDC oraz prąd 5 A, dzięki czemu użytkownik może mieć pewność, że każdy element układu będzie nieprzerwanie zasilany. Do zasilania poszczególnych elementów sekcji sterowania wykorzystane zostały moduły przetwornicy napięcia step-down LM317, aby zagwarantować zmniejszone napięcia zgodne z dokumentacją techniczną producenta elementów. Zasilanie awaryjne zostało rozwiązane przez zastosowanie akumulatora LONG WP5-12 12 VDC 5 Ah o parametrach, spełniających założenia projektowe, ładowanego przez moduł ładowania baterii XH-M609. Obsługę przełączania zasilania między sieciowym, a baterijnym zapewnia moduł automatycznego przełączania zasilania awaryjnego YX851 12 VDC 10 A. Otwieranie drzwi wejściowych do obiektu umożliwia elektrozaczep awersyjny Electra Plus Poznań R3 12.20L, o parametrach zgodnych z założeniami projektowymi, który zasilany jest napięciem przekazywanym przez moduł przekaźnika 1-kanalowego SRD-05VDC-SL-C 5V - 10 A/250 V, wysterowanego przez mikrokontroler ESP32.

Aplikacją odpowiedzialną za przechowywanie danych: rezerwacji, użytkowników systemu, autoryzacyjnych oraz dostępowych jest Google Sheets. Wybór aplikacji spowodowany był jej możliwościami takimi jak: przechowywanie danych w chmurze - Dysk Google, co zapewnia dostęp do informacji z każdego urządzenia z dostępem do internetu oraz dedykowanemu narzędziu do pisania aplikacji web'owych Google Apps Script umożliwiającej integrację systemu fizycznego z aplikacją Google Sheets.



Rysunek 4.2. Moduły systemu (a) - Moduł dostępowy, (b) - Moduł centralny

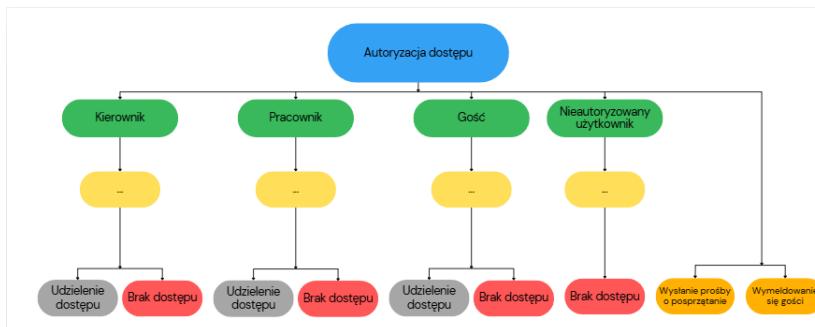
4.3.1. Opis procedur realizowanych przez system

Po konsultacjach z administratorem kompleksu wypoczynkowego domków na wynajem opracowano procedury wymagane przez użytkownika systemu. Procedury te obejmują zadania realizowane przez system oraz proces rejestracji wejścia gości oraz obsługi obiektu.

Autoryzacja dostępu

Autoryzacja dostępu to podstawowy tryb modułu dostępowego. Przykładowy schemat procedury został przedstawiony na rysunku 4.3, pozostałe schematy zostały uwzględnione w pracy inżynierskiej. Po wszczęciu procedury autoryzacyjnej, przez zeskanowanie identyfikatora lub podanie kodu, identyfikowane są uprawnienia do których przypisane są pobrane dane.

Rozróżniane są trzy główne rodzaje uprawnień: "Kierownik", "Pracownik" i "Gość" oraz dodatkowo "Nieautoryzowany użytkownik". Z poziomu nierozpoczętej procedury autoryzacyjnej możliwe jest również przejście do trybów: "Wysłanie prośby o posprzątanie" oraz "Wymeldowanie się gości".



Rysunek 4.3. Poglądowy schemat procedury autoryzacja dostępu

Autoryzacja kierownika

Po udanej autoryzacji użytkownika z uprawnieniami kierownika system umożliwia wybór jednej z trzech opcji: Sprzątania, weryfikacji oraz wejścia.

Wybór opcji **sprzątania** oznaczonej na wyświetlaczu LCD skrótem "CLN" wszczy-
na analizę możliwości rozpoczęcia procedury. Aby zakończyć sprząatanie należy ponownie
rozpocząć proces autoryzacji przez podanie kodu dostępowego lub zeskanowanie identy-
fikatora RFID. System zidentyfikuje uprawnienia przypisane do pobranych danych auto-
ryzacyjnych.

Wybór opcji **weryfikacji** oznaczonej na wyświetlaczu LCD skrótem "VER" wszczy-
na analizę możliwości rozpoczęcia procedury. Aby zakończyć weryfikację należy ponownie
rozpocząć proces autoryzacji przez podanie kodu dostępowego lub zeskanowanie identy-
fikatora RFID. System zidentyfikuje uprawnienia przypisane do pobranych danych auto-
ryzacyjnych.

Wybór opcji **wejścia** do obiektu oznaczonej na wyświetlaczu LCD skrótem "NO"
umożliwia bezwarunkowy dostęp do obiektu.

Aby **anulować** wybór opcji należy nacisnąć przycisk "return" na klawiaturze nume-
rycznej, po tej operacji system wróci do trybu początkowego.

Autoryzacja pracownika

Po udanej autoryzacji użytkownika z uprawnieniami pracownika system automatycznie
przechodzi do trybu sprzątania i wszczy-
na analizę możliwości rozpoczęcia procedury. Aby
zakończyć sprząatanie należy ponownie rozpocząć proces autoryzacji przez podanie kodu
dostępowego lub zeskanowanie identyfikatora RFID. System zidentyfikuje uprawnienia
przypisane do pobranych danych autoryzacyjnych.

Autoryzacja gości

Po udanej autoryzacji użytkownika z uprawnieniami gościa system wszczy-
na analizę moż-
liwości udzielenia dostępu.

Nieautoryzowani użytkownicy

Po identyfikacji nieautoryzowanego użytkownika system określa powód nieudzielenia do-
stępu.

Prośba o posprząatanie

Gdy system znajduje się w trybie domyślnym możliwe jest przejście do trybu "Prośby
o posprząatanie" przez naciśnięcie przycisku "SPRZĄTANIE". System poprosi o podanie
kodu lub zeskanowanie identyfikatora RFID po czym rozpocznie autoryzację.

Wymeldowanie się gości

Gdy system znajduje się w trybie domyślnym możliwe jest przejście do trybu "Wymeldo-
wania się" przez naciśnięcie przycisku "WYMELDOWANIE". System poprosi o podanie

kodu oraz przypomni o pozostawieniu identyfikatorów w środku obiektu, po czym rozpocznie autoryzację.

4.3.2. Rejestracja

Rejestracja jest podstawowym trybem modułu centralnego. System oferuje cztery opcje rejestracji: kart, gości, pracowników oraz kierowników.

Rejestracja nowych kart w systemie

Procedurę rozpoczynamy od zeskanowania identyfikatora RFID, system analizuje pobrane dane. Jeżeli procedura zakończona zostanie pomyślnie, na wyświetlaczu LCD wyświetlany jest przypisany przez system numer karty.

Rejestracja gości

Rejestrację należy rozpocząć od zeskanowania pierwszego identyfikatora RFID. System analizuje możliwość użycia karty. Następnie system prosi o zeskanowanie drugiego identyfikatora. Po pomyślnym zakończeniu procesu automatycznie generowany jest 6-cio cyfrowy kod dostępowy oraz następuje wysłanie wiadomości e-mail do gościa o pomyślnym zarejestrowaniu rezerwacji wraz ze wszystkimi informacjami niezbędnymi do uzyskania dostępu do obiektu.

Rejestracja pracowników

Przed rozpoczęciem procedury należy uzupełnić podstawowe dane w arkuszu Google. Rejestrację rozpoczynamy od zeskanowania identyfikatora RFID. System analizuje możliwość użycia karty. Po pomyślnym zarejestrowaniu identyfikatora, system prosi o podanie 6-cio cyfrowego kodu dostępowego. Sprawdzane jest czy kod nie jest używany, a po pomyślnym zakończeniu procesu do pracownika oraz kadry kierowniczej wysyłana jest wiadomość e-mail o pomyślnej rejestracji.

Rejestracja kierowników

Przed rozpoczęciem procedury należy uzupełnić podstawowe dane w arkuszu Google. Rejestrację rozpoczynamy od zeskanowania identyfikatora RFID. System analizuje możliwość użycia karty. Po pomyślnym zarejestrowaniu identyfikatora, system prosi o podanie 6-cio cyfrowego kodu dostępowego. Sprawdzane jest czy kod nie jest używany, a po pomyślnym zakończeniu procesu do nowego kierownika oraz pozostałej kadry kierowniczej wysyłana jest wiadomość e-mail o pomyślnej rejestracji.

4.4. Uzyskane wyniki

Po zakończeniu projektu przeprowadzone zostały testy elementów budowy modułów systemu, mające na celu sprawdzenie poprawności ich działania oraz zgodności realizowanych

funkcjonalności z założeniami projektowymi. Przeprowadzone testy oraz ich wyniki przedstawione zostały w tabelach 4.1 oraz 4.2.

Tabela 4.1. Testy elementów budowy modułów systemu oraz uzyskane wyniki

Przeprowadzony test	Wynik
Przesłanie kodu programu modułów dostępowego i centralnego do mikrokontrolerów ESP32.	Pozytywny - nieprzerwane działanie zgodne z założeniami.
Odczyt danych zeskanowanych identyfikatorów RFID czterech typów.	Pozytywny - odczyt każdego rodzaju identyfikatora spełniającego założenia.
Wyświetlanie komunikatów dla użytkownika na wyświetlaczu LCD.	Pozytywny - moduł wyświetlacza wyświetla wszelkie zadane komunikaty.
Sprawdzenie każdego przycisku na klawiaturze numerycznej.	Pozytywny - każdy przycisk zwraca przypisaną mu wartość.

Tabela 4.2. Testy elementów budowy modułów systemu oraz uzyskane wyniki

Przeprowadzony test	Wynik
Utrzymywanie stałego poziomu naładowania akumulatora modułem ładowarki.	Pozytywny - brak spadku napięcia przez okres miesiąca.
Zasilanie układu pod dużym obciążeniem.	Pozytywny - każdy element zasilany jest nieprzerwanie, układ zasilany jest zgodnie z założeniami.
Zasilenie modułu dostępowego zasilaniem awaryjnym (akumulatorem).	Pozytywny - układ jest w stanie działać ponad godzinę na zasilaniu awaryjnym, spełniając założenia.
Przełączanie zasilania sieciowego na awaryjne w momencie utraty prądu.	Pozytywny - system reaguje natychmiastowo.

Testy oprogramowania systemu, mające na celu sprawdzenie zgodności realizowanych przez system funkcjonalności z założeniami projektowymi, również zakończyły się powodzeniem. Szczegółowe wyniki testów zostały przedstawione w pracy inżynierskiej.

4.5. Podsumowanie

Projekt mikroprocesorowego układu sterowania elektronicznym zamkiem z programowalnym systemem ograniczonego dostępu został zrealizowany, tworząc gotowy do wdrożenia, w pełni funkcjonalny system.

Zaimplementowane funkcjonalności oraz skonstruowane modele realizują wszystkie funkcjonalne oraz techniczne założenia projektowe. Procedury ograniczenia dostępu gwarantują bezpieczeństwo gości, ich przedmiotów oraz samego obiektu. Liczne przeprowadzone testy świadczą o niezawodności systemu, a obszerna instrukcja obsługi oraz intuicyjny interfejs użytkownika zapewniają łatwość użytkowania.

Docelowo system będzie wykorzystywany w domkach na wynajem w ośrodku wypoczynkowym "SANÓWKA" znajdującym się w miejscowości Bachów, w województwie

podkarpackim. Możliwości dalszego rozwoju projektu są ściśle związane z infrastrukturą terenu, na którym znajdować się będą obiekty na wynajem. Goście będą korzystać z parkingu zabezpieczonego szlabanem wyposażonym w system identyfikacji tablic rejestracyjnych, o który będzie można rozszerzyć opracowany system, aby ten przechowywał numery rejestracyjne. Wspomniana agroturystyka znajduje się na trasie wschodniego szlaku rowerowego Green Velo, co czyni ją idealnym miejscem odpoczynku dla podróżujących rowerzystów. Dostępne garaże rowerowe będą mogły zostać zabezpieczone systemem wykorzystywanym do autoryzacji dostępu w obiektach. Kolejnym usprawnieniem systemu może być jego integracja ze stroną internetową umożliwiającą składanie rezerwacji, dzięki czemu dane gości uzupełniane będą automatycznie z formularza rezerwacyjnego.

Rynek oferuje szerokie spektrum systemów kontroli dostępu wykorzystujących technologię RFID, jednak najbardziej popularnym przeznaczeniem tych rozwiązań jest wykorzystanie ich w budynkach przedsiębiorstw i oferują one funkcje, które nie spełniają wszystkich wymogów funkcjonalnych obiektów na wynajem. Elementy wyróżniające zaproponowany przez autora system to zaimplementowane zautomatyzowane procedury kontroli: sprzątania, weryfikacji sprzątania, a także wysyłania próśb o posprzątanie obiektu oraz powiadomień e-mail o zdarzeniach w obiekcie, które ukierunkowane są na usprawnienie i zautomatyzowanie czynności wykonywanych w wynajmowanych nieruchomościach. W projekcie uwzględnione zostały również wszystkie najważniejsze funkcje systemów kontroli dostępu dostępnych na rynku m.in. rejestracja użytkowników z podziałem na uprawnienia, kontrola i nadzór dostępu oraz wysyłanie powiadomień do nowo zarejestrowanych użytkowników.

Bibliografia

- [1] Przybylski M., Mikroprocesorowy układ sterowania elektronicznym zamkiem z programowalnym systemem ograniczonego dostępu. Praca inżynierska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, 2025.

Opracowanie systemu diagnostyki akustycznej maszyn przemysłowych z wykorzystaniem zaawansowanych technik analizy dźwięku i sztucznej inteligencji

mgr inż. Damian Jarczok

Elektronika

dr inż. Piotr Staroniewicz

Katedra Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów

W pracy opracowano system diagnostyki akustycznej maszyn, wykorzystujący analizę dźwięku i sztuczną inteligencję do wczesnego wykrywania usterek. Oparty na konwolucyjnej sieci neuronowej model potrafi rozróżniać charakterystyczne wzorce akustyczne dla różnych stanów technicznych urządzenia. Zastosowanie metod przetwarzania sygnałów, takich jak współczynniki cepstralne (MFCC), pozwoliło nauczyć algorytm odróżniać odgłosy normalnej pracy od symptomów awarii. System został przetestowany na rzeczywistych nagraniach maszyny, wykazując wysoką skuteczność i odporność na zakłócenia. Opracowane rozwiązanie stanowi krok w kierunku prostych, tanich i automatycznych narzędzi diagnostyki dźwiękowej, które w przyszłości mogą wspierać utrzymanie ruchu w zakładach przemysłowych i zwiększać bezpieczeństwo eksploatacji maszyn.

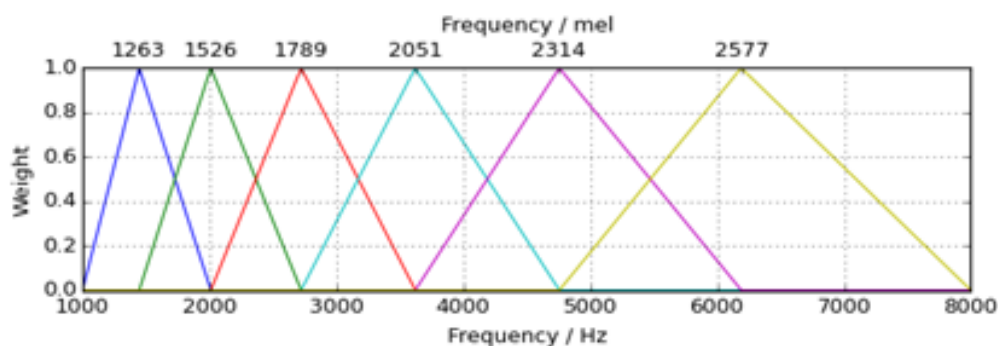
5.1. Cel i założenia

Głównym celem pracy było opracowanie działającego prototypu systemu diagnostycznego, który umożliwi wczesne wykrywanie awarii maszyn na podstawie analizy dźwięku. System powinien działać w trybie condition-based maintenance (CBM) – zbierając sygnały akustyczne z maszyny i automatycznie klasyfikując jej stan (np. normalny lub z określonym rodzajem uszkodzenia). Autor samodzielnie zaprojektował całe rozwiązanie: zbudował platformę sprzętową (komputer oraz mikrofon) i moduł akwizycji dźwięku, przygotował moduły obróbki sygnału oraz interfejs użytkownika, a także zaprojektował i wytrenował model konwolucyjnej sieci neuronowej do rozpoznawania stanów maszyny. Na podstawie przeglądu literatury sformułowano wymagania systemu, obejmujące m.in. zdolność wykrywania różnych rodzajów uszkodzeń, intuicyjność interfejsu oraz działanie w czasie rzeczywistym. Zakres pracy obejmował także opracowanie metodyki pomiaru sygnałów akustycznych oraz kryteriów oceny skuteczności algorytmów (np. czułość detekcji, macierz pomyłek, procent poprawnej klasyfikacji).

5.2. Wstęp teoretyczny

Diagnostyka techniczna maszyn ma kluczowe znaczenie dla niezawodności procesów przemysłowych, ponieważ umożliwia wykrycie pierwszych oznak zużycia lub uszkodzenia jeszcze przed wystąpieniem awarii. Istnieją różne metody monitoringu stanu maszyn – od analizy drgań czy termografii, przez diagnostykę olejową, wizyjną, po diagnostykę akustyczną. Sygnały akustyczne – czyli dźwięk emitowany przez maszynę – zawierają bogate informacje o jej stanie dynamicznym, dlatego stanowią cenny nośnik danych diagnostycznych. W literaturze podkreśla się, że zmiany w stanie maszyny są często widoczne jako zmiany w widmie drgań i dźwięków, stąd łączenie sygnałów wibroakustycznych poprawia jakość diagnozy [1, 9].

Z punktu widzenia analizy sygnałów akustycznych ważne są takie techniki jak transformacja Fouriera, analiza widmowa czy obliczanie współczynników cepstralnych (MFCC), które wydobywają cechy dźwięku zarejestrowanego w domenie czasu. Współczynniki MFCC są powszechnie stosowane w analizie mowy i dźwięków maszynowych, ponieważ skutecznie odwzorowują ważne właściwości spektralne sygnału. Zgodnie z klasycznymi badaniami (np. Davis i Mermelstein, 1980) transformacje typu mel-cepstralnego umożliwiają skuteczną klasyfikację sygnałów akustycznych [2, 10, 11].



Rysunek 5.1. Bank filtrów trójkątnych w skali mel używany przy obliczaniu współczynników MFCC

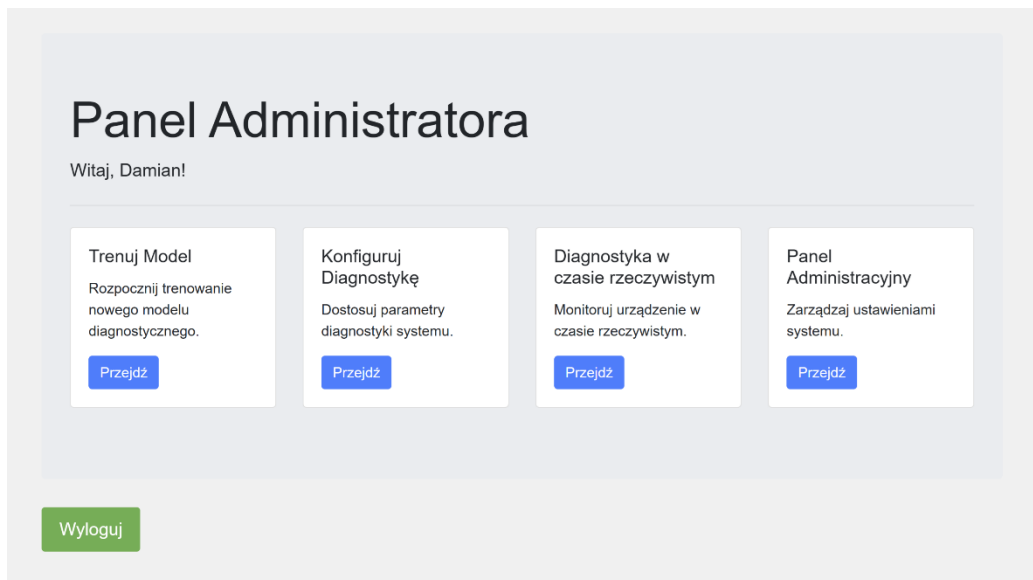
W ostatnich latach coraz większą popularność zyskują metody sztucznej inteligencji, zwłaszcza głębokie sieci neuronowe (deep learning), do analizy i klasyfikacji dźwięków diagnostycznych. Konwolucyjne sieci neuronowe (CNN) okazały się niezwykle efektywne w rozpoznawaniu wzorców w danych o strukturze czasowo-częstotliwościowej [3, 4, 6]. Przykładowo, Yang i Rai pokazali wykorzystanie CNN do diagnostyki maszyn jedynie na podstawie dźwięku, a inne prace dowodzą, że głębokie sieci świetnie radzą sobie z rozróżnianiem stanów uszkodzeń po analizie spektrogramów [3–6]. Dostępność bibliotek open-source (TensorFlow, PyTorch) umożliwia łatwą implementację takich modeli. Te zalety stały się podstawą przyjętej w pracy strategii: zamiast ręcznego opracowywania klasycznych algorytmów diagnozy, zastosowano CNN uczone bezpośrednio na cechach akustycznych i zaprojektowane z użyciem biblioteki środowiska Python [7, 8, 13].

5.3. Projekt i wykonanie

5.3.1. Wykonanie systemu i model sieci neuronowej

System diagnostyczny zbudowano na dedykowanej platformie sprzętowej oraz z użyciem nowoczesnych narzędzi softwarowych. Na Rys. 2. pokazano kompletne wyposażenie pomiarowe: komputer HP T630 (mini-PC) połączony z mikrofonem USB Røde NT-USB Mini. Komputer umożliwia akwizycję sygnału akustycznego i realizację obliczeń w czasie rzeczywistym, natomiast mikrofon zapewnia dobrą jakość rejestracji dźwięku pracy maszyny. Projekt obejmował także budowę układu pomiarowego oraz przygotowanie skryptów do zapisu dźwięku z mikrofonu i obliczania na nim jego cech.

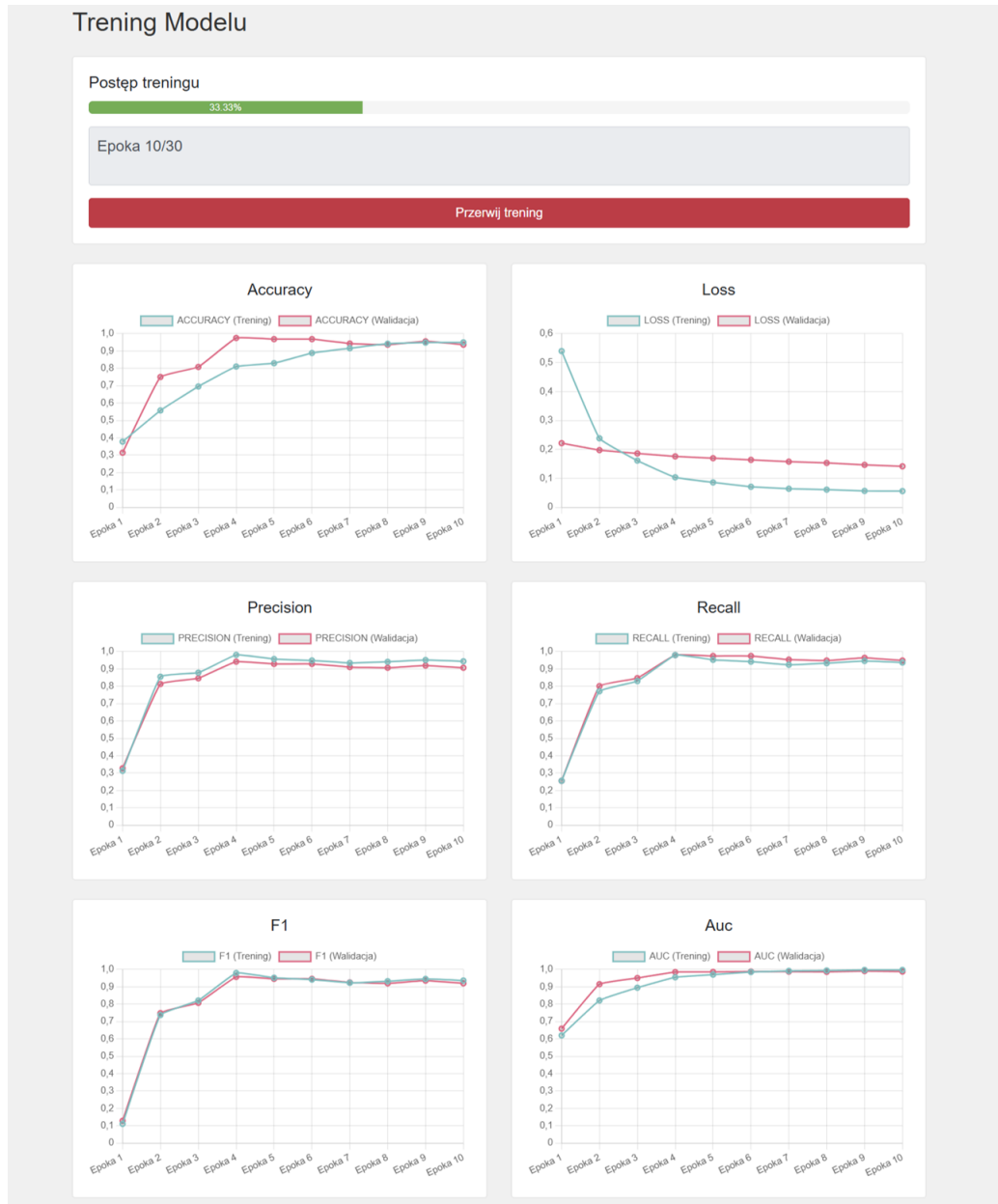
Oprogramowanie systemu zaimplementowano głównie w języku Python. Moduły sztucznej inteligencji (trenowanie i klasyfikacja CNN) wykorzystują bibliotekę TensorFlow/Keras, co pozwoliło szybko zdefiniować i trenować architekturę sieci. Ponadto użyto frameworka Django do stworzenia interfejsu webowego. W interfejsie (front-end) zastosowano HTML, CSS (Bootstrap) i JavaScript, co umożliwiło stworzenie dynamicznego panelu użytkownika. Kod backend (Python/Django) zarządza modelami danych i logiką aplikacji, a API JSON służy do komunikacji w czasie rzeczywistym. Całość tworzy spójny system: użytkownik przez przeglądarkę może ustawić parametry diagnostyki (np. parametry sieci, rodzaj klasyfikacji, liczbę augmentacji, progi alarmowe) i uruchomić monitorowanie.



Rysunek 5.2. Główny panel administratora systemu diagnostycznego

Interfejs użytkownika zaprojektowano z myślą o prostocie i czytelności. Zbudowano dwa główne panele: Konfiguracji diagnostyki oraz Monitoringu. Panel Konfiguracji umożliwia wybór danych treningowych i ustawień modelu, natomiast panel Monitoringu wyświetla wyniki pomiarów w czasie rzeczywistym. W obu panelach zastosowano przyjazny

układ graficzny. Cały interfejs wykonano w HTML/Bootstrap z dynamicznymi komponentami JS. Obsługuje on różne role (administrator – pełny dostęp, pracownik – ograniczony dostęp). Interfejs odświeża dane na bieżąco, więc użytkownik może śledzić zmiany akustyczne w czasie rzeczywistym.



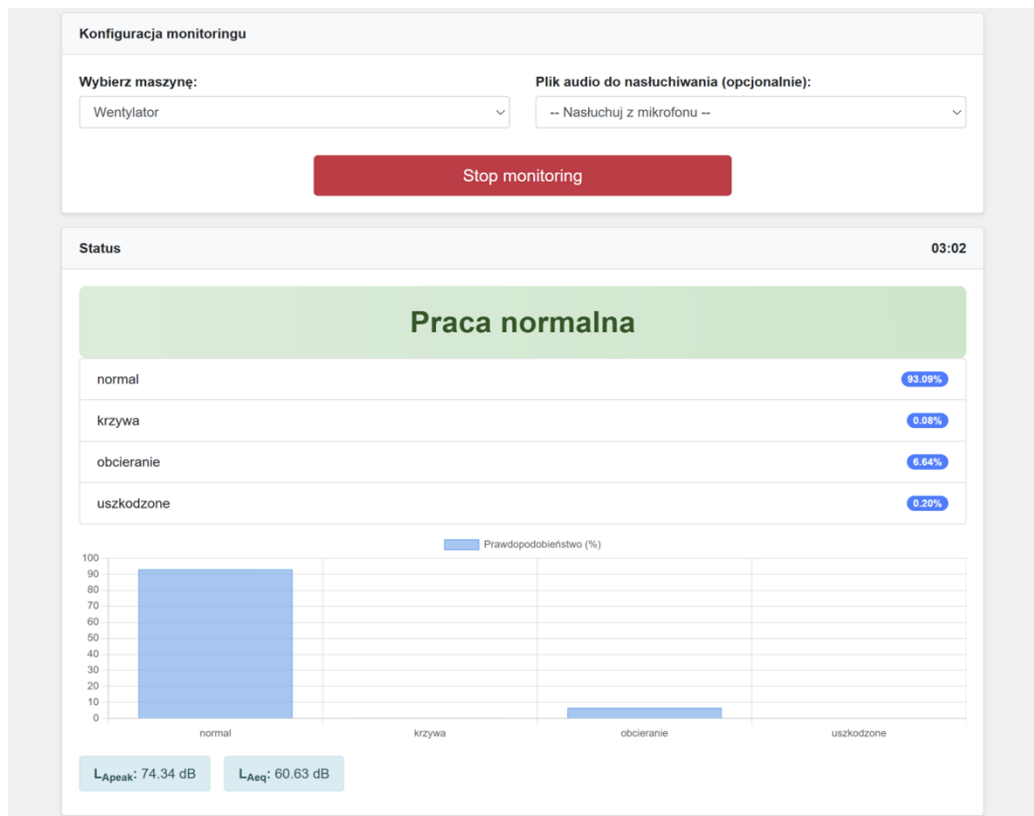
Rysunek 5.3. Widok postępu treningu z wykresami metryk

Model CNN składa się z warstw konwolucyjnych i gęstych dostosowanych do analizy cech spektralnych. Jako dane wejściowe zastosowano wektor współczynników MFCC oraz

dotatkowo inne cechy (np. chwilowe poziomy dźwięku LAeq, LApeak) uzyskane z pliku audio. Warto podkreślić, że poziomy dźwięku użyto głównie do ustalania progów alarmowych, natomiast główne decyzje klasyfikacyjne podejmuje sieć na bazie cech MFCC. Podczas implementacji autor opracował cały potok trenowania modelu tj. preprocesing sygnałów audio, ekstrakcja cech, definiowanie architektury CNN, warunków wczesnego zatrzymania treningu itp. Zaimplementował też mechanizm zapisywania parametrów treningu i wyników do plików JSON oraz bazy danych.

5.3.2. Testy systemu

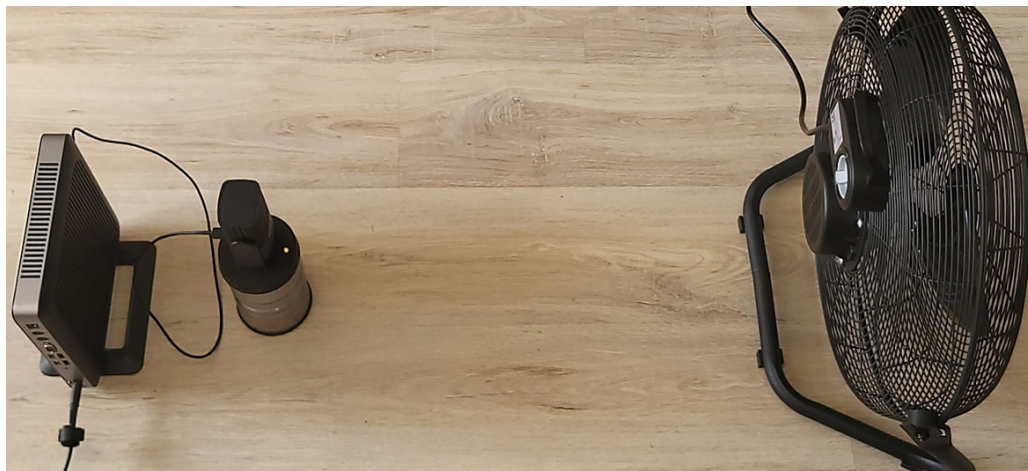
W ramach badań przeprowadzono szeroki zestaw testów mających na celu ocenę skuteczności, odporności oraz stabilności działania systemu. Analizowano zarówno wpływ parametrów treningu modelu konwolucyjnej sieci neuronowej, jak i parametrów pracy systemu podczas monitoringu rzeczywistego, już po wytrenowaniu modelu. Testowanych zmienianych było wiele i obejmowały m.in. architekturę sieci, liczbę współczynników MFCC, częstotliwość próbkowania, długość analizowanych próbek, progi decyzyjne, a także niestandardowe parametry takie jak ustawienia augmentacji.



Rysunek 5.4. Interfejs monitoringu akustycznego w czasie rzeczywistym (fragment)

Jako obiekt badawczy wykorzystano wentylator podłogowy, którego praca imitowała urządzenie przemysłowe. Zastosowanie prostego, łatwo sterowalnego źródła dźwięku

umożliwiło precyzyjne odwzorowanie i kontrolę trzech rodzajów usterek: symulowanego obcierania łopat, uszkodzonego łożyska oraz skrzywionej łopatki, a także stanu nominalnego. Dla każdego ze scenariuszy zarejestrowano godzinne nagrania w formacie WAV (PCM 16-bit), co pozwoliło na wydzielenie wielu niezależnych próbek przy zachowaniu jednorodności warunków akwizycji.



Rysunek 5.5. Układ pomiarowy wykorzystany do stworzenia bazy nagrań oraz testów

Pomiary wykonano w warunkach kontrolowanych, bazując na wytycznych normy PN-EN ISO 3746:2011, w pomieszczeniu o krótkim pogłosie, przy stałej pozycji mikrofonu względem urządzenia (odległość ≈ 1 m, ustawienie osiowe). Zarejestrowany materiał podzielono na próbki o różnej długości, by określić wpływ czasu obserwacji na wiarygodność klasyfikacji. Równolegle badano wpływ częstotliwości próbkowania (48 kHz, 16 kHz, 8 kHz) oraz dodatkowych parametrów akustycznych (LA_{eq} , LA_{peak}), które później wykorzystano do definiowania progów alarmowych. Dla oceny skuteczności wykorzystano zestaw metryk: accuracy, loss, precision, recall, F1-score oraz AUC, a także autorskie wskaźniki złożone, opracowane na potrzeby analizy zachowania systemu przy nierównym rozkładzie klas. Tak skonstruowana metodologia umożliwiła pełną ocenę jakości działania systemu – zarówno w wymiarze obliczeniowym, jak i funkcjonalnym.

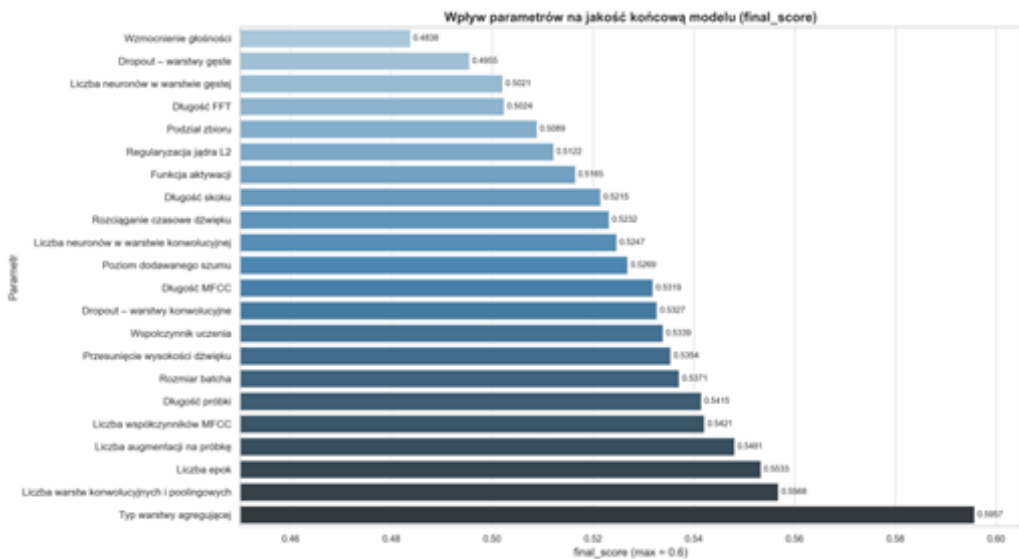
5.4. Uzyskane wyniki

Przeprowadzone eksperymenty wykazały bardzo wysoką skuteczność systemu w wykrywaniu usterek. Już 3-sekundowe próbki dźwięku wystarczyły do uzyskania 97,4% poprawnej klasyfikacji (tryb wieloklasowy). W przypadku klasyfikacji binarnej (normalny/ustereka) skuteczność detekcji osiągała 100,0%. W trybie wieloklasowym (wskazanie konkretnego typu uszkodzenia) uzyskano około 99,6% dokładności. Te wyniki potwierdzają, że model CNN bardzo dobrze rozpoznaje charakterystyczne cechy akustyczne generowane przez różne rodzaje usterek.

Zaskakujący był rezultat dotyczący liczby współczynników MFCC: najlepsze wyniki osiągnięto przy użyciu zaledwie 10 współczynników MFCC. To sugeruje, że dla anali-

zowanego układu istotne informacje zawarte są w niższych pasmach częstotliwości, co pozwala uprościć ekstrakcję cech i zmniejszyć obciążenie obliczeniowe bez utraty jakości klasyfikacji. Co więcej, system okazał się odporny na zmiany częstotliwości próbkowania – przy 8000 Hz spadek skuteczności był minimalny. Dzięki temu możliwa jest realizacja diagnostyki przy mniejszej objętości danych. Zaobserwowano dodatkowo wysoką stabilność działania. Wąskie (20/80%) i szerokie (30/70%) progi decyzyjne dały porównywalne wyniki, co pozwala dostosować czułość systemu do potrzeb bez istotnej utraty dokładności. Wykresy czułości (precision-recall) wskazały, że liczba fałszywych alarmów w normalnym trybie pracy była bardzo niska. Zmiany architektury modelu (np. liczby neuronów, filtrów konwolucyjnych, wielkości dropout) nie wpłynęły znacząco na końcową skuteczność, co świadczy o elastyczności i stabilności projektu.

Rezultaty potwierdzono wizualnie zarówno podczas treningu modeli jak i po zebraniu odpowiedniej liczby informacji o działaniu systemu w czasie rzeczywistym – otrzymane wykresy postępu uczenia pokazywały szybkie zbieganie algorytmu i brak widocznego przeuczenia. System sprawdził się w testach na rzeczywistych nagraniach wentylatora z trzema rodzajami uszkodzeń, ale nadmienić należy, że założono spójny zestaw klas – model działa w obecnej wersji jako klasyfikator zamknięty (closed-set).



Rysunek 5.6. Wpływ poszczególnych parametrów na końcowy wynik jakości modelu

5.5. Podsumowanie

Opracowany system diagnostyczny spełnił założone cele: skutecznie wykrywa awarie maszyn przemysłowych na podstawie analizy akustycznej, pracuje w czasie rzeczywistym i jest stosunkowo prosty do wdrożenia. Zbudowana platforma sprzętowa (komputer + mikrofon) i zaprojektowany interfejs umożliwiają łatwą obsługę systemu przez użytkownika nawet nietechnicznego. Wkład własny autora obejmuje wszystkie kluczowe elementy rozwiązania: zaprojektowanie i wykonanie platformy pomiarowej, implementację interfejsu

użytkownika, opracowanie potoku przetwarzania dźwięku oraz trening i wykorzystanie modelu konwolucyjnej sieci neuronowej do klasyfikacji stanów maszyny.

Uzyskane wyniki eksperymentów wskazują, że system ma duży potencjał praktycznego zastosowania. Odporny na krótkie próbkowanie i małą liczbę cech, może być wdrażany nawet w mobilnych aplikacjach czy na sprzęcie pomiarowym o małej mocy. Ponadto można go łatwo przystosować do różnych rodzajów maszyn generujących dźwięki robocze (pompy, silniki elektryczne, sprężarki itp.) – wystarczy zebranie odpowiednich danych treningowych, bez konieczności zmiany architektury algorytmu.

Obecna wersja systemu ma jednak ograniczenia. Została ona wytrenowana na ograniczonym zbiorze danych (kilka typów usterek wentylatora), więc przy nowych nieznanych uszkodzeniach może nastąpić spadek skuteczności lub nieprawidłowe klasyfikacje. W praktyce konieczne będzie ciągłe poszerzanie bazy danych o nowe nagrania z różnych maszyn i scenariuszy awarii. Ponadto środowisko przemysłowe o wysokim poziomie szumów i pogłosie wymagałoby zastosowania zaawansowanych metod separacji źródeł dźwięku lub adaptacyjnego uczenia się, co wykracza poza obecne założenia (system zakłada dominującą obecność monitorowanego sygnału akustycznego). Mimo tych ograniczeń przedstawione rozwiązanie ma duży potencjał rozwojowy. Jako dalsze kierunki pracy proponuje się rozszerzenie systemu o rozpoznawanie większej liczby klas usterek, integrację z czujnikami wibracji lub siecią IoT dla zdalnego monitoringu oraz implementację algorytmów adaptacyjnych uwzględniających zmienne warunki akustyczne otoczenia. Potencjalne zastosowania realne obejmują wdrożenie systemu w zakładach przemysłowych jako część strategii utrzymania ruchu (np. jako aplikacja na smartfony mechaników, urządzenie monitorujące w warsztacie, lub narzędzie w systemie zarządzania zakładem). Wyniki pracy wskazują, że system ten może stanowić podstawę do opracowania komercyjnego rozwiązania diagnostycznego bazującego na sztucznej inteligencji.

Bibliografia

- [1] Shaikh K. B. T., Jawarkar N. P., Ahmed V., Machine diagnosis using acoustic analysis: A review. *IEEE Norbert Wiener in the 21st Century (21CW)*, 2021.
- [2] Rustam F., Mabood I., Hussain M. I., Nawaz M., Ali U., Haider G., Railway Track Fault Detection Using Selective MFCC Features from Acoustic Data. *Sensors* 23(16), 2023.
- [3] Yang R. Y., Rai R., Machine auscultation: enabling machine diagnostics using convolutional neural networks. *Advances in Manufacturing*, 2019.
- [4] Nayak P. et al., 2D-CNN fault detection using scalogram images. *Heliyon* 10, 2024.
- [5] Lee J. G., Kim K. S., Lee J. H., Sound-Based Unsupervised Fault Diagnosis of Industrial Equipment. *Sensors* 24(22), 2024.
- [6] Kumar R. et al., Fault Identification of Direct-Shift Gearbox. *Machines* 12(7), 2024.
- [7] Abayomi-Alli O. O. et al., Data Augmentation and Deep Learning in Sound Classification. *Electronics* 11(22), 2022.
- [8] Akbalık F., Yıldız A., Ertuğrul Ö. F., Zan H., Engine Fault Detection by Sound Analysis. *Applied Sciences* 14(15), 2024.
- [9] Szymaniec S., Kasperak M., *Utrzymanie ruchu w przemyśle*. PWN, 2021.
- [10] Pawlak M., *Analiza sygnałów akustycznych w diagnostyce silników indukcyjnych*. 2011.

- [11] Shannon R. C., A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, 1948.
- [12] Gündert, Mel Filter Bank – pyfilterbank. Online: <https://siggigue.github.io/pyfilterbank/melbank.html>
- [13] NVIDIA, Convolutional Neural Network (CNN). Online.

Control System for Two HOG Wheel Mobile Robot

mgr inż. Eryk Możdżeń

Automatyka i Robotyka: Embedded Robotics

dr inż. Robert Muszyński

Katedra Cybernetyki i Robotyki

The primary objective of this thesis was to modernize the mechanical design of a two-HOG-wheel mobile robot, develop a dedicated hardware platform to support the implementation of advanced control algorithms, and carry out a qualitative evaluation of selected control strategies that, until now, had only been verified in simulation environments. All objectives defined within the scope of this work have been successfully accomplished. Experimental validation demonstrated that the robot's trajectory-tracking performance in real-world conditions diverges from existing simulation-based knowledge, thus providing new insights into the practical deployment of such control algorithms.

6.1. Platform Description

The Hemispherical Omnidirectional Gimballled (HOG) wheel [1], shown in Figure 6.1, it is a type of drive system that allows movement in any direction using constantly spinning hemisphere, or part of it.

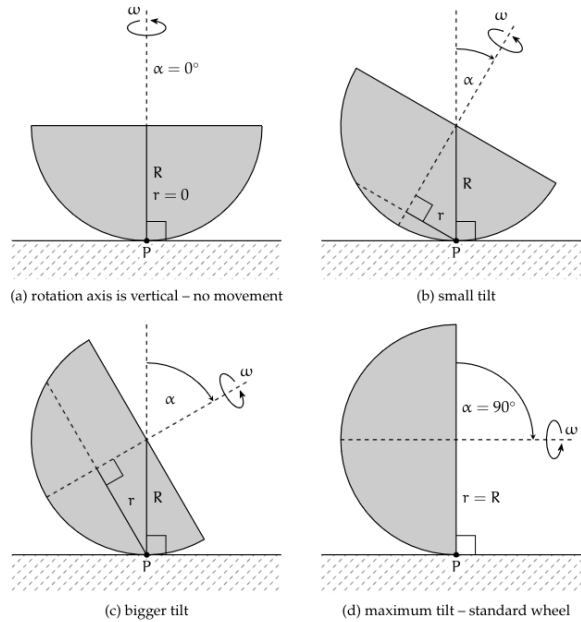


Figure 6.1. A HOG wheel tilting principle (cross section)

In perfect conditions, hemisphere touches the ground in exactly one contact point P . By tilting the axis of rotation from the vertical position by small amount α , one can directly control the point of contact with the ground, effectively creating a wheel with variable radius r , angular velocity ω , and heading (not shown in Figure). In theory, the use of constantly rotating hemispheres, each with a variable orientation, enables motion with high acceleration in any chosen direction. Additionally, massive hemispheres with high inertia can act as a kinetic energy bank for the platform, allowing the use of less powerful motors without compromising the robot's agility.

Robots with two HOG wheels are not widely available. For the purposes of this work, the *Hogger*² robot, shown in Figures 6.2 and 6.3, originally designed and elaborated as a part of the thesis [2] was expanded and redesigned.



Figure 6.2. The *Hogger*² robot after redesign

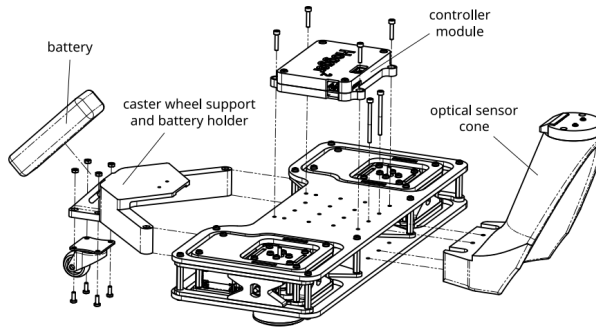


Figure 6.3. Exploded view of the *Hogger*² robot

In the *Hogger*² robot two HOG wheels are applied with an additional one passive Caster wheel that acts as a third support point. To obtain a complete robotic platform, it was necessary to equip the robot with perception and control systems.

6.2. Control Algorithms

Due to its unconventional drive system, the *Hogger*² robot still does not have well-tested control methods. In recent years, simulation research took place as part of several theses [4, 5]. All algorithms consider robot's reference frame and gimbal angles like shown in Figure 6.4.

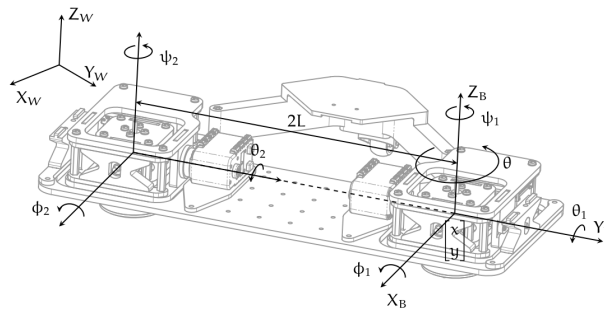


Figure 6.4. Robot reference frame and gimbal angles

Origin of the robot's reference frame $X_B Y_B Z_B$ is placed in the point of two gimbal axes ϕ_1 and θ_1 crossing. The positive end of the X_B axis is directed toward the front of the robot, while the positive end of the Y_B axis represents the left side of the robot's body. The robots behavior was tested for 5 implemented control algorithms, all of them are shortly described below.

6.2.1. Simultaneous Algorithms

The simultaneous algorithm, originally introduced in [4], assumes same control signals for both HOG wheels. Additionally, it is assumed that the gimbal movement of the hemisphere

has no influence on the robot's body movement. Unfortunately, this strategy disables control of the robot's orientation θ , leaving only position control. The control signals for both wheels can be either identical or mirrored. The identical (left) and mirrored (right) control signals are given by

$$\begin{cases} \phi_u = \phi_1 = \phi_2 = \arcsin\left(-\frac{\dot{x}_{\text{ref}}}{R\dot{\psi}_u \cos \theta_u}\right) \\ \theta_u = \theta_1 = \theta_2 = \arcsin\left(-\frac{\dot{y}_{\text{ref}}}{R\dot{\psi}_u}\right) \\ \dot{\psi}_u = \dot{\psi}_1 = \dot{\psi}_2 = \text{const} \end{cases}, \quad \begin{cases} \phi_u = \phi_1 = -\phi_2 = \arcsin\left(-\frac{\dot{x}_{\text{ref}}}{R\dot{\psi}_u \cos \theta_u}\right) \\ \theta_u = \theta_1 = -\theta_2 = \arcsin\left(-\frac{\dot{y}_{\text{ref}}}{R\dot{\psi}_u}\right) \\ \dot{\psi}_u = \dot{\psi}_1 = -\dot{\psi}_2 = \text{const} \end{cases}$$

where ϕ_u and θ_u are the gimbal control angles, $\dot{\psi}_u$ is the angular velocity of the hemispheres, $\dot{x}_{\text{ref}}$ and $\dot{y}_{\text{ref}}$ are the reference velocities expressed in the robot's reference frame. In order to track the desired trajectory, the naive control law for the reference velocities was defined as

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\text{ref}} \\ \dot{y}_{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \end{bmatrix} \right),$$

where x_d and y_d are the components of the trajectory, and k is a positive constant gain.

6.2.2. JPTD Algorithm

The JPTD algorithm, introduced in [4], is illustrated in Figure 6.5.

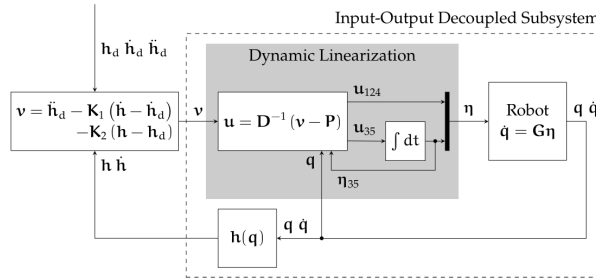


Figure 6.5. JPTD input-output decoupling with dynamic feedback linearization

It considers the configuration vector $\mathbf{q}$ containing robot's pose, gimbal angles and hemisphere angular positions. The robot kinematics can be modeled as a driftless system in the form

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{G}(\mathbf{q})\boldsymbol{\eta},$$

where $\boldsymbol{\eta}$ contains velocitices of the selected joints and $\mathbf{G}$ is a simplified kinematic control matrix obtained in [3].

Trajectory tracking is achieved using the input-output decoupling technique with dynamic feedback linearization [6]. The special linearizing output function $\mathbf{h}(\mathbf{q})$ was chosen. By differentiating and factorizing this output, one can obtain the matrix $\mathbf{D}$ and the vector $\mathbf{P}$, which satisfy

$$\ddot{\mathbf{h}} = \mathbf{D}\mathbf{u} + \mathbf{P},$$

where $\mathbf{u}$ is the internal control input with additional dynamics introduced. Then, the problem can be reformulated as the task of controlling a double integrator system by introducing a new control signal $\mathbf{v}$. The trajectory tracking algorithm for such a system is defined as

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{h}}_d - \mathbf{K}_1 (\dot{\mathbf{h}} - \dot{\mathbf{h}}_d) - \mathbf{K}_2 (\mathbf{h} - \mathbf{h}_d),$$

where $\mathbf{h}_d$ is the desired output of the system, and $\mathbf{K}_1$, $\mathbf{K}_2$ are positive definite gain matrices. To convert the linearized control signal $\mathbf{v}$ into the original input $\mathbf{u}$, the following transformation is applied

$$\mathbf{u} = \mathbf{D}^{-1} (\mathbf{v} - \mathbf{P}).$$

6.2.3. JPTD-1D Algorithm

As an modification of the JPTD algorithm, an even more simplified method was proposed in this thesis. The two HOG wheel robot can be reduced to a (2,0) robot by considering $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0$, and $\psi_1 = -\psi_2 = \psi$ which reduces size of the configuration vector $\mathbf{q}$ and in a result also the kinematic control matrix $\mathbf{G}$.

This time, the linearizing output function $\mathbf{h}(\mathbf{q})$ uses the concept of “virtual shaft”. It should be noted that, since the robot cannot move sideways in this method, the virtual shaft represents a point in front of the robot with which the algorithm is able to track the trajectory. Additionally, direct control over θ is lost.

6.2.4. Cascade PID Control

For comparison, a basic control algorithm was proposed. Cascade PID control is a widely used technique in industry for practical control tasks [7]. By skillfully transforming the problem, as shown in Figure 6.6, it becomes possible to apply well-known and simple methods for designing and tuning PID controllers.

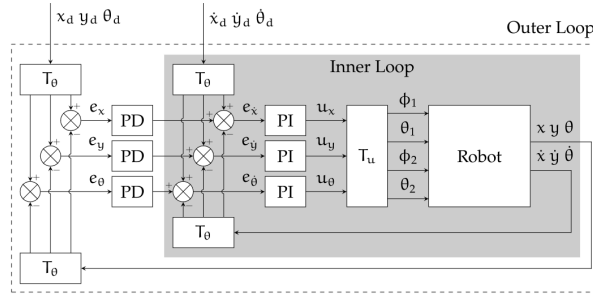


Figure 6.6. Structure of the cascade PID control

In the robot's reference frame $X_B Y_B Z_B$, controlling each of the x , y , and θ movements is independent, so three separate controllers can be introduced for the task of tracking reference trajectories. To achieve this, the transformation matrix $\mathbf{T}_\theta$ rotates error vectors expressed in the world reference frame $X_W Y_W Z_W$ to the robot's frame $X_B Y_B Z_B$. The inner feedback loop controls the velocities of the robot using the gimbal angles ϕ_1 , θ_1 , ϕ_2 , and θ_2 . The trajectory reference velocities are applied as setpoints to the PI controllers.

The transformation $\mathbf{T}_u$, often called the “motor mixer” matrix, is derived from the linearization of the robot’s kinematics expressed in the robot’s reference frame. Finally, both transformations are expressed as

$$\mathbf{T}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R\dot{\psi}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R\dot{\psi}} & 0 \\ \frac{1}{R\dot{\psi}} & 0 & \frac{2L}{R\dot{\psi}} \\ 0 & \frac{1}{R\dot{\psi}} & 0 \end{bmatrix}.$$

Unfortunately, due to the fact that this method is not based on the mathematical model of the robot, the PID parameters need to be tuned separately using Chien-Hrones-Reswick method [7] (inner loop) and λ -tuning method [7] (outer loop). Both methods are based on the analysis of the system’s step response.

6.3. Experimental Results

The experiments were carried out on a flat stone floor without noticeable grouting. For algorithms in which the control signals involve regulating servo velocity, additional integrators were introduced to compute the corresponding angle setpoints. The algorithms were tested on various trajectory shapes, including circular, lemniscate, linear and a variation of the Lissajous curve, as used in [4].

During the experiments, the trajectory tracking performance of all algorithms was evaluated for three angular velocity settings of both hemispheres: $200 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $350 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, and $500 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. For each test, the robot’s initial position was set at the center of the room, corresponding to the origin of the world reference frame $X_W Y_W Z_W$. At the beginning of each run, the trajectory tracking algorithm and the startup procedure for the hemisphere motors were initiated simultaneously. In total, 15 experiments were recorded across all hemisphere speeds, and algorithms for the Lissajous trajectory. One of them is shown in Figures 6.7 and 6.8.

The results of the experiments conducted in this chapter are summarized in Table 6.1.

Table 6.1. Overview of algorithms performance

Algorithm		Hemispheres Angular Velocity		
		$200 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$350 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$500 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Simultaneous (identical)	XY	big oscillations	big oscillations	big oscillations
	θ	fast spin	fast spin	fast spin
Simultaneous (mirrored)	XY	oscillations	oscillations	oscillations
	θ	slow spin	slow spin	slow spin
JPTD	XY	good	good	good
	θ	constant error	not converge	not converge
JPTD-1D	XY	good	good	big oscillations
	θ	oscillations	oscillations	fast spin
Cascade PID	XY	good	good	good
	θ	good	good	good

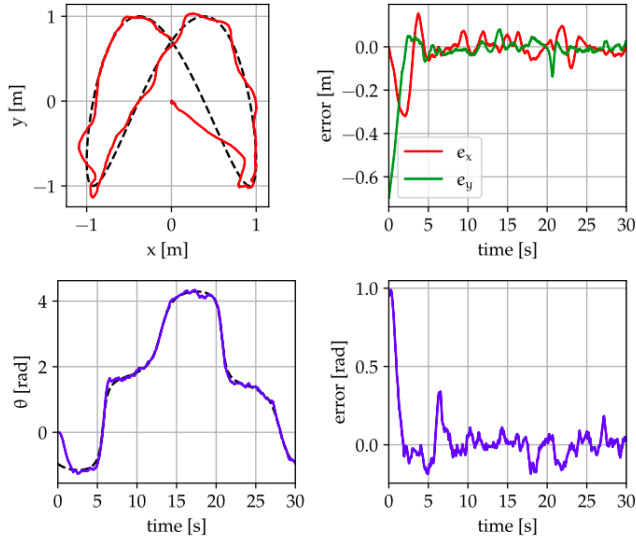


Figure 6.7. Results of trajectory tracking using cascade PID control for $\dot{\psi} = -500 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

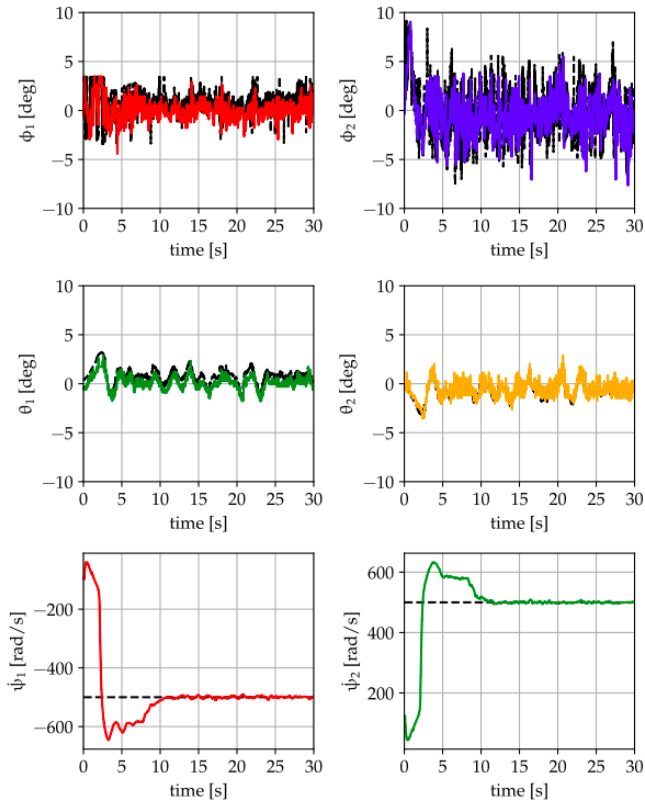


Figure 6.8. Control inputs using cascade PID control for $\dot{\psi} = -500 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

The table presents the overall performance of the algorithms in tracking the reference position (XY) and orientation (θ) for the given hemispheres angular velocities. Among all evaluated algorithms, JPTD, JPTD-1D, and cascade PID strategy demonstrated good performance in tracking the reference position, however only the PID cascade was able to reliably control the robot's orientation.

6.4. Summary

The mechanical modifications, along with the integration of new servomotors, significantly enhanced the capabilities of the platform. However, the design of the gimbal mechanism still exhibits several limitations, such as the relatively high mass of the links compared to 2 DOF spherical parallel manipulators. The overall mechanical backlash remain highly dependent on the internal servo gear quality. Vibrations occurring during operation contribute to the accelerated wear of these gears, resulting in a noticeable decrease of control precision, even by several degrees per axis. Reducing the radius of the hemispheres would improve the effective resolution of the servomotors and reduce the impact of servo backlash. Additionally, the initial assumption regarding the high rotational speed of the hemispheres proved to be incorrect. The use of a sensorless BEMF method for driving BLDC motors was found to be unsuitable for this application. Furthermore, the operational environment and the maximum velocity of the robot were significantly constrained by the use of an optical flow sensor, which is primarily intended for far-field applications. Relying solely on velocity integration for position estimation, without any external correction mechanisms, resulted in considerable position drift, particularly evident during high-speed motion. In the future, alternative methods for robot localization need to be introduced.

The analysis of the experiments indicates that control strategies based solely on the robot's kinematics exhibit poor performance in practical applications. The cascade PID control, being the only algorithm that incorporates the basic robot's dynamics, achieved the best results. As the angular velocities of the hemispheres increased, the tracking performance of the kinematic controllers decreased. The two tested variants of the simultaneous control strategy demonstrated that the friction between the hemispheres and even a flat ground surface is not negligible. To minimize the influence of this friction, the hemispheres should rotate in opposite directions at equal speeds.

The most significant drawback of the HOG drive is the unrealistic assumption of a single point of contact between the hemisphere and the ground. Even small shape imperfections cause noticeable movement errors. During operation, the hemispheres wear unevenly near the rotation axis, which is critical when combined with above.

Bibliography

- [1] Hemisphere Drive Speedster. *Mechanics and Handicraft* 5(9), 1938.
- [2] Góral, D., Konstrukcja robota mobilnego napędzanego dwiema półsferami. Bachelor's thesis (in Polish), Wrocław University of Science and Technology, 2017.
- [3] Joniak, P., Badania symulacyjne zachowania robota mobilnego napędzanego dwiema półsferami. Bachelor's thesis (in Polish), Wrocław University of Science and Technology, 2014.

- [4] Joniak, P., Zadanie sterowania robota mobilnego napędzanego dwiema półsferami. Master's thesis (in Polish), Wrocław University of Science and Technology, 2017.
- [5] Boczar, J., Control system for two HOG wheel mobile robot. Master's thesis, Wrocław University of Science and Technology, 2019
- [6] Tchoń, K. and Muszyński, R., Mathematical Methods of Automation and Robotics. Lecture Notes, Wrocław University of Science and Technology, 2017.
- [7] Åström, K. J. and Hägglund, T., PID Controllers, Setting the standard for automation. International Society for Measurement and Control, 1995.

Analiza danych chmurowych w celu prognozowania jakości powietrza

mgr inż. Piotr Fiebig

Elektroniczne Systemy Mechatroniki

dr inż. Milena Kiliszkiewicz

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej

Praca obejmuje zaprojektowanie, implementację oraz analizę systemu, który monitoruje i prognozuje jakość powietrza korzystając z danych chmurowych oraz algorytmów uczenia maszynowego. System zbudowano na platformie Raspberry Pi 5, wykorzystując wyświetlacz LCD, klawiaturę matrycową oraz API GIOŚ do pobierania danych ze stacji pomiarowych zlokalizowanych we Wrocławiu. Dane przetwarzane są lokalnie z użyciem języka Pythona oraz lokalnej bazy danych SQLite. W pracy przeanalizowano normy jakości powietrza. Zaimplementowano, a następnie szczegółowo oceniono skuteczność pięciu modeli predykcyjnych. Wykorzystano trzy rodzaje regresji: liniową, wielomianową oraz ze wzmocnieniem gradientowym. Korzystano również z modelu drzewa decyzyjnego oraz lasu losowego.

7.1. Cel i założenia

Celem pracy jest wykonanie systemu, który będzie pobierał dane pogodowe, przetwarzał je oraz wyświetlał rezultaty. Na podstawie uzyskanych danych, system będzie dokonywał predykcji jakości powietrza w perspektywie krótkoterminowej. W pracy należy opracować interfejs użytkownika do wizualizacji danych rzeczywistych, archiwalnych oraz prognozowanych, które będą przechowywane. Kluczowym aspektem pracy jest krytyczna analiza uzyskanych wyników. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to: zaprojektowanie architektury do monitorowania powietrza; przygotowanie interfejsu użytkownika do wizualizacji danych; uruchomienie systemu powiadomień o przekroczeniu dopuszczalnych norm; opracowanie interfejsu użytkownika do wizualizacji wyników; opracowanie możliwości przechowywania danych w chmurze z uwzględnieniem bezpieczeństwa danych.

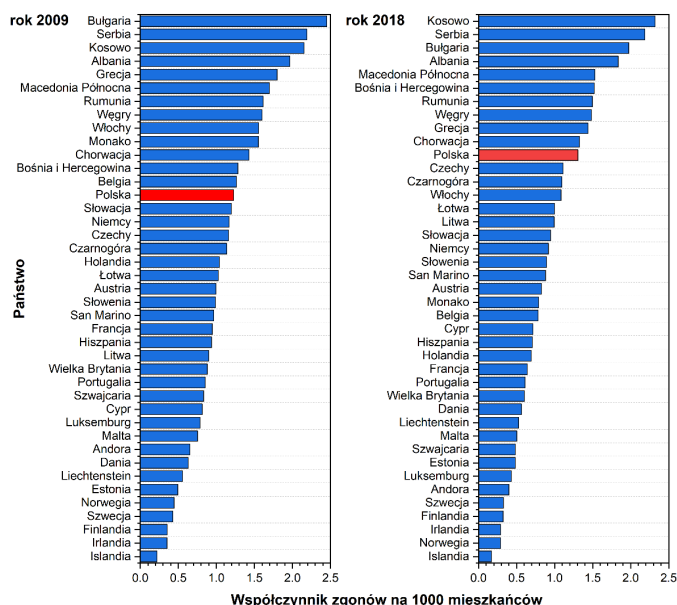
7.2. Wstęp teoretyczny

W rozdziale tym opisano tematykę jakości powietrza ze szczególnym uwzględnieniem wpływu na zdrowie ludzkie. Przedstawiono i omówiono źródła zanieczyszczeń oraz dokonano ich klasyfikacji.

7.2.1. Problem jakości powietrza

W dzisiejszym świecie, w którym duży nacisk kładzie się na rozwój gospodarczy oraz postęp społeczny jednym z głównych problemów jest jakość powietrza (w tym zanieczyszczenia). Poza zwykłym monitorowaniem oraz kontrolą zanieczyszczeń szeroko rozwija się również zagadnienie prognozy jakości powietrza w najbliższych dniach. Szczególnie istotne może się to okazać w nagłych sytuacjach związanych z dużym zanieczyszczeniem, gdzie czas, dokładność oraz jakość predykcji mogą posłużyć do podjęcia konkretnych decyzji przez organy administracyjne [1]. Zanieczyszczenia dzieli się na antropogeniczne, które wynikają z działalności człowieka oraz naturalne. Do zanieczyszczeń wynikających z działalności człowieka zalicza się m.in: gęstość zaludnienia, przemysł, rolnictwo, energetykę oraz transport [2]. Natomiast naturalne źródła zanieczyszczenia to np.: erupcje wulkanów, pożary lasów, wyładowania atmosferyczne, pył kosmiczny oraz procesy biologiczne [3].

Na emisje zanieczyszczeń w Polsce głównie wpływa ogrzewanie domów za pomocą węgla i innych paliw stałych (w tym również śmieci). Problem ten szczególnie uwypukla się w sezonach grzewczych [4]. Monitorowaniem oraz oceną rocznej jakości powietrza zajmuje się w Polsce Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ), który zobowiązany jest, przygotować raport dla każdego województwa za poprzedni rok kalendarzowy. Publikowany on jest na dostępnych portalach informacyjnych w tym na oficjalnej stronie GIOŚ-u.



Rysunek 7.1. Wykres współczynnika zgonów dla poszczególnych państw

Do najważniejszych zanieczyszczeń, które objęte są systematycznym monitorowaniem należą: dwutlenek siarki (SO_2), dwutlenek azotu (NO_2), tlenek węgla (CO), benzen (C_6H_6), ozon (O_3), pył zawieszony PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$ [5]. W Polsce jakość powietrza klasyfikuje się według sześciostopniowej skali oceny: bardzo dobra, dobra, umiarkowana, dostateczna, zła, bardzo zła [6].

Zgodnie z badaniami przeprowadzanymi przez Europejską Agencję Środowiska (ang. European Environment Agency – EEA) w samej Polsce co roku przedwcześnie umiera około 45000 osób. Na rysunku 7.1, przedstawiono wykres współczynnika zgonów dla poszczególnych krajów w 2009 oraz 2018 roku. Z zamieszczonych danych można zaobserwować, że Polska w 2009 roku posiadała 14 największy współczynnik zgonów (1,23), natomiast w 2018 roku wartość ta wynosiła 1,30, co przyczyniło się do 11 pozycji prezentowanego zestawienia [7].

7.2.2. Modele predykcyjne

Regresja liniowa jest fundamentalną metodą statystyczną w uczeniu maszynowym, została zaadaptowana z klasycznej statystyki. Ulepszona jest o nowe metody dopasowywania linii, a także mierzenia błędu [8]. Do zalet tego modelu zalicza się: prostotę implementacji, szybkość obliczeń, łatwość interpretacji wyników oraz możliwość identyfikacji najważniejszych czynników wpływających na jakość powietrza. Natomiast głównym ograniczeniem regresji liniowej jest to, że zakłada ona, że przewidywana zmienna odpowiada funkcji liniowej parametrów cech wejściowych [9].

Regresja wielomianowa jest uogólnieniem regresji liniowej, która dzięki dodaniu wielomianowych składników zmiennych pozwala modelować nieliniowe zależności między zmiennymi [10]. Najważniejszą procedurą podczas korzystania z regresji wielomianowej jest znalezienie odpowiedniego stopnia wielomianu n . Określa on jak bardzo złożona jest krzywa dopasowania, ale także determinuje elastyczność modelu – im wyższy stopień wielomianu tym większa elastyczność, lecz rośnie także ryzyko przeuczenia modelu [11].

Drzewo decyzyjne stanowi nieparametryczny model uczenia maszynowego. W celu wykonania predykcji wartości zmiennej docelowej, tworzy on hierarchiczną strukturę reguł decyzyjnych. Struktura ta przypomina drzewo, które składa się z węzłów decyzyjnych, gałęzi oraz liści [12]. W regresyjnym drzewie decyzyjnym każdy liść drzewa najczęściej przypisuje średnią wartość y z próbek w tym liściu. Ścieżka od korzenia do liścia określa reguły, w jakim obszarze cech przypisana jest dana wartość [13]. Aby wybrać optymalne punkty podziału w węzłach algorytm budowy wykorzystuje odpowiednie kryteria [14]. Korzeń, w którym znajdują się wszystkie dane jest początkiem procesu, następnie rekurencyjne dane są dzielone na mniejsze podzbiory aż do osiągnięcia odpowiednich kryteriów [15].

Las losowy jest algorytmem uczenia zespołowego. Składa się z wielu drzew decyzyjnych, aby uzyskać bardziej stabilną i dokładniejszą predykcję [16]. Każde drzewo trenowane jest na innej losowej próbce danych treningowych. Pozwala to obniżyć wariancję modelu i uśredniane wyniki, a także sprawia, że drzewa są mniej ze sobą skorelowane. Wynik końcowy lasu stanowi uśrednioną wartość z wszystkich drzew decyzyjnych lub najczęściej występującą wartość, co poprawia generalizację modelu a także redukuje możliwość przeuczenia [17]. Las losowy najczęściej jest wykorzystywany w sytuacjach których występują duże zbiory danych. Regresja ze wzmocnieniem gradientowym, tak jak las losowy

jest zaawansowanym algorytmem uczenia zespołowego. W porównaniu z lasem losowym, nie występuje trenowanie równoległe a minimalizacja błędów poprzednika. W sposób iteracyjny każdy kolejny model stara się usunąć błędy poprzednich modeli [18]. Algorytm korzysta z gradientowej optymalizacji funkcji straty, co w obszarach, w których występuje wysoki błąd pozwala na precyzyjne dostrojenie predykcji [19].

7.3. Projekt i wykonanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono główne elementy składowe systemu zaprojektowanego do monitorowania i prognozowania jakości powietrza.

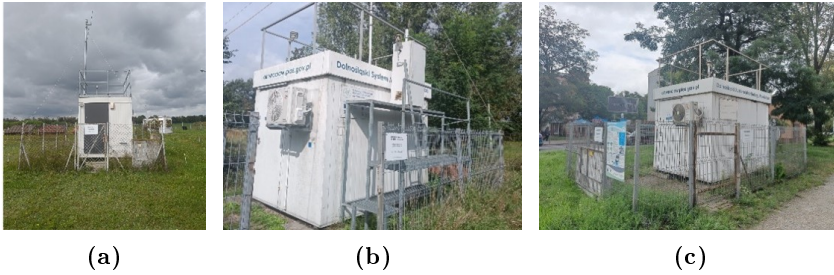
7.3.1. Dobór API

Interfejs programowania aplikacji (ang. *Application Programming Interface* – *API*) to zestaw protokołów, narzędzi i standardów umożliwiających komunikację między aplikacjami programowymi [20]. Proces funkcjonowania API można opisać w pięciu krokach [21]:

- złożenie żądania przez aplikację kliencką,
- przetworzenie żądania przez URI API na serwerze internetowym,
- wywołanie aplikacji lub serwera w przypadku uznania żądania za prawidłowe,
- transmisja żądanych danych z powrotem do API,
- przekazanie danych do aplikacji klienckiej.

Podczas projektowania systemu monitorowania i prognozowania jakości powietrza, kluczowym elementem było dobranie odpowiedniego interfejsu API. Wybór ten może mieć bezpośredni wpływ na niezawodność, aktualność, wiarygodność i użyteczność przetwarzanych danych. Popularnym rozwiązaniem jest wykorzystanie API OpenAQ jako źródła danych. Jest to międzynarodowa platforma udostępniająca otwarte dane środowiskowe z wielu stacji na całym świecie w ujednoliconym formacie. Oferuje ona dobre wsparcie techniczne, dokumentację oraz łatwą integrację z popularnymi językami programowania [22]. Jednakże API OpenAQ pozyskuje dane dotyczące zanieczyszczeń w Polsce bezpośrednio od GIOŚ [23], zatem, aby nie powodować opóźnień w aktualizacji danych, w badaniach wykorzystano API GIOŚ. W ramach realizowanego systemu monitorowania i prognozowania jakości powietrza skupiono się na badaniu zanieczyszczenia powietrza na obszarze miasta Wrocław. Wybrano stacje pomiarowe zlokalizowane na terenie aglomeracji, które są dostępne w API GIOŚ: Bartnicza, Korzeniowskiego oraz Wiśniowa (rys. 7.2) [24–26].

Każda z wymienionych stacji dostarcza wyniki pomiarowe na temat konkretnych parametrów zanieczyszczenia do API GIOŚ, z którego następnie system pobiera i przetwarza dane. Tabela 7.1 zawiera informacje na temat konkretnych parametrów jakie są dostarczane przez dostępne stacje zlokalizowane we Wrocławiu [24–26].



Rysunek 7.2. Stacja pogodowa (a) ul. Bartniczna [24], (b) ul. Korzeniowskiego [25], (c) ul. Wiśniowa [26]

Tabela 7.1. Parametry dostarczane przez konkretne stacje pomiarowe [24–26]

Stacja	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	O ₃ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	SO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	C ₆ H ₆ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Bartnicza	Nie	Nie	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie
Korzeniowskiego	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie
Wiśniowa	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie	Nie	Tak

7.3.2. Część Elektroniczna

Każdy z komponentów wykorzystany w projekcie (rysunek 7.3) został dobrany w taki sposób, aby zapewnić niezawodne działanie systemu, możliwość integracji z pozostałymi modułami oraz łatwość rozbudowy w przyszłości. Szczególną uwagę poświęcono funkcji, jaką pełni każdy komponent w ramach całej architektury systemu.



Rysunek 7.3. Wybrane komponenty elektroniczne (a) Raspberry Pi [27], (b) wyświetlacz TFT [28], (c) klawiatura matrycowa [29], (d) dioda LED [30]

Raspberry Pi 5 (rysunek 7.3a) to mikrokomputer, który pełni rolę centralnej jednostki obliczeniowej systemu. To na nim zostały zaimplementowane wszystkie kluczowe funkcjonalności umożliwiające zbieranie, przetwarzanie oraz analizę danych środowiskowych. Wyświetlacz LCD TFT 1,8" Waveshare (rysunek 7.3b) pełni funkcję głównego interfejsu wizualnego systemu i odpowiada za prezentację danych bieżących, archiwalnych oraz prognozowanych w sposób czytelny i intuicyjny dla użytkownika. Klawiatura matrycowa 4×4 (rysunek 7.3c) Pełni rolę funkcjonalnego panelu sterującego, za pomocą którego

użytkownik może wybierać tryby pracy, żądać wyświetlenia danych archiwalnych, prognozowanych lub aktualnych, a także uruchamiać inne funkcje systemu. Dioda LED RGB (Iduino SE010) (rysunek 7.3d) stanowi istotny element sygnalizacji wizualnej systemu.

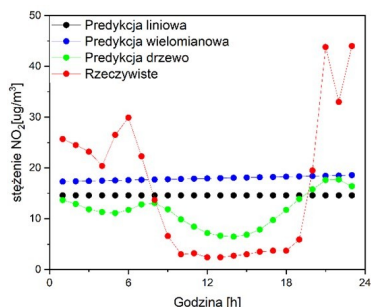
7.3.3. Część Programistyczna

Język programowania Python został wybrany jako główny język ze względu na swoją prostotę, czytelność składni oraz szeroko rozwiniętą bazę bibliotek, które między innymi: wspierają analizę danych, zapewniają komunikację z komponentami sprzętowymi oraz pomagają w tworzeniu wizualizacji. Został on wykorzystany do implementacji głównych funkcjonalności systemu, w tym akwizycji danych, komunikacji z bazą danych, generowania wykresów oraz predykcji parametrów środowiskowych.

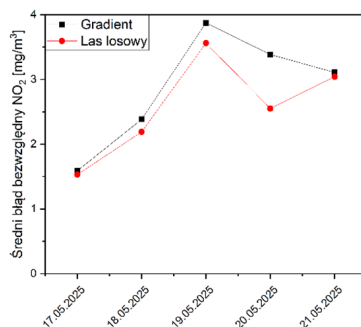
Baza danych SQLite została wybrana ze względu na swoją lekkość, szybkość działania oraz brak konieczności instalowania dodatkowego oprogramowania serwerowego. Struktura bazy danych została zaprojektowana tak, aby umożliwić łatwe filtrowanie danych po dacie, lokalizacji i konkretnym zanieczyszczeniu powietrza (np. PM2.5, PM10, NO₂). Zaimplementowano także mechanizm nadpisywania danych dla tej samej daty oraz dopisywania nowych rekordów w przypadku danych, które wcześniej nie wystąpiły dla konkretnej daty.

7.4. Uzyskane wyniki

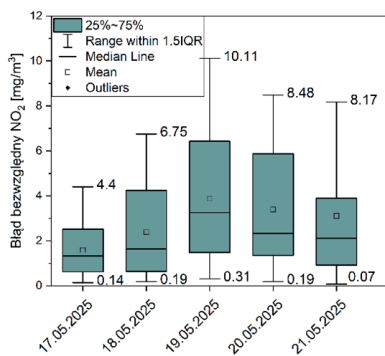
Dla zaprojektowanego systemu zostały zaimplementowane a następnie przetestowane (pod względem skuteczności predykcji) modele opisane w rozdziale 7.2.2. Początkowo zostały zbadane modele: regresji liniowej, regresji wielomianowej oraz drzewa decyzyjnego dla stężenia NO₂ dla stacji Bartnicza w dniu 13.05.2025 roku (rysunek 7.4). Drzewo decyzyjne jako jedyny model charakteryzowało się nieliniowymi wartościami co było podstawą do implementacji bardziej zaawansowanych modeli. Dodatkowo porównano dwa zaawansowane modele tj. regresję ze wzmocnieniem gradientowym oraz las losowy dla danych z okresu 17.05 – 21.05.2025 roku dla stężenia NO₂ dla stacji Bartniczej. Rysunek 7.5 przedstawia wykres porównujący średni błąd bezwzględny otrzymywany przez las losowy oraz regresję ze wzmocnieniem gradientowy w poszczególnych dniach. Z analizy rysunku można zauważyć, że średnie błędy są do siebie zbliżone (z wyjątkiem 20.05.2025 r.), jednakże model lasu losowego uzyskał mniejsze błędy bezwzględne. Na rysunku 7.6 umieszczono wykresy pudełkowe, z których wynika, że model regresji ze wzmocnieniem gradientowym uzyskał większe rozrzuty błędów dla trzech z pięciu dni. Las losowy posiada 3 punkty odstające po jednym dla trzech pierwszych dni, natomiast regresja ze wzmocnieniem gradientowym 2 punkty odstające dla 21.05.2025 roku. Las losowy charakteryzuje się również mniejszymi medianami. Rysunek 7.7 przedstawia mapy cieplne dla modelu regresji ze wzmocnieniem gradientowym oraz lasu losowego. Z analizy wynika, że w godzinach nocnych mniejsze błędy uzyskuje model lasu losowego. U dwóch modeli większe błędy bezwzględne występują w godzinach porannych oraz późnowieczornych. Dodatkowo 19.05.2025 roku wystąpiły duże błędy bezwzględne w godzinach popołudniowych zarówno dla lasu losowego jak i regresji ze wzmocnieniem gradientowym.



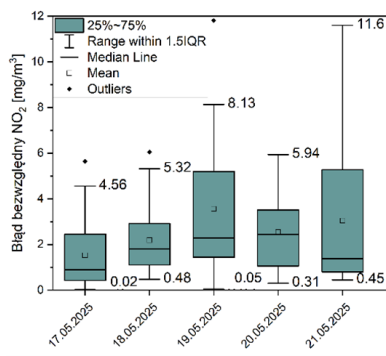
Rysunek 7.4. Wykres porównujący dane predykcyjne z rzeczywistymi w dniu 13.05.2025 roku



Rysunek 7.5. Średni błąd bezwzględny w dniach 17.05 - 21.05.2025 roku dla stacji przy ul. Bartniczej

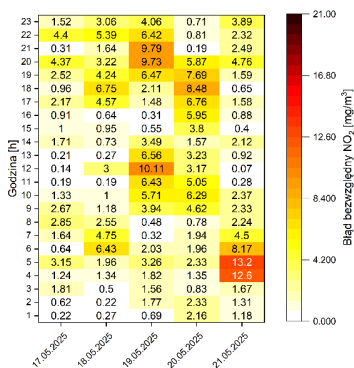


(a)

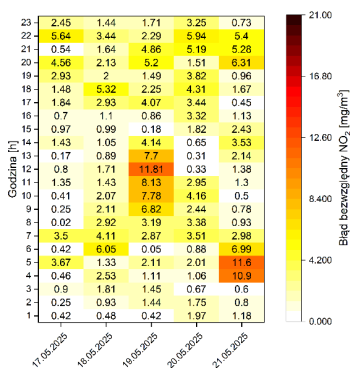


(b)

Rysunek 7.6. Błędy bezwzględne dla (a) model regresji ze wzmacnieniem gradientowym, (b) model lasu losowego



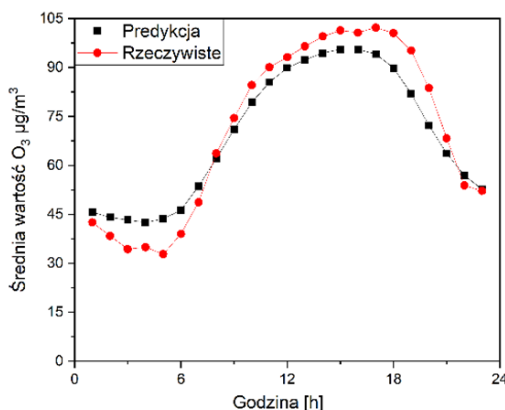
(a)



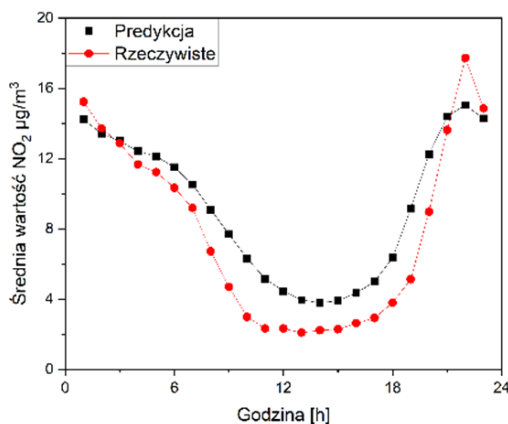
(b)

Rysunek 7.7. Mapa ciepła (a) model regresji ze wzmacnieniem gradientowym, (b) model lasu losowego

Na rysunku 7.8 przedstawiono średnią wartość rzeczywistą oraz predykcję ozonu ze stacji Bartnicza. Na rysunku 7.9 przedstawiono dane dla dwutlenku azotu. Z analizy rysunku 7.8 można zauważyć, że prognozy dla ozonu wykazują lekkie przeszacowanie wartości w początkowych godzinach dnia, natomiast w środkowej części dnia zauważalne jest niedoszacowanie. Model przedstawiony na rysunku 7.9 przeszacowuje wartości dwutlenku azotu przez praktycznie cały dzień, z wyjątkiem godziny 23, gdzie obserwuje się znaczące niedoszacowanie.



Rysunek 7.8. Dane dla stężenia ozonu na stacji Bartnicza w dniach 04.06 - 21.06.2025 roku



Rysunek 7.9. Dane dla stężenia dwutlenku azotu na stacji Bartnicza w dniach 04.06 - 21.06.2025 roku

7.5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono rozwiązanie problemu monitorowania i prognozowania jakości powietrza w warunkach lokalnych na przykładzie miasta Wrocławia. Analiza literatury i danych środowiskowych wykazała, że zanieczyszczenia atmosferyczne – zwłaszcza pyły zawieszone PM2.5 i PM10 – stanowią istotne zagrożenie zdrowotne. Polska charakteryzuje się jednym z najwyższych w Europie wskaźników zgonów związanych z złą jakością

powietrza oraz wyższymi progami alarmowymi niż w krajach Europy Zachodniej. Nowe, zaostrome normy WHO z 2021 roku podkreślają konieczność skrupulatniejszego monitorowania i redukcji zanieczyszczeń. W związku z tym praca podkreśla potrzebę rozwoju systemów prognozowania jakości powietrza zintegrowanych z systemami ostrzegania oraz prowadzenia szeroko zakrojonych działań edukacyjnych dla społeczeństwa i decydentów.

W celu sprostania tym wyzwaniom zaprojektowano modułowy system monitoringu i prognozowania jakości powietrza, która gwarantuje łatwą rozbudowę (np. O dodatkowe własne czujniki, nowe modele prognozowania czy integrację z usługami chmurowymi) i wpisuje system w aktualne trendy Internetu Rzeczy (IoT – ang. Internet of things). Dzięki temu zaprojektowana platforma jest elastyczna, skalowalna i nadaje się zarówno do celów edukacyjnych, jak i praktycznego monitoringu jakości powietrza.

W pracy podjęto się zagadnienia integracji z danymi źródłowymi przez interfejsy API. Wybrano REST API Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, które dostarcza aktualne i wiarygodne dane pomiarowe w formacie JSON. Takie rozwiązanie zapewnia wysoką wydajność i przejrzystość integracji z systemem.

Istotnym elementem pracy było zastosowanie algorytmów predykcyjnych do prognozowania krótkoterminowych zmian stężeń zanieczyszczeń. Przeprowadzono testy zarówno prostych modeli liniowych (regresja liniowa i wielomianowa), jak i bardziej złożonych nieliniowych (drzewo decyzyjne, las losowy, regresja ze wzmocnieniem gradientowym). Wstępne analizy przeprowadzono na danych stacji Bartnicza dla stężenia NO₂. Wyniki wykazały, że modele liniowe okazały się nieskuteczne – generowały niemal stałe prognozy niezależne od rzeczywistych wahań stężeń, osiągając wysokie średnie błędy. Zastosowanie drzewa decyzyjnego pozwoliło znacząco poprawić dokładność predykcji. Dużą dokładnością prognozowania charakteryzowały się modele zespołowe (tj. las losowy oraz model regresji ze wzmocnieniem gradientowym). Modele zespołowe znacząco przewyższają proste modele regresyjne w prognozowaniu złożonych zjawisk środowiskowych. Jednocześnie zaobserwowano, że we wszystkich modelach występowały większe odchylenia błędów w porach szczytu komunikacyjnego (rano i wieczorem), co może wynikać z pominięcia czynników takich jak natężenie ruchu drogowego czy warunki meteorologiczne.

Podsumowując, opracowany system stanowi spójne rozwiązanie integrujące kilka komponentów sprzętowych i programowych w celu bieżącego monitoringu i prognozowania jakości powietrza. Dzięki modularnej architekturze oraz wykorzystaniu dostępnych interfejsów API możliwe jest skalowanie funkcji systemu i adaptacja do różnych scenariuszy miejskich. Wdrożone algorytmy predykcyjne – szczególnie las losowy z optymalizacją hiperparametrów – zapewniają użyteczne prognozy stężeń zanieczyszczeń, mogące wspomagać podejmowanie decyzji ochrony środowiska i zdrowia publicznego. Wyniki pracy podkreślają zarówno znaczenie problemu zanieczyszczeń powietrza w Polsce, jak i wykonalność lokalnego rozwiązania opartego na IoT do jego monitorowania.

Bibliografia

- [1] Liu Y., Wang P., Li Y. et al. Air quality prediction models based on meteorological factors and real-time data of industrial waste gas. *Scientific Reports* **2022**, 12, 9253.
- [2] Ravindiran G., Hayder G., Kanagarathinam K., Alagumalai A., Sonne Ch. Air quality prediction by machine learning models: A predictive study on the Indian coastal city of Visakhapatnam. *Chemosphere* **2023**, 338, 139518.

-
- [3] Zanieczyszczenie powietrza. Dostępny online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Zanieczyszczenie_powietrza (dostęp: 20-05-2025).
- [4] Global Compact Network Poland. *Jakość powietrza w Polsce – stan obecny i propozycje działań naprawczych*, Warszawa, Polska, 2022.
- [5] GIOŚ – Measuring air assessment rating info. Dostępny online: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/measuring_air_assessment_rating_info (dostęp: 20-05-2025).
- [6] GIOŚ – Health informations. Dostępny online: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/health_informations (dostęp: 20-05-2025).
- [7] European Environment Agency. *Air quality in Europe — 2020*. EEA Report No. 09/2020.
- [8] Microsoft Azure Machine Learning – Linear regression. Dostępny online: <https://learn.microsoft.com/pl-pl/azure/machine-learning/component-reference/linear-regression?view=azureml-api-2> (dostęp: 20-05-2025).
- [9] Qu K. Research on linear regression algorithm. *MATEC Web of Conferences* **2024**, 395 (ICPCM 2023).
- [10] Kim S.-J., Bae S.-J., Jang M.-W. Linear Regression Machine Learning Algorithms for Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Climate Data. *Sustainability* **2022**, 14, 11674.
- [11] Nam C.S. et al. Most men of reproductive age do not prefer a gender-concordant reproductive urologist. *The Journal of Urology* **2025**, 213(5S), e829.
- [12] Azad M., Chikalov I., Hussain S., Moshkov M. Entropy-Based Greedy Algorithm for Decision Trees Using Hypotheses. *Entropy* **2021**, 23(7), 808.
- [13] Decision tree learning. Dostępny online: https://en.wikipedia.org/wiki/Decision_tree_learning (dostęp: 20-05-2025).
- [14] Saltykov S. Algorithm of Building Regression Decision Tree Using Complementary Features. 13th International Conference “Management of large-scale system development” (MLSD), Moscow, Russia, 2020, doi:10.1109/MLSD49919.2020.9247785.
- [15] Lee K.-M., Herrman T.J., Bean S.R., Jackson D.S., Lingenfelser J. Classification of Dry-Milled Maize Grit Yield Groups Using Quadratic Discriminant Analysis and Decision Tree Algorithm. *Cereal Chemistry* **2007**, 84, s. 152–161.
- [16] Israel-Nyemeche T., Taylor O.E. et al. A Random Forest Regressor Model for Forecasting Air Quality Index from Particulate Matters. *International Journal of Computer Science & Mobile Computing* **2023**, 12(10), s. 57–70.
- [17] Random forest. Dostępny online: https://en.wikipedia.org/wiki/Random_forest (dostęp: 20-05-2025).
- [18] Jailani N.M.A.K., Mara G.C. Feature Selection in Ozone Feature Space Impacts Performance in Gradient Boosting, Random Forest, Xgboost and Adaptive Boosting Regressors. 2024 International Conference on Current Trends in Advanced Computing (ICCTAC), Bengaluru, India, 2024, s. 1–6.
- [19] Liu W., Fu J., Tang C., Huang X., Sun T. Real-time prediction of multivariate ROP based on machine learning regression algorithms. *Journal of Energy Resources Technology* **2023**, 41(5).
- [20] Interfejs programowania aplikacji. Dostępny online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Interfejs_programowania_aplikacji (dostęp: 20-05-2025).
- [21] Application Programming Interface – Spiceworks. Dostępny online: <https://www.spiceworks.com/tech/devops/articles/application-programming-interface/> (dostęp: 20-05-2025).
- [22] OpenAQ – About. Dostępny online: <https://openaq.org/about/> (dostęp: 20-05-2025).
-

- [23] OpenAQ – Location 10566. Dostępny online: <https://explore.openaq.org/locations/10566> (dostęp: 20-05-2025).
- [24] GIOŚ – Stacja 114. Dostępny online: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/114 (dostęp: 20-05-2025).
- [25] GIOŚ – Stacja 117. Dostępny online: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/117 (dostęp: 20-05-2025).
- [26] GIOŚ – Stacja 129. Dostępny online: https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current/station_details/info/129 (dostęp: 20-05-2025).
- [27] Raspberry Pi 5 – Botland. Dostępny online: <https://botland.com.pl/moduly-i-zestawy-raspberry-pi-5/25346-raspberry-pi-5-2gb-5056561803302.html> (dostęp: 20-05-2025).
- [28] Wyświetlacz TFT – Botland. Dostępny online: <https://botland.com.pl/wyswietlacze-lcd-tft-i-ips/10754-wyswietlacz-lcd-tft-kolorowy-18-128x160px-spi-waveshare-13892-5904422316600.html> (dostęp: 20-05-2025).
- [29] Klawiatura matrycowa – Botland. Dostępny online: <https://botland.com.pl/klawiatury-arduino/2895-klawiatura-matryca-16-x-tact-switch-5903351247818.html> (dostęp: 20-05-2025).
- [30] Dioda LED – Botland. Dostępny online: <https://botland.com.pl/diody-led-rgb/14294-modul-z-dioda-led-rgb-iduino-se010-5903351241922.html> (dostęp: 20-05-2025).

Wydział Elektryczny

Mikroprocesorowy sterownik silnika tarczowego z magnesami trwałymi

inż. Maciej Pankau
Automatyka Przemysłowa

dr inż. Krzysztof Dyrzcz, prof. uczelni
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Mikroprocesorowy sterownik dla silnika tarczowego z magnesami trwałymi ma zapewnić stabilną i precyzyjną kontrolę jego pracy, a jednocześnie być prosty w obsłudze i niezawodny. W ramach pracy inżynierskiej przygotowano kompletny układ obejmujący część mocy, sterowania, zasilania oraz interfejs użytkownika. Układ sterujący został oparty na płytce rozwojowej Arduino NANO, która odpowiadała za generowanie sygnałów PWM, odczyt parametrów pracy silnika oraz obsługę wyświetlacza i enkodera obrotowego. Sterownik został zrealizowany w oparciu o nowoczesne tranzystory z węgla krzemu – SiC MOSFET, co zapewniło wysoką sprawność i odporność na przepięcia. W trakcie badań laboratoryjnych potwierdzono stabilność pracy, skuteczną regulację prędkości oraz działanie zabezpieczenia nadprądowego. Uzyskane wyniki wykazały, że zaprojektowany układ jest sprawny, łatwy w obsłudze i stanowi nowoczesną alternatywę dla tradycyjnych analogowych układów regulacji.

8.1. Cel i założenia

Celem pracy dyplomowej było zaprojektowanie i wykonanie mikroprocesorowego sterownika silnika tarczowego z magnesami trwałymi. Praca obejmowała analizę literatury, opracowanie założeń projektowych, wykonanie prototypu oraz jego testy laboratoryjne. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to m.in.:

- zapewnienie regulacji prędkości obrotowej zarówno w układzie otwartym, jak i zamkniętym, ze sprzężeniem zwrotnym od prądu twornika oraz prędkości obrotowej,
- sterowanie realizowane za pomocą mostka H z tranzystorami MOSFET,
- układ sterowania oparty o mikrokontroler z rodziny AVR np. płytka Arduino,
- prosty interfejs użytkownika oparty o wyświetlacz LCD oraz enkoder obrotowy.

8.2. Wstęp teoretyczny

Silniki prądu stałego od wielu lat stanowią jedną z podstawowych grup maszyn elektrycznych stosowanych w automatyce, robotyce czy transporcie. Ich popularność wynika z prostoty konstrukcji oraz możliwości łatwej regulacji prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego. Klasyczny silnik prądu stałego, składa się z wirnika, stojana oraz komutatora. Regulacja prędkości odbywa się przez zmianę napięcia zasilania twornika, natomiast kontrola momentu – przez odpowiednią regulację prądu.

Wśród maszyn prądu stałego szczególne miejsce zajmują silniki tarczowe z magnesami trwałymi. Wyróżniają się płaskim wirnikiem, w którym nie stosuje się pakietów blach ferromagnetycznych, co eliminuje straty w obwodzie magnetycznym oraz tzw. moment zaczepowy. Dzięki temu silniki te cechują się niską bezwładnością, dużą dynamiką oraz zdolnością do płynnej regulacji prędkości. Stałe pole magnetyczne wytwarzane jest przez magnesy trwałe umieszczone w stojanie, co upraszcza konstrukcję i zwiększa sprawność układu. Na rysunku 8.1 przedstawiono użyty silnik prądu stałego produkcji Warszawskich Zakładów Maszyn Elektrycznych WAMEL: typ 7FTM160, nr 9310.



Rysunek 8.1. Silnik tarczowy z magnesami trwałymi

gdzie:

- U_L – wartość przepięcia,
- L – indukcyjność obwodu,
- $\frac{dI}{dt}$ – szybkość zmian prądu w czasie.

Im większa indukcyjność oraz szybkość zaniku prądu, tym wyższa wartość przepięcia, co może prowadzić do uszkodzenia tranzystorów mocy lub zakłóceń w pracy całego układu. Z tego względu w praktyce stosuje się elementy ochronne, takie jak diody zwrotne – flyback diode, diody transil - TVS, czy układy Snubber RC, które rozpraszają energię

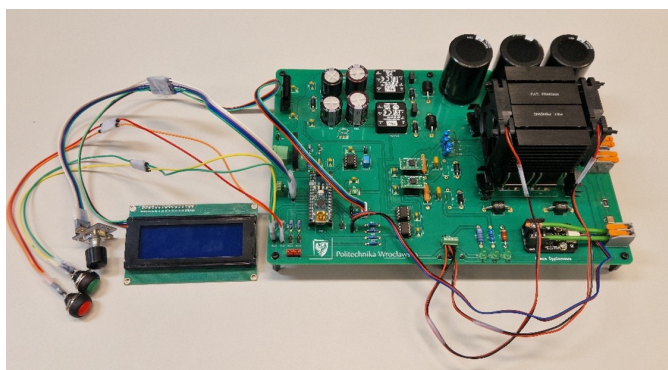
zgrupowaną w polu magnetycznym i chronią elementy półprzewodnikowe przed zniszczeniem. Właściwy dobór elementów zabezpieczających wymaga analizy charakterystyk silnika oraz parametrów przełączania tranzystorów mocy. Dzięki temu możliwe jest zapewnienie stabilnej pracy układu sterującego nawet w warunkach dynamicznych zmian obciążenia.

8.3. Projekt i wykonanie

Projekt mikroprocesorowego sterownika silnika tarczowego z magnesami trwałymi obejmował kompleksowy proces inżynierski, począwszy od analizy wymagań funkcjonalnych, przez dobór podzespołów, aż po wykonanie prototypu i jego testy. Głównym celem było zastąpienie niesprawnego sterownika analogowego nowoczesnym rozwiązaniem cyfrowym, które zapewni większą niezawodność, stabilność działania oraz możliwość realizacji dodatkowych funkcji ochronnych.

Układ został podzielony na cztery główne bloki funkcjonalne: część mocy odpowiedzialną za bezpośrednie sterowanie silnikiem, układ sterowania z mikrokontrolerem, sekcję zasilania stabilizującą napięcia oraz interfejs użytkownika umożliwiający intuicyjną obsługę.

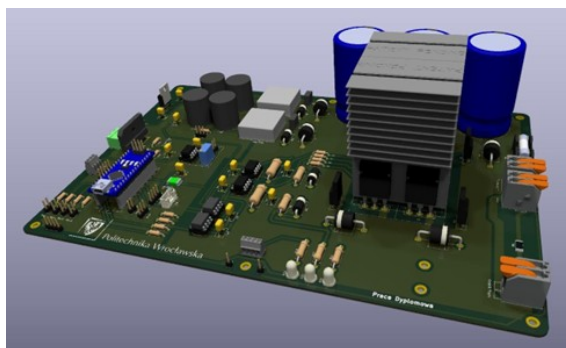
Szczególne uwagę poświęcono części mocy, w której zastosowano tranzystory z węgla krzemu SiC MOSFET oraz dodatkowe układy ochronne minimalizujące skutki przepięć powstających podczas przełączania prądów w obciążeniu indukcyjnym. Dzięki temu możliwe było zwiększenie trwałości całego systemu i zabezpieczenie go przed uszkodzeniami. Projektując płytę PCB zwrócono uwagę na prawidłowe prowadzenie ścieżek prądowych oraz separację sekcji logicznej i mocy, co znacząco poprawiło odporność układu na zakłócenia. Na rysunku 8.2 przedstawiono zaprojektowany i wykonany sterownik.



Rysunek 8.2. Mikroprocesorowy sterownik silnika tarczowego z magnesami trwałymi

Istotnym etapem realizacji pracy było przygotowanie projektu płytki drukowanej w programie KiCad. W środowisku tym opracowano szczegółowy schemat elektroniczny całego sterownika, uwzględniając połączenia między blokami funkcjonalnymi. Następnie, w module projektowania PCB, rozmieszczono komponenty i zaprojektowano ścieżki sygnałowe oraz zasilające. Projekt w KiCadzie pozwolił na wygenerowanie kompletnej dokumentacji produkcyjnej w postaci plików Gerber, a także na wykonanie wizualizacji

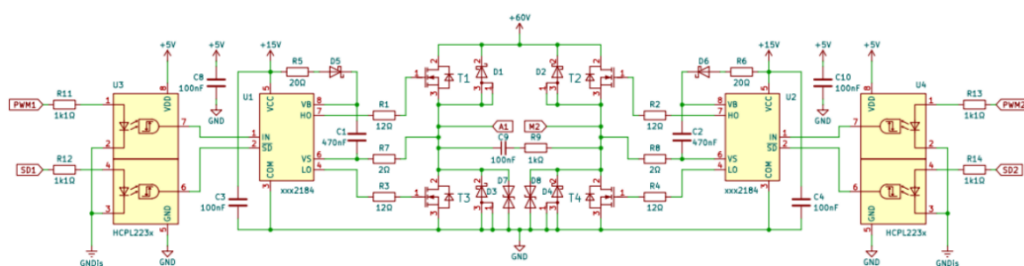
3D płytki. Po wykonaniu płytki drukowanej przystąpiono do montażu elementów, lutowania i uruchamiania prototypu. Na rysunku 8.3 przedstawiono wizualizację sterownika w programie KiCad.



Rysunek 8.3. Wizualizacja 3D sterownika w programie KiCad

8.3.1. Część mocy – mostek H

Najważniejszym elementem wykonawczym sterownika był mostek H, odpowiedzialny za bezpośrednie sterowanie silnikiem. W projekcie zastosowano tranzystory z węgla krzemu SiC MOSFET Infineon IMW65R039M1H [2] z kanałem typu N, które wyróżniają się wysoką sprawnością energetyczną, małymi stratami przełączania oraz dużą odpornością na przepięcia. Wybór tych elementów pozwolił na zwiększenie niezawodności całego układu oraz ograniczenie nagrzewania przy pracy z dużymi prądami. Do poprawnego sterowania tranzystorami użyto specjalizowanych driverów Infineon 2ED2184S06F [3], również bazujących na technologii węgla krzemu, zapewniających właściwe czasy przełączania i odpowiednie impulsy prądowe. W celu ochrony elementów mocy przed przepięciami zastosowano zestaw zabezpieczeń: szybkie diody zwrotne Schottky'ego, diody transil TVS oraz układ Snubber RC. Ich zadaniem było rozpraszanie energii zgromadzonej w indukcyjności silnika i tłumienie impulsów napięciowych. Na rysunku 8.4 przedstawiono schemat zaprojektowanego mostka H.



Rysunek 8.4. Schemat zaprojektowanego mostka H

8.3.2. Układ sterowania

Jednostką centralną sterownika była płytką rozwojowa Arduino Nano z mikrokontrolerem ATmega328P. Układ ten został wybrany ze względu na łatwość programowania,

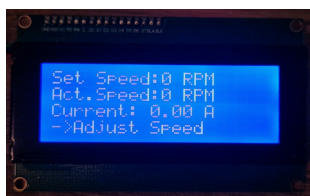
dostępność bibliotek oraz wystarczającą moc obliczeniową do realizacji algorytmów regulacji. Mikrokontroler odpowiadał za generację sygnałów PWM sterujących tranzystorami mostka H, pomiar parametrów pracy oraz obsługę interfejsu użytkownika. Do pomiaru prądu wykorzystano czujnik Halla ACS712, który dostarczał sygnał proporcjonalny do natężenia przepływającego prądu. Informacja o prędkości obrotowej była pozyskiwana z prądnicy tachometrycznej, co pozwalało na realizację kaskadowej regulacji w pętli sprzężenia zwrotnego. Oprogramowanie mikrokontrolera przewidywało również zabezpieczenie nadprądowe, wyłączające napęd po przekroczeniu wartości prądu 10 A.

8.3.3. Układ zasilania

Stabilne zasilanie całego systemu miało kluczowe znaczenie dla poprawnej pracy sterownika. Układ został zaprojektowany w oparciu o przetwornice DC/DC oraz stabilizator liniowy, które dostarczały odpowiednie napięcia dla poszczególnych sekcji. Zastosowano oddzielne linie zasilania dla obwodów logicznych i obwodów mocy, co zapobiegało przenikaniu zakłóceń do mikrokontrolera. Dodatkowo wprowadzono filtry LC, redukujące szpilki napięciowe i zakłócenia wysokiej częstotliwości, które mogłyby zakłócać sygnały.

8.3.4. Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika został zaprojektowany tak, aby umożliwić intuicyjną obsługę sterownika i łatwy dostęp do kluczowych parametrów pracy. Podstawowym elementem wizualizacji był wyświetlacz LCD 20×4, na którym prezentowano bieżące wartości prędkości, prądu oraz informacje o stanie systemu. Do obsługi sterownika służył enkoder obrotowy z wbudowanym przyciskiem, pozwalający na szybkie wprowadzanie ustawień i poruszanie się po menu. Zastosowanie tego rozwiązania umożliwiło rezygnację z wielu przycisków i uprościło obsługę urządzenia. Oprogramowanie mikrokontrolera zapewniało czytelne menu, a komunikaty były prezentowane w sposób zrozumiały dla użytkownika. Dodatkowo przewidziano funkcję sygnalizacji alarmowej, informującą o zadziałaniu zabezpieczeń, np. przy przekroczeniu prądu granicznego. Dzięki temu interfejs nie tylko ułatwiał obsługę, ale także zwiększał bezpieczeństwo pracy całego układu. Na rysunku 8.5 przedstawiono interfejs użytkownika.



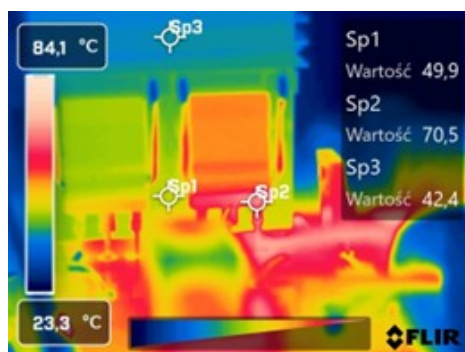
Rysunek 8.5. Interfejs - wyświetlacz LCD20X4

8.4. Uzyskane wyniki

W ramach badań prototypu przeprowadzono testy laboratoryjne mające na celu ocenę poprawności działania zaprojektowanego sterownika oraz weryfikację spełnienia założeń

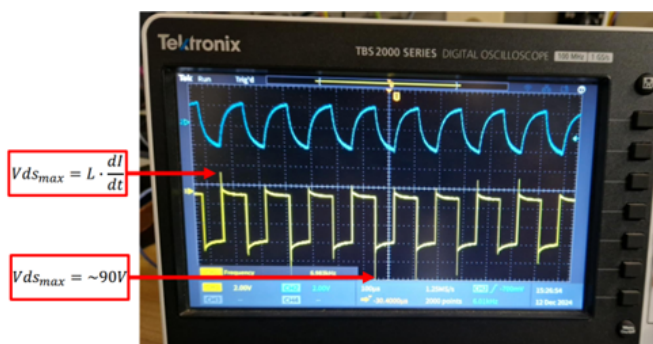
projektowych. Sprawdzano zarówno pracę w układzie otwartym, gdzie prędkość obrotowa zależy bezpośrednio od wartości zadanych sygnałów sterujących, jak i w układzie zamkniętym, w którym zastosowano sprzężenie zwrotne od prądu i prędkości. Wyniki badań potwierdziły, że regulacja prędkości przebiegała stabilnie w szerokim zakresie obciążeń oraz napięć zasilania.

Szczególną uwagę zwrócono na zachowanie układu przy przeciążeniach. Sterownik skutecznie wyłączał napęd po przekroczeniu wartości 10 A, co świadczy o prawidłowej implementacji zabezpieczenia nadprądowego. W trakcie pomiarów nie stwierdzono nadmiernego nagrzewania tranzystorów mocy, ich temperatura zawierała się w bezpiecznym zakresie. Na rysunku 8.6 przedstawiono pomiary termowizyjne sterownika.



Rysunek 8.6. Pomiary termowizyjne sterownika – mostka H

Dodatkowo przeprowadzono pomiary przebieg (szpilek napięciowych) pojawiających się podczas przełączania tranzystorów w mostku H. Zarejestrowane oscyloskopowo przebiegi prądu i napięcia wykazały występowanie krótkotrwałych impulsów o amplitudzie sięgającej do 90 V przy napięciu znamionowym równym 60 V. Dzięki obecności diod zwrotnych, diod transil oraz obwodu Snubber RC, szpilki te były skutecznie tłumione i nie przekraczały wartości granicznych dopuszczalnych dla użytych tranzystorów. Na rysunku 8.7 przedstawiono przebiegi oscyloskopowe wykonanych pomiarów. Przebieg w kolorze niebieskim przedstawia prąd twornika silnika, natomiast przebieg w kolorze żółtym napięcie dostarczane do silnika.



Rysunek 8.7. Pomiary przebieg w mostku H

8.5. Podsumowanie

Realizacja pracy dyplomowej umożliwiła zaprojektowanie i wykonanie mikroprocesorowego sterownika przeznaczonego do silnika tarczowego z magnesami trwałymi oraz jego praktyczną weryfikację w warunkach laboratoryjnych. W toku działań stworzono kompletny układ obejmujący część mocy, jednostkę sterującą, system zasilania oraz interfejs użytkownika, a następnie przeprowadzono testy potwierdzające poprawność jego działania.

Uzyskane wyniki pokazały, że zaprojektowany sterownik zapewnia stabilną regulację prędkości, skutecznie reaguje na przeciążenia i chroni elementy mocy przed uszkodzeniem dzięki wdrożonym zabezpieczeniom. Badania wykazały również, że zastosowane rozwiązania konstrukcyjne pozwoliły na ograniczenie przepięć, które mogłyby prowadzić do awarii tranzystorów. Szczególnie istotne było potwierdzenie, że system pozostaje odporny na zakłócenia i działa przewidywalnie nawet przy dynamicznych zmianach obciążenia.

Praca potwierdziła, że nowoczesne rozwiązania mikroprocesorowe mogą być skutecznie wykorzystane w praktyce do sterowania nietypowymi napędami elektrycznymi. Zrealizowany projekt stanowi przykład praktycznego połączenia wiedzy teoretycznej i umiejętności inżynierskich, pokazując, że przy użyciu powszechnie dostępnych narzędzi można tworzyć systemy o dużej funkcjonalności i wysokiej niezawodności. Wnioski płynące z pracy wskazują także na możliwość dalszego rozwijania podobnych konstrukcji, np. przez zastosowanie bardziej zaawansowanych algorytmów regulacji, wprowadzenie zdalnej komunikacji lub integrację z systemami diagnostyki.

Bibliografia

- [1] Pankau M., Mikroprocesorowy sterownik silnika tarczowego z magnesami trwałymi. Praca Inżynierska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, 16.12.2024 r.
- [2] IMW65R039M1H Datasheet. Dostępny online: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-imw65r039m1h-datasheet-en.pdf> (dostęp: 01-10-2025).
- [3] 2ED2184S06F Datasheet. Dostępny online: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/60/49/infineon-2ed2184-4-s06f-j-datasheet-en.pdf> (dostęp: 01-10-2025).

Napęd fotoniczny układów mikromaszynowych

inż. Tomasz Nowak

Elektromobilność

prof. dr hab. inż. Teodor Gotszalk

Katedra Nanometrologii

W ramach pracy inżynierskiej przygotowano układ zasilania lasera półprzewodnikowego, umożliwiającego pomiar siły wywieranej przez fotony. Układ ten pracuje w układzie stabilnego źródła prądowego z możliwością wstrzykiwania prądu do złącza lasera półprzewodnikowego. Układ iniekcji pracuje w konfiguracji Libbrechta-Halla, pozwala on na modulację pracy lasera w zakresie prądów do 10 mA i częstotliwości 1 MHz. Opracowane źródło prądowe użyto do modulacji siły fotonów, jaka była wywierana na dźwignię mikromechaniczną typu MEMS. W eksperymencie tym na dźwignię kierowano wiązkę promieniowania ze światłowodu. Częstotliwość modulacji wiązki laserowej była równa częstotliwości rezonansowej układu mikromechanicznego. W ten sposób siłą fotonów wzbudzono drgania dźwigni o wartości skutecznej 30 nm.

9.1. Cel i założenia

Celem pracy było wprowadzenie w ruch układu mikromaszynowego (mikrodźwigni MEMS) za pomocą promieniowania laserowego. Wiązka fotonów wywiera nacisk na zwierciadło mikromaszyny prowadząc do jej wychylenia. W pracy przeprowadzona została optymalizacja zasilania układu lasera półprzewodnikowego tak, aby modulował on swoją wiązkę na częstotliwości rezonansowej mikromaszyny. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- zbadanie możliwości aktuacji mikromaszyny w warunkach powietrznych,
- opracowanie układu zasilania zmiennoprądowego lasera półprzewodnikowego i zespołu ogniskowania wiązki na powierzchni zwierciadła.

9.2. Wstęp teoretyczny

Pojęcie fotonu jako kwantu światła utrwaliło się w XX wieku po pracach M. Plancka i A. Einsteina [1]; nazwa photon (od gr. *phos*, *photos*) została szerzej zaadaptowana

po zdefiniowaniu jej jako „jednostki światła” przez G. Lewisa [2]. Przyjęcie dualizmu korpuskularno-falowego [3] pozwala na łączenie opisu falowego z własnościami cząstkowymi promieniowania, co jest podstawą rozważań dotyczących przekazywania pędu i energii przez fotony.

9.2.1. Energia i pęd fotonu

Energię fotonu zapisuje się jako $E = hf$ [4], a pęd związany z tą energią wynika z relacji $p = \frac{E}{c}$. Dla fali elektromagnetycznej poruszającej się z prędkością c relacje te determinują mechanizm przekazywania pędu do materii przy absorpcji, transmisji lub odbiciu promieniowania [5]. Przy padaniu prostopadłym najprostsze formy zależności dają się przedstawić przez stosunek strumienia energii do prędkości światła: w przybliżeniu $p \approx \frac{I}{c}$ przy pochłonięciu i $p \approx \frac{2I}{c}$ przy idealnym odbiciu (gdzie I to gęstość strumienia energii). Rozszerzając opis o współczynniki odbicia R , transmisji T i absorpcji A otrzymuje się uogólnione relacje określające rzeczywisty transfer pędu w zależności od właściwości powierzchni oraz kierunku padania [6]. Aby maksymalizować przekazywany pęd przy zadanej mocy optycznej należy stosować powierzchnie o możliwie dużej refleksyjności R i minimalnej absorpcji A ; funkcja refleksyjności zależy od długości fali λ , dlatego dobór materiału i powłoki (oraz kolimacja wiązki i kąt padania) mają bezpośredni wpływ na wielkość siły optomechanicznej. Przyjęto założenie padania prostopadłego ($\cos\Theta=1$) dla uproszczonych oszacowań.

9.2.2. Napęd fotonowy – zastosowania makroskalowe

Jednym ze starszych konceptów wykorzystania siły fotonów jest żagiel słoneczny: odbijające zwierciadło o dużej powierzchni przenosi pęd fotonów na pojazd. Teoretyczne zastosowania w podróży kosmicznych proponowano już w XVII wieku [7], lecz fizyczna realizacja przyszła dopiero w drugiej połowie wieku XX [8]. Mimo niskiego przyspieszenia (typowo 10^{-4} – $10^{-5}g$) [9] długotrwałe działanie pozwala osiągać znaczące prędkości [10]; przykłady satelitów IKAROS [11], NanoSail-2, czy LightSail-2 potwierdziły wykonalność i użyteczność konceptu, którego popularność stale się zwiększa.

Alternatywnym rozwiązaniem przemieszczania w przestrzeni kosmicznej są aktywne napędy fotonowe, w których generuje się wiązkę (np. laserową) celowo skierowaną na reflektor. Rozwiązania BLP (Beamed-Laser-Propulsion) [12] oraz koncepcje wykorzystujące wielokrotne odbicia (komórki Herriota [13], PLT [14]) umożliwiają zwiększenie ciągu kosmicznego w porównaniu z pasywnym żaglem, kosztem konieczności dysponowania silnym i precyzyjnie kierowanym źródłem promieniowania.

9.2.3. Napęd fotonowy – zastosowania mikroskalowe

Równolegle do projektów makroskalowych rozwija się wykorzystanie tego samego fenomenu ciśnienia promieniowania w mikroskali – przez manipulacje strukturami rozmiarów submilimetrycznych, gdzie ciśnienie promieniowania wytwarza siły wystarczające do akcji i precyzyjnych pomiarów, między innymi dźwigni MEMS. Mogą być one projektowane jako elementy jednostronnie lub dwustronnie utwierdzone, a ich mała masa i wysoka

czułość pozwalają na detekcję sił rzędu pN–nN. Integracja struktur MEMS z optycznymi metodami pomiaru (interferometria, wibrometry) umożliwia określenie częstotliwości rezonansowych, sztywności oraz dobroci próbki [6].

Wiązki laserowe wykorzystuje się ponadto do wpływania na ruch atomów [15]. Za pomocą odpowiednio dobranych technik optycznych (chłodzenie dopplerowskie [16], pułapki optyczne [17]) możliwe jest zmniejszenie energii kinetycznej układów atomowych i mechanicznych, co przekłada się na redukcję szumu termomechanicznego i stabilizację ruchu mikrostruktur. Techniki te, rozwijane od lat 70. [18], stanowią narzędzie do manipulacji dynamiką w układach optomechanicznych. Rozwój w dziedzinie ciśnienia promieniowania zaowocował kilkoma nagrodami Nobla [19].

Siły wywoływane przez ciśnienie promieniowania elektromagnetycznego, poza poznaniami jakościowym, wymagają również opisu ilościowego w celu precyzyjnego ich wykorzystania. Ponieważ wartości sił optycznych są niewielkie (rzędu 1 nN i poniżej), stosuje się metody interferometryczne i elektromagnetyczne o wysokiej czułości; wagi typu Kibble’a dają punkt odniesienia w metrologii siły [20], natomiast w mikroskali wykorzystuje się mikrodźwignie, wibrometry i techniki OBD (Optical Beam Deflection) do bezpośredniego pomiaru wychyleń i konwersji ich na siłę [21, 22]. Kalibracja mocy optycznej (np. fotodiodą) oraz monitorowanie i stabilizacja prądu zasilającego laser są niezbędne dla uzyskania powtarzalnych rezultatów [23].

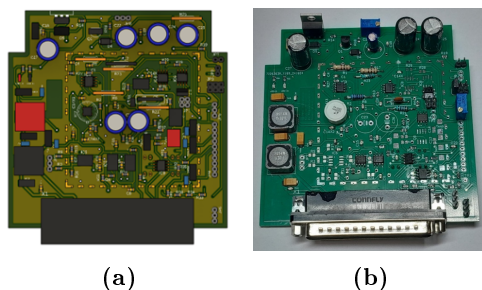
9.3. Projekt i wykonanie

W ramach pracy zdecydowano się na zaprojektowanie modulowanego źródła zasilania lasera, którego wiązka optyczna kierowana jest na wysoce refleksyjną złotą powierzchnię na krzemowej mikrodźwigni MEMS. Wiązka laserowa, wykorzystywana w pomiarze sił, musiała spełniać dwa kryteria:

- stabilność i przewidywalność mocy optycznej w momencie działania – ze względu na małe odległości między końcówką światłowodu a poruszaną mikrodźwignią nie ma możliwości równoczesnego pomiaru mocy optycznej i oddziaływań optomechanicznych.
- modulacja prostokątna lub sinusoidalna ze sterowaną częstotliwością kilkudziesięciu kHz – pomiarów siły dokonywano dla częstotliwości rezonansowej mikrodźwigni.

9.3.1. Źródło prądowe i układ elektroniczny

Podstawą zrealizowanego stanowiska badawczego był układ elektroniczny pełniący funkcję stabilnego i modulowanego źródła prądowego dla diody laserowej. Jego zadaniem było dostarczanie precyzyjnie kontrolowanego prądu o wysokiej stabilności, z możliwością modulacji przebiegiem o zadanym kształcie, przy jednoczesnym zapewnieniu pełnego bezpieczeństwa dla lasera. Zastosowano konstrukcję bazującą na klasycznym układzie Libbrechta–Halla [24], który w niniejszym rozwiązaniu został zmodyfikowany pod kątem większej niezawodności i niższego poziomu szumów. Układ zaprojektowano w środowisku Eagle, wykonano płytke PCB (rysunek 9.1) i przeprowadzono montaż ręczny. W trakcie montażu podukłady testowano oddzielnie, aby możliwe było wczesne wykrycie usterek.



Rysunek 9.1. Wykorzystana w projekcie płytka PCB (a) Wizualizacja 3D płytki, (b) Zmontowana i oczyszczona płytka źródła prądowego

9.3.2. Badania i kalibracja źródła

Przed podłączeniem lasera przeprowadzono serię pomiarów testowych:

- **Soft-start** – potwierdzono łagodny narost napięcia i prądu, chroniący diodę laserową. Badanie sygnału na oscyloskopie wykazało powolny narost napięcia od 0 V do zadanej wartości 10 V w czasie 22,8 s, co spełniało potrzeby projektowe.
- **Stabilność prądowa** – mierzono długookresowe zmiany natężenia prądu, które utrzymywały się w zakresie poniżej 0,0005% wartości ustalonej. Po 750 s zmiany prądu utrzymywały się w granicach zaledwie 0,5 μA .
- **Monitor prądu** – zaprojektowano wtórnik napięciowy umożliwiający pośredni pomiar prądu lasera. Skalibrowano go w odniesieniu do pomiarów referencyjnych, uzyskując zgodność na poziomie 0,5%.
- **Modulacja** – sprawdzono odpowiedź układu na modulacje prostokątne i sinusoidalne. Ostatecznie dobrano wzmacniacze operacyjne o odpowiednio wysokim slew rate, aby umożliwić poprawną pracę przy częstotliwościach rzędu setek kHz.

W ramach badań potwierdzono, że układ charakteryzuje się bardzo dobrą liniowością, niskimi tętnieniami oraz niewielkim dryftem temperaturowym. Po pozytywnej weryfikacji układ oczyszczono i przygotowano do pracy z laserem półprzewodnikowym.

9.3.3. Laser półprzewodnikowy i transmisja światłowodowa

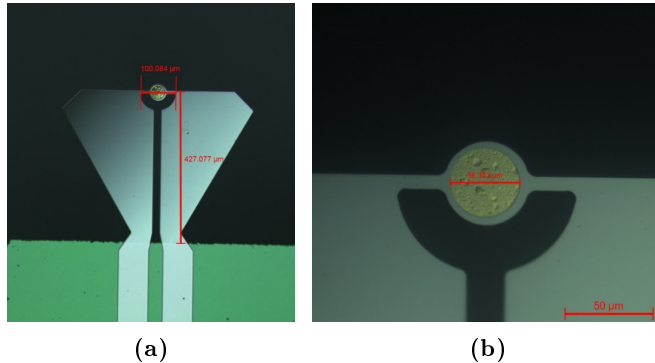
Źródłem światła w układzie pomiarowym był laser półprzewodnikowy, który charakteryzuje się wąskim widmem, koherencją i małą rozbieżnością wiązki, co jest kluczowe dla optycznej aktuacji mikrodźwigni [25]. Wykorzystano model LP635-SF8 produkcji Thor-Labs o długości fali 635 nm, sprzężony ze światłowodem jednomodowym. Maksymalna moc wyjściowa wynosiła 5 mW, a zakres roboczy prądu – do 120 mA. Światłowód zakończony był złączem FC/PC, co zapewniało wysoką powtarzalność pozycjonowania w gnieździe i ograniczało straty na łączu [26]. Celem weryfikacji karty katalogowej wykonano pomiary charakterystyki lasera, używając fotodiody krzemowej FDS02:

- określono prąd progowy,
- wyznaczono zależność mocy optycznej od prądu zasilania,
- sprawdzono amplitudę zmian mocy przy modulacji prostokątnej w zakresie 0-5 V.

Te dane były niezbędne do kalibracji dalszych pomiarów siły fotonów.

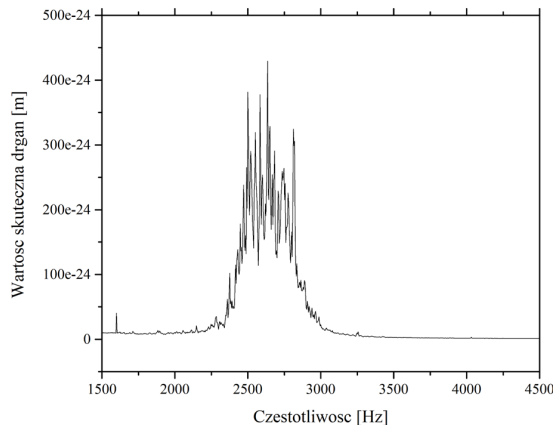
9.3.4. Mikrodźwignia MEMS

Elementem badawczym była krzemowa mikrodźwignia MEMS z naniesionym zwierciadłem złotym (rysunek 9.2), które odbijało wiązkę laserową. Użyto dostępnych w laboratorium mikrobelek jednostronnie utwardzonych o kształcie zbliżonym do połączenia dwóch trójkątów, podpartych na jednym narożniku. Na końcu dźwigni (w odległości około $427\ \mu\text{m}$ od podstawy) obie jej części zostały połączone mostkiem o długości $100\ \mu\text{m}$, na którego środku znajduje się okrągłe zwierciadło o średnicy około $39\ \mu\text{m}$.



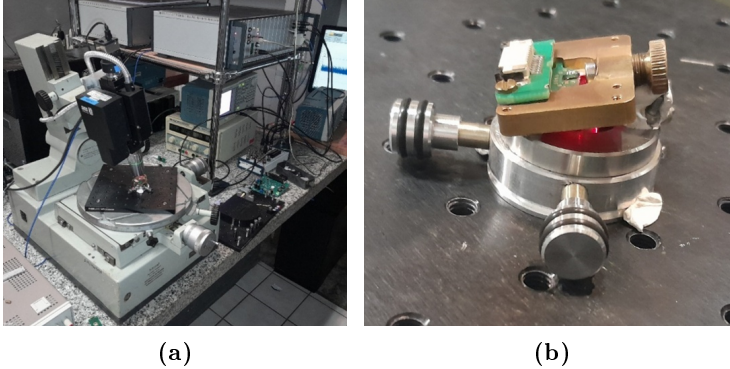
Rysunek 9.2. Wykorzystana mikrodźwignia z naniesioną warstwą złota (a) Wymiary całkowite mikrodźwigni, (b) Złote zwierciadło umieszczone na mikrodźwigni

Struktura była wykorzystywana już we wcześniejszych pomiarach innych grup projektowych i zoptymalizowana pod kątem czułości na siłę [6]. W ramach badań zmierzono i opisano jej właściwości mechaniczne, takie jak częstotliwość rezonansowa i sztywność. Parametry te wyznaczono na podstawie szumu termomechanicznego mikrodźwigni w programie komputerowym (rysunek 9.3). Do detekcji wychyleń użyto wibrometru laserowego SIOS SP-S 120, zdolnego do pomiaru amplitud rzędu nanometrów [27].



Rysunek 9.3. Pomiar szumu termicznego w bezpośredniej bliskości mikrodźwigni w zakresie 1,5 - 4,5 kHz

- karta pomiarowa National Instruments,
- komputer PC z programem dedykowanym dla SIOS do pomiaru szumu termomechanicznego i drgań mikrobelek.



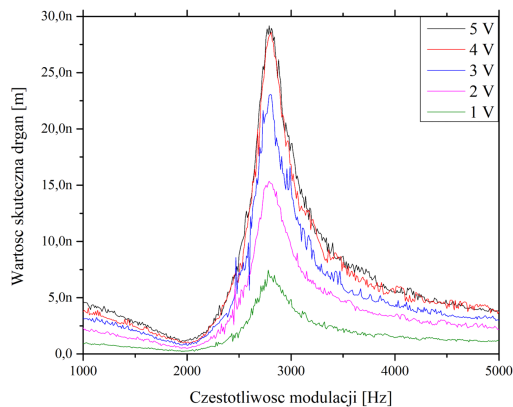
Rysunek 9.5. Układ pomiaru szumu termicznego i siły fotonów (a) pełny układ pomiarowy, (b) konstrukcja utrzymująca mikrodźwignię

9.3.6. Wyniki pomiarów

Końcowym i najważniejszym etapem projektu były eksperymenty, polegające na skierowaniu modulowanej wiązki laserowej na mikrodźwignię i pomiarze jej drgań. Analizowano:

- wychylenia przy częstotliwości rezonansowej,
- amplitudę drgań w funkcji mocy optycznej,
- powtarzalność efektu aktuacji fotonowej.

W serii wykonano pięć pomiarów dla różnych amplitud napięcia modulacji – 1 V, 2 V, 3 V, 4 V i 5 V (rysunek 9.6). Odpowiadają one następującym wartościom prądu wstrzykiwanego do układu – 2 mA, 4 mA, 6 mA, 8 mA i 10 mA.



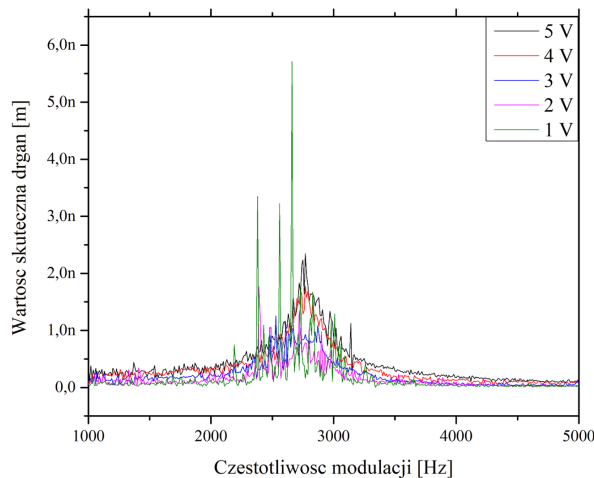
Rysunek 9.6. Wykres wartości skutecznej drgań mikrodźwigni w zależności od częstotliwości modulacji w zakresie od 1 kHz do 5 kHz

Uzyskane wyniki (tabela 9.2) potwierdziły możliwość wywołania mierzalnego ruchu mikrodźwigni za pomocą ciśnienia promieniowania, a układ źródła prądowego wraz z laserem i wibrometrem okazał się skuteczną platformą do badań optomechanicznych.

Tabela 9.2. Parametry punktu rezonansu mikrodźwigni dla różnych amplitud napięcia modulacji

Amplituda modulacji	Częstotliwość w szczycie [Hz]	Drgania RMS w szczycie [nm]
1 V	2780	7,4598
2 V	2790	15,3618
3 V	2800	23,0553
4 V	2810	28,5835
5 V	2790	29,1773

Żeby wykluczyć możliwość, że obserwowana akcja jest jedynie wynikiem oddziaływań termomechanicznych, wykonano pomiar porównawczy, kierując wiązkę na strukturę krzemową mikrobilki (rysunek 9.7). W tym przypadku oddziaływanie ciśnienia fotonów jest pomijalnie małe. Zgodnie z oczekiwaniami osiągnięto drgania o rząd wielkości mniejsze – oznacza to, że przy oświetlaniu złotego zwierciadła znacząca część vibracji była efektem ciśnienia fotonów.



Rysunek 9.7. Wykres wartości skutecznej drgań przy kierowaniu wiązki bezpośrednio na powierzchnię krzemu bliżej podstawy mikrodźwigni

9.4. Podsumowanie

W ramach pracy zrealizowano kompletny projekt układu napędu fotonicznego, który umożliwił wzbudzenie drgań mikrodźwigni pod wpływem działania modulowanej wiązki światła laserowego. Celem projektu było praktyczne zademonstrowanie zjawiska ciśnienia promieniowania w skali mikromechanicznej. Całość przedsięwzięcia obejmowała zarówno

projekt i wykonanie elektroniki sterującej, jak i przygotowanie toru optycznego, dobór elementów mikrostrukturalnych oraz opracowanie metody pomiarowej.

W pierwszej kolejności opracowano stabilne źródło prądowe dla diody laserowej, zapewniające precyzyjną regulację i możliwość modulacji z szerokim zakresem częstotliwości. Następnie przeprowadzono pomiary charakterystyk lasera oraz dobór parametrów pracy zapewniających stabilność emisji. Kolejnym krokiem było przygotowanie mikrodźwigni MEMS, której parametry mechaniczne pozwoliły na obserwację drgań w zakresie częstotliwości rezonansowych. Istotnym elementem projektu było opracowanie toru optycznego, który umożliwił precyzyjne doprowadzenie modulowanej wiązki światła do powierzchni próbki przy zachowaniu wysokiej stabilności mocy.

W przeprowadzonych pomiarach zarejestrowano drgania mikrodźwigni wywołane zmiennym w czasie ciśnieniem promieniowania, potwierdzając możliwość wzbudzenia ruchu mechanicznego wyłącznie za pomocą oddziaływania fotonów. Tym samym osiągnięto główny cel pracy, jakim było praktyczne ukazanie działania napędu fotonicznego w warunkach laboratoryjnych. Opracowany układ łączy elementy elektroniki precyzyjnej, optyki i mikromechaniki, stanowiąc podstawę do dalszych badań nad miniaturowymi napędami światłowymi i mikroaktuatorami optycznymi. Uzyskane rezultaty wskazują na duży potencjał wykorzystania zjawiska ciśnienia promieniowania w systemach MEMS, szczególnie tam, gdzie wymagane jest bezkontaktowe sterowanie lub napęd o bardzo małej sile.

Bibliografia

- [1] ter Haar D., *The Old Quantum Theory. The Commonwealth and International Library. Selected Readings in Physics*, Pergamon Press, Oxford, New York, 1st ed., 1967.
- [2] Lewis G.N., The conservation of photons. *Nature* **1926**, 118(2981), s. 874–875.
- [3] Aspect A., From Huygens' waves to Einstein's photons: Weird light. *Comptes Rendus Physique* **2017**, 18(9–10), s. 498–503.
- [4] Planck M., *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*, Springer, 1978.
- [5] Ma D., Garrett J.L., Munday J.N., Quantitative measurement of radiation pressure on a microcantilever in ambient environment. *Applied Physics Letters* **2015**, 106(9).
- [6] Orłowska K., *Metrologia oddziaływań optomechanicznych z układami mikroelektromechanicznymi MEMS*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, 2020.
- [7] Kepler J., *Dissertatio cum nuncio sidereo nuper ad mortales misso à Galilae'o Galilaeo...*, 1640.
- [8] Matloff G.L., Photon sail history, engineering and mission analysis. W: *Deep-Space Probes: To the Outer Solar System and Beyond*, s. 185–221, 2005.
- [9] Hock D.C., McMillan F.N., Tanguay A.R., Photon propelled space vehicles. *Proceedings of the IRE* **1960**, 48(4), s. 492–496.
- [10] Garwin R.L., Solar sailing – a practical method of propulsion within the solar system. AMER INST AERONAUT ASTRONAUT, Reston, 1958.
- [11] Takeuchi H. i in., VLBI tracking of the solar sail mission IKAROS. W: *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, 2011, s. 1–4.
- [12] Forward R.L., Advanced propulsion systems. W: *Space propulsion analysis and design*, s. 631, 1995.

- [13] Meyer T.R., McKay C.P., McKenna P.M., The laser elevator – Momentum transfer using an optical resonator, 1987.
- [14] Bae Y.K., Prospective of photon propulsion for interstellar flight. *Physics Procedia* **2012**, 38, s. 253–279.
- [15] Ashkin A., Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Physical Review Letters* **1970**, 24(4), s. 156.
- [16] Dehmelt H.G., Proposed $10^{14} \nu/\Delta\nu$ laser fluorescence spectroscopy on Trimonoion oscillator II. *Bulletin of the American Physical Society* **1975**, 20, s. 60.
- [17] Ashkin A., Trapping of atoms by resonance radiation pressure. *Physical Review Letters* **1978**, 40(12), s. 729.
- [18] Wineland D.J., Drullinger R.E., Walls F.L., Radiation-pressure cooling of bound resonant absorbers. *Physical Review Letters* **1978**, 40(25), s. 1639.
- [19] Tych K., Hechtl V.K., Mandal S., The power of light: Nobel prize in physics 2018. *IEEE Pulse* **2019**, 10(2), s. 14–19.
- [20] Kibble B.P., Robinson L.A., Belliss J.H., Re-defining the kilogram via a moving-coil apparatus. W: *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, 1990, s. 178–179.
- [21] Moczala M., Sierakowski A., Janus P., Grabiec P., Leśniewicz W., Gotszalk T., Progress in nanometrology of MEMS/NEMS devices. *Mechanik* **2016**, s. 1611–1613.
- [22] Putman C.A.J., De Grooth B.G., Van Hulst N.F., Greve J., A theoretical comparison between interferometric and optical beam deflection technique for the measurement of cantilever displacement in AFM. *Ultramicroscopy* **1992**, 42, s. 1509–1513.
- [23] Pruchnik B. i in., Microcantilever-based current balance for precise measurement of the photon force. *Scientific Reports* **2023**, 13(1), 466.
- [24] Libbrecht K.G., Hall J.L., A low-noise high-speed diode laser current controller. *Review of Scientific Instruments* **1993**, 64(8), s. 2133–2135.
- [25] Ziętek B., *Optoelektronika*, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2011.
- [26] Hecht J., *Understanding Fiber Optics*, Jeff Hecht, 2015.
- [27] Lutzmann P., Göhler B., Hill C.A., van Putten F., Laser vibration sensing at Fraunhofer IOSB: review and applications. *Optical Engineering* **2017**, 56(3), 31215.

Bin picking z zastosowaniem systemu wizyjnego 3DV oraz robota przemysłowego

inż. Adrian Grzyb

Automatyka Przemysłowa

dr hab. inż. Karol Wróbel

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Praca inżynierska dotyczy zaprojektowania i wykonania aplikacji typu bin picking, wykorzystującej system wizyjny 3DV firmy FANUC oraz robota przemysłowego CRX-5iA. Głównym celem projektu było opracowanie systemu umożliwiającego automatyczne wykrywanie, lokalizowanie i pobieranie elementów z pojemników oraz ich odkładanie w wyznaczone miejsca. W pracy przedstawiono proces doboru komponentów systemu, projekt chwytaka i adaptera, konfigurację systemu wizyjnego oraz analizę symulacyjną w środowisku RoboGuide. Zrealizowany system został przetestowany w warunkach rzeczywistych, co pozwoliło ocenić skuteczność wykrywania i pobierania elementów przy różnych warunkach oświetleniowych. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność doboru robota i sensora oraz skuteczność działania opracowanego systemu bin pickingu.

10.1. Cel i założenia

Celem pracy było stworzenie aplikacji opartej na robocie przemysłowym oraz systemie wizyjnym 3D, zdolnej do automatycznego pobierania i odkładania elementów. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- dobór odpowiedniego modelu robota oraz systemu wizyjnego,
- zaprojektowanie chwytaka i adaptera montażowego,
- przeprowadzenie symulacji w środowisku RoboGuide,
- konfiguracja i kalibracja systemu wizyjnego 3DV,
- weryfikacja działania aplikacji w warunkach rzeczywistych

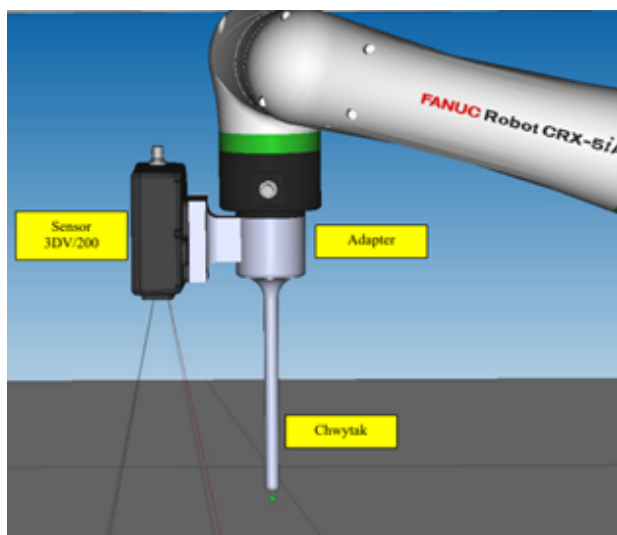
10.2. Wstęp teoretyczny

Robotyzacja procesów przemysłowych pozwala na zwiększenie efektywności, dokładności oraz bezpieczeństwa produkcji. Systemy wizyjne stanowią integralną część nowoczesnych

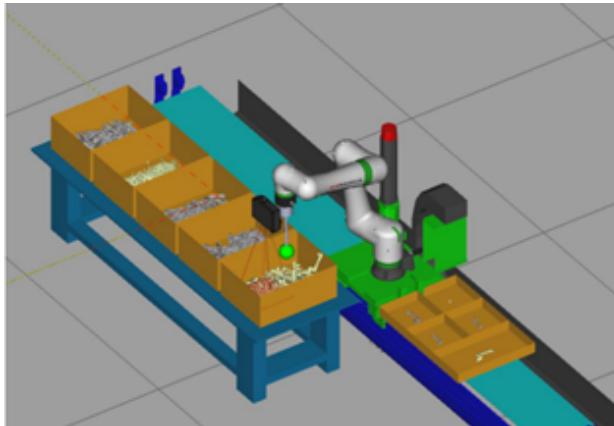
aplikacji zrobotyzowanych, umożliwiając identyfikację i lokalizację obiektów. Systemy te dzielą się na 2D i 3D — pierwsze analizują obraz w płaszczyźnie XY, natomiast systemy 3D dostarczają informacji o orientacji i położeniu w przestrzeni XYZ. W pracy wykorzystano system 3D, który korzysta z technologii światła strukturalnego, umożliwiając tworzenie modeli przestrzennych obiektów. W opracowanej aplikacji system wizyjny współpracuje z robotem przemysłowym FANUC CRX-5iA. Jest to 6-osiowy cobot o dużej precyzji, umożliwiający współpracę z człowiekiem oraz integrację z systemami wizyjnymi.

10.3. Projekt i wykonanie

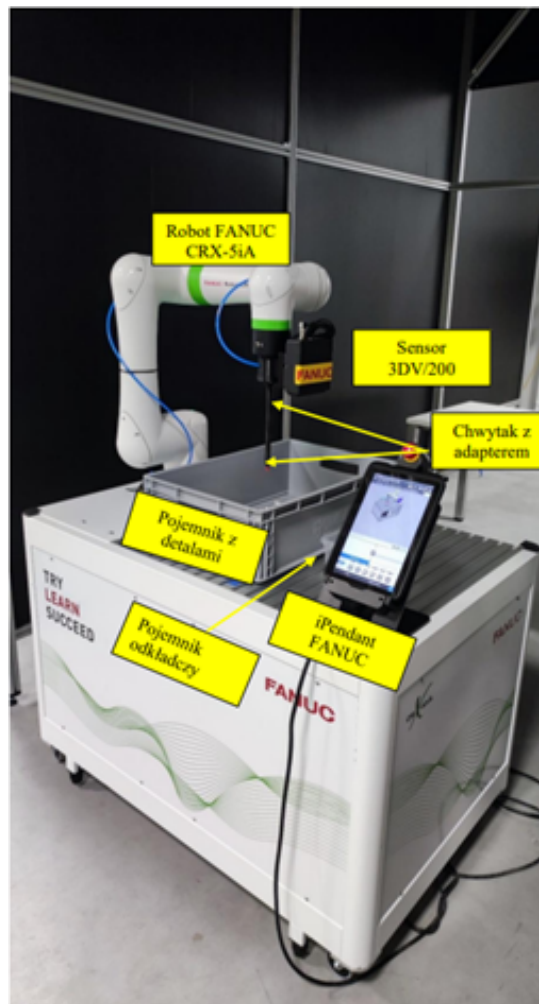
W ramach realizacji projektu opracowano stanowisko zrobotyzowane, w którym robot FANUC CRX-5iA współpracuje z systemem wizyjnym 3DV/200. Zbudowane w ramach pracy stanowisko jest częścią linii produkującej modele robotów, które mają zastosowanie jako podstawki do telefonów. Użycie systemu wizyjnego ma na celu zidentyfikowanie i lokalizację elementów modelu robota w pojemnikach. Robot z kolei ma za zadanie pobrać i przenieść pojedyncze elementy modelu do tacki, która jest następnie transportowana do kolejnych urządzeń w linii produkcyjnej. Na podstawie wymaganej rozdzielczości i obszaru pracy dokonano analizy dostępnych systemów i wybrano system wizyjny z sensorem 3DV/200. W ramach realizacji pracy zaprojektowano i wykonano (w technologii druku 3D) chwytak próżniowy o średnicy przyssawki 6 mm oraz adapter mocujący (rys. 10.1). Przed uruchomieniem systemu rzeczywistego przeprowadzono symulację w środowisku RoboGuide (rys. 10.2), umożliwiającą analizę kolizyjności, czasu cyklu oraz żywotności napędów. Opracowano program sterujący procesem pobierania elementów, wykorzystujący funkcje Interference Avoidance oraz 3D Blob Locator Tool systemu 3DV. Następnie aplikację odtworzono i przetestowano na rzeczywistym stanowisku (rys. 10.3).



Rysunek 10.1. Zamocowany model chwytaka i adapter na robocie w RoboGuide



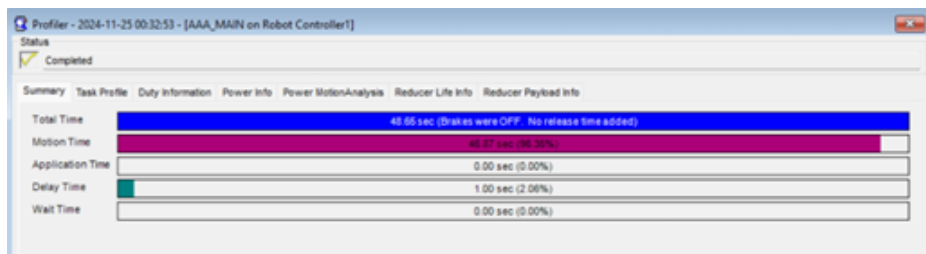
Rysunek 10.2. Podgląd stanowiska w środowisku RoboGuide



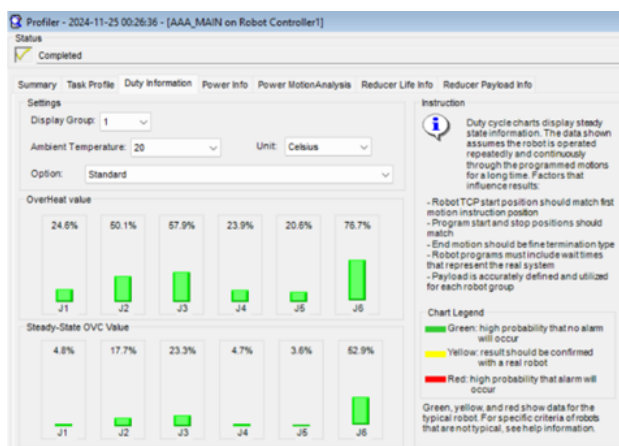
Rysunek 10.3. Przedstawienie stanowiska testowego

10.4. Uzyskane wyniki

Symulacja wykazała, że czas cyklu kompletacji elementu wyniósł 48,65 s, co stanowiło wynik lepszy o 23% od założonego limitu 60 s (rys. 10.4). Analiza pracy napędów robota wskazała, że maksymalne obciążenie silnika szóstej osi wyniosło 76,7%, co mieści się w dopuszczalnym zakresie (rys. 10.5). Przeprowadzone testy rzeczywiste potwierdziły prawidłowe działanie systemu wizyjnego 3DV/200 oraz chwytaka. System skutecznie rozpoznawał i pobierał elementy nawet przy zmiennym oświetleniu, zachowując wysoką powtarzalność działania (tabela 10.1).



Rysunek 10.4. Przedstawienie stanowiska testowego



Rysunek 10.5. Estymowane prawdopodobieństwo przegrzania się silników

Tabela 10.1. Wyniki przeprowadzonych testów dla flanszy

Ilość elementów w pojemniku [szt]	Ilość wykrytych elementów [szt]	Ilość poprawnie pobranych [szt]	Ilość pobranych nieprawidłowo [szt]	Skuteczność pobrań [%]	Skuteczność wykrywania [%]
Natężenie światła 68 [lux]					
100	80	75	5	93,8	80
Natężenie światła 414 [lux]					
100	75	68	7	90,1	75

10.5. Podsumowanie

W pracy zrealizowano pełny proces projektowy aplikacji bin picking z wykorzystaniem robota FANUC CRX-5iA i systemu wizyjnego 3DV/200. Zaprojektowany system został poprawnie skonfigurowany, przetestowany i zweryfikowany zarówno w środowisku symulacyjnym, jak i rzeczywistym. Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowane rozwiązania spełniają wymagania aplikacji i mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w procesach przemysłowych, takich jak automatyzacja magazynów czy montaż detali. Dalszy rozwój projektu może obejmować integrację z systemami sztucznej inteligencji oraz rozbudowę funkcji wizyjnych o uczenie adaptacyjne. Obecnie aplikacja została wdrożona w nowej siedzibie firmy FANUC Polska.

Model symulacyjny sieci trakcyjnej kolejowej 3 kV prądu stałego uwzględniający zmiany wartości napięcia występującego w sieci

inż. Kacper Kras
Elektrotechnika

dr inż. Marta Bątkiewicz-Pantuła
Katedra Energoelektryki

W pracy przedstawiono budowę i zasadę działania kolejowej sieci trakcyjnej. Na podstawie stworzonego modelu symulacyjnego sieci trakcyjnej w programie komputerowym ATP EMTP przeanalizowano wpływ trzech wariantów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej na poziom napięcia występującego w sieci przy symetrii napięcia zasilania z systemu elektroenergetycznego: zasilania jednostronnego, dwustronnego i dwustronnego z kabiną sekcyjną oraz wariant zasilania jednostronnego przy asymetrii napięcia zasilania. Zbadano wpływ obciążenia na wartość napięcia występującego w sieci trakcyjnej w zależności od różnych odległości pojazdu szynowego od podstacji trakcyjnej. Wykonano analizę zawartości wyższych harmoniczných w napięciu stałym w przypadku asymetrii napięcia zasilania podstacji trakcyjnej. Wyniki analiz wykazały, że najbardziej ekonomicznym wariantem zasilania sieci trakcyjnej jest wariant zasilania dwustronnego z kabiną sekcyjną, a najmniej ekonomicznym i wydajnym wariant zasilania jednostronnego. Ponadto wykazano, że asymetria napięcia zasilania powoduje pojawienie się harmoniczných niecharakterystycznych w przebiegu napięcia trakcyjnego oraz wpływa na wartość napięcia na pantografie pojazdu szynowego.

11.1. Cel i założenia

Celem pracy było zaprojektowanie i przeanalizowanie modelu sieci trakcyjnej. W pracy zasympulowano sieć trakcyjną wraz z podstacją trakcyjną, co pozwoliło przeanalizować zmiany napięcia sieci występujące w różnych odległościach od podstacji trakcyjnej w zależności od obciążenia przejeżdżającego elektrycznego zespołu trakcyjnego. Ponadto dokonano analizy wpływu asymetrii napięcia zasilania na napięcie stałe w sieci trakcyjnej oraz przedstawiono wady i zalety systemu 3 kV DC. Główne założenia projektowe to:

- studia literaturowe z zakresu systemu trakcji elektrycznej,

- ogólna charakterystyka wymagań systemu trakcji elektrycznej,
- wykonanie modelu symulacyjnego sieci trakcyjnej,
- weryfikacja praktyczna modelu symulacyjnego sieci trakcyjnej w zakresie analizy przebiegów prądów i napięć,
- redakcja i napisanie pracy dyplomowej.

11.2. Wstęp teoretyczny

W Polsce na terenie całego kraju na wszystkich zelektryfikowanych liniach kolejowych eksploatowany jest system 3 kV prądu stałego jako system zasilania kolejowej trakcji elektrycznej. System ten jest stosowany w kolejowej trakcji elektrycznej od początku elektryfikacji polskiej kolei [1]. System 3 kV DC jest wykorzystywany do zasilania sieci trakcyjnych także w innych krajach europejskich takich jak: Hiszpania czy Włochy [2, 3]. System prądu stałego o napięciu znamionowym 3 000 V charakteryzuje się dużymi stratami energii elektrycznej oraz stosunkowo dużymi spadkami napięcia w sieci jezdnej w porównaniu do napięcia trakcyjnego, co jest rezultatem przepływu przez sieć jezdnią dużego prądu obciążenia pobieranego przez pojazdy trakcyjne. Niskie napięcie zasilające sieć jezdnią w stosunku do mocy znamionowych pojazdów trakcyjnych w porównaniu z innymi systemami prądu przemiennego, powoduje przepływ przez sieć jezdnią prądu liczonego w kA, co przyczynia się do tego, że górna sieć jezdna musi być budowana z przewodów profilowanych i lin nośnych o dużych przekrojach odznaczających się wysoką konduktywnością. Duże obciążenia sieci trakcyjnej powodują oprócz zwiększania przekroju górnej sieci jezdnej, także zmniejszania odległości między podstacjami trakcyjnymi do nawet 10-12 km [1]. W systemie 3 kV DC występują ograniczenia mocy lokomotyw elektrycznych do około 6 MW i elektrycznych zespołów trakcyjnych (EZT) do 6-8 MW [?]. Największą zaletą systemu 3 kV DC w początkowym okresie stosowania i do lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku był układ napędowy prądu stałego pojazdów szynowych oraz prosty układ zasilania trakcji elektrycznej. Zaletą systemu 3 kV DC jest także symetria obciążenia zasilającego systemu elektroenergetycznego oraz możliwość przyłączania ze względu na mniejsze moce zainstalowane do sieci SN [1].

Sieć trakcyjna jest odpowiednio przystosowanym układem przewodów (jezdnych i lin nośnych), szyn kolejowych oraz urządzeń pomocniczych nośno-przewodzących i izolacyjnych, którego zadaniem jest dostarczenie energii elektrycznej prądu stałego do odbieraków prądu pojazdu szynowego wyposażonego w choperowy układ rozruchowy z silnikami szeregowymi prądu stałego lub falownikowy układ napędowy z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Kolejowa sieć trakcyjna zbudowana jest z dwóch zasadniczych części [3]:

- z górnej sieci jezdnej,
- z sieci powrotnej.

Sieć jezdna jest najbardziej skomplikowanym elementem sieci trakcyjnej, dlatego od jej parametrów i stanu technicznego zależy jej prawidłowa współpraca z pantografem pojazdu szynowego przy zakładanych prędkościach jazdy i pobieranej mocy [2]. Funkcjonowanie sieci powrotnej także jest istotne z uwagi na współpracę z urządzeniami sterowania ruchem kolejowym (SRK), prawidłowym odprowadzaniem prądu powrotnego do podstacji trakcyjnej i zjawiskiem prądów błędzących, czy ochroną przeciwporażeniową.

Kolejowa trakcja elektryczna jest zasilana z SEE liniami elektroenergetycznymi średniego napięcia 15, 20 kV (zasilanie dwustopniowe) lub wysokiego napięcia 110 kV (zasilanie jednostopniowe) przez podstacje trakcyjne rozmieszczone wzdłuż linii kolejowych lub w ich sąsiedztwie, w których zachodzi przekształcanie napięcia przemiennego np. 15 kV 50 Hz na napięcie wyprostowane tętniące 3 kV. Podstacja trakcyjna pełni rolę rozdzielni energii elektrycznej zasilającą odcinki sieci jezdnej, a także jest rozdzielnią dla obwodów nietrakcyjnych kolejowych. W podstacjach trakcyjnych w Polsce są stosowane do przekształcania napięcia AC/DC prostowniki 6-pulsowe lub 12-pulsowe [1, 5].

Zastosowanie prostownika 12-pulsowego do zasilania sieci trakcyjnej powoduje, że napięcie wyprostowane w sieci trakcyjnej odznacza się mniejszą zawartością harmonicznych charakterystycznych w przeciwieństwie do prostownika 6-pulsowego. Liczba pulsów prostownika wpływa także na zawartość wyższych harmonicznych prądu w prądzie fazowym w liniach zasilających uzwojenie pierwotne transformatora zespołu prostownikowego (równanie (11.2)). Prostownik 12-pulsowy eliminuje pewne harmoniczne charakterystyczne dla prostownika 6-pulsowego. Praca prostownika 12-pulsowego powoduje, że w napięciu trakcyjnym w sieci jezdnej pojawiają się harmoniczne napięcia o rzędach wynikających z zależności (11.1). W przypadku wystąpienia asymetrii napięcia w napięciu wyprostowanym pojawiają dodatkowo oprócz harmonicznych charakterystycznych, harmoniczne niecharakterystyczne o rzędach (równanie (11.3)).

$$u_h = 12k \quad (11.1)$$

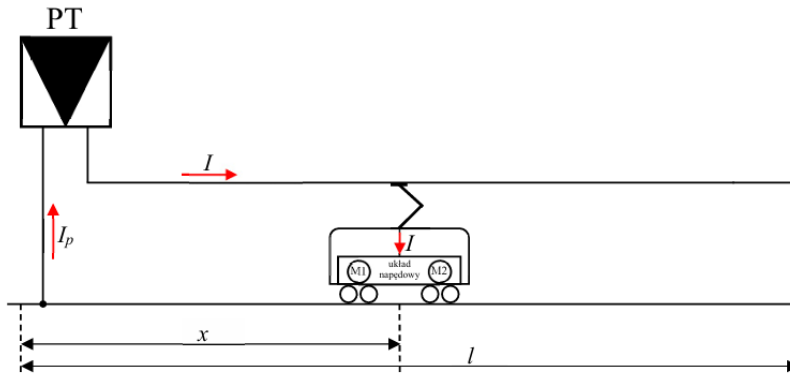
$$i_h = 12k \pm 1 \quad (11.2)$$

$$u_h = 2k \quad (11.3)$$

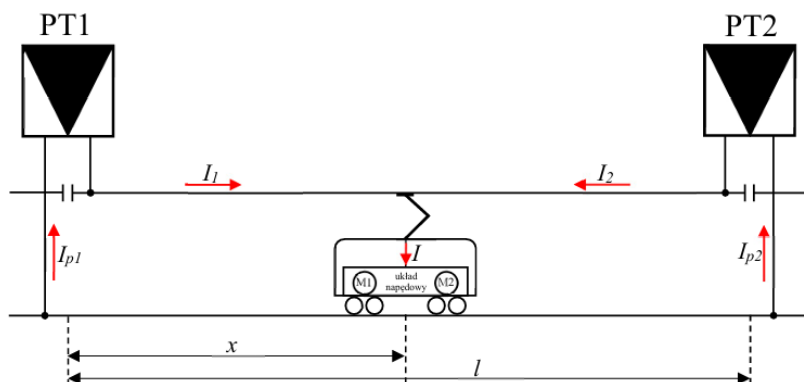
gdzie $k = 0, 1, 2, 3, \dots$,

W systemie zasilania 3 kV DC stosowane są układy zasilania sieci trakcyjnej [6]:

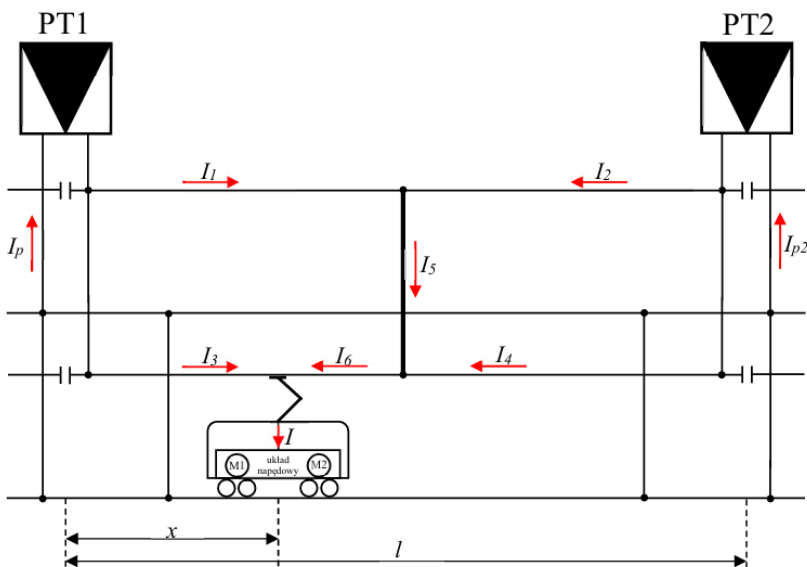
- zasilanie jednostronne (rys. 11.1),
- zasilanie dwustronne (rys. 11.2),
- zasilanie dwustronne z kabiną sekcijną (rys. 11.3).



Rysunek 11.1. Schemat układu zasilania jednostronnego sieci trakcyjnej



Rysunek 11.2. Schemat układu zasilania dwustronnego sieci trakcyjnej



Rysunek 11.3. Schemat układu zasilania dwustronnego z kabiną sekcijną sieci trakcyjnej

Układy zasilania sieci trakcyjnej mają wpływ na poziom napięcia w sieci trakcyjnej, spadki napięcia oraz na jej wydajność i przepustowość. Dopuszczalne napięcia trakcyjne zostały określone w normie PN-EN 50163 [7] i normie PN-EN 50388 [8]. Dopuszczalne napięcia mogące występować w sieci trakcyjnej zostały podane w tabeli ?? . Podane w tabeli ?? napięcie 2 700 V dotyczy linii kolejowych konwencjonalnych, natomiast napięcie 2 800 V linii kolejowych dużej prędkości.

Zasilanie jednostronne lub dwustronne bez kabiny sekcyjnej jest przeznaczone do zasilania sieci trakcyjnych na liniach jednotorowych, natomiast zasilanie dwustronne z kabiną sekcijną przeznaczone jest do zasilania sieci trakcyjnych na liniach z przynajmniej dwoma torami kolejowymi, gdyż tylko wtedy zamontowanie kabiny sekcyjnej jest uzasadnione. Zasilanie jednostronne znajduje zastosowanie na liniach odznaczających się małym obciążeniem i ruchem, a zasilanie dwustronne stosuje się tam, gdzie nie ma możliwo-

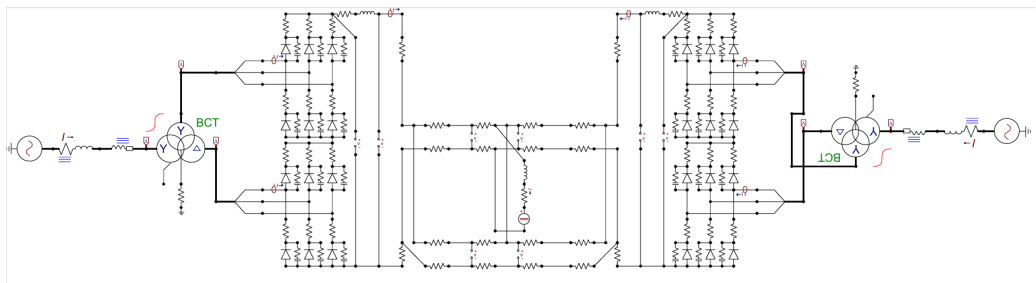
ści zamontowania kabiny sekcyjnej lub wymagają tego inne czynniki natury technicznej. Odległość między podstacjami przy zasilaniu dwustronnym bez kabiny sekcyjnej maleje. Montowanie kabin sekcyjnych na liniach dwutorowych i wielotorowych oprócz ograniczania spadków napięcia w sieci jezdnej i poprawy rozplywów prądów w sieci jezdnej, ma także za zadanie ułatwić ściślejszą lokalizację i selekcję zwarć, co zapobiega w przypadku wystąpienia zwarcia wyłączeniu całego odcinka sieci trakcyjnej między podstacjami PT1 i PT2. Kabina sekcyjna rozcina sieć jedną na dwa lub więcej niezależnych odcinków, co skutkuje np. wyłączeniem tylko tego odcinka, w którym wystąpiło zwarcie.

Tabela 11.1. Dopuszczalne napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC co do wartości [7, 8]

Najniższe napięcie nietrwałe U_{min2} [V]	Najniższe napięcie trwałe U_{min1} [V]	Najwyższe napięcie trwałe U_{max1} [V]	Najwyższe napięcie nietrwałe U_{max2} [V]	Najwyższe długotrwałe przebiegięcie U_{max3} [V]	Napięcie średnie użyteczne $U_{rednie\ uyteczne}$ [V]
2000	2000	3600	3900	5075	2700 2800

11.3. Projekt i wykonanie

Model symulacyjny sieci trakcyjnej 3 kV DC został przygotowany z wykorzystaniem programu komputerowego ATP EMTP (ang. *Alternative ElectroMagnetic Transients Program*) przeznaczonego do przeprowadzenia symulacji i analizy zjawisk elektromagnetycznych stanów przejściowych w sieciach elektroenergetycznych [9]. W programie ATP EMTP zostały stworzone trzy modele sieci trakcyjnej z różnymi wariantami zasilania. Do budowy modeli symulacyjnych zostały wykorzystane podstawowe komponenty dostępne w programie. Wariant modelu zasilania dwustronnego z kabiną sekcijną pokazano na rysunku 11.4.



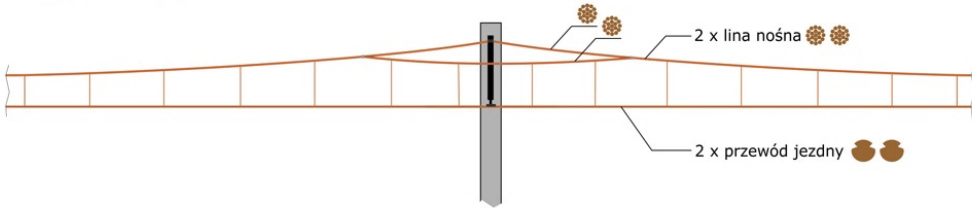
Rysunek 11.4. Model symulacyjny sieci trakcyjnej zasilanej dwustronnie z kabiną sekcijną

11.3.1. Założenia symulacyjne dla sieci trakcyjnej

Model symulacyjny sieci trakcyjnej zbudowany został w oparciu o górną sieć jezdnią zbudowaną w konfiguracji sieci łańcuchowej typu 2C120-2C (rys. 11.5) oraz sieć powrotną wykonaną z użyciem stalowych szyn kolejowych typu S60. Sieć jezdna typu 2C120-2C jest najczęściej spotykanym typem sieci na polskich szlakach kolejowych. Sieć jezdna składa się z dwóch przewodów jezdnych profilowanych Djp o przekroju każdego z nich 100 mm² wykonanych z miedzi CuETP oraz z dwóch lin nośnych wykonanych jako liny miedziane

gołe wielodrutowe o przekroju każdej z nich 120 mm^2 [2]. Model uwzględnia, że szyny kolejowe są w pełni odizolowane od gruntu w celu wyeliminowania prądów błędzących. Rezystancje wieszaków w modelu zostały pominięte. Dodatkowo zakłada się, że zarówno sieć jezdna, jak i powrotna są nowe i nie nastąpiło jeszcze jakiejkolwiek zużycie przewodów jezdnych i szyn kolejowych w wyniku mechanicznego ścierania przez nakładki pantografów i koła pojazdu szynowego. Analizowany odcinek sieci trakcyjnej miał długość 30 km. Najważniejsze parametry materiałowe przewodów jezdnych, lin nośnych i szyn kolejowych wykorzystanych do obliczeń zostały podane w tabeli 11.2.

www.transportszynowy.pl



Rysunek 11.5. Sieć trakcyjna łańcuchowa 2C120-2C [5]

Tabela 11.2. Parametry materiałowe do modelu symulacyjnego sieci trakcyjnej

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Rezystancja jednostkowa przewodu Dip 100 mm^2 CuETP	r_{Dip100}	$0,183 \text{ } \Omega/\text{km}$
Rezystancja jednostkowa liny nośnej 120 mm^2	r_{120}	$0,157 \text{ } \Omega/\text{km}$
Konduktywność właściwa stali	σ_{st}	$5,9 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$
Całkowita rezystancja jednostkowa sieci powrotnej	S_{sz}	7680 mm^2

Sieć jezdna typu 2C120-2C została przekształcona na potrzeby modelu symulacyjnego w jeden sumaryczny przekrój na podstawie wzorów (11.4)-(11.5), natomiast sieć powrotna na podstawie wzoru (11.6).

$$S_{sj} = (2S_{120}) + (2S_{Djp100}) \quad (11.4)$$

$$r_{sj} = \frac{0.5 \cdot r_{Djp100} \cdot 0.5 \cdot r_{120}}{0.5 \cdot r_{Djp100} + 0.5 \cdot r_{120}} \quad (11.5)$$

$$r_{sp} = \frac{1000}{2\sigma_{st}S_{SZ}} \quad (11.6)$$

gdzie:

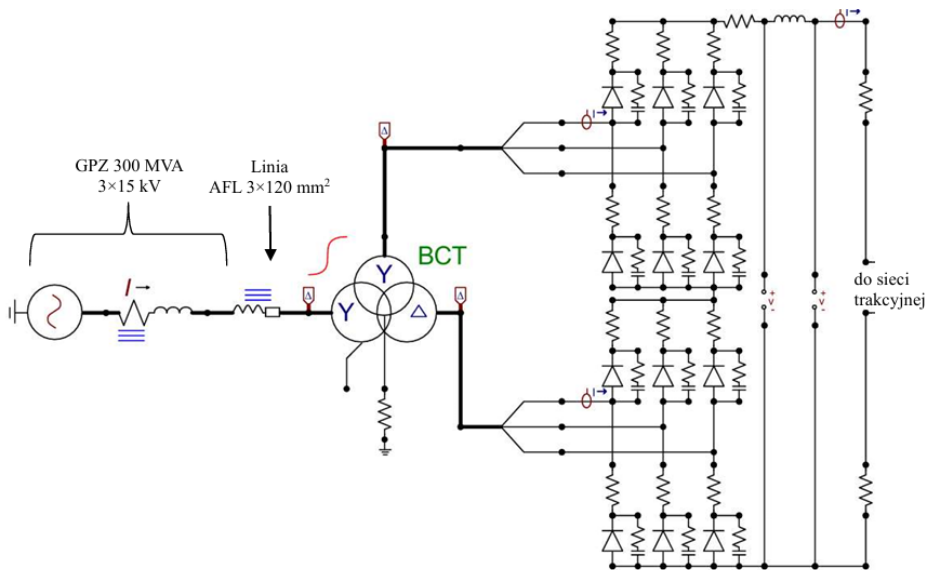
- S_{sj} – całkowity przekrój sieci jezdnej,
- S_{Djp100} – przekrój przewodu jezdnego,
- S_{120} – przekrój liny nośnej.

11.3.2. Założenia symulacyjne dla podstacji trakcyjnej

Podstacja trakcyjna jest zasilana z GPZ-u o mocy zwarciowej 300 MVA liniami elektroenergetycznymi średniego napięcia o napięciu $3 \times 15 \text{ kV}$. Linia SN jest wykonana jako

AFL 3×120 mm². W podstacji trakcyjnej jest zamontowany transformator trójzwojowy Yd11y0 o przekładni napięciowej 15/1,3/1,3 kV i mocy znamionowej 6,3/3,15/3,15 MVA. Uzwojenia wtórne d i y transformatora zasilają prostownik 12-pulsowy zbudowany z dwóch mostków 6-pulsowych połączonych szeregowo. Zespół prostownikowy jest wyposażony w powietrzny dławik katodowy o indukcyjności $L_{d1} = 4$ mH i rezystancji $R_{d1} = 0,01 \Omega$. Dławik katodowy stanowi jedyny podstawowy filtr wygładzający w podstacji trakcyjnej. Przyjęto rezystancję kabla zasilacza i kabla powrotnego dla 1 km $R_{kz} = R_{kp} = 0,0605 \Omega$. W modelu przyjęto także, że długość kabla zasilacza i kabla powrotnego liczona z podstacji trakcyjnej do wpięcia do sieci trakcyjnej wynosi tylko 1 km. Parametry GPZ-u i linii zasilającej SN zostały odpowiednio dobrane dla założonej mocy zwarciowej punkty zasilania i linii SN. Model zespołu prostownikowego w stanie jałowym pozwala uzyskać napięcie wyjściowe na zaciskach prostownika o wartości 3 511 V zgodnie z zależnością określoną wzorem (11.7). Model podstacji trakcyjnej został pokazany na rysunku 11.6.

$$U_{d0} = 2 \left(\sqrt{2} U_2 \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} \right) \quad (11.7)$$

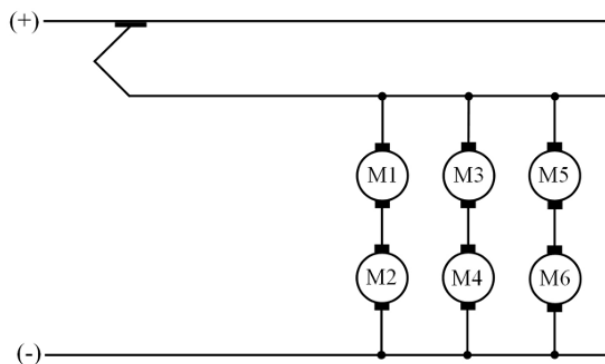


Rysunek 11.6. Model podstacji trakcyjnej wraz z GPZ i linią SN

11.3.3. Założenia symulacyjne dla pojazdu trakcyjnego

Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone z uwzględnieniem w modelu symulacyjnym sieci trakcyjnej 3 kV DC obciążenia typu RLE, które odzwierciedla pojazd trakcyjny wyposażony w napęd elektryczny składający się z sześciu silników szeregowych prądu stałego typu DK-103, które pracują w układzie równoległym, który stanowi ostatni etap rozruchu pojazdu szynowego (rys. 11.7). Praca pojazdu trakcyjnego w przypadku pojazdu z napędem szeregowym DC z wszystkimi sześcioma silnikami równocześnie oznacza pracę pojazdu szynowego z parametrami znamionowymi. W każdej z trzech gałęzi równoległych

pracują dwa silniki trakcyjne połączone szeregowo o parametrach znamionowych każdego z nich: $U_n = 1\,750\text{ V}$ i $I_n = 200\text{ A}$. W modelu układ sześciu silników trakcyjnych został zastąpiony jednym modelem zastępczym reprezentującym cały pojazd trakcyjny. Pojazd trakcyjny w analizie wszystkich wariantów zasilania pobiera z sieci trakcyjnej prąd obciążenia równy $1\,200\text{ A}$.



Rysunek 11.7. Konfiguracja połączeń silników trakcyjnych w pojeździe szynowym przy pracy znamionowej

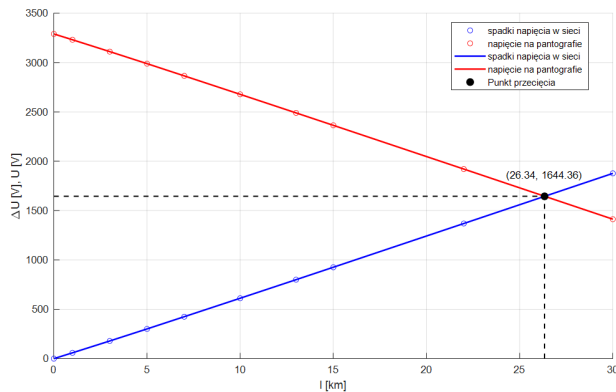
11.4. Uzyskane wyniki

Z przeprowadzonych symulacji można wywnioskować, że przy poborze prądu o wartości $1\,200\text{ A}$ z podstacji trakcyjnej przez pojazd szynowy poruszający się po linii jednotorowej z siecią trakcyjną typu 2C120-2C zasilanej jednostronnie z jednej podstacji długość odcinka takiej linii kolejowej może maksymalnie wynosić około $l = 19,87\text{ km}$, aby w sieci jezdnej napięcie trakcyjne było na poziomie minimalnym $2\,000\text{ V}$ określonym przez normę PN-EN 50163 [?]. Jeśli przyjąć, że napięcie w sieci nie może być mniejsze od $2\,800\text{ V}$ określające średnie napięcie użyteczne na pantografie, to wtedy odcinek takiej linii może być zasilany jednostronnie do około $l = 7,35\text{ km}$. Napięcie na pantografie pojazdu trakcyjnego maleje wraz ze oddalaniem się pojazdu od podstacji trakcyjnej, ponieważ wraz ze zwiększaniem odległości od PT rosną spadki napięcia (rys. 11.8). Największe napięcie w sieci trakcyjnej wystąpi w miejscu podłączenia kabla zasilacza do sieci jezdnej, natomiast najmniejsze na końcu sieci jezdnej. W odległości około $x = 26,34\text{ km}$ od PT, napięcie na odbieraku prądu pojazdu szynowego jest takie same jak spadek napięcia w tym punkcie (tj. około $1\,644\text{ V}$), co oznacza, że w tej odległości od PT połowa napięcia trakcyjnego (tj. połowa napięcia wyjściowego z prostownika pomniejszona o spadek napięcia na kablu zasilacza) pójdzie na pokrycie strat w sieci jezdnej, a druga połowa napięcia stanowić będzie napięcie użyteczne, które zasili pojazd trakcyjny (rys. 11.8). Po przekroczeniu odległości $26,34\text{ km}$ spadki napięcia przewyższą napięcie trakcyjne, co oznacza, że powyżej tej odległości, zasilanie sieci jest kompletnie nieopłacalne i niewydajne. W tabeli 11.3 podano zmierzone napięcia na pantografie pojazdu trakcyjnego w różnej odległości od podstacji trakcyjnej oraz obliczone spadki napięcia przy zasilaniu jednostronnym.

Tabela 11.3. Zmierzone napięcia na pantografie pojazdu trakcyjnego w różnej odległości od podstawy trakcyjnej oraz obliczone spadki napięcia przy zasilaniu jednostronnym

Odległość od podstacji trakcyjnej x [km]	Napięcie na pantografie pojazdu trakcyjnego U [V]	Spadki napięcia ΔU [V]	
0*	3290	0	
1	3231	59	
3	3111	179	
5	2989	301	* miejsce
7	2865	425	
10	2678	612	
13	2490	800	
15	2364	926	
22	1921	1369	
30	1413	1877	

podłączenia kabla zasilacza z podstawy trakcyjnej

**Rysunek 11.8.** Porównanie napięcia na pantografie pojazdu szynowego i spadków napięcia w sieci przy zasilaniu jednostronnym

Przy zasilaniu dwustronnym sieci trakcyjnej 2C120-2C i obciążeniu 1 200 A najmniejsze napięcie na pantografie pojazdu trakcyjnego wystąpi na 15 km, czyli na pośrodku odcinka międzypodstacyjnego i wyniesie 2 953 V (tab 11.4, rys. 11.9). Największy spadek napięcia w sieci wystąpi także na 15 km i wyniesie 361 V (tab 11.4, rys. 11.10). Rysunki 11.9 i 11.10 odnoszą się do sytuacji, kiedy obie podstacje trakcyjne PT1 i PT2 są obciążone równomiernie oraz parametry zasilania od strony prądu przemiennego i podstacje są identyczne. Napięcie w sieci trakcyjnej względem $l = 15$ km rozkłada się symetrycznie, co oznacza, że wraz z oddalaniem od punktu 15 km w stronę PT1 i PT2, napięcie na odbieraku prądu będzie rosło, a spadki napięcia w sieci będą malały (rys. 11.9 i 11.10).

Tabela 11.4. Zmierzone napięcia na pantografie pojazdu trakcyjnego w różnej odległości od podstawy trakcyjnej oraz obliczone spadki napięcia przy zasilaniu dwustronnym

Odległość od podstawy trakcyjnej x [km]	Napięcie na pantografie pojazdu trakcyjnego U [V]	Spadki napięcia ΔU [V]
0*	3314	0
1	3269	45
3	3187	127
5	3116	198
7	3058	256
10	2994	320
13	2959	355
15	2953	361
17	2959	355
20	2994	320
23	3058	256
25	3116	198
27	3187	127
29	3269	45
30*	3314	0

* miejsce podłączenia kabla zasilacza z podstawy trakcyjnej

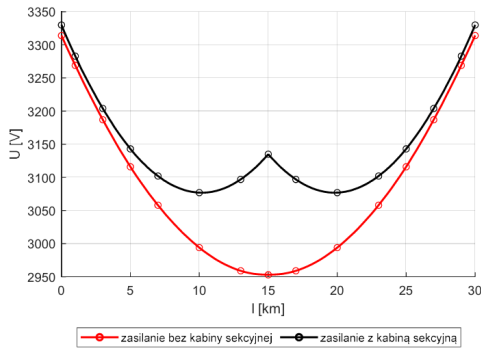
Przy zasilaniu dwustronnym z kabiną sekcijną linii dwutorowej z sieci typu 2C120-2C i obciążeniu 1 200 A, największe napięcie na odbieraku prądu wystąpi najszybciej pod podstawy trakcyjnej PT1 i PT2 (tj. podłączenia kabla zasilacza). Napięcie pośrodku odcinka międzypodstacyjnego (tj. 15 km) w porównaniu z zasilaniem dwustronnym bez kabiny sekcyjnej po zamontowaniu kabiny sekcyjnej podniosło się o 182 V (tab. 11.5, rys. 11.9).

Tabela 11.5. Zmierzone napięcia na pantografie pojazdu trakcyjnego w różnej odległości od podstawy trakcyjnej i obliczone spadki napięcia przy zasilaniu dwustronnym z kabiną sekcijną

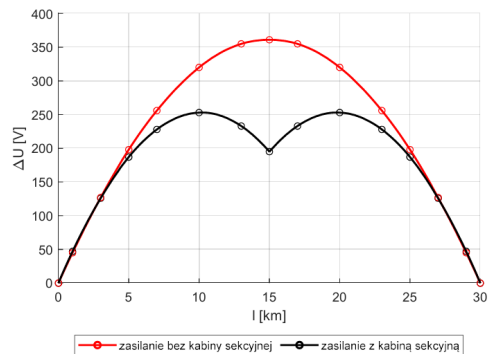
Odległość od podstawy trakcyjnej x [km]	Napięcie na pantografie pojazdu trakcyjnego U [V]	Spadki napięcia ΔU [V]
0*	3330	0
1	3283	47
3	3204	126
5	3143	187
7	3102	228
10	3077	253
13	3097	233
15	3135	195
17	3097	233
20	3077	253
23	3102	228
25	3143	187
27	3204	126
29	3283	47
30*	3330	0

* miejsce podłączenia kabla zasilacza z podstawy trakcyjnej

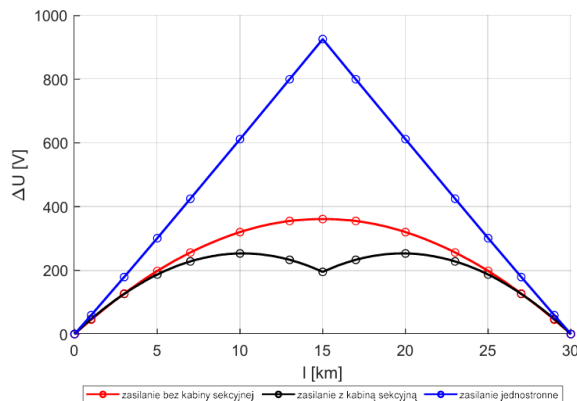
Charakterystyczną cechą zasilania sieci trakcyjnej z kabiną sekcijną jest przeniesienie punktu z najniższym napięciem występującym w sieci ze środka sieci na odległość $1/3$ symetrycznie od tego punktu, co oznacza w modelu odległość 10 km od PT1 i 10 km od PT2 (rys. 11.9). Zastosowanie kabiny sekcyjnej spowodowało podniesienie napięcia w całej sieci jezdnej, co jest skutkiem ograniczenia spadków napięcia na całej długości sieci jezdnej. Zamontowanie kabiny sekcyjnej w połowie odległości między podstacjami trakcyjnymi PT1 i PT2 pozwoliło zmniejszyć spadki napięcia w tym punkcie (tj. 15 km) przy takim samym obciążeniu sieci jezdnej o 46%. Największe spadki napięcia wystąpią w odległości $1/3$ od PT1 i PT2 i wyniosą po 253 V (tab 11.5, rys. 11.10).



Rysunek 11.9. Porównanie napięć na odbieraku prądu pojazdu szynowego w różnych odległościach od podstacji trakcyjnej w zależności od sposobu zasilania sieci trakcyjnej



Rysunek 11.10. Porównanie spadków napięć w sieci trakcyjnej w różnych odległościach od podstacji trakcyjnej w zależności od sposobu zasilania sieci trakcyjnej



Rysunek 11.11. Porównanie spadków napięć występujących w sieci trakcyjnej przy różnych sposobach zasilania sieci

Na rysunku 11.11 zostały zestawione ze sobą wykresy spadków napięcia dla trzech analizowanych wariantów zasilania sieci trakcyjnej. W celu lepszego zobrazowania linia kolejowa o długości $l = 30$ km zasilana jednostronnie została rozciąta w połowie długości

na dwa odcinki po 15 km, które są zasilane osobno z niezależnych podstacji trakcyjnych (na 15 km jest zamontowany w sieci jezdnej izolator sekcyjny, który rozdziela sieć na dwie części, podstacje trakcyjne nie współpracują ze sobą), co pozwoliło w ten sposób porównać wszystkie trzy warianty zasilania sieci trakcyjnej pod względem wartości napięcia trakcyjnego oraz spadków napięć występujących w sieci. Zastosowanie dwóch podstacji trakcyjnych PT1 i PT2 do zasilania odcinka sieci trakcyjnej o $l = 30$ km w zasilaniu dwustronnym w porównaniu do odcinka dwa razy po 15 km z dwóch niezależnych podstacji z izolatorem sekcyjnym, pozwoliło zmniejszyć spadki napięć o 61%. Zamontowanie kabiny sekcyjnej w połowie odcinka międzypodstacyjnego pozwoliło zmniejszyć spadki napięcia o 79% w porównaniu do zasilania linii jednotorowej z dwóch niezależnych podstacji trakcyjnych z izolatorem sekcyjnym oraz o 46% w porównaniu do zasilania dwustronnego bez kabiny sekcyjnej. Zestawienie uzyskanych wyników dla analizowanych wariantów zasilania sieci trakcyjnej zostały zestawione w tabeli 11.6.

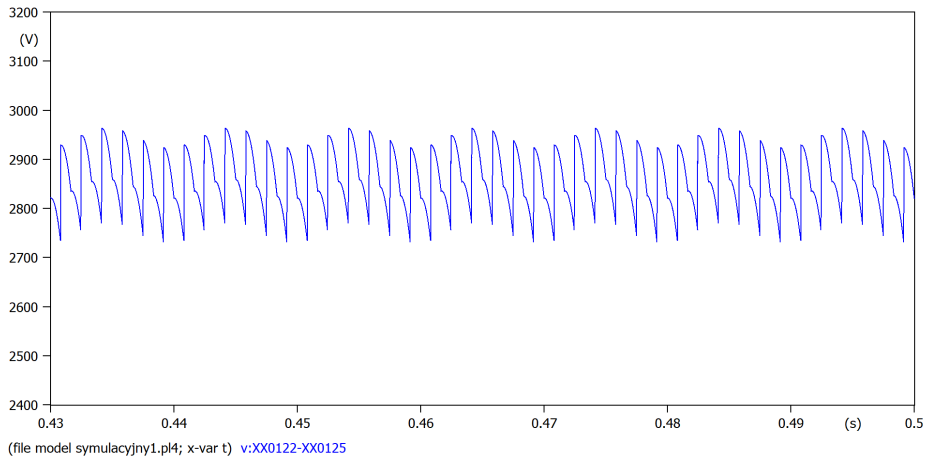
Jak wynika, z przeprowadzonych analiz powyższych wariantów zasilania sieci trakcyjnej, dwustronne zasilanie sieci trakcyjnej odcinka o takiej samej długości pozwala w bardzo dużym stopniu ograniczyć spadki napięcia, a tym samym straty energii w sieci jezdnej. Zamontowanie kabiny sekcyjnej dodatkowo jeszcze te spadki napięcia w sieci ogranicza, tym samym starty też są ograniczane. Jednostronne zasilanie sieci trakcyjnej może być stosowane, kiedy linie kolejowe nie przekraczają pewnych długości, które uniemożliwiają prawidłowe funkcjonowanie taboru elektrycznego.

Tabela 11.6. Zestawienie uzyskanych wyników dla analizowanych wariantów zasilania sieci trakcyjnej na podstawie rysunku 11.11 oraz tabel 11.2–11.4 dla punktu – 15 km

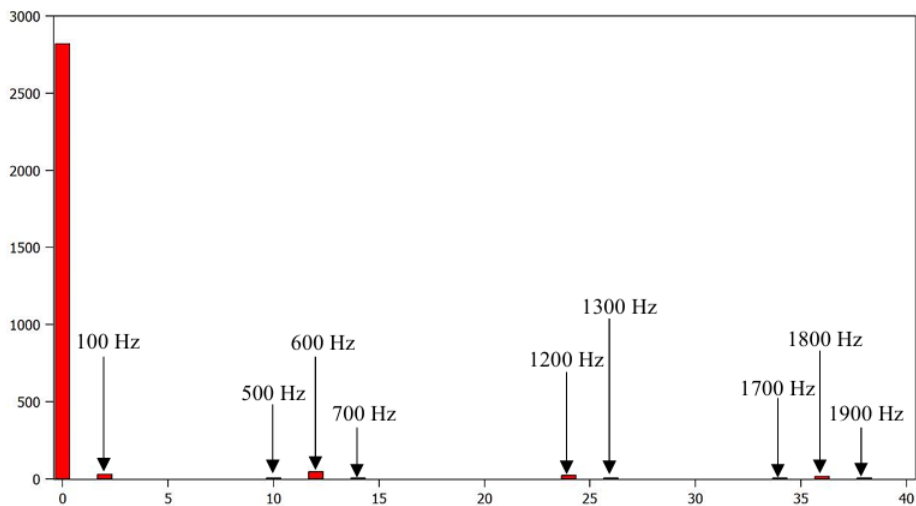
Porównanie wariantów zasilania	Napięcie [V]	Przyrost napięcia [%]	Spadek napięcia [V]	Zmniejszenie spadku napięcia [%]
Jednostronne z dwustronnym	+589	+25	-565	-61
Dwustronne z dwustronnym z kabiną sekcyjną	+182	+6,2	-166	-46
Jednostronne z dwustronnym z kabiną sekcyjną	+771	+33	-731	-79

W przypadku asymetrii napięcia zasilania po stronie SN i stałym obciążeniu prądowym, asymetria napięcia wpływa w różny sposób na wartość napięcia w sieci trakcyjnej. Przy różnym współczynniku asymetrii napięcia zasilania, napięcie w sieci trakcyjnej zwiększa się lub zmniejsza, co powoduje, że przy stałej prędkości pojazdu szynowego, prąd pobierany przez pojazd może być mniejszy lub większy przy zachowaniu stałej prędkości. Asymetria napięcia zasilania spowodowała pojawienie się w napięciu trakcyjnym oprócz harmonicznych charakterystycznych wynikających z pracy prostownika 12-pulsowego określonych wzorem (11.1) harmonicznych niecharakterystycznych o rzędach określonych zależnością (11.3) (rysunki 11.12 i 11.13). Wartości skuteczne poszczególnych harmonicznych niecharakterystycznych rosną wraz ze wzrostem współczynnika asymetrii

napięcia. Porównując wartości skuteczne napięcia danej harmonicznej niecharakterystycznej dla tego samego współczynnika asymetrii napięcia, to widać, że wartości harmonicznych różnią się w różny sposób od asymetrii napięcia zasilania. Zastosowanie dławika katodowego w podstacji trakcyjnej jako podstawowego filtra wygładzającego redukuje harmoniczne w ograniczonym stopniu.



Rysunek 11.12. Napięcie w sieci trakcyjnej w przypadku asymetrii napięcia zasilania



Rysunek 11.13. Spektrum harmonicznych w napięciu trakcyjnym przy asymetrii napięcia zasilania

11.5. Podsumowanie

Głównym celem pracy było zaprojektowanie i przeanalizowanie modelu symulacyjnego kolejowej sieci trakcyjnej 3 kV prądu stałego uwzględniającego zmiany wartości napięcia w sieci trakcyjnej. Omówiono system zasilania 3 kV DC oraz budowę sieci trakcyjnej.

Przeanalizowano typowe sposoby zasilania sieci trakcyjnej oraz ich wpływ na wartość napięcia występującego w sieci w zależności od odległości obciążenia od podstacji trakcyjnej. Ponadto zasymulowano i przeanalizowano wpływ asymetrycznego napięcia zasilającego podstację trakcyjną na napięcie stałe występujące w sieci trakcyjnej. Wykonano analizę wyższych harmonicznych prądów fazowych w linii zasilającej oraz napięcia stałego w sieci trakcyjnej. Podsumowując największe spadki napięcia występują w wariancie zasilania jednostronnego sieci trakcyjnej, natomiast najmniejsze w wariancie zasilania dwustronnego z kabiną sekcyjną. Najmniejsze straty energii spowodowane spadkami napięć występują w zasilaniu dwustronnym z kabiną sekcyjną, w którym kabiny sekcyjna przynosi wiele korzyści ekonomicznych. Zasilanie jednostronne sieci trakcyjnej jest najmniej ekonomicznym sposobem zasilania, gdyż spadki napięcia są największe, co z kolei przekłada się na niewielkie długości sieci trakcyjnej mogącej być zasilanej z jednej podstacji trakcyjnej. Praca podstacji trakcyjnej odkształca przebiegi prądów fazowych po stronie przemiennoprądowej, co z kolei powoduje powstawanie wyższych harmonicznych charakterystycznych w napięciu trakcyjnym po stronie stałoprądowej w przypadku symetrii zasilania. Asymetria napięcia zasilającego podstację trakcyjną powoduje powstawanie wyższych harmonicznych niecharakterystycznych w prądach fazowych po stronie pierwotnej oraz wtórnej transformatora prostownikowego, a także powstawanie harmonicznych niecharakterystycznych w napięciu stałym zasilającym sieć trakcyjną, a tym samym w napięciu zasilającym bezpośrednio pojazd szynowy. Asymetria napięcia zasilania w różny sposób wpływa na napięcie na pantografie pojazdu szynowego. Zastosowanie dławika katodowego w znaczny sposób wpływa na wartości skuteczne wyższych harmonicznych w napięciu stałym, ale ich w całości nie eliminuje. Dopuszczalne odległości między podstacjami są zależne od mocy pojazdu trakcyjnego, która będzie miała wpływ na poziom napięcia trakcyjnego. W warunkach rzeczywistych w Polsce zasilanie dwustronne najczęściej ma miejsce już przy dużo mniejszych odległościach między podstacjami niż 30 km, a kabiny sekcyjne w przypadku linii dwutorowych umieszcza się już co około 10 km w celu większej niezawodności sieci trakcyjnej. Napięcie w sieci trakcyjnej także jest zależne od zespołu prostownikowego w podstacji trakcyjnej i jego sprawności. W symulacjach napięcie wyjściowe prostownika w stanie jałowych wynosiło $U_{d0} = 3\,511\text{ V}$, a nie zawsze tak musi być i te napięcia w różnych podstacjach są inne np. na poziomie 3 300 V, 3 400 V itp., więc to też wpływa na wartości napięcia wstępującego w sieci. Rodzaj i typ zastosowanej sieci jezdnej mają istotny wpływ na spadki napięcia w sieci trakcyjnej. Różne konfiguracje sieci trakcyjnej będą powodowały, że napięcia w sieci będą niższe lub wyższe przy takim samym obciążeniu. Model symulacyjny był oparty na sieci trakcyjnej typu 2C120-2C, która charakteryzuje się dość niską rezystancją jednostkową, ale jeżeli sieć byłaby typu np. C120-2C lub C120-C rezystancja ta byłaby o wiele większa, co dyktowałoby ograniczenia prądowe oraz większe spadki napięć. Jest wiele istotnych aspektów dotyczących projektowania sieci trakcyjnych i ich zasilania, na które trzeba zwrócić uwagę, gdyż moc zwarciova czy wybór linii wysokiego napięcia lub średniego napięcia do zasilania podstacji trakcyjnej także będzie miał wpływ na wartości napięcia w sieci.

Bibliografia

- [1] Szelaǵ A., *Trakcja elektryczna – podstawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Polska, 2019.
- [2] Rojek A., *Tabor i Trakcja Kolejowa*, Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa, Polska, 2010.
- [3] Strojny J., *Trakcja elektryczna prądu stałego. Układy zasilania*, Zeszyt 27, SEP-COSiW, Listopad, Polska, 2009.
- [4] Karwowski K., *Energetyka Transportu Zelektryfikowanego. Poradnik inżyniera*, t. 3, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Polska, 2020.
- [5] Transport Szynowy. Dostępny online: <https://www.transportszynowy.pl/> (dostęp: 07-10-2024).
- [6] *Standardy Techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). Tom IV. Urządzenia Trakcji Elektrycznej / Elektroenergetyki Trakcyjnej*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa, 2009.
- [7] *PN-EN 50163: Zastosowania kolejowe – Napięcia zasilania systemów trakcyjnych*. PKN, Warszawa, 2006.
- [8] *PN-EN 50388: Zastosowania kolejowe – System zasilania i tabor – Warunki techniczne koordynacji między systemem zasilania (podstacja) i taborem w celu osiągnięcia interoperacyjności*. PKN, Warszawa, 2014.
- [9] Rosołowski E., *Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska, 2009.

Rejestrator zużycia energii elektrycznej

inż. Marcin Niezgodziński

Automatyka Przemysłowa

dr inż. Grzegorz Kosobudziński

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Projekt dotyczył stworzenia prostego i bezinwazyjnego systemu do monitorowania zużycia energii elektrycznej. Wykorzystano mikrokontroler Arduino Nano, który wraz z fototranzystorem rejestruje impulsy świetlne generowane przez standardowe liczniki energii. Dane zapisywane są na karcie SD i synchronizowane w czasie dzięki modułowi czasu rzeczywistego RTC. Opracowane oprogramowanie umożliwia analizę i wizualizację wyników w postaci wykresu i statystyki w komputerze, co pozwala użytkownikowi określić okresy zwiększonego zużycia energii. Dodatkowo zaprojektowano w technologii 3D obudowę projektu dla ułatwienia użytkowania. Rozwiązanie cechuje się dokładnością pomiaru, archiwizacją danych o zużyciu energii do kilku liczników i potencjałem do wykorzystania w gospodarstwie domowym lub małych firmach.

12.1. Cel i założenia

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie układu umożliwiającego rejestrację oraz analizę zużycia energii elektrycznej na podstawie impulsów diody wbudowanych w liczniki energii elektrycznej. Wykonany układ umożliwia użytkownikowi bieżący podgląd poboru mocy, zużycia energii oraz analizę dziennych statystyk. Główne cechy realizowanej pracy:

- wykorzystanie fototranzystora do detekcji impulsów świetlnych z diody LED licznika,
- zastosowanie mikrokontrolera Arduino Nano [1] jako jednostki sterującej,
- rejestracja danych na karcie SD w postaci plików tekstowych,
- synchronizacja pomiarów przy użyciu modułu RTC,
- zaprojektowanie i wykonanie obudowy w technologii druku 3D,
- opracowanie programu do analizy i wizualizacji zebranych danych.

12.2. Wstęp teoretyczny

Projekt składa się z kilku działów projektu, opomiarowanych liczników, elektronicznej i programowej stworzonego urządzenia.

12.2.1. Liczniki energii elektrycznej

Licznik energii elektrycznej to urządzenie, które rejestruje ilość energii elektrycznej zużytej przez odbiorcę. Działają one w oparciu o różne technologie, które ewoluowały z czasem, od liczników mechanicznych do elektronicznych.

Liczniki mechaniczne opierają się na zasadach elektromagnetyzmu, posiadają dwie cewki (prądową i napięciową) które wytwarzają pola wprawiające w ruch aluminiowy dysk.

Liczniki elektroniczne posiadają przekładniki prądowe lub rezystory bocznikowe i napięciowe takie jak dzielniki napięciowe, elektroniczne przetworniki zamieniają te pomiary na sygnały cyfrowe, które procesor przelicza na moc czynną, a następnie sumuje energię.

W licznikach elektronicznych wbudowana jest dioda LED, która generuje impulsy świetlne, zgodne z stałą impulsów na kilowatogodzinę, np. Stała licznika 1000imp/kWh odpowiada jednemu impulsowi dla 1Wh zużytej energii.

12.2.2. Czujnik optyczny

Fototranzystor jest to półprzewodnikowy element elektroniczny który reaguje na światło zmieniając je na sygnał elektryczny. Jest on bardziej czuły niż fotodioda, ponieważ wykorzystuje efekt wzmocnienia prądowego dzięki swojej budowie tranzystorowej.

W wykonanym układzie rejestratora fototranzystor zapewnia bezinwazyjny dostęp do informacji o aktualnym zużyciu energii. Umieszczany jest nad diodą LED licznika (Optyczne wyjście kontrolne licznika według nomenklatury normy EN-50470-1).

12.2.3. Środowisko programowe

Urządzenie zostało zaprogramowane w środowisku Arduino IDE [2], przeznaczone do tworzenia testowania i wdrażania oprogramowania dla mikrokontrolerów z rodziny Arduino. Umożliwia pisanie kodu w uproszczonym języku programowania opartym na C/C++.

Zawiera wbudowany edytor kodu, kompilator oraz narzędzia do komunikacji z płytą Arduino. Użytkownik ma możliwość korzystania z szerokiej gamy bibliotek rozszerzających jego funkcjonalność. Przykładowe biblioteki to, biblioteka SD do obsługi kart pamięci SD oraz microSD, biblioteka Wire pozwalająca na komunikację protokołem I2C z urządzeniami peryferyjnymi, takimi jak czujniki wyświetlacze czy układy RTC, biblioteka LiquidCrystalI2C, umożliwia sterowanie wyświetlaczami LCD podłączonymi za pomocą konwertera I2C, oraz biblioteka Rtc DS1302, która umożliwia komunikację z zegarem czasu rzeczywistego DS1302. Funkcje i cechy ATmega328P dostępne w Arduino

ATmega328P jako mikrokontroler w płytkach Arduino (np. Uno, Nano), oferuje szeroki zestaw funkcji, które są dostępne dzięki bibliotekom i środowisku Arduino IDE. W jego najważniejszych funkcjach wyróżnia się:

- wejścia i wyjścia (I/O), umożliwiające łączenie płytki za pomocą wyjść/wejść cyfrowych oraz analogowych, jak również nadanie sygnału PWM,
- zegary i czas, Atmega działa na wewnętrznym oscylatorze 8MHz, w arduino Nano zostały zastosowane oscylatory kwarcowe 16MHz, mikrokontroler posiada również trzy timery,
- posiada protokoły komunikacji, UART używanej do komunikacji USB, I2C korzystający z dwóch linii danych, SPI wykorzystujący cztery linie danych, pozwalając na podpięcie kilku urządzeń do jednej magistrali SPI, oraz komunikacja analogowa która polega na zamianie sygnału analogowego (0-5 V) na cyfrowy mieszczącego się w zakresie od 0 do 1023,
- wbudowane odczytywanie przerw pozwala na zatrzymaniu aktualnie wykonywanego kodu na rzecz obsługi operacji zdefiniowanej przez przerwanie, oraz powrotu do głównego kodu w miejscu gdzie został przerwany.
- dodatkowe moduły SD oraz RTC, rozszerzają podstawową funkcjonalność mikrokontrolera o zapis i odczyt dużych ilości danych, oraz śledzenia aktualnego czasu nawet po odłączeniu głównego zasilani mikrokontrolera.

12.2.4. Środowisko Python

Python to wszechstronne środowisko programistyczne, które cechuje się prostą i czytelną składnią, co sprawia, że jest łatwy do nauki oraz stosowania w różnych dziedzinach. Python wspiera różne paradygmaty programowania, takie jak programowanie proceduralne, obiektowe i funkcyjne [3].

Wypasowany jest w bogatą bibliotekę standardową oraz dostępność wielu dodatkowych bibliotek, które umożliwiają realizację zadań związanych z analizą danych (biblioteka pandas), wizualizacją (biblioteka Matplotlib), obsługą interfejsów graficznych (biblioteka Tkinter) oraz operacjami na plikach (biblioteka Datetime).

12.3. Projekt i wykonanie

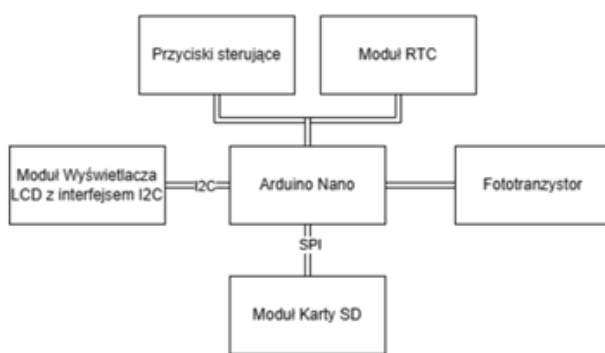
Do stworzenia projektu zostały wyznaczone wymagania projektowe, które naznaczyły kierunek prac, są to:

- pomiar zużycia energii elektrycznej, rejestrowanie impulsów świetlnych generowanych przez licznik energii,
- zapis danych pomiarowych takich jak liczba impulsów, czas ich rejestracji oraz konfiguracja licznika,
- lokalne wyświetlanie chwilowego poboru mocy,
- konfiguracja systemu, przez dopasowanie urządzenia do mierzonego licznika energii,
- analiza uzyskanych danych.

12.3.1. Dobór komponentów

Do spełnienia tych wymagań zostały dobrane komponenty i moduły, które rozwiązują wyznaczone wymagania projektowe:

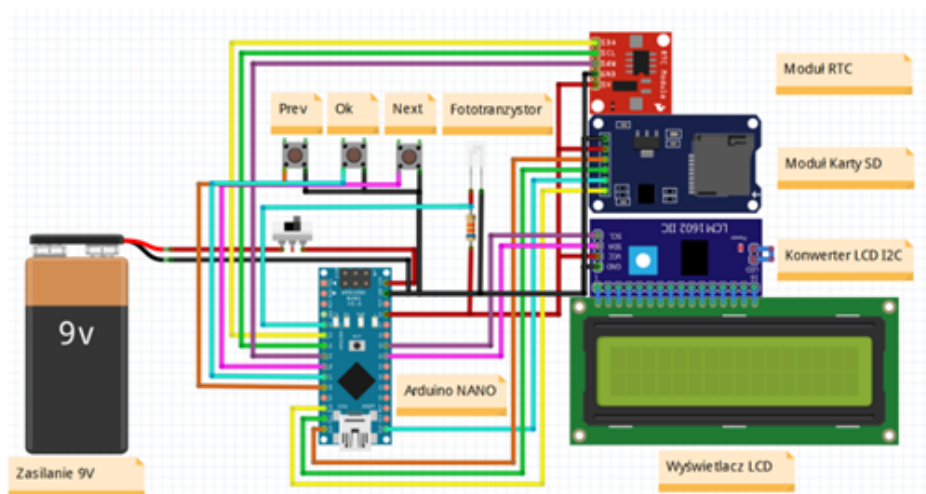
- mikrokontroler Arduino Nano: główna jednostka sterująca, odpowiadająca za obsługę fototranzystora, modułu RTC, karty SD i wyświetlacza LCD,
- moduł RTC (Real-Time Clock): zapewniający dokładną synchronizację czasową pomiarów, co pozwala na precyzyjne określenie momentu zarejestrowania impulsów,
- fototranzystor: czujnik służący do wykrywania impulsów świetlnych generowanych przez diodę LED licznika energii,
- karta SD: nośnik danych służący do gromadzenia wyników pomiarów oraz przechowywania programu do analizy danych,
- wyświetlacz LCD 16x2 z interfejsem I2C: umożliwiający prezentację danych, takich jak chwilowe zużycie mocy oraz menu konfiguracji systemu, w formie tekstowej,
- obudowa wydrukowana w technologii 3D: chroniąca elementy systemu oraz ułatwiająca montaż w pobliżu licznika energii elektrycznej.



Rysunek 12.1. Schemat blokowy układu rejestratora energii

12.3.2. Projekt układu elektronicznego

Użyte moduły i komponenty korzystają z różnych protokołów komunikacyjnych z jednostką sterującą, którą jest Arduino Nano,.



Rysunek 12.2. Schemat połączeniowy układu

Podstawowym zasilaniem jest bateria 9 V, która jest powszechnie dostępna i łatwa do wymiany, moduł RTC oraz wyświetlacz połączony z konwerterem łączy się po protokole I2C, moduł karty SD korzysta z protokołu SPI. Najważniejszym elementem układu jest fototranzystor działający w układzie dzielnika napięcia z rezystorem pozwalając na łatwe przetworzenie sygnału świetlnego na cyfrowy. Dodatkowo zostały dołożone przyciski służące do poruszania się po menu.

12.3.3. Oprogramowanie modułu Arduino

W celu łatwej i efektywnej implementacji oprogramowania w systemie mikroprocesorowym wykorzystano platformę Arduino. Skorzystano z gotowych bibliotek programowych do obsługi: wyświetlacza LCD, modułu zegara czasu rzeczywistego, karty SD. Wykorzystując taką platformę sprzętowo programistyczną można było skupić się na kluczowym zagadnieniu jakim jest konwersja impulsów z czujnika światła zamontowanego na diodzie LED licznika energii elektrycznej na wartość mocy czynnej i energii.



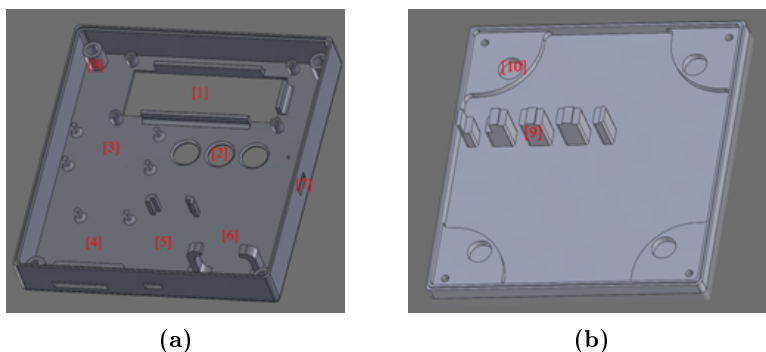
Rysunek 12.3. Schemat blokowy programu zaimplementowanego w module Arduino

Każde uruchomienie układu rozpoczyna inicjalizację, po jej zakończeniu użytkownik ma możliwość ustawić układ do własnego zastosowania, czyli stałej impulsów licznika na kWh. W celu ułatwienia konfiguracji pomiarów dodana została opcja zmiany numeru

licznika, aby można było wykonywać pomiary na kilku licznikach, nie nadpisywać danych, oraz mieć dostęp do każdego opomiarowanego licznika. Po wybraniu konfiguracji rejestrator od razu przechodzi w tryb pomiaru, liczenie impulsów jest wykonywane przez przerwania, dzięki czemu każdy impuls zostanie zliczony bez znaczenia w którym momencie kodu aktualnie znajduje się program.

12.3.4. Projekt obudowy rejestratora

Obudowa została wykonana przy użyciu drukarki 3D typu FDM (Fused Deposition Modeling). Technologia FDM polega na topieniu materiału termoplastycznego w formie filamentu za pomocą grzałki w głowicy drukarki. Roztopiony materiał jest wyciskany przez dyszę, tworząc kolejne warstwy, które łączą się i tworzą końcowy model. Ruchy głowicy oraz platformy są sterowane przez silniki krokowe zgodnie z g-kodem przygotowanym dla danego projektu.



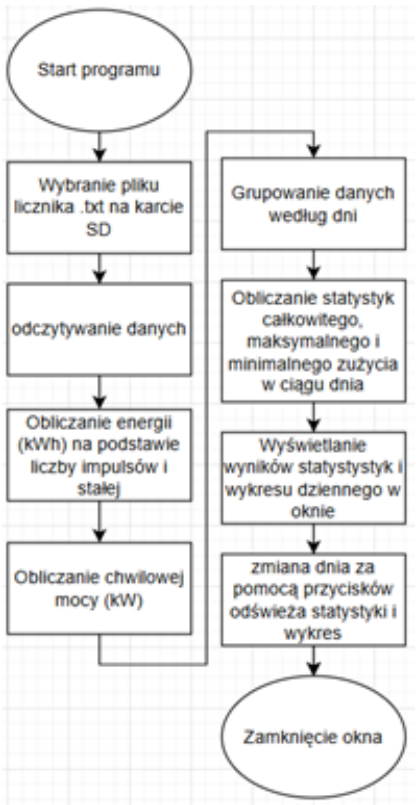
Rysunek 12.4. Obudowa rejestratora energii: (a) przód obudowy, (b) tył obudowy

Wszystkie moduły i komponenty zostały dokładnie zmierzone tak aby zmieścić je na jak najmniejszej powierzchni. Oznaczenia zastosowane na rysunku 12.4:

- [1] Otwór na wyświetlacz LCD wraz z podstawkami oraz otworami montażowymi do śrub.
- [2] Otwory na przyciski „Prev”, „Ok”, „Next” do poruszania się po menu.
- [3] Miejsce na moduł RTC wraz ze słupkami montażowymi.
- [4] Miejsce na moduł karty SD wraz z otworem umożliwiającym łatwy eksport danych.
- [5] Miejsce na mikrokontroler Arduino Nano z ogranicznikami oraz otworem dla przewodu Micro USB do aktualizacji programu.
- [6] Ramiona na baterię 9V.
- [7] Otwór na przełącznik suwakowy do włączania/wyłączania zasilania mikrokontrolera.
- [8] Otwory przeznaczone do montażu gwintu techniką HotInsert.
- [9] Słupki do zamocowania przycisków.
- [10] Otwory do wklejenia magnesów umożliwiających montaż urządzenia w metalowej rozdzielnicy przy liczniku energii elektrycznej.

12.3.5. Program analizy danych

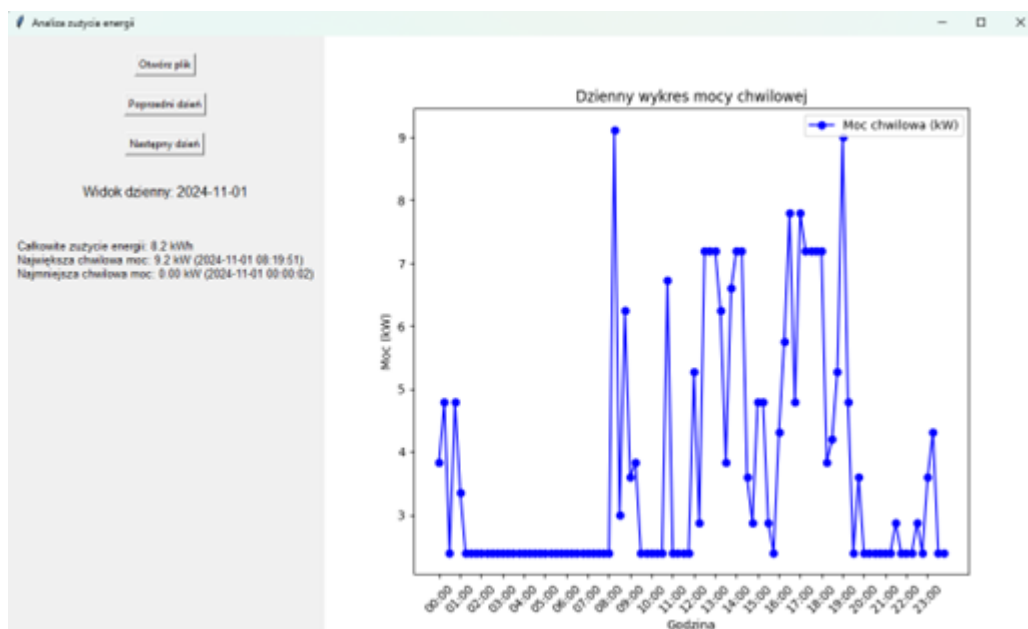
Program w Pythonie służy do analizy danych zebranych przez układ Arduino. Dane dotyczą zużycia energii elektrycznej i są zapisane w plikach tekstowych na karcie SD w formacie CSV (Czas, Liczba impulsów, Stała impulsów na kWh). Program w Pythonie odczytuje te dane, przeprowadza obliczenia i wyświetla wyniki oraz wykresy w graficznym interfejsie użytkownika (GUI). Schemat blokowy przedstawia rysunek 12.5.



Rysunek 12.5. Schemat blokowy programu do analizy danych zapisanych przez rejestrator

 LICZNIK6	14.12.2024 23:08	Dokument tekstowy	59 KB
 LICZNIK5	28.11.2024 14:11	Dokument tekstowy	6 835 KB
 LICZNIK4	01.01.2000 01:00	Dokument tekstowy	12 KB
 LICZNIK3	01.01.2000 01:00	Dokument tekstowy	4 KB
 LICZNIK2	01.01.2000 01:00	Dokument tekstowy	10 KB
 LICZNIK1	01.01.2000 01:00	Dokument tekstowy	67 KB
 AnalizaDniowa	14.12.2024 22:58	Python File	7 KB

Rysunek 12.6. Przykładowa zawartość karty SD podczas wyboru pliku txt



Rysunek 12.7. Przykładowa „Analiza Dniowa” z wybranego licznika

12.4. Testy rejestratora

Układ został poddany trzem testom: poprawności odczytów impulsów, zapisu i odczytu danych oraz testowi poprawności działania programu w Pythonie (analiza i wizualizacja danych).

Test 1. Poprawność obliczania mocy i energii

Scenariusz testowy:

1. Podłączenie układu pomiarowego do komputera z programem Arduino IDE.
2. Wprowadzenie stałej impulsów licznika: 1500 imp/kWh.
3. Włączenie układu do symulacji licznika energii elektrycznej (ustawiono częstotliwość dającą moc 35 kW).
4. Obserwacja wyników wysyłanych na *Serial Monitorze*.
5. Porównanie wyników z oczekiwanymi.

Dane z licznika:

Czas: 2024-12-14 14:30:35; Impulsy: 13110; Stała (imp/kWh): 1500

Energia została obliczona z zależności:

$$E [\text{kWh}] = \frac{\text{Impulsy}}{\text{Staa impulsów na kWh}} \quad (12.1)$$

Moc natomiast według wzoru:

$$P [\text{kW}] = \frac{E [\text{kWh}]}{t [\text{h}]} \quad (12.2)$$

Dla podanych danych:

$$E = \frac{13110}{1500} = 8.74 \text{ kWh}$$

$$P = \frac{8.7507}{0.25 \text{ h}} = 34.96 \text{ kW}$$

Uzyskane wyniki są zbliżone do oczekiwanej wartości 35 kW.

Test 2. Poprawność zapisu danych na kartę SD

Celem testu była weryfikacja poprawnego zapisu danych na kartę SD oraz możliwości ich późniejszego odczytu.

Scenariusz testowy:

1. Uruchomienie układu.
2. Ustawienie stałej impulsów oraz numeru licznika.
3. Wykonanie pomiaru i zapis na kartę SD.
4. Wyłączenie układu, wyjęcie karty SD i umieszczenie jej w komputerze.
5. Sprawdzenie obecności zapisanych danych na karcie SD.

Wykorzystano układ z poprzedniego testu. Po zakończeniu testu na karcie SD znajdowały się dane:

```
2024-12-14 19:12:42,13118,1500
2024-12-14 19:27:42,13117,1500
2024-12-14 19:42:42,13110,1500
2024-12-14 19:57:42,13122,1500
2024-12-14 20:12:42,13118,1500
```

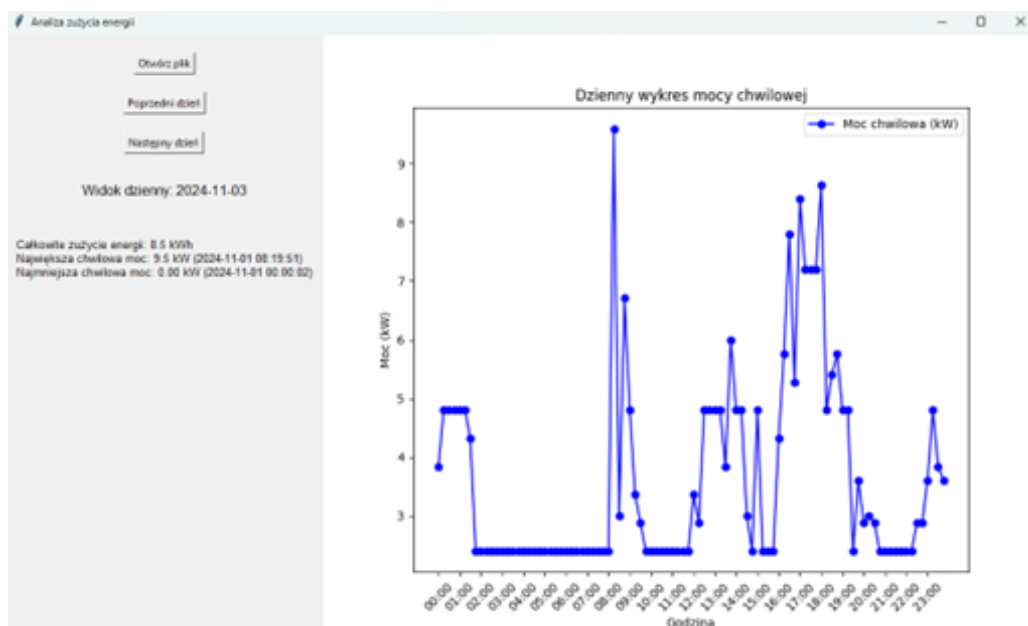
Układ poprawnie zapisuje zmierzone dane na kartę SD w prawidłowym formacie.

Test 3. Poprawność przetwarzania zarejestrowanych danych

Celem testu było sprawdzenie poprawności działania programu do analizy danych oraz poprawności generowanych statystyk i wykresów.

Scenariusz testowy:

1. Odczytanie pliku z karty SD.
2. Przeprowadzenie analizy danych.
3. Weryfikacja poprawności prezentowanych statystyk: zużycia energii, maksymalnej i minimalnej mocy.
4. Weryfikacja poprawności wykresu dziennego (zgodność godzin pomiaru z zapisanymi danymi).
5. Test funkcji nawigacji po danych dziennych.



Rysunek 12.8. Przykładowy wykres dzienny

Po przeprowadzeniu testu statystyki zgadzały się z największym chwilowym zużyciem w ciągu doby, a wygenerowany wykres poprawnie przedstawiał dzienne zużycie energii.

12.5. Podsumowanie

Wykonany rejestrator działa zgodnie z założonymi celami, poprawnie zlicza impulsy, generuje dane o zużyciu energii i zapisuje je na karcie SD w formacie gotowym do analizy. Charakteryzuje się również stabilnością działania przy długotrwałej pracy. Program napisany w środowisku Python ułatwia analizę i prezentację danych na komputerze - wyświetlając statystyki oraz wizualizuje zużycie energii. Układ dostarcza użytkownikowi dane o zużyciu energii na których podstawie można rozsądnie decydować o zmniejszeniu zużycia w naszym obiekcie. Największym atutem jest bezinwazyjny montaż dzięki któremu nie narażamy się na kary ze strony dostawcy energii za ingerencję w układ rozliczeniowo - pomiarowy

Bibliografia

- [1] Arduino Nano, *Technical Specification and Pinout*, Arduino.cc. Dostępny online: <https://www.arduino.cc> (dostęp: 07-10-2024).
- [2] Arduino IDE, *Integrated Development Environment for Arduino*, wersja 1.8.19. Dostępny online: <https://www.arduino.cc/en/software> (dostęp: 07-10-2024).
- [3] Python, Python Software Foundation, wersja 3.11. Dostępny online: <https://www.python.org> (dostęp: 07-10-2024).
- [4] *EN-50470-1: Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego), Część 1: Wymagania ogólne, badania i warunki badań. Urządzenia do pomiarów (klas A, B i C)*, 2006.

Analiza wpływu fotowoltaicznych instalacji prosumenckich na warunki pracy sieci dystrybucyjnej

mgr inż. Filip Roczyński
Elektrotechnika

dr inż. Robert Łukomski
Katedra Energoelektryki

W pracy poruszono problematykę oddziaływania mikroinstalacji odnawialnych źródeł energii (OZE) na warunki pracy sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia (nN), w szczególności na poziomy napięcie i przepływy mocy. Przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem i symulacją pracy w sieci w stanie ustalonym w warunkach zmieniającej się generacji fotowoltaicznej związanymi z analizą wpływu prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych (PV) na warunki napięciowe i przepływy mocy w wybranym, fragmencie rzeczywistej wiejskiej sieci dystrybucyjnej nN. Problem ten jest szczególnie istotny ze względu na rosnącą liczbę instalacji fotowoltaicznych współpracujących z siecią, co może prowadzić do niekorzystnych zmian parametrów jakościowych energii elektrycznej, w szczególności możliwości przekroczenia dopuszczalnych wartości napięcia i warunków pracy transformatora zasilającego.

Cel i założenia

Za cel pracy przyjęto przeprowadzenie modelowania, symulacji oraz analizy wpływu prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych na wartości napięcie i przepływy mocy (prądów) w stanach ustalonych dla wybranej sieci dystrybucyjnej nN. Realizacja zadania analizy wpływu fotowoltaicznych instalacji prosumenckich na warunki pracy sieci dystrybucyjnej obejmowała następujące etapy:

- określenie charakterystycznych cech technicznych mikroinstalacji fotowoltaicznych,
- przegląd przepisów prawnych, norm i zaleceń dotyczących współpracy instalacji fotowoltaicznych z siecią elektroenergetyczną,
- opracowanie modelu wybranej terenowej sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia z przyłączonymi mikroinstalacjami fotowoltaicznymi do obliczeń rozplądów mocy; przeprowadzenie symulacji pracy sieci w programie OpenDSS w zakresie wpływu generacji z mikroinstalacji na warunki napięciowe w sieci,

- weryfikacja i analiza wyników, wnioski i propozycje rozwiązań służących poprawie profilu napięciowego w sieci.

13.1. Wstęp teoretyczny

Elektroenergetyka przechodzi proces głębokiej transformacji przejawiający się m. in. wzrastającym udziałem odnawialnych źródeł energii (OZE) zarówno w mocach wytwórczych, jak i produkcji energii. W ciągu ostatnich kilku lat bardzo szybko przyrastała liczba prosumenckich mikroinstalacji OZE przyłączanych do sieci nN. W sieciach tych, planowanych i realizowanych pierwotnie tylko do zasilania odbiorców, pojawiło się szereg problemów związanych z oddziaływaniem mikroinstalacji. Z obserwacji m. in. operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD) wynika, że w przypadku wysokiego stopnia „nasylenia” sieci mikroinstalacjami (porównywalna lub większa potencjalna generacja w stosunku do zapotrzebowania), może dochodzić do pogorszenia parametrów jakości energii elektrycznej i zakłóceń pracy, w szczególności przekraczania dopuszczalnych poziomów napięć i zmian kierunków przepływów mocy.

13.1.1. Dynamika rozwoju fotowoltaicznych mikroinstalacji prosumenckich

Według aktualnego stanu prawnego, prosumentem energii odnawialnej nazywa się „odbiorcę końcowego wytwarzającego energię elektryczną wyłącznie z odnawialnych źródeł energii na własne potrzeby w mikroinstalacji” [1]. Z kolei mikroinstalację w rozumieniu ww. ustawy, stanowi „instalacja odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 50 kW, przyłączoną do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV albo o mocy osiągalnej cieplnej w skojarzeniu nie większej niż 150 kW, w której łączna moc zainstalowana elektryczna jest nie większa niż 50 kW” [1].

Podstawowymi elementami składowymi mikroinstalacji PV są moduły (panele) i inwerter. Energia elektryczna jest generowana przez efekt fotowoltaiczny, polegający na powstawaniu siły elektromotorycznej w złączu półprzewodnikowym pod wpływem promieniowania słonecznego. Falownik, zwany również inwerterem PV, jest urządzeniem energoelektronicznym, przekształcającym prąd stały (DC) generowany przez moduły PV na prąd przemienny sieci (AC). Ze względu na sposób pracy, inwertery dzielimy na pracujące w trybie sieciowym (on-grid), wyspowym (off-grid) lub hybrydowy (łączy oba wymienione tryby) [7].

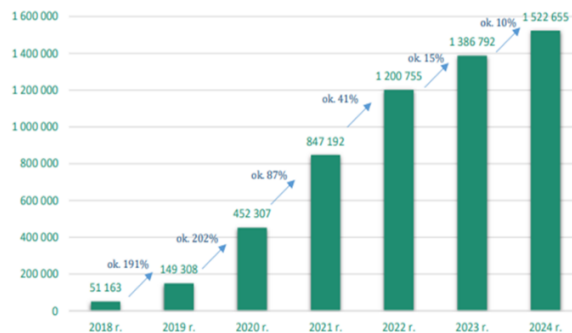
Moc zainstalowana źródeł (w tym OZE) w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym na koniec 2024 roku wynosiła 72,2 GW, z czego 46,5% tej mocy stanowią elektrownie węglowe, natomiast udział OZE wynosił 43,9%. Od 2018 roku zauważalny jest dynamiczny (ponad czterokrotny na przestrzeni 10 lat) wzrost udziału mocy zainstalowanej pochodzącej ze źródeł odnawialnych, czego główną przyczyną jest popularność instalacji PV, których moc zainstalowana wynosi ok. 16,9 GW. Elektrownie wiatrowe stanowią ok. 15% udziału (9,9 GW) w krajowych miksie mocy zainstalowanej, co stanowi ok. 1/3 udziału w całej energetyce opartej o źródła odnawialne [3]. Średni roczny udział OZE w całkowitej

produkcji energii elektrycznej, postępując za wzrostem mocy zainstalowanej, z roku na rok zwiększa się - w rekordowym maju 2024 r. generacja ze źródeł odnawialnych stanowiła 35,9% całkowitej produkcji (rysunek 13.1).

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
STY	13.9%	11.9%	16.7%	15%	18.8%	14.2%	22.8%	23.5%	27.4%	26.3%
LUT	17.8%	13.9%	9.7%	17.1%	22.4%	15.9%	26.5%	25.1%	29.4%	20%
MAR	13.1%	14.8%	11.8%	19.2%	18.6%	17.9%	17.8%	28%	30.1%	28.8%
KWI	13.7%	16.3%	16%	15.7%	19.5%	19.6%	22.9%	27.7%	32.7%	
MAJ	13.2%	13%	11.9%	13.6%	18.9%	21.1%	23.8%	30.7%	35.9%	
CZE	11.4%	13.9%	11.1%	12.3%	16.2%	15.5%	21.6%	29%	31.5%	
LIP	12.2%	10.1%	9.8%	12.8%	15.7%	14%	23.2%	30.7%	31.7%	
SIE	11.3%	11.3%	9.8%	10.4%	14.3%	16.8%	18.1%	28.1%	30.7%	
WRZ	10.3%	13.4%	11.8%	14.9%	15.1%	16.2%	19.1%	27.7%	34.2%	
PAŹ	14.3%	17.4%	15.1%	14.4%	17.4%	20.5%	22.2%	28.7%	28.4%	
LIS	14.7%	15%	12.2%	16.1%	16.5%	17.1%	15.7%	23.7%	23.7%	
GRU	16.7%	14.9%	14.7%	18.9%	18.3%	16.6%	19.3%	27%	24.2%	
rok	13.6%	13.8%	12.5%	15%	17.6%	17.1%	21.1%	27.5%	30%	25%

Rysunek 13.1. Procentowy udział OZE w całkowitej produkcji energii elektrycznej w KSE [4]

W strukturze prosumentów, zdecydowanie dominują instalacje fotowoltaiczne (99,97% wszystkich instalacji prosumenckich). Na podstawie danych URE, z końcem 2024 roku moc zainstalowana instalacji prosumenckich stanowiła 12,7 GW. Przewyższa to całkowitą moc energetyki wiatrowej w Polsce i stanowi ok. 60% całkowitej mocy zainstalowanej ze wszystkich instalacji PV i 16,4% całkowitego udziału w strukturze KSE. Instalacje prosumenckie wprowadziły do sieci ponad 8,3 TWh energii elektrycznej, co stanowi ok. 5% krajowego zużycia za 2024 r. W całym kraju zainstalowane jest ponad 1,5 mln instalacji prosumenckich, a ich liczba z roku na rok rośnie, ze mniejszą dynamiką wzrostu w ciągu ostatniego roku (rysunek 13.2).



Rysunek 13.2. Dynamika wzrostu liczby instalacji prosumenckich przyłączonych do sieci [5]

Aktem prawnym ustanawiającym reguły dotyczące przyłączania jednostek wytwórczych do sieci elektroenergetycznej jest Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączania

jednostek wytwórczych do sieci NC RfG (Network Code of Requirements for Generators) [6]. Kodeks ten determinuje zapisy obowiązujące zawarte m. in. W Prawie Energetycznym czy Ustawie o OZE. Zgodnie z kodeksem, źródła generacji rozproszonej nazywane są modułami wytwarzania energii (MWE) oraz dzielone są na typy (A, B, C i D), zależne od napięcia i mocy maksymalnej w punkcie przyłączenia. Mikroinstalacje prosumenckie zaliczają się do MWE typu A. Szczegółowe wymagania dotyczące ich przyłączenia zawarte są w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (IRiESD) każdego operatora i obejmują takie parametry, jak: regulacja częstotliwości pracy MWE, zakresy generacji mocy czynnej i biernej, tryby regulacji, standardy komunikacji oraz nastawy układów automatyki zabezpieczeniowej w inwerterach [2, 7].

13.1.2. Wpływ źródeł rozproszonych na pracę sieci dystrybucyjnej

Rozwój energetyki rozproszonej w sieciach nN stanowi szczególne wyzwanie dla operatorów sieci dystrybucyjnych (stare stacje transformatorowe SN/nN, małe przekroje robocze przewodów napowietrznych), szczególnie na sprzyjających ku temu obszarach wiejskich. Do najczęstszych problemów w sieciach nN związanych z wysokim nasyceniem przyłączonych instalacji PV na obwodach możemy zaliczyć: wzrost skutecznych wartości napięcia w węzłach powyżej dozwolonych wartości, skokowe zmiany napięcia, wzrost wartości krótko i długotrwałych współczynników migotania światła (Pst i Plt), asymetrię prądów i napięć, przekroczenia dopuszczalnych wartości prądów długotrwałych oraz podwyższenie strat sieciowych [8]. Powyższe zakłócenia przyczyniają się m. in. do: (i) szybszego zużycia się urządzeń elektrycznych odbiorców i OSD, (ii) nieprawidłowej pracy odbiorników, pogorszenia wskaźników jakościowych energii (CP i CTP), (iii) problemów z synchronizacją agregatów prądotwórczych w trakcie prac eksploatacyjnych służb OSD.

13.1.3. Wpływ źródeł na napięcia w sieci

Rysunek 13.3 przedstawia linię promieniową SN lub nN z przyłączonymi odbiorami i generacją PV, przy czym przyjmuje się generację jedynie mocy czynnej (jednostkowy współczynnik mocy). Napięcie w węźle m można w tym przypadku oszacować na podstawie różnicy algebraicznej napięcia w węźle 0 i spadków napięć na odcinkach linii łączących węzeł 0 i m [9]:

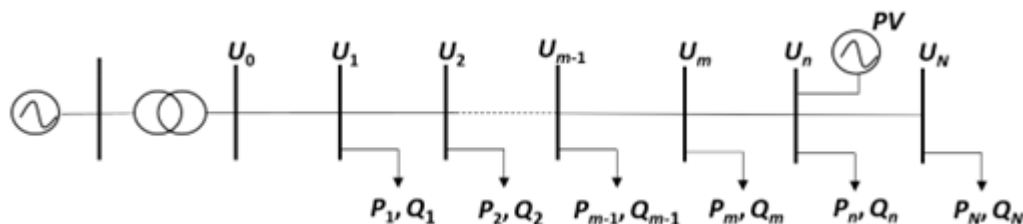
$$U_m \approx U_0 - \sum_{i=1}^m \Delta U_i = U_0 - \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sum_{j=1}^N P_j - P_{PV} \right) R_i + \sum_{j=i}^N Q_j X_i}{U_{i-1}} \quad (13.1)$$

gdzie:

- P_j, Q_j – moc czynna i bierna odbioru w j-tym węźle,
- P_{PV} – moc czynna generacji PV,
- U_i – napięcie w i-tym węźle,
- R_i, X_i – rezystancja i reaktancja fazowa i-tego odcinka linii łączącego sąsiednie węzły.

Dla sieci trójfazowej wartości wielkości podane są w jednostkach względnych (p.u.). Na podstawie analizy zależności (13.1) można zauważyć, że:

- gdy generowana moc jest niewielka w porównaniu z obciążeniem w węzłach za miejscem przyłączenia napięcie w węzłach spada wzdłuż całej linii, jednak w mniejszym stopniu niż w przypadku braku generacji,



Rysunek 13.3. Promieniowa sieć dystrybucyjna

- gdy generowana moc jest zbliżona do zapotrzebowania w węzłach za miejscem przyłączenia źródła, wtedy ich napięcia (idąc od miejsca przyłączenia źródła do końca linii) spadają; w pozostałych węzłach (idąc od transformatora w kierunku miejsca przyłączenia źródła) rosną.

13.2. Projekt i wykonanie

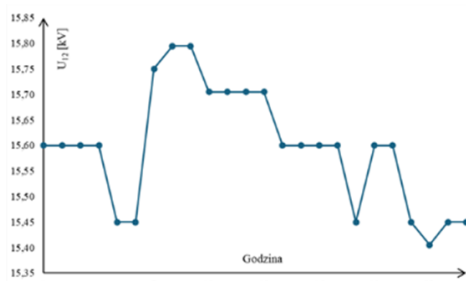
Analizie wpływu prosumenckich mikroinstalacji na sieć dystrybucyjną został poddany rzeczywisty fragment sieci dystrybucyjnej nN, na którym operator i odbiorcy borykają się z nieprawidłowymi parametrami jakościowymi energii elektrycznej. Do przeprowadzenia symulacji wybrano oprogramowanie OpenDSS (Open Distribution System Simulator).

13.2.1. Program OpenDSS

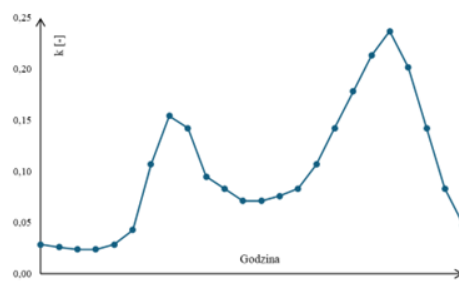
Program OpenDSS (wersja instalacyjna dla systemu Windows dostępna na stronie <http://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx>) to pakiet oprogramowania typu open source przeznaczony głównie do symulacji elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. Umożliwia on przeprowadzanie różnorodnych analiz w układzie fazowym (sieci wielofazowej) i dziedzinie częstotliwości, w tym analizę przepływu mocy harmonicznej, w układach sieciowych o skomplikowanym układzie, z uwzględnieniem niesymetrii fazowej. Program umożliwia integrację danych czasowych i przestrzennych, przez co znajduje zastosowanie w analizie i planowaniu integracji dużej liczby rozproszonych OZE z systemem elektroenergetycznym. Do głównych zastosowań pakietu OpenDSS zaliczyć można: (i) planowanie i analizę sieci dystrybucyjnej; (ii) analizę wielofazowych obwodów prądu przemiennego; (iii) analizę wpływu integracji rozproszonych instalacji fotowoltaicznych z siecią dystrybucyjną; (iv) analizę czasową zmian obciążeń i generacji i rocznego przepływów mocy generatorów; (v) analizę wyższych harmonicznych i interharmonicznych; (vi) wyznaczanie probabilistycznych rozpyłów mocy.

13.2.2. Opis badanej sieci, parametry symulacyjne

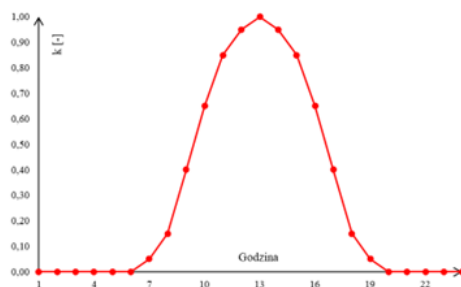
Stacja transformatorowa wyposażona jest w transformator olejowy o mocy 100 kVA, grupa połączeń Yzn5, napięcie zwarcia $u_k=4,2\%$. Transformator ma pięciostopniowy przełącznik zaczeów do beznapięciowej regulacji uzwojenia pierwotnego, w zakresie $+2,5/0/-2,5\%/-5\%/-7,5\%$ napięcia znamionowego. Obecnie, transformator pracuje konfiguracji „zimowej” tj. na zaczeie czwartym (-5%). Rozdzielnica nN wyposażona jest w 3 czynne pole („A”, „B”, Oświetlenie uliczne). Obwód „A” zasilą 19 odbiorców, obwód „B” 21 odbiorców; 33 odbiorców zasilanych jest przyłączem trójfazowym, natomiast 7 posiada przyłącza jednofazowe. Ciągi główne na obu obwodach nN to w większości linie typu AL 4x(...) , z fragmentami typu AsXSn 4x(...) , o żyłach aluminiowych, o przekroju 70 mm², odgałężenie i zakończenia obwodów głównych wykonane są w przekrojach 25, 35 i 50 mm². Największe odległości punktów przyłączenia od stacji wynoszą 434 metry na obwodzie „B” i 379 metrów na obwodzie „A”. Do analizy przyjęto, że wszyscy odbiorcy na obwodzie „B” posiadają instalację fotowoltaiczną, o mocy równej 40-70% mocy przyłączeniowej dla konkretnego budynku, dla obwodu „A” założono, że połowa odbiorców posiada mikroinstalację. Przyjęte przebiegi wartości napięć po stronie SN, stopień wykorzystania mocy przyłączeniowej i moc generowana przez mikroinstalacje PV przedstawia rysunek ??.



(a)



(b)



(c)

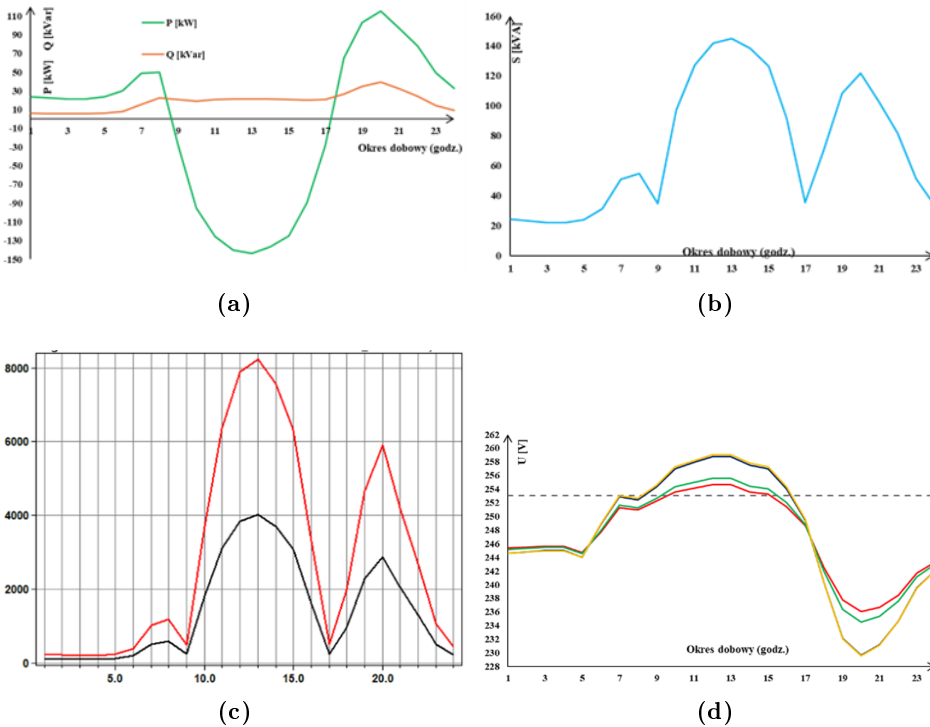
Rysunek 13.4. Wybrane parametry symulacyjne w okresie dobowym, (a) – napięcie międzyfazowe po stronie SN transformatora, (b) – współczynnik wykorzystania mocy przyłączeniowej, (c) – wykorzystanie mocy generacji modułów fotowoltaicznych

13.2.3. Warianty pracy sieci

Warianty symulacyjne objęły następujące przypadki:

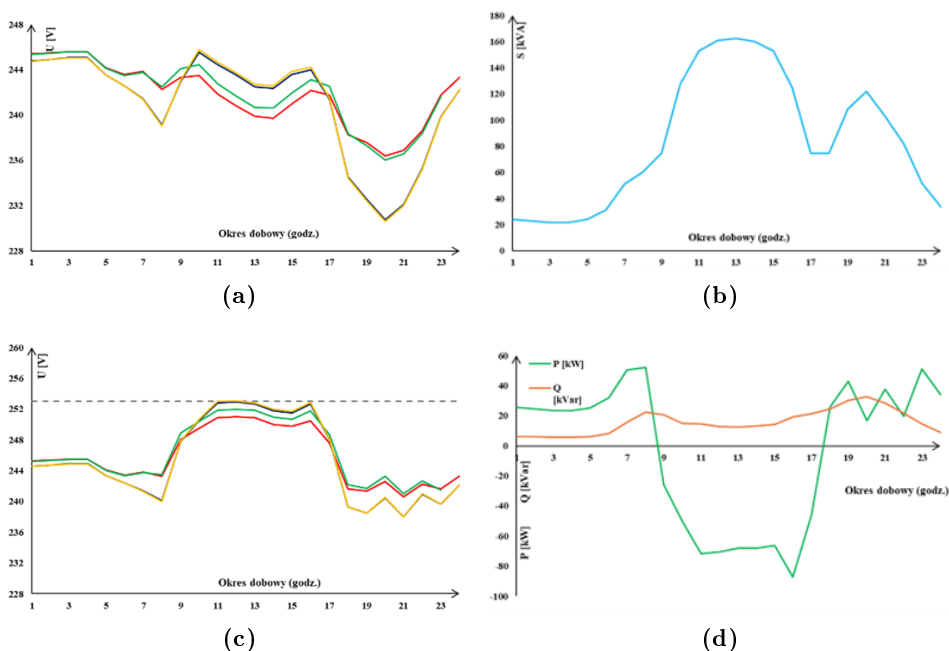
- Wariant podstawowy (dotychczasowy stan sieci),
- Wymiana transformatora na jednostkę o wyższej mocy,
- Możliwość zmiany przekładni transformatora,
- Zwiększenie przekrojów roboczych linii nN,
- Automatyczna regulacja napięcia,
- Zastosowanie regulacji Q(U) w falownikach, Wykorzystanie magazynów energii w wariantach: magazyn centralny, magazyny grupowe i indywidualne.

Wariant podstawowy (Rysunek ??) przedstawia aktualny stan sieci przy rozbudowie instalacji odbiorców o źródła wytwórcze, bez uwzględnienia możliwości regulacji falowników i nastaw zabezpieczeń nadnapięciowych. Krzywa dobowego obciążenia transformatora przedstawia odwrotny kierunek przepływu mocy czynnej (z sieci nN do sieci SN). Widoczne są również przekroczenia znamionowej mocy transformatora i wartości napięć fazowych powyżej dopuszczalnej tj. 1,1 UN.



Rysunek 13.5. Rezultaty symulacji dobowej w wariantcie bazowym: (a) przepływy mocy czynnej i biernej, (b) moc pozorna zmierzona na transformatorze, (c) straty czynne i bierne transformatora, (d) napięcia fazowe na początkach i końcach obwodów A i B

Analogicznie dokonano symulacji dla poszczególnych wariantów. Rysunek 13.6 przedstawiono przykładowe rezultaty obliczeń rozpyływów mocy z uwzględnieniem dobowych zmian wielkości.



Rysunek 13.6. Wybrane warianty symulacyjne: (a) dobowe przebiegi napięć, regulacja $Q(U)$, (b) moc pozorna na transformatorze, regulacja $Q(U)$, (c) dobowe przebiegi napięć, indywidualne ME, (d) dobowe wartości P i Q , indywidualne magazyny energii

13.3. Uzyskane wyniki

Uzyskane wartości zostały przedstawione poniżej (tabela 13.1). Pogrubiono wartości odpowiadające przekroczenia dopuszczalnych limitów dla napięcia oraz znamionowej mocy transformatora. Obecnie w sieciach nN obserwuje się przekroczenia napięcia i przeciążenia transformatorów, co w warunkach rzeczywistych powodowałoby wyłączenia instalacji PV. Wymiana transformatora na większy oraz korekta położenia zaczepów mogą częściowo poprawić sytuację, choć wymagają wyłączeń odbiorców i sezonowej regulacji. Skablowanie sieci ogranicza spadki napięć, lecz jako samodzielne działanie jest niewystarczające. Najbardziej efektywne są rozwiązania z automatyczną regulacją napięcia lub zdecentralizowanymi magazynami energii u prosumentów, które stabilizują napięcie i zwiększają autokonsumpcję.

13.4. Podsumowanie

Praca miała na celu przedstawienie szerokiego spektrum zagadnień związanych z rosnącym udziałem generacji rozproszonej w systemie elektroenergetycznym. Zastosowanie programu OpenDSS pozwoliło na odtworzenie fragmentu sieci niskiego napięcia oraz wprowadzenie rozważanych środków poprawy warunków pracy systemu dystrybucyjnego. Użyte rozwiązania różniły się od siebie kosztem oraz trudnością realizacji (tabela 13.2).

Tabela 13.1. Porównanie zastosowanych metod – wielkości fizyczne

Metoda	Obwód						
	A		B		Transformator		
	U _{max} [V]	U _{min} [V]	U _{max} [V]	U _{min} [V]	S _{max} [kVA]	ΔP _{max} [kW]	ΔQ _{max} [kVar]
Wariant bazowy	258,7	229,7	259,0	229,5	145,1	4,1	8,2
Transformator 160kVA	256,8	229,7	257,6	229,5	144,0	2,5	5,2
Beznapięciowa zmiana zacze- pów	252,9	223,4	253,2	223,3	145,1	4,1	8,2
Zwiększenie przekro- jów (linia kablowa)	255,0	236,1	255,1	236,0	142,7	4,1	8,2
Automatyczna regu- lacja (ARN)	245,0	230,0	245,3	229,9	145,1	4,1	8,2
Zastosowanie regula- cji Q(U)	245,6	230,8	245,8	230,6	162,5	5,3	11,0
Centralny ME	258,7	230,2	259,0	230,0	91,4	1,8	3,3
Grupowy ME	254,5	230,2	257,1	230,0	91,3	2,0	4,2
Indywidualne ME	252,9	238,0	253,1	238,0	89,4	1,7	3,2

gdzie: U_{max} - maksymalne napięcie fazowe w obwodzie, U_{min} – minimalne napięcie fazowe w obwodzie S_{max} - moc pozorna maksymalna zmierzona na transformatorze, ΔP_{max} - maksymalne straty mocy czynnej na transformatorze, ΔQ_{max} - maksymalna moc bierna na transformatorze.

Tabela 13.2. Porównanie zastosowanych metod – koszty i realizacja

Metoda	Kto realizuje?		Trudność realizacji	Koszt
Zwiększenie mocy trans- formatora (160 kVA)	OSD		niska	średni
Beznapięciowa zmiana zacze- pów	OSD		niska	bardzo niski
Zwiększenie przekrojów (linia kablowa)	OSD		trudna	bardzo wysoki
Podobciążeniowa regula- cja zacze- pów (ARN)	OSD		średnia	wysoki
Zastosowanie regulacji Q(U)	Prosument/OSD		niska	niski
Centralny magazyn energii	Inwestor		trudna	bardzo wysoki
Grupowe magazyny energii	Prosument/spółdzielnia		średnia	średni/wysoki
Indywidualne magazyny energii	Prosument		niska/średnia	średni

W pracy potwierdzono, że źródła generacji rozproszonej w sieci nN mogą negatywnie wpływać na warunki pracy sieci dystrybucyjnej, powodując przekroczenia dopuszczalnych wartości napięć u odbiorców oraz zmianę kierunku przepływu mocy z sieci nN do sieci SN. Najmniej korzystne warunki napięciowe w sieci widoczne są na końcach obwodów. Wykazano, że kluczowym dla uzyskania poprawnych wartości napięcia w sieci nN z generacją rozproszoną jest odpowiednie ustawienie transformatora rozdzielczego względem napięcia zasilającego po stronie pierwotnej oraz zachowanie odpowiedniego zapasu mocy transformatora do przyjęcia nadwyżki energii. Jako najefektywniejsze i najprostsze w implementacji dla analizowanego przypadku jest wymiana transformatora o wyższej mocy znamionowej oraz poprawne ustawienie przełącznika zaczepów, a ze strony prosumenckiej aktywacja trybu Q(U) w falownikach i montaż indywidualnych magazynów energii.

Brak jednego uniwersalnego sposobu wymaga podejścia łączącego kilka metod, dostosowanych do lokalnych warunków sieciowych. Z powodu złożoności poruszanych zagadnień, powyższa praca nie wyczerpuje tematyki wpływu źródeł generacji rozproszonej na sieć elektroenergetyczną. Kolejnym kierunkiem analizy mogą być badania w kierunku asymetrii napięć i prądów w rzeczywistym układzie nN oraz innych parametrów jakościowych, takich jak wskaźniki migotania światła czy zawartość harmonicznych.

Bibliografia

- [1] Dz. U. 2015 poz. 478, *Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. O odnawialnych źródłach energii* (z późniejszymi zmianami).
- [2] Trojnicz D., Habrych M., Herlender J., Koncepcja hybrydowego inwertera PV współpracującego z magazynem energii dla mikroinstalacji o mocy do 50 kW, *Elektro.info* 2022, 9, s. 138–143.
- [3] Dusilo M., *Transformacja energetyczna w Polsce. Edycja 2024*, Forum Energii, 2024 r.
- [4] Kwidzyński K., Marzec 2025 - fotowoltaika wraca do systemu, *Miesięcznik Forum Energii*. Dostępny online: <https://www.forum-energii.eu/miesiecznik> (dostęp: 07-04-2025).
- [5] Urząd Regulacji Energetyki, *Raport – wytwarzanie energii elektrycznej w mikroinstalacjach w 2024 r.*, Warszawa, marzec 2025.
- [6] *Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci.*
- [7] *Zbiór wymagań dla modułów wytwarzania energii typu A, w tym mikroinstalacji* (wersja z 31.12.2019 r.). Dostępny online: <https://www.tauron-dystrybucja.pl/przylaczenie-do-sieci/przylaczenie/mikroinstalacja> (dostęp: 19-05-2025).
- [8] Smółka M., Korab R., Połomski M., „Minimalizacja wpływu prosumenckich mikroinstalacji na pracę sieci niskiego napięcia”, *Przegląd Elektrotechniczny* 2024, 10, s. 1–6.
- [9] Zhao B., Wang C., Zhang X., *Grid-Integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems. Analysis, Design and Control*, John Wiley & Sons, Singapore, 2018.

Analiza współpracy zabezpieczeń odległościowych z wykorzystaniem łącza telekomunikacyjnego

mgr inż. Michał Zelcer
Elektrotechnika

dr hab. inż. Marcin Habrych, prof. uczelni
Katedra Energoelektryki

Praca dyplomowa dotyczyła sposobów komunikacji zabezpieczeń elektroenergetycznych, a dokładniej ich koordynacji. W pracy przeanalizowano jakie są możliwe do zastosowania rodzaje takiej współpracy. W części praktycznej przeprowadzono badania laboratoryjne, które miały na celu zbadanie komunikacji między zabezpieczeniami elektroenergetycznymi e2TANGO-2000, produkowanymi przez firmę Elektrometal Energetyka S.A. W tym celu opracowano model sieci elektroenergetycznej o napięciu 110 kV, na której symulowano zwarcia, co pozwoliło na pozyskanie przebiegów prądów i napięć na obu końcach linii. Zestawiono stanowisko pomiarowe i zaprogramowano zabezpieczenia odpowiednio do parametrów symulowanej linii. Przebiegi były następnie odtwarzane z wykorzystaniem oprogramowania Advanced TransPlay i za pomocą testerów zabezpieczeń Omicron CMC 356. Otrzymane na drodze symulacyjnej przebiegi prądów i napięć generowane były na wejścia prądowe i napięciowe badanych zabezpieczeń. Następnie analizowano czasy zadziałania obu zabezpieczeń w różnych warunkach pracy. W wyniku testów wykazano między innymi, że zabezpieczenie działa lepiej niż określił to producent oraz że wszystkie sposoby koordynacji zabezpieczeń odległościowych dostępne w badanych przekaźnikach spełniają wymagania Operatorów Systemów Dystrybucyjnych w Polsce.

14.1. Cel i założenia

Celem magisterskiej pracy dyplomowej była analiza możliwości współpracy zabezpieczeń odległościowych, skomunikowanych ze sobą przy użyciu różnych rodzajów połączeń transmisji danych (połączenie światłowodowe, drutowe). Praca obejmowała część teoretyczną - analizę możliwych sposobów współpracy zabezpieczeń odległościowych, sposoby ich komunikacji. Drugą częścią pracy były badania laboratoryjne dostępnych sposobów współpracy w zabezpieczeniach e2TANGO-2000 firmy Elektrometal Energetyka S.A. Założenia projektowe były następujące:

- studia literaturowe zagadnienia,

- przeanalizowanie możliwych rodzajów połączeń transmisji danych między zabezpieczeniami odległościowymi,
- opisanie rodzajów współpracy zabezpieczeń odległościowych – współbieżnej i przeciwbieżnej,
- analiza i opisanie wymagań stawianych współpracy zabezpieczeń odległościowych przez Operatorów Systemu Dystrybucyjnego (OSD) i Operatora Systemu Przesyłowego (OSP),
- opracowanie modelu symulacyjnego linii wysokiego napięcia dwustronnie zasilanej i wykonanie symulacji różnego rodzaju zwarcí oraz pozyskanie przebiegów sygnałów prądów i napięć podczas zakłóceń,
- w oparciu o pozyskane przebiegi zwarcíowe wykonanie badań laboratoryjnych współpracujących ze sobą zabezpieczeń odległościowych,
- analiza otrzymanych wyników i sformułowanie wniosków.

14.2. Wstęp teoretyczny

Podstawowe działanie zabezpieczenia odległościowego, bez komunikacji z pozostałymi zabezpieczeniami odległościowymi, funkcjonuje w oparciu o pomiar impedancji pętli zwarcia. Każda linia elektroenergetyczna ma swoją impedancję. W odniesieniu do linii elektroenergetycznych określa się często takie parametry jak reaktancja jednostkowa linii x' [Ω/km] oraz rezystancja jednostkowa linii r' [Ω/km]. Można zatem określić, dla dowolnej długości linii elektroenergetycznej, jaka będzie jej impedancja. Ponadto należy jeszcze wziąć pod uwagę rezystancję samego zwarcia. Impedancja pętli zwarcia jest więc sumą impedancji linii do miejsca zwarcia oraz rezystancji zwarcia:

$$Z = r' \cdot l + x' \cdot l + R \quad (14.1)$$

gdzie:

- Z – impedancja pętli zwarcia [Ω];
- r' – rezystancja jednostkowa linii [$\text{m}\Omega/\text{km}$];
- x' – reaktancja jednostkowa linii [$\text{m}\Omega/\text{km}$];
- l – długość linii od stacji, w której znajduje się zabezpieczenie do miejsca zwarcia [km];
- R – rezystancja zwarcia [Ω].

Zabezpieczenie wylicza wartość impedancji na podstawie pomiarów wartości prądu i napięcia z przekładników odpowiednio prądowego i napięciowego [1]:

$$\underline{Z_p} = \frac{\underline{U_p}}{\underline{I_p}} \quad (14.2)$$

gdzie:

- $\underline{Z_p}$ – fazor impedancji pomiarowej;
- $\underline{U_p}$ – fazor napięcia pomiarowego;
- $\underline{I_p}$ – fazor prądu pomiarowego.

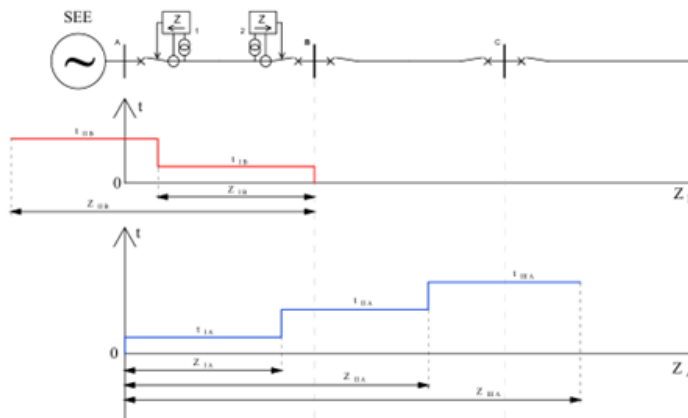
W przypadku normalnej pracy systemu elektroenergetycznego wyznaczana impedan-

cja, określona zależnością (14.2), wyliczana na podstawie fazorów, czyli wektorów pomiarowych prądu i napięcia reprezentuje impedancję systemu elektroenergetycznego. W chwili zwarcia natomiast fazor napięcia $\underline{U}_p$ reprezentuje spadek napięcia na odcinku od stacji pomiarowej do miejsca zwarcia, a fazor prądu $\underline{I}_p$ reprezentuje prąd zwarcia. Impedancja wyznaczana w ten sposób jest wielkością wektorową, dzięki której na podstawie modułu impedancji $|Z|$ można określić odległość miejsca zwarcia od stacji pomiarowej, analogicznie do zależności (14.1).

Drugim elementem tej wartości wektorowej, reprezentowanej przez liczbę zespoloną jest kąt zwarcia ϕ_Z . Wartość kąta zwarcia pozwala określić:

1. kierunek zwarcia – czy zwarcie jest w kierunku:
 - „do przodu” – czyli zwarcie nastąpiło w obszarze od stacji pomiarowej w kierunku linii zabezpieczanej przez dane zabezpieczenie;
 - „do tyłu” – czyli zwarcie nastąpiło w obszarze od stacji pomiarowej w kierunku przeciwnym do zabezpieczanej linii elektroenergetycznej (nie obejmuje fragmentu lub całości zabezpieczanej linii);
2. Charakter zwarcia – czy zwarcie jest bezpośrednie – metaliczne, czy pośrednie – z rezystancją (ponieważ znany jest kąt przy zwarcu bezpośrednim – wywołany impedancją linii).

Ogólną zasadę działania zabezpieczenia odległościowego można prześledzić analizując jego nastawy. Dobiera się je w ten sposób, że obszar działania zabezpieczenia odległościowego dzieli się na strefy zależne od impedancji zwarcia, a czas działania zależy od strefy w której wystąpiło zwarcie. Na rysunku 14.1 impedancje Z_{IA} , Z_{IIA} , Z_{IIIA} odpowiadają zaznaczonym fragmentom linii elektroenergetycznej. Zaznaczone obszary to odpowiednio strefy I, II i III zabezpieczenia 1. W kierunku od stacji A -> stacji C. Zabezpieczenie 1. jest odpowiedzialne za wyłączenie wyłącznika przy stacji A na odcinku A-B. Impedancje Z_{IB} , Z_{IIB} odpowiadają zaznaczonym fragmentom linii elektroenergetycznej dla stref odpowiednio I i II zabezpieczenia 2. To zabezpieczenie jest odpowiedzialne za wyłączenie wyłącznika przy stacji B, który znajduje się na odcinku linii A-B, kiedy zwarcie wystąpiło w kierunku od stacji B -> stacji A. Na niebiesko zaznaczono czasy zadziałania dla zabezpieczenia 1., a na czerwono czasy zadziałania dla zabezpieczenia 2., które odpowiadają poszczególnym impedancjom.

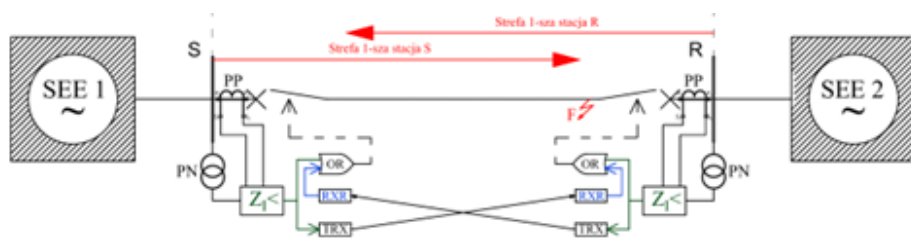


Rysunek 14.1. Czas działania i impedancje poszczególnych stref zabezpieczenia

Każda strefa obejmuje kolejny, dalszy odcinek linii elektroenergetycznej, z czasem działania wydłużonym o zwłokę czasową, stanowiąc w ten sposób zabezpieczenie rezerwowe tych kolejnych odcinków linii. Ze względu na błędy pomiarowe przekładników pomiarowych i napięciowych oraz możliwe zakłócenia sygnałów prądu i napięcia, nie nastawia się dla żadnej strefy impedancji odpowiadającej 100% linii elektroenergetycznej. Dla I strefy nastawia się impedancję odpowiadającą 85 – 95% [1] linii elektroenergetycznej. Gdy zwarcie nastąpi w tych ostatnich 5-15% linii, to w jednej stacji elektroenergetycznej zostanie ono wyłączone bezzwłocznie, natomiast w 2-giej stacji elektroenergetycznej zostanie wyłączone ze zwłoką czasową 300 - 500 ms [2] – zostanie wyłączone z czasem II strefy. Przedłużające się zwarcie może spowodować uszkodzenie aparatury elektroenergetycznej.

Aby zapobiec opóźnieniu w wyłączeniu zwarcia, jeśli wystąpi ono w początkowych 5-15% linii elektroenergetycznej (II strefa zabezpieczenia odległościowego danego końca linii), przez jeden z wyłączników, opracowano systemy koordynacji zabezpieczeń odległościowych. Wyróżnia się 2 typy koordynacji zabezpieczeń odległościowych wzajemnie i przeciwnie:

- Typ 1) Logika przeciwbieżna, inaczej blokująca zadziałanie wyłącznika (ang. blocking mode) – ten typ logiki polega na zablokowaniu zadziałania wyłącznika/wyłączników, których zadziałanie jest niepożądane. Ten typ logiki jest używany przede wszystkim w przypadku starszych rozwiązań komunikacyjnych, gdzie do komunikacji jest wykorzystywana linia elektroenergetyczna – jest to komunikacja PLC (ang. power line carrier) [3].
- Typ 2) Logika współbieżna, inaczej wyzwalająca (przyspieszająca) zadziałanie wyłącznika (ang. tripping mode) – ten typ logiki polega na wysłaniu sygnału wyzwalającego na otwarcie wyłącznika, dla którego jest pożądane przyspieszenie zadziałania. Ten typ logiki może być stosowany do przesyłania sygnałów dla nowych cyfrowych technologii, przede wszystkim z wykorzystaniem komunikacji światłowodowej [3]. Najprostszym układem współpracy zabezpieczeń odległościowych jest układ koordynacji współbieżnej DUTT. Zasadę jego działania przedstawiono na rysunku 14.2.



Rysunek 14.2. Schemat działania współpracy zabezpieczeń odległościowych DUTT, Rysunek własny na podstawie [4]

Sposób działania logiki DUTT jest następujący: zwarcie (zwarcie F) pojawia się w miejscu, które obejmuje strefa 1-sza jednego z zabezpieczeń odległościowych (na rysunku 14.2 jest to zabezpieczenie w stacji R). Na odcinku linii elektroenergetycznej, na którym pojawiło się zwarcie S – R, zwarcie F jest widziane przez zabezpieczenie odległościowe w drugiej stacji (na rysunku 14.2 jest to zabezpieczenie w stacji S) w 2-giej strefie tego zabezpieczenia lub w wydłużonej strefie 1-szej. W takiej sytuacji bez aktywnego

systemu koordynacji to zabezpieczenie zadziałałoby z nastawioną zwłoką czasową. Zabezpieczenie pobudzone w strefie 1-szej generuje jednak sygnał przez nadajnik TRX łączem teletransmisyjnym do zabezpieczenia w stacji po drugiej stronie linii. Odbiornik RXR w stacji z zabezpieczeniem, którego 1-sza strefa nie została pobudzona odbiera sygnał. Następnie otrzymany sygnał inicjuje bezpośrednie otwarcie wyłącznika w stacji, której zabezpieczenie odległościowe nie było pobudzone w strefie 1-szej [3].

W kolejnym etapie pracy badano również systemy koordynacji PUTT i POTT. Ich zasada działania jest analogiczna, jak w systemie DUTT – zostaje wysłany sygnał bezzwłocznego wyłączenia do przeciwległej stacji elektroenergetycznej, jednak aby uniknąć błędnych wyłączeń w wyniku zakłóceń, są w nich stosowane dodatkowe kryteria weryfikacyjne, czy zwarcie faktycznie miało miejsce.

14.3. Projekt i wykonanie

W ramach pracy przeprowadzono testy koordynacji DUTT, PUTT i POTT dla zabezpieczeń e2TANGO-2000 firmy Elektrometal Energetyka S. A. W celu przeprowadzenia badań laboratoryjnych – testów koordynacji zabezpieczeń opracowano model symulacyjny, z którego pozyskano przebiegi prądów i napięć występujących podczas zwarcia. Kolejnym etapem było zaprogramowanie zabezpieczeń, odpowiednio do modelowanych parametrów linii elektroenergetycznej. Ostatnim etapem było zestawienie stanowiska pomiarowego i przeprowadzenie testów.

14.3.1. Model symulacyjny i uzyskane przebiegi zwarcia

Model symulacyjny został opracowany w programie ATP Draw. Jest to model linii elektroenergetycznej 3-fazowej dwustronnie zasilanej. Od strony stacji elektroenergetycznej A zasilanie stanowi System Elektroenergetyczny A (110 kV, kąt 70° , 50 Hz, $Z_{SA1} = 1,3 + j 15,0 \Omega$, $Z_{SA0} = 2,3 + j 26,4 \Omega$), natomiast od strony stacji elektroenergetycznej B zasilanie stanowi System Elektroenergetyczny B (110 kV, kąt 20° , 50 Hz, $Z_{SB1} = 1,81 + j 20,5 \Omega$, $Z_{SB0} = 2,65 + j 32,8 \Omega$). Dla stacji elektroenergetycznych A i B zamodelowano również przekładniki prądowe 1200 A/5 A oraz przekładniki napięciowe indukcyjne 110 kV/100 V. Odcinki linii elektroenergetycznej do miejsca zwarcia od strony Systemu A i od strony systemu B modelowano za pomocą bloków parametrów RLC. Przyjęto następujące parametry linii elektroenergetycznej: $R1 = 0,02760 \Omega/\text{km}$, $R0 = 0,27500 \Omega/\text{km}$, $L1 = 0,31513 \Omega/\text{km}$, $L0 = 1,02650 \Omega/\text{km}$, $C1 = 4,08410 \mu\text{S}/\text{km}$, $C0 = 2,67040 \mu\text{S}/\text{km}$.

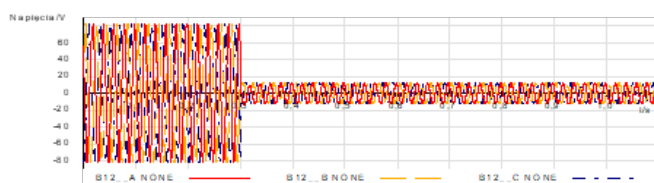
Symulację wykonano za pomocą programu ATP-EMTP, symulując pracę wykonanego modelu w następujących warunkach obliczeniowych:

- Czas symulacji: $T_{\text{max}} = 1,1 \text{ s}$;
- Liczba próbek: 1 000 000 próbek/s ($\Delta T = 1\text{e-}6 \text{ s}$)
- Rodzaj zwarcia: Symetryczne zwarcie 3-fazowe bez udziału ziemi;
- Rezystancja zwarcia: $R_{\text{zw}} = 1 \Omega$ dla każdej fazy;
- Czas powstania zwarcia: $T_{\text{zw}} = 0,3 \text{ s}$ od początku symulacji – dla wszystkich faz równocześnie;
- Odległość zwarcia od stacji A: $L_A = 90 \text{ km}$.

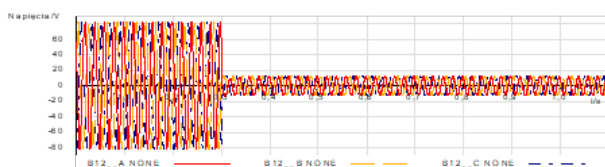
W wyniku symulacji zostały wygenerowane przebiegi prądów i napięć w formacie COMTRADE. Wykorzystując tester zabezpieczeń Omicron odtworzono pliki symulacji zwarcia symetrycznego trójfazowego, mającego miejsce 90 km od stacji A (90% linii, patrząc od stacji A), dla każdej ze stacji elektroenergetycznych. Przebiegi prądów i napięć odtworzone w oprogramowaniu Advanced TransPlay, symulowane na zaciskach wtórnych przekładników odpowiednio prądowych i napięciowych w stacji elektroenergetycznej A, przedstawiono na rysunkach 14.3 i 14.4. Natomiast, analogicznie, przebiegi prądów i napięć odtworzone w oprogramowaniu Advanced TransPlay, symulowane na zaciskach wtórnych przekładników odpowiednio prądowych i napięciowych w stacji elektroenergetycznej B, przedstawiono na rysunkach 14.5 i 14.6.



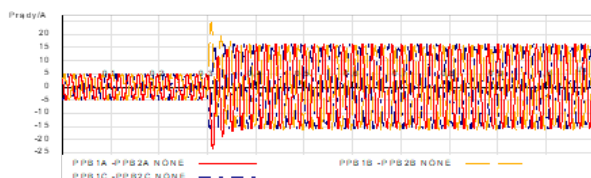
Rysunek 14.3. Przebiegi napięć w stacji A odtworzone przez Advanced TransPlay z pliku COMTRADE dla symulacji zwarcia 3-fazowego w odległości 90 km od stacji A



Rysunek 14.4. Przebiegi prądów w stacji A odtworzone przez Advanced TransPlay z pliku COMTRADE dla symulacji zwarcia 3-fazowego w odległości 90 km od stacji A



Rysunek 14.5. Przebiegi napięć w stacji B odtworzone przez Advanced TransPlay z pliku COMTRADE dla symulacji zwarcia 3-fazowego w odległości 90 km od stacji A

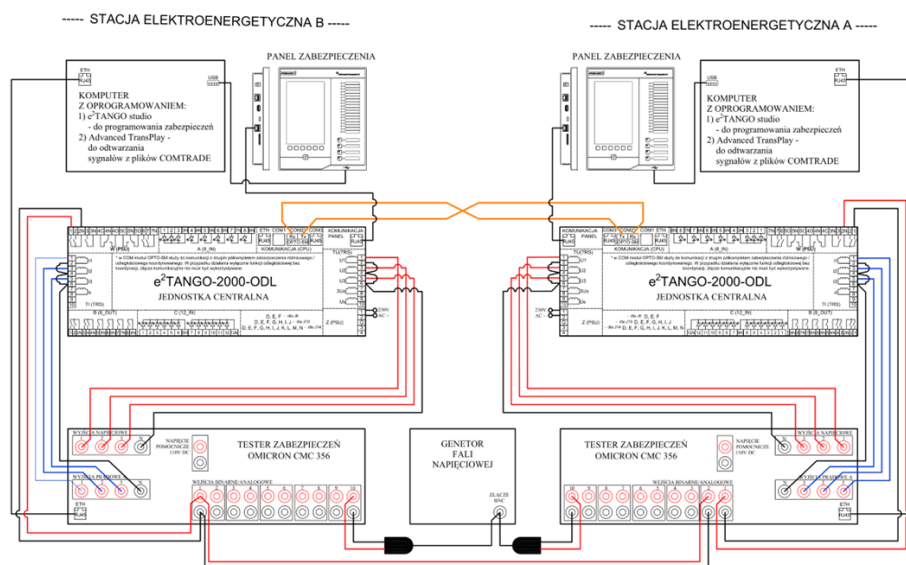


Rysunek 14.6. Przebiegi prądów w stacji B odtworzone przez Advanced TransPlay z pliku COMTRADE dla symulacji zwarcia 3-fazowego w odległości 90 km od stacji A

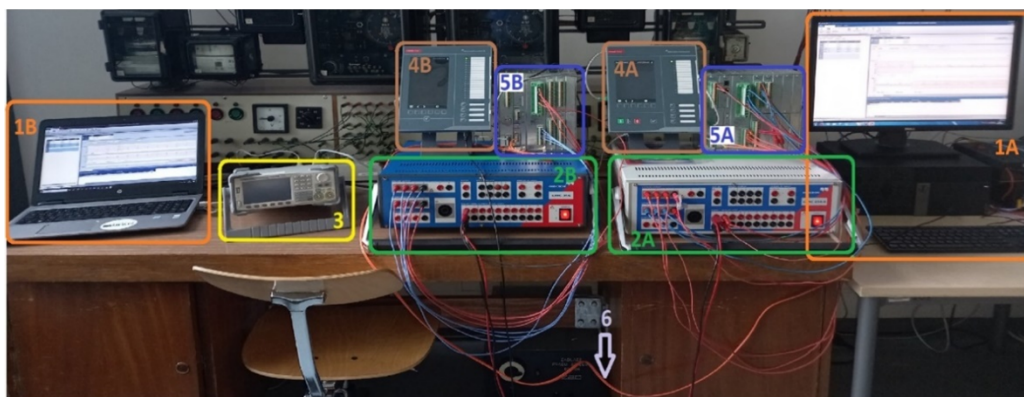
14.3.2. Stanowisko pomiarowe

Szczegółowy sposób realizacji stanowiska pomiarowego do badania pracy współbieżnej z komunikacją światłowodową przedstawia schemat na Rysunek 7. Badano koordynację 2 zabezpieczeń wielofunkcyjnych e2TANGO-2000, z aktywną funkcją zabezpieczenia odległościowego. W pierwszej części badań laboratoryjnych łączem wymiany informacji był światłowód, za pomocą którego zabezpieczenia były skoordynowane. Zabezpieczenia programowano przy użyciu komputera z programem e2TANGO Studio (Na rysunku 14.8 oznaczone jako 1A i 1B), w którym wcześniej zdefiniowano nastawy i funkcje zabezpieczenia. Konfigurację wgrywano do panelu zabezpieczenia za pomocą portu USB.

Dwa komputery reprezentowały dwie stacje elektroenergetyczne, na przeciwnych końcach symulowanej linii elektroenergetycznej 110 kV o długości 100 km. Zainstalowany na komputerach program Advanced TransPlay umożliwił odtworzenie przebiegów prądów i napięć podczas symulowanego zwarcia, w stacjach elektroenergetycznych A i B (rysunek 14.8, oznaczone odpowiednio jako 1A i 1B), zapisanych w plikach COMTRADE. Z komputerów odtwarzana symulacja była przesyłana za pomocą łącza ETHERNET do testerów zabezpieczeń Omicron CMC 356 (rysunek 14.8, odpowiednio dla stacji A - 2A i dla stacji B - 2B). Testery zabezpieczeń generowały przebiegi prądów i napięć zgodne z odtwarzanymi symulacjami na wyjściach prądowych i napięciowych. Wyjścia te były połączone z wejściami prądowymi i napięciowymi zabezpieczeń. Na zaciski prądowe i napięciowe zabezpieczeń były zatem generowane symulacyjne przebiegi prądów i napięć, po stronie wtórnej przekładników prądowych i napięciowych, podczas zwarcia odpowiednio w stacji elektroenergetycznej A - na zaciski zabezpieczenia reprezentującego zabezpieczenie odległościowe w stacji A oraz w stacji elektroenergetycznej B - na zaciski zabezpieczenia reprezentującego zabezpieczenie odległościowe w stacji B.



Rysunek 14.7. Schemat stanowiska laboratoryjnego z połączeniem światłowodowym, Rysunek własny z wykorzystaniem i modyfikacją gotowych modeli DWG: [10, 11]



Rysunek 14.8. Widok stanowiska laboratoryjnego dla połączenia światłowodowego

Ze względu na bardzo krótkie czasy działania zabezpieczeń i przesyłu informacji nie byłoby możliwe, aby człowiek jednocześnie w tym samym momencie uruchomił symulację stacji A oraz stacji B, ze względu na jego opóźnienie reakcji. Z tego powodu wykorzystano generator sygnału napięciowego (rysunek 14.8, oznaczenie 3), który posłużył do zsynchronizowania uruchomienia symulacji w stacji A oraz w stacji B w jednym momencie. W tym celu wygenerowano na generatorze sygnał prostokątny i gdy stan napięcia był wysoki, nastąpiło uruchomienie symulacji jednocześnie dla obu stacji.

Testery zabezpieczeń Omicron CMC 356 rejestrowały również na wejściach binarnych sygnał generowany przez zabezpieczenia na otwarcie wyłączników w stacjach elektroenergetycznych A oraz B. Informacja o tym, kiedy nastąpiło zadziałanie poszczególnych wyłączników od początku symulacji, była generowana w raporcie. Była również możliwość sprawdzenia, ile czasu upłynęło między wyłączeniem wyłącznika w jednej i drugiej stacji.

14.4. Wyniki badań

Najistotniejszymi wynikami badań laboratoryjnych są czasy zadziałania zabezpieczeń odległościowych w każdej z symulowanych stacji elektroenergetycznych oraz czas, który upłynął od przesłania sygnału na wyłączenie w jednej stacji do wygenerowania tego sygnału w przeciwległej stacji. Czas ten, między sygnałem na wyłączenie w jednej i drugiej stacji można potraktować w przybliżeniu jako czas transmisji (czas komunikacji między zabezpieczeniami).

Program Advanced TransPlay po wygenerowaniu raportu z każdego badania umożliwiał, za pomocą funkcji kursorów, zmierzenie dokładnych chwil czasowych momentów wyartykułowanych w akapicie powyżej. Czasy te, na podstawie wszystkich raportów, zestawiono w tabeli 14.1.

Na podstawie uzyskanych wyników, przedstawionych w tabeli 14.1, można wywnioskować, że gdy funkcja koordynacji zabezpieczeń odległościowych jest odstawiona to działają one (zgodnie z założeniem), z czasem 1-szej strefy – stacja B (czas własny zabezpieczenia) oraz z czasem 2-giej strefy – stacja A (nastawiona zwłoka czasowa 500 ms + czas własny zabezpieczenia).

Tabela 14.1. Zestawienie czasów wyłączeń zabezpieczeń w każdej ze stacji i czasów transmisji między stacjami przy różnych sposobach koordynacji zabezpieczeń odległościowych.

Typ koordynacji	t_{wyl} zabezpieczenia odległościowego od chwili zwarcia [ms]		
	Brak komunikacji	Połączenie światłowodowe	Połączenie przewodowe (We. Dwustanowe)
Brak	14,96	-	-
DUTT	-	15,0	15,3
PUTT	-	14,6	14,1
POTT	-	15,1	16,9
Brak	527,26	-	-
DUTT	-	21,4	45,5
PUTT	-	25,8	50,2
POTT	-	27,1	51,6
Brak	-	-	-
DUTT	-	6,4	30,2
PUTT	-	11,2	36,1
POTT	-	12,0	34,7

W przypadku włączonej koordynacji, czas wyłączenia zabezpieczenia w stacji A jest o wiele krótszy. Czas własny zadziałania zabezpieczeń jest na poziomie 15 ms, a najdłuższy czas transmisji przy połączeniu światłowodowym to 12 ms. Można wnioskować, że sygnał na wyłączenie wyłącznika w przeciwległej stacji jest wysyłany jeszcze przed wygenerowaniem sygnału na wyłączenie w 1-szym zabezpieczeniu, a różnica czasu między sygnałem na wyłączenie zabezpieczenia w stacji A i stacji B jest rzeczywiście czasem transmisji sygnału. Na podstawie systemu koordynacji DUTT można zatem stwierdzić, że prosta transmisja sygnału łączem światłowodowym trwa około 6 ms i spełnia wymagania OSD (poniżej 20 ms dla sygnałów binarnych [5–8]), natomiast łączem przewodowym, wykorzystującym wejścia dwustanowe trwa około 30 ms i nie spełnia wymagań OSD [5–8].

14.5. Podsumowanie

Wykorzystując pozyskane z symulacji przebiegi zwarciowe wykonano badania laboratoryjne współpracujących ze sobą zabezpieczeń odległościowych. Przeprowadzono testy pracy współbieżnej badanych zabezpieczeń e2TANGO-2000. Przetestowano pracę współbieżną zabezpieczeń DUTT, PUTT i POTT w 2 wariantach komunikacji między zabezpieczeniami: komunikacji światłowodowej i przewodowej. Przetestowano również działanie zabezpieczeń bez koordynacji.

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych wywnioskowano, że badane zabezpieczenie działa lepiej niż określił to producent, w 1-szej strefie wyłącza zwarcie z czasem szybszym, niż określa to instrukcja zabezpieczenia [1]. Czas własny działania zabezpieczenia odległościowego z przyspieszaczem jest w niej określony – 20 ms, natomiast zabezpieczenie w 1-szej strefie najczęściej wyłączało się z czasem około 15 ms, natomiast najdłuższy zarejestrowany czas to 17 ms. Z uzyskanych badań wynika również, że najkrótszy czas transmisji ma system DUTT - przy komunikacji światłowodowej, transmisja trwa około 6ms, jednak jest to system koordynacji najbardziej narażony na wyłączenia błędne w wyniku zakłóceń. Czas transmisji dla systemów koordynacji PUTT i POTT przy ko-

munikacji światłowodowej jest na poziomie 12 ms i jest to czas krótszy od rzeczywistego czasu własnego zabezpieczeń.

Badania laboratoryjne pozwoliły także określić, że wszystkie zbadane rodzaje pracy współbieżnej dostępne w badanym zabezpieczeniu, przy komunikacji światłowodowej, spełniają wymagania stawiane przez OSD odnośnie czasu transmisji (poniżej 20 ms dla sygnałów binarnych [5–8]), ponadto określono także, że wszystkie zbadane rodzaje pracy współbieżnej dostępne w badanym zabezpieczeniu, przy komunikacji przewodowej – najkrótszy czas transmisji około 30 ms, nie spełniają wymagań stawianych przez OSD odnośnie czasu transmisji.

Bibliografia

- [1] Bednarczyk T., Wybrane zagadnienia zabezpieczeń odległościowych linii (część 1). Kryterium podimpedancyjne oraz parametryzacja zasięgów reaktancyjnych stref pomiarowych, *elektro.info* 2016, 11.
- [2] Klucznik J., Mańkowski G., Wpływ układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej na dobór przewodów odgromowych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2020, 11.
- [3] Pujari R., Alam M.N., Review on Distance Relaying for the Protection of Modern Power System Networks, *IEEE Access* 2016, 4.
- [4] *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines*, IEEE Std C37.113-2015 (Revision of IEEE Std C37.113-1999), 2016, pp. 1–141.
- [5] *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej*, TAURON Dystrybucja, tekst ujednolicony obowiązujący od dnia 14.05.2025.
- [6] *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej*, PGE Dystrybucja, tekst ujednolicony obowiązujący od dnia 14.05.2025.
- [7] *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej*, ENEA Operator, tekst jednolity obowiązujący od dnia 14.05.2025.
- [8] *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej*, ENERGA Operator, tekst jednolity obowiązujący od dnia 22.04.2019.
- [9] *Instrukcja obsługi: Zabezpieczenia różnicowe i odległościowe linii e² TANGO 2000*, wersja: 5.5.1.2, Firmware: 5.5.1.x / 5.6.1.x, Elektrometal Energetyka SA, Data wydania: 2025-03-18.
- [10] cloud.elektrometal-energetyka.pl. Dostępny online: <https://cloud.elektrometal-energetyka.pl/index.php/s/DrbEGKHaKsiLLj9?path=%2FZabezpieczenia%20WN%20e%20C%20B2TANGO%2FZabezpieczenia%20e%20C%20B2TANGO-2000-ODL%20-%20zabezpieczenie%20odleg%20C5%82o%20C5%9Bciowe%20gotowy%20model%20e2TANGO-2000-LRR%20ODL%20-%20Schematy%20aplikacyjne%20Zabezpieczenia%20r%C3%B3%C5%9Bnicowe%20i%20odleg%C5%82o%C5%9Bciowe%20linii%20WN.dwg>, (dostęp: 03-06-2025).
- [11] cloud.elektrometal-energetyka.pl. Dostępny online: <https://cloud.elektrometal-energetyka.pl/index.php/s/DrbEGKHaKsiLLj9?path=%2FZabezpieczenia%20WN%20e%20C%20B2TANGO%2FZabezpieczenia%20e%20C%20B2TANGO-2000-ODL%20-%20zabezpieczenie%20odleg%20C5%82o%20C5%9Bciowe%20gotowy%20model%20Panel%20e2TANGO-2000%20-%20wymiar%C5%9B%20urz%C3%A1dzenia.dwg>, (dostęp: 03-06-2025).

Generator szeregowego zwarcia łukowego

mgr inż. Rafał Chudy

Elektrotechnika

dr inż. Michał Czosnyka

Katedra Energoelektryki

Szeregowe zwarcia łukowe są przyczyną wielu pożarów. Ich detekcja jest trudna ze względu na specyfikę zjawiska. W przypadku szeregowych zwarć łukowych dochodzi do wyładowania między elementami obwodu znajdującymi się na tym samym potencjale. Natężenie prądu nie różni się znacząco od wartości występujących podczas warunków normalnej pracy, dlatego tradycyjne aparaty zabezpieczające nie są w stanie ich wykryć. Urządzeniem zapewniającym kompleksową ochronę przed skutkami zwarć łukowych jest detektor iskrzenia AFDD. Konstrukcja prototypu generatora szeregowego zwarcia łukowego umożliwia kontrolowane wytwarzanie szeregowego zwarcia łukowego w warunkach laboratoryjnych, co daje możliwość jego lepszego poznania i analizy. W trakcie badań sprawdzano właściwości łuku elektrycznego przy różnych wartościach prądu wymuszenia. Rejestrowano próbki sygnałów w określonych chwilach czasowych, aby ocenić powtarzalność procesu. Wyniki potwierdziły, że z użyciem prototypu generatora możliwe jest uzyskanie stabilnych i odtwarzalnych zwarć łukowych, co pozwala na pogłębione badania i zwiększenie poziomu bezpieczeństwa. Generowanie powtarzalnego zwarcia łukowego daje również możliwości testowania detektorów AFDD pod kątem niezawodności ich działania [1, 2].

15.1. Cel i założenia

Celem pracy jest zbadanie czynników wpływających na rozwój szeregowego zwarcia łukowego w obrębie uszkodzonego przewodu czynnego za pomocą generatora zwarcia łukowego. Do zakresu pracy należy:

- wykonanie generatora szeregowego zwarcia łukowego,
- wykonanie badań i pomiarów na stanowisku pomiarowym,
- analiza wykonanych badań zawierająca ocenę skuteczności i powtarzalności generowanego zwarcia łukowego.

15.2. Wstęp teoretyczny

Łuk elektryczny to samoistne wyładowanie między dwoma elementami przewodzącymi, w kontekście szeregowych zwarć łukowych występuje on najczęściej w przypadku, gdy dochodzi do przerwania obciążonego obwodu elektrycznego. Może być zasilany zarówno napięciem stałym jak i przemiennym, w badaniach skupiono się na wyładowaniach przy prądzie przemiennym. Szeregowe zwarcie łukowe może występować zarówno w przewodzie fazowym, jak i neutralnym. Do podstawowych przyczyn występowania tego rodzaju zjawiska można zaliczyć:

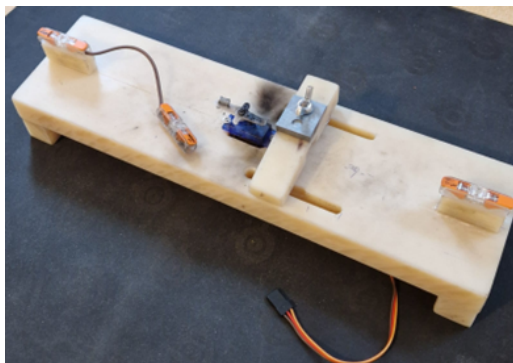
- procesy starzeniowe,
- złamania, pęknięcia i otarcia wynikające z czynników mechanicznych,
- błędy ludzkie,
- działalność zwierząt i gryzoni.

Do ochrony przed skutkami szeregowych zwarć łukowych służy detektor iskrzenia AFDD, który działa na zasadzie algorytmów bazujących na pomiarze i analizie prądu przepływającego przez urządzenie. W przypadku wystąpienia uszkodzenia (zwarcie łukowe), w przebiegu prądu zaczynają pojawiać się charakterystyczne zmienne, cechujące dane zjawisko [3, 4].

15.3. Projekt i wykonanie

Prototyp generatora szeregowego zwarcia łukowego został skonstruowany w celu możliwości generowania powtarzalnego łuku elektrycznego w przewodzie czynnym. Pierwszym etapem było wykonanie projektu urządzenia, w tym celu sporządzono szkic urządzenia z wykorzystaniem programu AutoCad. Następnie przystąpiono do budowy prototypu generatora. Do jego głównych elementów można zaliczyć: szybkozłączki przelotowe firmy Wago, sprężynę, serwomechanizm, Serwo SG-90 – micro – 180, mocowanie, podstawkę.

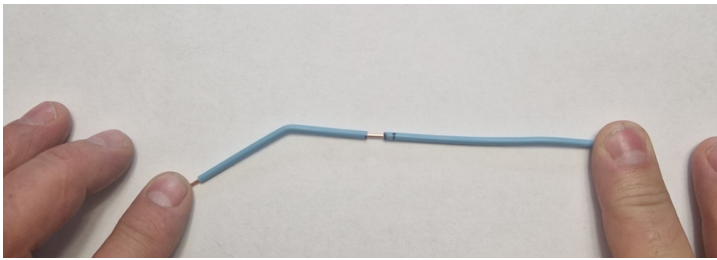
Wymiary generatora to 65 mm wysokości, 295 mm długości oraz 80 mm szerokości. Prototyp został wykonany z mikanitu, materiał ten cechuje się bowiem odpornością na wysoką temperaturę oraz jest nieprzewodzący i niepalny, co jest szczególnie ważne w kontekście prowadzenia badań związanych z występowaniem łuku elektrycznego. Widok ogólny generatora przedstawia rysunek 15.1.



Rysunek 15.1. Widok ogólny prototypu generatora szeregowego zwarcia łukowego

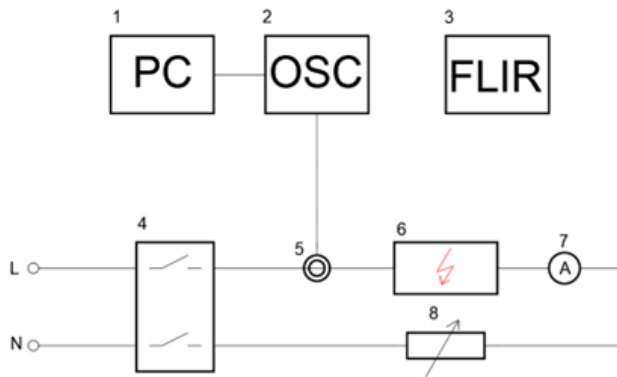
Podstawowym elementem prototypu generatora jest serwomechanizm. Dzięki niemu istnieje możliwość zginania przewodu (próbki), co odpowiada za symulację zginania przewodu podczas jego eksploatacji. Zastosowanie silnika pozwala na odzwierciedlenie warunków zbliżonych do rzeczywistych. Poprzez ruch serwomechanizmu można generować szeregowe zwarcie łukowe między elementami uszkodzonego przewodu czynnego. Program do sterowania silnikiem został napisany z wykorzystaniem środowiska programistycznego Arduino IDE. Umożliwia on łatwą zmianę prędkości oraz zakresu obrotu badanej próbki kablowej.

W celu przygotowania próbek pomiarowych przygotowano przewody jednożyłowe, docięte na odpowiednią długość, dopasowaną do wymiarów prototypu generatora. Następnie odizolowywano część przewodu i uszkodzano go dokonując jego rozcięcia. Końcowy efekt został przedstawiony na rysunku 15.2.



Rysunek 15.2. Odpowiednio przygotowana próbka pomiarowa

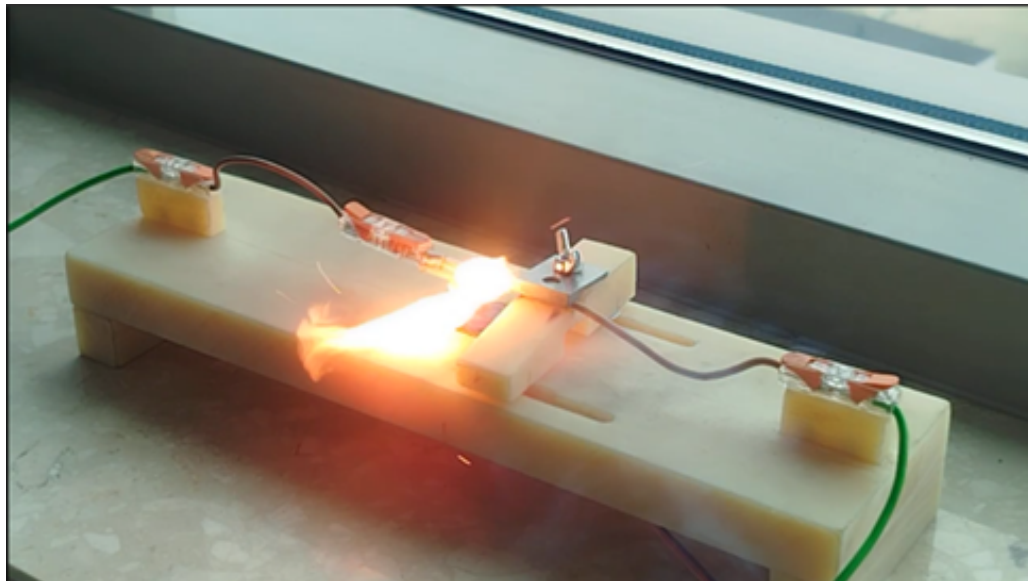
Do przeprowadzenia badań prototypu generatora szeregowego zwarcia łukowego przygotowano odpowiednio dopasowane stanowisko pomiarowe, które pozwalało na bezpieczne testowanie urządzenia. Schemat stanowiska przedstawia rysunek 15.3.



Rysunek 15.3. Schemat połączeń układu do badania prototypu generatora szeregowego zwarcia łukowego

Stanowisko składa się elementów oznaczonych odpowiednio na rysunku: 1 – komputer PC wraz z monitorem, 2 – oscyloskop, 3 – kamera termowizyjna, 4 – detektor iskrzenia AFDD, 5 – cęgi prądowe, 6 – prototyp generatora, 7 – amperomierz, 8 – dekada rezystorowa.

W pierwszym etapie badań podzielono próbki kablowe na trzy grupy. Podział definowany był ze względu na wartość wymuszonego prądu. W tej części sprawdzano czy dla wymuszenia prądu odpowiednio 1, 3 oraz 5 A, z wykorzystaniem prototypu generatora jesteśmy w stanie wygenerować szeregowe zwarcie łukowe. Przykład zapalenia się łuku przy wymuszeniu 3 A przedstawia rysunek 15.4.



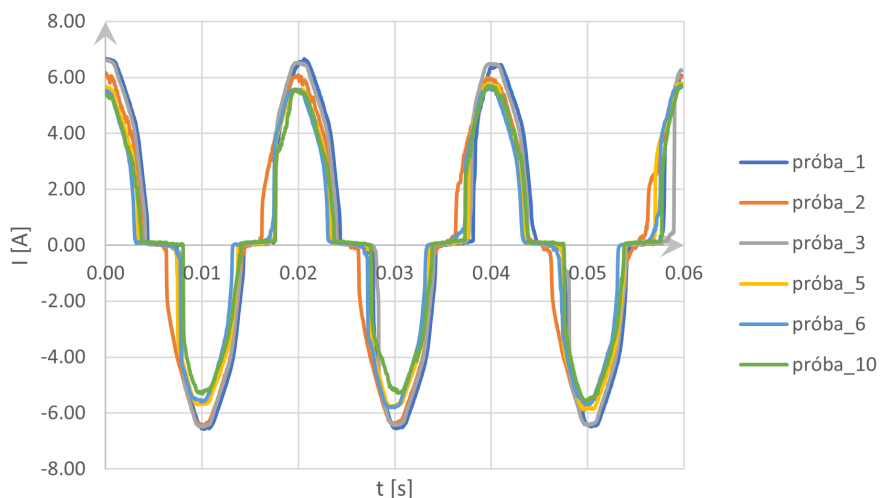
Rysunek 15.4. Wystąpienia zwarcia łukowego dla próbki kablowej przy prądzie wymuszenia 3 A

W celu oceny powtarzalności generowanego zwarcia łukowego dokonano analizy 10 próbek kablowych przy prądzie wymuszenia równym 5 A oraz 7 próbek przy wymuszeniu prądu 10 A. Rejestrowano, jak zmienia się natężenie prądu w czasie. Na podstawie odtworzonego przebiegu prądu badano, jak zachowuje się układ z prototypem generatora szeregowego zwarcia łukowego.

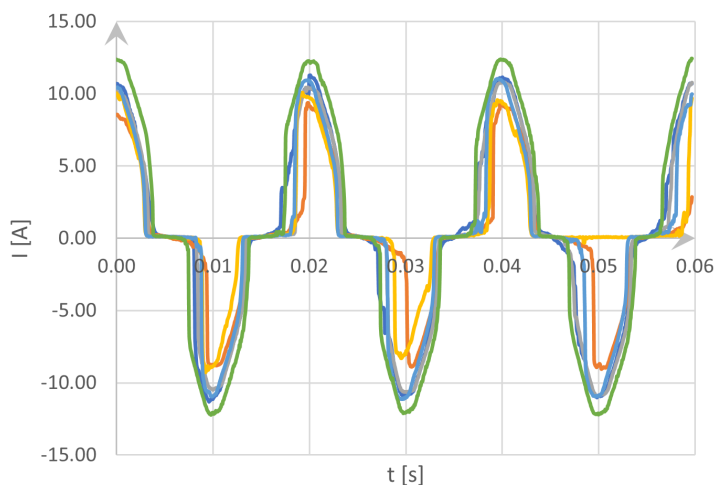
15.4. Uzyskane wyniki

Na podstawie wyników oraz obserwacji z pierwszej części ćwiczenia, wykazano, że dla wszystkich wartości prądu wymuszenia z badanego przedziału, z wykorzystaniem prototypu generatora szeregowego zwarcia łukowego możliwe jest wygenerowanie łuku elektrycznego. Szczególnie istotne w tym aspekcie okazało się to, że dla prądu wymuszenia równego 1 A również dochodziło do zapłonu i pojawienia się ognia. Jest to szczególnie niebezpieczne z powodu progu czułości detektorów AFDD na poziomie 2,5 A i braku ich działania przy niższych natężeniach [5].

W celu oceny powtarzalności generowanego zjawiska zestawiono na wspólnym wykresie przebiegi prądu podczas prób dla których doszło do zapalenia się łuku elektrycznego, dla próbek kablowych z tej samej serii pomiarowej. Zebrane wyniki przedstawiają wykresy na rysunkach 15.5 oraz 15.6.



Rysunek 15.5. Porównanie przebiegów prądu podczas wyładowania łukowego dla prądu wymuszenia 5 A



Rysunek 15.6. Porównanie przebiegów prądu podczas wyładowania łukowego dla prądu wymuszenia 10 A

Na podstawie przedstawionych wykresów wykazano, że z wykorzystaniem prototypu generatora szeregowego zwarcia łukowego jesteśmy w stanie generować powtarzalne wyładowanie łukowe występujące w przewodzie czynnym. Wraz z wzrostem wartości prądu wymuszenia rozbieżności między poszczególnymi próbami rosną, jest to wynikiem większej dynamiki zjawiska powstawania łuku przy większych prądach.

15.5. Podsumowanie

Szeregowe zwarcia łukowe stanowią poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi i instalacji elektrycznych. Badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych pozwalają lepiej zrozumieć mechanizmy ich powstawania oraz ocenić skuteczność detektorów iskrzenia, które jako jedyne zapewniają realną ochronę przed skutkami tego zjawiska. Na podstawie analizy uzyskanych wyników i możliwości powstawania wyładowania łukowego dla wartości prądu poniżej progu zadziałania AFDD, należy pochylić się nad danym zagadnieniem, w celu poprawy niezawodności działania zabezpieczenia dla szerszego przedziału wartości prądu.

Podczas eksperymentów z wykorzystaniem generatora zwarcia łukowego obserwowano pojawianie się płomieni i zapalanie izolacji przewodów. W laboratorium ryzyko można było łatwo ograniczyć dzięki szybkiej reakcji osób prowadzących badania lub działaniu AFDD. W rzeczywistych instalacjach, gdzie ciągły nadzór jest niemożliwy do zrealizowania, gdy brak detektora iskrzeń ryzyko rozwoju wyładowania i wystąpienia pożaru znacząco wzrasta, co może prowadzić do poważnych strat materialnych oraz zagrożenia życia i zdrowia osób przebywających w pobliżu.

Dlatego istotne jest nie tylko doskonalenie układów zabezpieczających, ale także upowszechnianie wiedzy o zagrożeniach związanych ze zwarciami łukowymi. Świadomość ta sprzyja szerszemu stosowaniu nowoczesnych detektorów, co w efekcie przekłada się na większe bezpieczeństwo i skuteczniejsze zapobieganie pożarom. Stworzenie prototypu generatora szeregowego zwarcia łukowego pozwala na prowadzenie badań nad danym zjawiskiem w kontrolowanych warunkach, zapewniając jednocześnie bezpieczeństwo oraz możliwość najlepsze odzwierciedlenie warunków panujących w rzeczywistych układach.

Bibliografia

- [1] Czosnyka M., Przeciwpožarowy detektor iskrzenia AFDD. *Kwartalnik Podkarpackiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa* 2023, 4, s. 26–28.
- [2] Mazur G., *Wyładowania elektryczne w gazach*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.
- [3] Przyczyny zwarcia łukowego w przewodach. Dostępny online: <https://www.kopel.pl/przyczyny-zwarcia-lukowego-w-przewodach> (dostęp: 01.10.2025).
- [4] Jak zabezpieczyć instalację w budynkach drewnianych przed pożarem. Dostępny online: <https://www.drewno.pl/artykuly/10935,jak-zabezpieczyc-instalacje-w-budynkach-drewnianych-przed-pozarem.html> (dostęp: 01.10.2025).
- [5] Czosnyka M., Budzisz J., Skuteczność działania AFDD przy niskich prądach obciążenia. *Przegląd Elektrotechniczny* 2023, s. 164–166.

Rozmyty regulator typu II zastosowany w pętli sterowania prędkością silnika prądu stałego

mgr inż. Jakub Suszek
Automatyka przemysłowa

dr hab. inż. Marcin Kamiński
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

System sterowania prędkością silnika elektrycznego odgrywa kluczową rolę w wielu urządzeniach przemysłowych i mobilnych. Tradycyjne regulatory, takie jak PID, nie zawsze zapewniają odpowiednią jakość pracy, szczególnie w zmiennych warunkach obciążenia. W niniejszej pracy opracowano regulator oparty na logice rozmytej typu II, który potrafi uwzględniać niepewności i nieliniowości występujące w rzeczywistych układach napędowych. Do dostrajania parametrów regulatora wykorzystano algorytmy inspirowane naturą, m.in. roje cząsteczek oraz zachowania wilków. Opracowany system został najpierw sprawdzony w symulacjach komputerowych, a następnie wdrożony w rzeczywistym układzie sterującym z mikrokontrolerem STM32. Przeprowadzone badania potwierdziły, że regulator rozmyty typu II poprawia stabilność, szybkość i dokładność regulacji, przewyższając możliwości klasycznych metod sterowania.

16.1. Cel i założenia

Celem pracy było opracowanie regulatora rozmytego typu II do sterowania prędkością silnika prądu stałego, celem zwiększenia odporności układu na zakłócenia i zmienność parametrów.

Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- opracowanie modelu obliczeniowego silnika,
- zaprojektowanie regulatora rozmytego typu II,
- optymalizacja parametrów regulatora metodami metaheurystycznymi,
- implementacja algorytmu w mikrokontrolerze STM32,
- weryfikacja działania w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych.

16.2. Wstęp teoretyczny

Silnik prądu stałego jest jedną z najczęściej stosowanych maszyn elektrycznych w systemach automatyki i mechatroniki. Jego popularność wynika z prostej budowy, łatwości sterowania oraz dobrej odpowiedzi dynamicznej. Dzięki temu znajduje zastosowanie w robotyce, układach pozycjonowania czy napędach precyzyjnych. Podstawą jego pracy jest zjawisko powstawania momentu elektromagnetycznego w wyniku oddziaływania pola magnetycznego stojana z prądem płynącym w uzwojeniach wirnika. W praktyce silniki te charakteryzują się nieliniowościami, takimi jak histereza magnetyczna, tarcie czy zmienne obciążenia, które utrudniają ich precyzyjne sterowanie.

Do najczęściej stosowanych metod regulacji prędkości należy klasyczny regulator PID. Jest on prosty w implementacji i od lat stanowi standard w przemyśle, jednak przy dużych zmianach parametrów lub zakłóceniach jego skuteczność znacząco maleje. W takich sytuacjach pojawia się potrzeba wykorzystania nowocześniejszych metod, które są bardziej elastyczne i odporne na niepewności modelu.

Jednym z podejść alternatywnych jest sterowanie oparte na logice rozmytej. Zamiast precyzyjnych zależności matematycznych, regulator rozmyty posługuje się regułami językowymi, podobnymi do sposobu podejmowania decyzji przez człowieka. Szczególnie interesującym rozwiązaniem jest logika rozmyta typu II, która dodatkowo pozwala na uwzględnienie niepewności w definicji funkcji przynależności. Dzięki temu regulator jest bardziej odporny na zmienne warunki pracy i zakłócenia zewnętrzne.

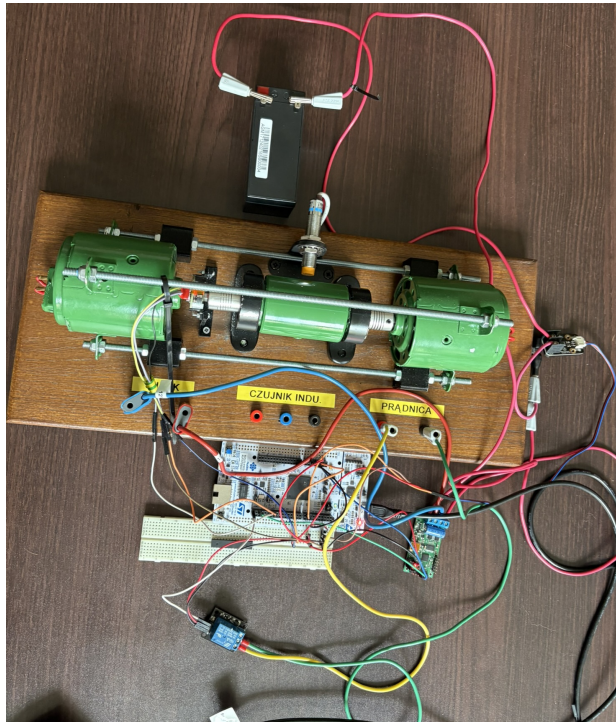
Współcześnie coraz częściej łączy się logikę rozmytą z metodami sztucznej inteligencji i algorytmami optymalizacji inspirowanymi naturą. Algorytmy takie jak optymalizacja rojem cząsteczek, algorytmy genetyczne czy metoda wilczego stada umożliwiają automatyczny dobór parametrów regulatora, eliminując problem czasochłonnego strojenia ręcznego. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości regulacji w złożonych i dynamicznie zmieniających się układach napędowych.

16.3. Projekt i wykonanie

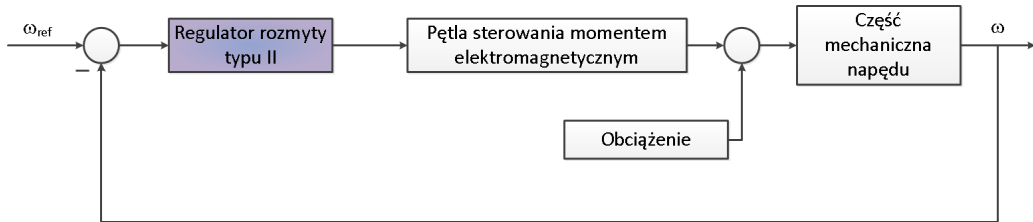
Zaprojektowany układ badawczy miał umożliwić praktyczną weryfikację działania regulatora rozmytego typu II w sterowaniu prędkością silnika prądu stałego. W tym celu przygotowano stanowisko laboratoryjne składające się z mikrokontrolera STM32F767ZI, sterownika silnika Pololu 24v12, enkodera inkrementalnego oraz układów pomiarowych. Mikrokontroler odpowiadał zarówno za generowanie sygnału sterującego, jak i za rejestrację przebiegów w czasie rzeczywistym, co umożliwiało późniejszą analizę jakości regulacji.

Część symulacyjna obejmowała implementację algorytmu logiki rozmytej typu II oraz procedury optymalizacji parametrów regulatora. Oprogramowanie mikrokontrolera zostało opracowane w środowisku Matlab/Simulink (konfiguracja w STM32CubeIDE).

Stanowisko zostało zbudowane w taki sposób, aby możliwe było łatwe wprowadzanie zmian obciążenia mechanicznego i rejestrowanie odpowiedzi układu w różnych warunkach pracy. Zdjęcie stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 16.1. Ideowy schemat blokowy układu sterowania prędkością napędu przedstawiono na rysunku 16.2.



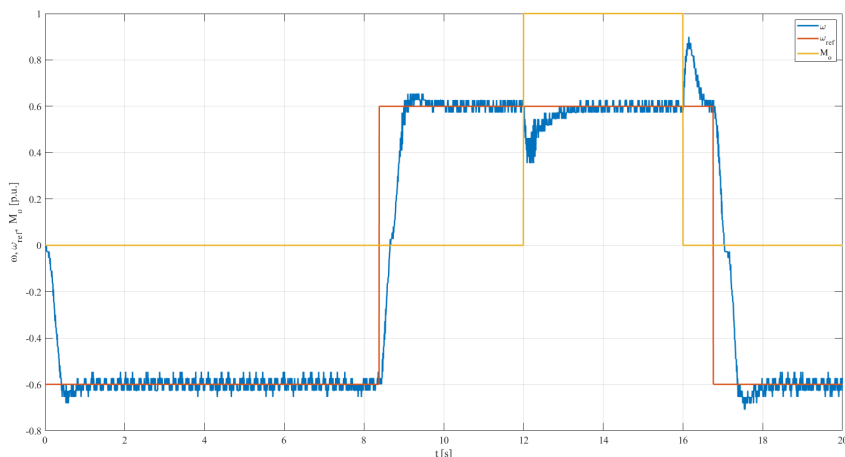
Rysunek 16.1. Stanowisko laboratoryjne z silnikiem prądu stałego zastosowane do badań rozmytego regulatora prędkości typu II



Rysunek 16.2. Ogólny schemat układu sterowania

16.4. Uzyskane wyniki

Zaprezentowane poniżej wyniki pochodzą z badań eksperymentalnych, w których oceniono skuteczność regulatora rozmytego typu II. Szczególną uwagę zwrócono na odpowiedź układu napędowego w warunkach zmiennych obciążeń, które stanowią jeden z najtrudniejszych przypadków dla klasycznych metod regulacji. Na rysunku 16.3 przedstawiono przebiegi prędkości obrotowej silnika prądu stałego podczas realizacji nawrotów układu napędowego w obecności dynamicznie zmieniającego się momentu obciążenia.



Rysunek 16.3. Wyniki badań eksperymentalnych - nawroty napędu przy zmianach obciążenia

Analiza przedstawionych wyników wskazuje, że regulator rozmyty typu II skutecznie nadąża za sygnałem zadany, utrzymując stabilną pracę układu mimo gwałtownych zmian kierunku ruchu i wartości momentu obciążenia. Widoczne są krótkotrwałe oscylacje w momentach przełączeń, jednak nie powodują one istotnego pogorszenia jakości regulacji. Przebieg prędkości charakteryzuje się stosunkowo krótkimi czasami przejściowymi, układ szybko stabilizuje się na poziomie wartości zadanej. W porównaniu do klasycznych regulatorów, zaprojektowany algorytm rozmyty typu II wykazuje wyższą odporność na zakłócenia. Potwierdza to zasadność zastosowania logiki rozmytej w sterowaniu napędami elektrycznymi, szczególnie w aplikacjach wymagających wysokiej niezawodności w warunkach dynamicznych.

16.5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły, że zastosowanie regulatora rozmytego typu II umożliwia skuteczną i stabilną regulację prędkości silnika prądu stałego. Szczególnie istotne było uwzględnienie zmiennych warunków pracy oraz zakłóceń, które w przypadku klasycznych regulatorów prowadzą do spadku jakości sterowania. Wyniki eksperymentalne wykazały, że możliwe jest utrzymanie wysokiej precyzji regulacji nawet w sytuacjach dynamicznych, takich jak nawroty napędu przy zmiennym obciążeniu. Z przeprowadzonych badań wynika, że regulator rozmyty typu II charakteryzuje się krótkim czasem przejściowym i dobrą odpornością na zmiany parametrów obiektu. Opracowany algorytm sprawdził się zarówno w warunkach symulacyjnych, jak i na rzeczywistym stanowisku badawczym, co potwierdza możliwość zastosowania w rzeczywistych układach napędowych.

Zasady projektowania i użytkowania farm fotowoltaicznych zgodnie z normami i przepisami prawnymi

mgr inż. Eryk Synenko
Elektrotechnika

dr inż. Kazimierz Herlender, prof. uczelni
Katedra Elektroenergetyki

W ostatnich latach farmy fotowoltaiczne stały się jednym z filarów transformacji energetycznej w Polsce. Praca magisterska poświęcona została zasadom ich projektowania i eksploatacji w świetle obowiązujących norm oraz przepisów prawnych. Opracowanie obejmuje analizę regulacji formalnych, opracowanie projektu elektrowni PV o mocy 1 MW wraz ze stacją transformatorową oraz weryfikację poprawności jej wykonania za pomocą pomiarów eksploatacyjnych. W dalszej części dokonano analizy efektywności istniejącej farmy PV, uwzględniającej produkcję energii, koszty inwestycyjne oraz opłacalność ekonomiczną. Wyniki wskazują, że okres zwrotu inwestycji jest krótki w porównaniu do możliwego czasu eksploatacji instalacji, a całkowity przychód w 25-letnim cyklu eksploatacji przekracza 5 mln zł. Wnioski pracy potwierdzają, że farmy fotowoltaiczne, mimo wyzwań związanych z przeciążeniami sieci i zmiennością pogody, stanowią bezpieczne, ekologiczne i opłacalne rozwiązanie w polskim systemie elektroenergetycznym.

17.1. Cel i założenia

Celem pracy było przeanalizowanie regulacji formalno-prawnych, opracowanie kompletnego projektu farmy fotowoltaicznej o mocy 1 MW wraz ze stacją transformatorową oraz ocena efektywności ekonomicznej takiej inwestycji. Główne założenia pracy to:

- analiza norm i przepisów regulujących proces budowy i eksploatacji farm PV,
- opracowanie projektu farmy PV wraz z dedykowaną stacją transformatorową,
- dobór paneli, inwerterów, kabli i zabezpieczeń zgodnie z wymaganiami norm i przepisów prawa,
- weryfikacja poprawności instalacji przez analizę wyników pomiarów wymaganych do dopuszczenia instalacji do eksploatacji,

- analiza wydajności rzeczywistej farmy fotowoltaicznej, oparta na danych eksploatacyjnych, w tym obliczenia produkcji energii, przychodów ze sprzedaży energii oraz wskaźników opłacalności inwestycji, takich jak LCOE czy okres zwrotu inwestycji.

17.2. Wstęp teoretyczny

Rozwój farm fotowoltaicznych w Polsce wiąże się z dążeniem do dekarbonizacji, poprawy bezpieczeństwa energetycznego i zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym. Projektowanie farm PV odbywa się w ramach prawa budowlanego i energetycznego oraz zgodnie z normami technicznymi. Podczas projektowania instalacji kluczowy jest odpowiedni dobór między innymi: położenia instalacji fotowoltaicznej, konstrukcji wsporczej, paneli fotowoltaicznych, falowników, połączenia paneli, a także zabezpieczeń i ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej. Poszczególne elementy farmy fotowoltaicznej powinny być dobierane tak aby spełniały wymagania stawiane przez przepisy prawne oraz normy techniczne.

Instalacja odgromowa powinna być zaprojektowana zgodnie z wymaganiami opisanymi w normie PN-EN 62305-2 [1]. Pierwszym krokiem, który należy wykonać jest określenie klasy LPS jaką powinna charakteryzować się instalacja odgromowa. Instalację odgromową można zaprojektować z wykorzystaniem metody toczącej się kuli. W zależności od wyznaczonej klasy LPS w metodzie przyjmuje się odpowiednie wartości parametrów takich jak promień kuli, którą wykorzystuje się do wyznaczenia odstępów między elementami instalacji odgromowej. Promień kuli przyjmuje wartości:

- 20 m dla klasy LPS I,
- 30 m dla klasy LPS II,
- 45 m dla klasy LPS III,
- 60 m dla klasy LPS IV.

W naziemnych farmach fotowoltaicznych najczęściej wykorzystuje się maszty jako środek ochrony odgromowej. Przed wykonaniem projektu inwestor powinien wykonać odpowiednie kroki aby móc zgodnie z prawem rozpocząć projektowanie a następnie budowę farmy fotowoltaicznej. Przed sporządzeniem projektu należy uzyskać szereg dokumentów, które są wymagane podczas procesu związanego z budową instalacji. Skompletowanie poniżej wymienionych dokumentów jest warunkiem koniecznym do realizacji projektu:

- ocenę zgodności zapisów w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego (MPZP) z przedmiotową inwestycją,
- ocenę klasy gruntu terenu pod inwestycję (jeżeli inwestycja ma zostać zrealizowana na gruncie rolnym),
- decyzję o warunkach środowiskowych,
- decyzję o warunkach zabudowy (WZ), o ile nieruchomość nie jest objęta MPZP,
- warunki przyłączenia do sieci dystrybucyjnej lub przemysłowej.

17.3. Projekt i wykonanie

Praca dyplomowa składa się z kilku części, które należy wyodrębnić. Pierwszym z nich jest projekt farmy fotowoltaicznej wraz z dedykowaną stacją transformatorową, następnie

w pracy omówione zostały pomiary wymagane do dopuszczenia farmy do eksploatacji wraz z analizą ich wyników. Ostatnią częścią pracy jest przedstawienie analizy efektywności istniejącej farmy fotowoltaicznej na podstawie rzeczywistych danych.

17.3.1. Projekt farmy fotowoltaicznej

Przedmiotem opracowania jest farma PV o mocy 1 MW, zaprojektowana w centralnej Polsce. Farma składa się z 1572 paneli TW SOLAR TH635PMB6-69SDC o mocy jednostkowej 635 W i sprawności 20,4%. Moduły zamontowane są na stalowej konstrukcji gruntowej, ustawionej pod kątem 30° .

Panele podłączono do trzech inwerterów SUNGROW SG350HX o mocy 350 kW każdy. Schemat połączenia paneli oraz sieci AC inwerterów. Energia z falowników trafia do rozdzielnic nN, a następnie do projektowanej stacji transformatorowej.

Stacja została wyposażona w transformator 2000 kVA (15/0,4 kV, układ Dyn5), co pozwala na przyszłą rozbudowę farmy do 2 MW. Dla zapewnienia poprawnych rozliczeń zastosowano układ pomiarowo-rozliczeniowy oraz system zabezpieczeń uREG.

17.3.2. Wymagane pomiary dla farm fotowoltaicznych

W celu dopuszczenia farmy fotowoltaicznej do eksploatacji niezbędne jest przeprowadzenie serii pomiarów odbiorczych, które potwierdzą zgodność wykonanych instalacji z wymaganiami norm technicznych oraz warunkami bezpieczeństwa użytkowania. Pomiaram tym podlegają w szczególności elementy instalacji elektrycznej niskiego napięcia (nN), w tym kable zasilające oraz systemy uziemiające poszczególnych urządzeń, takich jak falowniki. Pomiary rezystancji izolacji kabli nN mają na celu wykrycie ewentualnych uszkodzeń izolacji przewodów, które mogłyby prowadzić do niekontrolowanych przepływów prądu, stanowiąc zagrożenie dla ludzi i urządzeń. Z kolei pomiar skuteczności uziemień pozwala ocenić, czy instalacja jest w stanie skutecznie odprowadzić prąd zwarciovowy do ziemi w przypadku awarii, co jest kluczowe dla zapewnienia ochrony przeciwporażeniowej oraz poprawnego działania urządzeń zabezpieczających.

Spełnienie wymagań dotyczących rezystancji izolacji i wartości oporności uziemień jest warunkiem koniecznym do przekazania instalacji do eksploatacji oraz zapewnienia jej długoterminowego, bezpiecznego działania.

Wykonano analizę wyników następujących pomiarów:

- rezystancja izolacji kabli nN – wszystkie wyniki powyżej $1\text{ M}\Omega$, co spełnia wymagania normy PN-HD 60364-6:2008 [2],
- rezystancja uziemień – wartości w zakresie $2,3\text{--}4,2\ \Omega$, zgodne z normą ($<10\ \Omega$),
- badania kabli SN – próby napięciowe wykazały pełną sprawność izolacji,
- badania transformatora – rezystancja izolacji na poziomie $48\text{--}54\text{ G}\Omega$, brak uszkodzeń.

17.3.3. Analiza efektywności istniejącej farmy fotowoltaicznej

Do analizy efektywności istniejącej farmy fotowoltaicznej wykorzystane zostały dane zebrane z rzeczywistego obiektu. Omówione zostały koszty budowy farmy fotowoltaicznej

wraz z kosztami eksploatacyjnymi. Dzięki pomiarom zebranych z obiektu możliwa była analiza pracy farmy fotowoltaicznej pod względem jej efektywności oraz opłacalności. Przebiegi wytwarzanej energii elektrycznej instalacji wraz z przebiegami natężenia promieniowania słonecznego pozwoliły na analizę problemu związanego z wyłączeniami farm fotowoltaicznych podczas dużych obciążeń systemu elektroenergetycznego.

17.4. Uzyskane wyniki

W celu omówienia poprawnej pracy farmy fotowoltaicznej wykonany został szereg pomiarów umożliwiających dokładną analizę istniejącego obiektu. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych dla rzeczywistej farmy fotowoltaicznej przed jej dopuszczeniem do eksploatacji. Analiza efektywności również została wykonana na podstawie danych z rzeczywistej instalacji.

17.4.1. Analiza pomiarów dla farmy fotowoltaicznej

Wykonano analizę wyników między innymi pomiarów:

- rezystancja izolacji kabli nN – wszystkie wyniki powyżej 1 M Ω , co spełnia wymagania normy PN-HD 60364-6:2008 [2],
- rezystancja uziemień – wartości w zakresie 2,3–4,2 Ω , zgodne z normą (<10 Ω),
- badania kabli SN – próby napięciowe wykazały pełną sprawność izolacji,
- badania transformatora – rezystancja izolacji na poziomie 48–54 G Ω , brak uszkodzeń.

Wyniki pomiarów wskazują na poprawność wykonania instalacji. Na podstawie protokołu z pomiarów można stwierdzić, że farma fotowoltaiczna jest sprawna i może być dopuszczona do eksploatacji.

17.4.2. Analiza efektywności istniejącej farmy fotowoltaicznej

Przedstawiono strukturę kosztów związanych z budową farmy fotowoltaicznej o mocy 1 MW. Do wydatków zaliczono zakup modułów fotowoltaicznych, inwerterów, konstrukcji wsporczych, kabli i osprzętu elektrycznego, a także budowę stacji transformatorowej i wykonanie przyłącza do sieci elektroenergetycznej. Ujęto również koszty prac projektowych, robót ziemnych, montażu oraz niezbędnych pomiarów odbiorczych. Łączny koszt inwestycji oszacowano na poziomie około 2,27 mln zł.

Dzięki systemowi pomiarowym możliwe było odczytanie ilości energii elektrycznej wyprodukowanej z omawianej farmy fotowoltaicznej w skali roku. Farma wyprodukowała 1255 MWh energii elektrycznej. Ilość energii wyprodukowanej w poszczególnych miesiącach przedstawiona została w tabeli 17.1.

Tabela 17.1. Ilość wyprodukowanej energii elektrycznej w skali roku

Miesiąc	Produkcja [MWh]
Marzec 2024	91,87
Kwiecień 2024	128,39
Maj 2024	163,78
Czerwiec 2024	161,48
Lipiec 2024	177,86
Sierpień 2024	156,00
Wrzesień 2024	114,93
Październik 2024	95,14
Listopad 2024	28,05
Grudzień 2024	24,38
Styczeń 2025	40,35
Luty 2025	72,88
RAZEM	1255,11

Omawiana w pracy farma fotowoltaiczna rozliczana jest zgodnie z rozliczeniem opartym na średniej miesięcznej cenie energii elektrycznej RCEm. Łączna roczna produkcja energii wyniosła 1255,11 MWh, natomiast całkowity przychód netto ze sprzedaży energii wyniósł 364 543,02 zł. Najwyższe wartości produkcji energii zanotowano w miesiącach letnich – maj (163,78 MWh), czerwiec (161,48 MWh), lipiec (177,86 MWh) oraz sierpień (156,00 MWh). Były to jednocześnie miesiące charakteryzujące się najwyższymi przychodami – czerwiec przyniósł 53 364,30 zł przychodu z tytułu sprzedaży energii elektrycznej, natomiast lipiec 50 106,72 zł.

Tabela 17.2 przedstawia zestawienie przychodu uzyskanego z tytułu sprzedaży energii elektrycznej do sieci w poszczególnych miesiącach. Dane te pozwalają na analizę efektywności i opłacalności inwestycji związanych z farmami fotowoltaicznymi. Podczas analizy zwrócono uwagę na problem wynikający z przeciążeń systemu elektroenergetycznego podczas słonecznych dni gdy wiele farm fotowoltaicznych pracuje z pełną mocą przez co dochodzi do częstych wyłączeń takich instalacji.

Tabela 17.2. Zestawienie miesięcznej produkcji energii, wartości RCEm oraz przychodu netto

Miesiąc	Produkcja [MWh]	RCEm – Rynkowa miesięczna cena energii elektrycznej [zł/MWh]	Przychód netto [zł]
Marzec 2024	91,87	247,85	22 769,98
Kwiecień 2024	128,39	251,93	32 345,29
Maj 2024	163,78	254,19	41 631,24
Czerwiec 2024	161,48	330,47	53 364,30
Lipiec 2024	177,86	281,72	50 106,72
Sierpień 2024	156,00	241,94	37 742,64
Wrzesień 2024	114,93	220,56	25 348,96
Październik 2024	95,14	285,58	27 170,08
Listopad 2024	28,05	394,45	11 064,32
Grudzień 2024	24,38	468,28	11 416,67
Styczeń 2025	40,35	480,01	19 368,40
Luty 2025	72,88	442,02	32 214,42
RAZEM	1255,11		364 543,02

17.5. Podsumowanie

W pracy omówiono przepisy prawne i normy dotyczące farm fotowoltaicznych, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań formalnych, sposobów rozliczania właścicieli oraz zasad projektowania i eksploatacji instalacji. Podkreślono znaczenie normy PN-EN 62124:2005, która określa procedury testowania systemów PV. Przedstawiono proces projektowania farmy fotowoltaicznej, obejmujący dobór elementów instalacji, optymalne usytuowanie paneli oraz projekt stacji transformatorowej. Zwrócono uwagę, że stacja została zaprojektowana z możliwością rozbudowy farmy w przyszłości.

Kolejny etap dotyczył wymaganych pomiarów odbiorczych – rezystancji izolacji, uziemień, prób napięciowych kabli, badań transformatora i pomiarów skuteczności ochrony przeciwporażeniowej. Wskazano, że badania muszą być wykonywane przez uprawniony personel i certyfikowany sprzęt.

W części analitycznej scharakteryzowano efektywność farmy PV o mocy 1 MW. Całkowity koszt inwestycji wyniósł ok. 2,27 mln zł, a koszty eksploatacyjne ok. 50 tys. zł rocznie. Farma wytwarza rocznie ok. 1255,11 MWh energii, co daje przychód ok. 364,5 tys. zł i okres zwrotu ok. 7 lat. W 25-letnim cyklu eksploatacji przewidywany przychód sięga 5,67 mln zł.

Wskazano również na problemy wynikające z niestabilności źródeł PV, zależnych od warunków pogodowych, oraz na częste wyłączenia instalacji w okresach dużej generacji. Zaznaczono potrzebę rozwoju magazynów energii dla zwiększenia stabilności systemu. Podkreślono, że mimo tych trudności farmy PV są efektywne, opłacalne i korzystne ekologicznie, a koszt jednostkowy energii z nich jest niższy niż ze źródeł konwencjonalnych.

Bibliografia

- [1] Polski Komitet Normalizacyjny, *PN-EN 62305-1:2011: Ochrona odgromowa – Część 1: Zasady ogólne*.
- [2] Polski Komitet Normalizacyjny, *PN-HD 60364-6:2008: Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzenie*.

Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Podpisy w powietrzu jako nowa metoda uwierzytelniania osób fizycznych i zabezpieczenia danych w cyfrowym świecie

inż. Bartłomiej Baut

Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo

Katedra Podstaw Informatyki

Techniki biometryczne do dziś pozostawiają wiele przestrzeni do badań nad adaptacją coraz to nowszych rozwiązań bezpieczeństwa. W ramach pracy inżynierskiej zbudowano i przeanalizowano działanie systemu opartego na biometrii behawioralnej podpisów wykonywanych w powietrzu. Z punktu technicznego projekt został podzielony na moduły do rejestracji danych biometrycznych, ekstrakcji cech z wykonanych podpisów oraz ich odpowiedniej klasyfikacji. Wykonano szereg eksperymentów na systemie przez zmiany jego poszczególnych parametrów w celu znalezienia najefektywniejszych wartości dla klasyfikatorów pod kątem uzyskiwanych stóp błędów. Dodatkowo sprawdzono użyteczność i realność wdrożenia omawianego rozwiązania na podstawie testów narzędzia na grupie ponad 30 respondentów podczas 56 spotkań stacjonarnych. W efekcie tych działań zebrano 859 unikalnych próbek podpisów. Przedstawione w pracy rezultaty badań, w tym zrównoważony wskaźnik błędu oscylujący w granicach 4%, udowadniają, że narzędzie ma potencjał na wprowadzenie go w rzeczywistości, a tym samym rozszerzenie listy zabezpieczeń biometrycznych oferowanych dla użytkowników smartfonów, tabletów oraz innych urządzeń elektronicznych.

18.1. Cel i założenia

Bezpośrednią motywacją do napisania pracy inżynierskiej był artykuł naukowy „**Air-Sign: Smartphone authentication by signing in the air**” autorstwa **Yubo Shao, Tinghan Yang, He Wang** oraz **Jianzhu Ma** [1]. Przedstawiony w nim system biometryczny jest bardziej skomplikowany i ekstrahuje cechy dotyczące trasy podpisu, geometrii dłoni, a także poruszania się ręki trzymającej smartfona dzięki czujnikom akustycznym oraz ruchu wbudowanym w urządzenie.

Z kolei głównym celem niniejszej pracy było zbudowanie i zbadanie działania systemu biometrycznego opartego na biometrii behawioralnej podpisów cyfrowych wykonywanych

w powietrzu do kamery oraz przeprowadzenie na nim eksperymentów dotyczących stopnia poprawności klasyfikacji próbek biometrycznych. Praca miała zwrócić uwagę na fakt, że nadal istnieją niewykorzystane cechy ludzkie i narzędzia, które mogłyby potencjalnie posłużyć za kolejne skuteczne metody uwierzytelniania użytkowników w istniejących systemach i urządzeniach elektronicznych. Ważnym celem było również zbudowanie wartościowej bazy podpisów użytkowników, która może posłużyć do przyszłych badań nad tym rozwiązaniem.

Do głównych założeń realizowanej pracy należały m.in.:

- opracowanie modułów do rejestracji podpisów w powietrzu, ekstrakcji cech z próbek biometrycznych oraz ich klasyfikacji na podstawie własnego algorytmu,
- przeprowadzenie badania na grupie wybranych respondentów polegającego na testach użyteczności przedstawionego systemu biometrycznego,
- wykonanie eksperymentów na własnym klasyfikatorze przez zmiany jego parametrów działania i porównanie ich wyników z klasycznymi algorytmami.

18.2. Wstęp teoretyczny

W niniejszym rozdziale przybliżono podstawowe pojęcia związane z podpisami cyfrowymi i elektronicznymi (18.2.1.). Opisano również różnicę między tymi zagadnieniami, która jest istotna w kontekście zrozumienia całości tekstu. Następnie przedstawiono podstawowe metryki klasyfikacyjne potrzebne do prawidłowej analizy wyników eksperymentów umieszczonych w pracy (18.2.2.).

18.2.1. Podpisy cyfrowe a podpisy elektroniczne

W Internecie bardzo często można spotkać się z terminami takimi jak podpis cyfrowy oraz podpis elektroniczny. Pojęcia te są używane często zamiennie, jednak na potrzeby niniejszej pracy ważne jest wskazanie istotnej różnicy między nimi.

Podpisy elektroniczne są węższym terminem w stosunku do podpisów cyfrowych. Wyróżnia je przede wszystkim to, że są zdefiniowane prawnie m.in. przez rozporządzenie unijne **eIDAS**. Oficjalnie oznaczają one „*dane w postaci elektronicznej, które są dołączone lub logicznie powiązane z innymi danymi w postaci elektronicznej, i które użyte są przez podpisującego jako podpis*” [2].

Podpisy cyfrowe to z kolei pojęcie obejmujące każdą formę podpisu elektronicznego oraz jego tradycyjne odpowiedniki, które uległy digitalizacji. Może to być zarówno podpis własnoręcznie oddany przez rysik na ekranie tabletu, jak i skan podpisu wykonanego na papierze. Natomiast podpisy elektroniczne opierają się przede wszystkim na koncepcji kryptografii asymetrycznej i certyfikatach cyfrowych. Mogą, ale nie muszą mieć wizualnego odniesienia do tradycyjnego odręcznego podpisu. Sama definicja podpisów cyfrowych nie jest uregulowana prawnie. Na potrzeby niniejszej pracy zakłada się, że każda forma danych w Internecie, która w sposób intencjonalny identyfikuje człowieka może być traktowana jako forma podpisu cyfrowego w tym podpisy wykonywane w powietrzu.

Obecnie wyróżnia się 2 metody badania pisma. Pierwsza z nich to **analiza statyczna (offline)**, która charakteryzuje się tym, że brany pod uwagę jest obraz przygotowanego

podpisu, np. takiego jak składa prezydent Stanów Zjednoczonych Barack Obama, pokazanego na rysunku 18.1. Zatem nie ma tu informacji dotyczącej porządku występowania kolejnych jego fragmentów. Ryzyko skutecznego podrobienia takiego podpisu jest stosunkowo duże [3].



Rysunek 18.1. Obraz podpisu Baracka Obamy, który może zostać poddany **analizie statycznej** cech biometrycznych (źródło: [4]).

Kolejna metoda bierze pod uwagę **cechy dynamiczne (online)** podpisu, które są zapisywane w trakcie jego składania na urządzeniu elektronicznym. Dzięki temu system bazujący na takiej biometrii może mieć dostęp zarówno do analizy statycznej obrazu podpisu, jak i atrybutów bazujących na sekwencji, np. czasowej, występowania jego kolejnych fragmentów, co pokazano na rysunku 18.2 [3].



Rysunek 18.2. Obraz podpisu Baracka Obamy, który może zostać poddany **analizie statycznej** cech biometrycznych, a także przybliża zarejestrowany podział na 5 sekwencji, w których mogą być badane jego **atrybuty dynamiczne** (źródło: [5]).

Analizowane w pracy **podpisy w powietrzu** stanowią formę **podpisów cyfrowych** oraz należą do **biometrii behawioralnej**. Do zalet tego systemu można zaliczyć m.in. zachowanie większej higieny, ponieważ użytkownik nie musi dotykać ekranu urządzenia ani ewentualnego rysika. Nie jest również wymagany żaden specjalny tablet graficzny czy też aplikacje zewnętrzne, jak te do elektronicznych podpisów kwalifikowanych. Użytkownik ma więcej przestrzeni do tworzenia podpisu, którą ogranicza jedynie zakres kamery wbudowanej w urządzenie, a nie np. mały ekran smartfona. Dzięki wykorzystaniu analizy cech dynamicznych podpisów trudniej jest go podrobić.

18.2.2. Podstawowe metryki klasyfikacyjne

Na bazie wyników klasyfikacji przetwarzanych w systemie próbek podpisów wyliczane są dwie specjalistyczne dla dziedziny biometrii metryki klasyfikacyjne, tj. **średni współczynnik błędów fałszywej akceptacji** (18.1) oraz **średni współczynnik błędów fałszywego odrzucenia** (18.2). W niniejszej pracy stosuje się dla nich oficjalne skróty, którymi są **FAR** (ang. **False Acceptance Rate**) i **FRR** (**False Rejection Rate**) [6].

$$\text{FAR} = \frac{\text{Łączna liczba wystąpień błędnych akceptacji podpisów}}{\text{Łączna liczba dokonanych fałszywych prób weryfikacji}} \times 100\% \quad (18.1)$$

$$\text{FRR} = \frac{\text{Łączna liczba wystąpień błędnych odrzuceń podpisów}}{\text{Łączna liczba dokonanych autentycznych prób weryfikacji}} \times 100\% \quad (18.2)$$

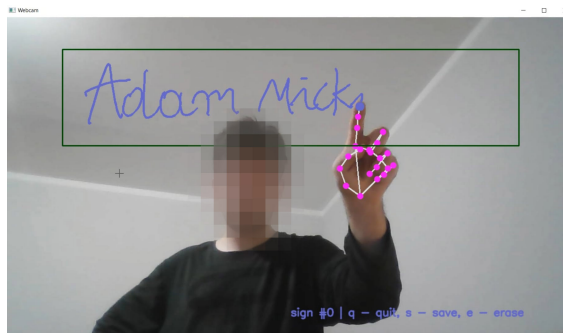
Na rysunkach przedstawiających wykresy wartości współczynników błędów FAR i FRR w zależności od pewnego progu decyzyjnego istotne jest również umieszczenie punktu **EER** będącego **zrównoważonym wskaźnikiem błędu**. W omawianej pracy inżynierskiej w takiej formie prezentowane są wszystkie wyniki działania zarówno autorskiego klasyfikatora podpisów, jak i tych zaimplementowanych w oparciu o klasyczne modele uczenia maszynowego.

18.3. Projekt i wykonanie

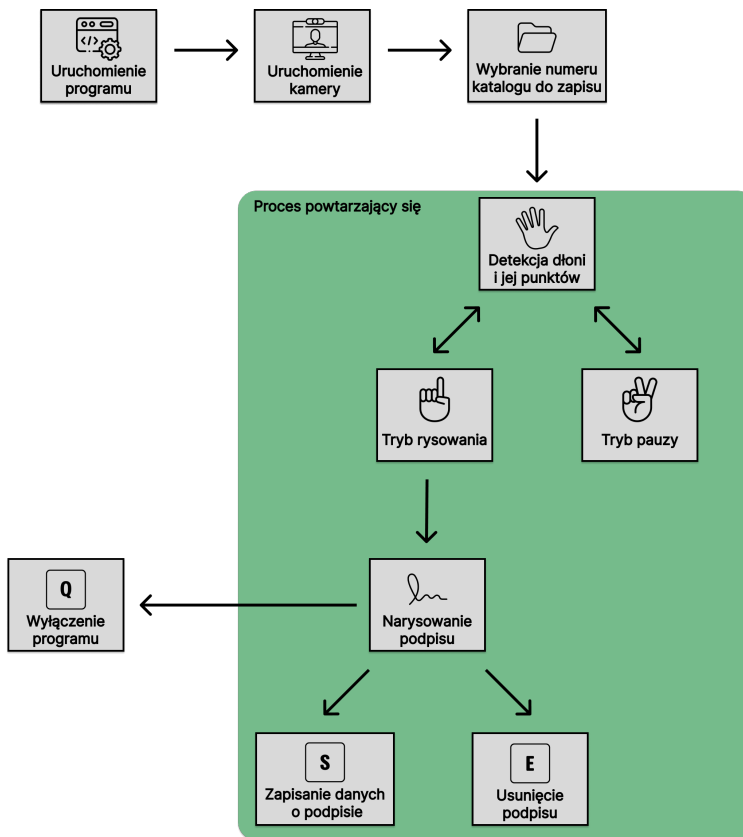
W niniejszym rozdziale przedstawiono opis wykonania projektu systemu biometrycznego podpisów w powietrzu, który podzielono na moduły do rejestracji danych (18.3.1.), ekstrakcji cech z sygnatur (18.3.2.) oraz ich klasyfikacji (18.3.3.) przy użyciu własnego algorytmu, a także ogólnodostępnych rozwiązań w postaci modeli uczenia maszynowego dostępnych w module scikit-learn języka programowania Python.

18.3.1. Moduł rejestracji podpisów

Przedstawiony w pracy moduł rejestracji pozwala na **wykonywanie podpisów w powietrzu do kamery zintegrowanej w pewnym urządzeniu** i zapisywaniu na ich podstawie próbek biometrycznych w postaci serii danych składających się z **punktów rozłożonych w przestrzeni dwuwymiarowej (x, y) w czasie t** . Na rysunku 18.3 pokazano interfejs działającego narzędzia. W obrębie zielonego prostokąta użytkownik może wykonywać swój podpis. Z kolei na schemacie 18.4 przybliżono budowę i działanie całości modułu do rejestracji sygnatur.



Rysunek 18.3. Wygląd interfejsu działającego modułu rejestracji podpisów w powietrzu podczas rysowania sygnatury (źródło: opracowanie własne).



Rysunek 18.4. Schemat działania modułu rejestracji podpisów w powietrzu (źródło: opracowanie własne).

Do wdrożenia modułu rejestracji wykorzystano bazowy kod narzędzia napisanego w języku **Python**, pochodzący z artykułu opublikowanego przez użytkownika o pseudonimie **Sarves** w serwisie **Medium** [7]. Program służący pierwotnie do detekcji dłoni oraz rysowania dostosowano do pozostałych części systemu biometrycznego dokonując odpowiednich modyfikacji skryptu źródłowego.

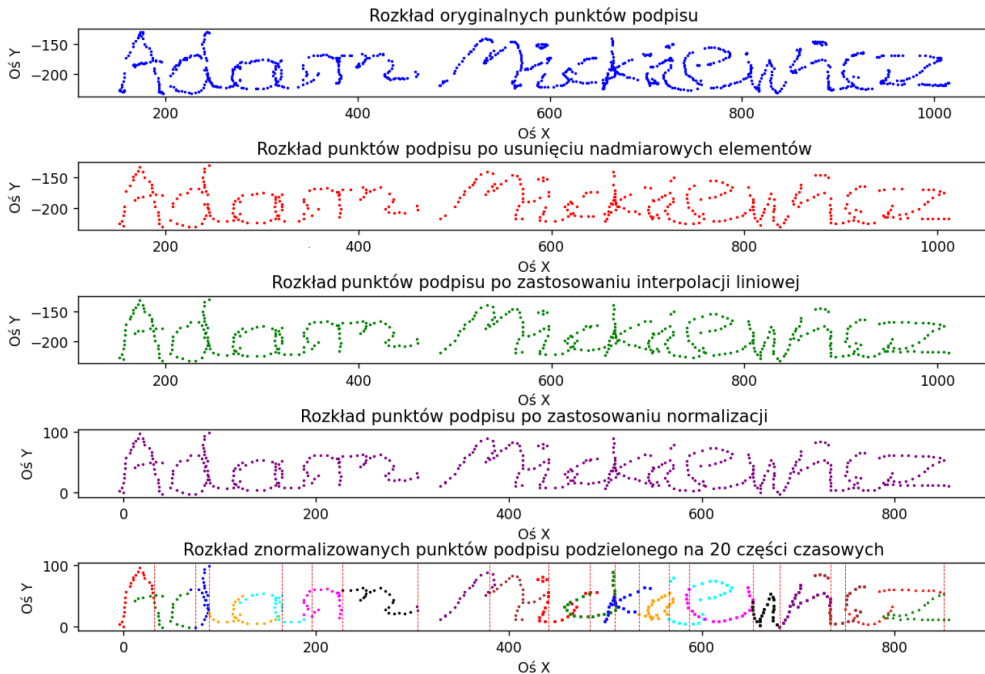
18.3.2. Moduł ekstrakcji cech z podpisów

W celu ekstrakcji cech szczególnych z podpisów należało w pierwszej kolejności odpowiednio przetworzyć zapisane dane biometryczne, które zebrano podczas stacjonarnych **56 sesji badawczych** za pomocą modułu rejestrującego podpisy. Każdy badany miał za zadanie wykonać minimum **15 podpisów** w postaci co najmniej nazwiska, co na koniec wraz z nadmiarowymi sygnaturami dało łącznie **859 unikalnych próbek** zapisanych w postaci plików tekstowych zawierających informacje o punktach w przestrzeni dwuwymiarowej rozłożonych w czasie.

Na potrzeby pracy założono, że **10 podpisów** każdego respondenta zostanie umieszczone losowo w **zbiorze uczącym sygnatur**, natomiast **pozostałe 5 w zbiorze testowym**. Pierwszy zestaw danych jest wykorzystywany do tworzenia tzw. **profilu użytkownika**.

ników. To do nich podczas procesu klasyfikacji porównywane są próbki testowe sygnatur. Wtedy system podejmuje decyzję o pomyślnej lub negatywnej weryfikacji podpisu z analizowanym wzorcem w bazie.

Na rysunku 18.5 przedstawiono podsumowanie wykresów ze wszystkich etapów przetwarzania próbek biometrycznych i jednego dodatkowego dotyczącego podziału podpisu na części czasowe w ramach narzędzia do ekstrakcji cech. Podpis na nim widoczny został wygenerowany w celach testowych i nie należy do żadnej z badanych osób.



Rysunek 18.5. Podsumowanie wykresów ze wszystkich etapów przetwarzania danych i jednego dodatkowego dotyczącego podziału podpisu na części czasowe w ramach narzędzia do ekstrakcji cech (źródło: opracowanie własne).

Etapy przetwarzania danej próbki do momentu zapisu jej w głównej bazie to:

- **transfer i korekcja oryginalnych danych** — przeliczenie zarejestrowanych czasów punktów podpisu do formatu mikrosekundy,
- **usunięcie punktów nadmiarowych z podpisu** — pomniejszenie liczby danych do analizy, np. punkty nachodzące na siebie w tym samym miejscu, w którym pewna osoba trzymała palec podczas rysowania przez zbyt długi okres czasu,
- **interpolacja liniowa brakujących punktów podpisu** — zwiększenie liczby danych w miejscach, gdzie program w wyniku błędów nie zarejestrował punktów podpisu,
- **normalizacja danych** — przesunięcie punktów w kierunku początku układu współrzędnych i sprowadzenie czasów do wielkości 0 ps. Dzięki temu każdy z zarejestrowanych podpisów rozpoczyna się w tej samej lokalizacji oraz chwili,
- **ekstrakcja cech z podpisu** — podział podpisu na pewną liczbę fragmentów czasowych, dla których wyliczane jest kilka cech szczególnych.

W narzędziu do ekstrakcji cech zaimplementowano dokładnie **10 charakterystyk**. Wśród nich znajduje się **po 5 dynamicznych** oraz **statycznych wielkości**. Program pozwala na wybór poszczególnych cech do ekstrakcji, co jest przedmiotem niektórych eksperymentów opisanych bardziej szczegółowo we właściwej pracy. Do przykładowych dynamicznych charakterystyk należą średnia szybkość, przyspieszenie czy też całkowity czas podpisu. Wśród cech statycznych wzięto pod uwagę m.in. całkowity dystans między punktami, nachylenie linii prostej oraz przesunięcie w osi X.

18.3.3. Moduł klasyfikacji podpisów

Zaimplementowany autorski algorytm klasyfikujący, którego schemat działania przedstawiono na rysunku 18.6 pozwala na określenie pewnych progów decyzyjnych mających wpływ na wyniki dopasowywania podpisów do właściwych profili.

Pierwszym parametrem możliwym do ręcznego ustawienia jest **wielokrotność odchylenia standardowego**. Jego zmiana umożliwia potencjalne sprawdzenie **reguły trzech sigma**, która polega na tym, że w **jednej wielokrotności** odchylenia standardowego znajduje się **68,27%** wszystkich obserwacji, w **dwukrotności** jest to już **95,45%**, natomiast dla **trzykrotności** **99,73%**. W zaimplementowanym klasyfikatorze wartość tego parametru **domyślnie wynosi 1**, co stanowi jednokrotność omawianej miary rozproszenia. Rozszerzając odchylenie o jego dwu- lub trzykrotność można zwiększyć w systemie ogólną akceptację podpisów porównywanych do danych profili użytkowników.

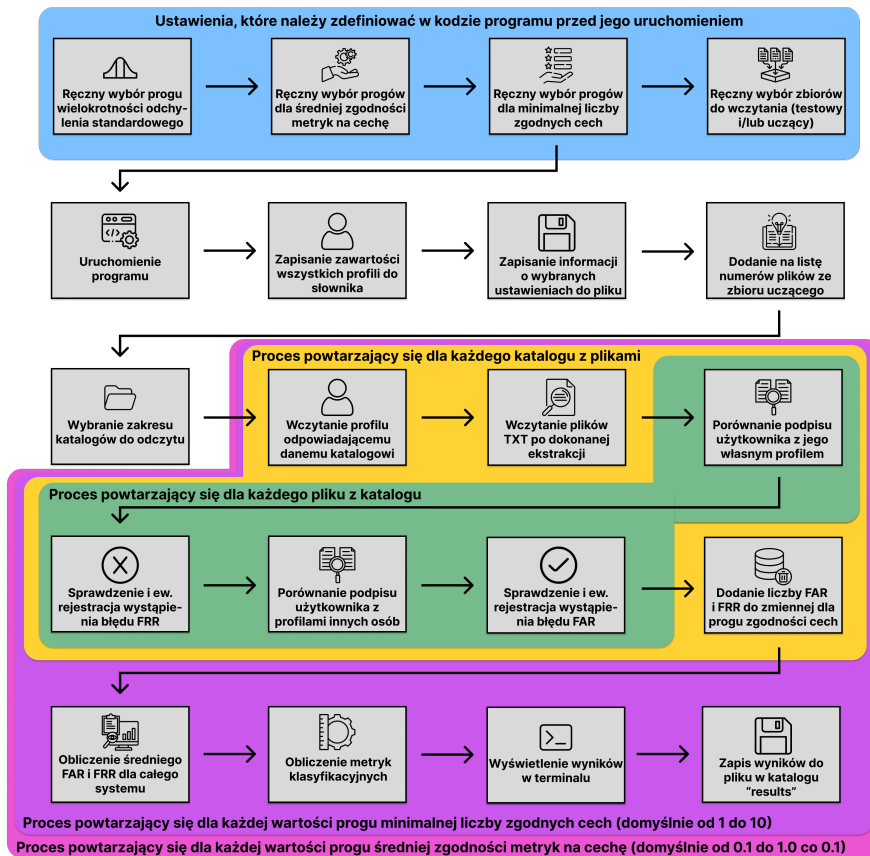
Kolejnym progiem decyzyjnym jest **średnia zgodność metryk na cechę**. Domyślnie to **lista wartości od 0,1 do 1 z krokiem 0,1**, czyli od 10% do 100%. Zakładając, że dana cecha ma wielkości w dziesięciu podziałach czasowych, przy ustawieniu rozpatrywanego progu na np. wartość 0,7, program zadziała tak, że uzna charakterystykę za autentyczną dla danego podpisu w momencie, kiedy 70% ze wspomnianych wyników dla poszczególnych segmentów będzie mieściło się w odpowiadających im miarach odchylenia standardowego w danym profilu użytkownika.

Trzecim ustawieniem możliwym do ręcznej konfiguracji jest **minimalna liczba zgodnych cech**. Przy zastosowaniu tego progu decyzyjnego z wielkością np. 6 program uzna dany podpis za autentyczny, jeżeli co najmniej właśnie tyle charakterystyk zostanie zaklasyfikowane jako rzeczywiste w ramach omawianej wcześniej wartości dotyczącej średniej zgodności metryk na cechę.

Ostatnią opcją jest wybór czy program ma porównywać do profili użytkowników podpisy **tylko ze zbioru testowego, czy również te z uczącego**. Na bazie tych danych zbudowane są poszczególne szablony biometryczne wykorzystywane przez program. W przypadku samego zbioru testowego z każdym profilem zostanie porównane dokładnie **299 podpisów** (po 5 testowych z każdej z 56 sesji i łącznie 19 nadmiarowych), natomiast po dodaniu zbioru uczącego będzie to sumarycznie **859 sygnatur** (po 15 z każdej sesji i łącznie 19 nadmiarowych).

W module klasyfikacji dany podpis jest najpierw porównywany z profilem osoby, od której pochodzi, aby podjąć ewentualną decyzję o zliczeniu wystąpienia **błędu FRR**. Następuje tu analiza każdej z wybranych 10 cech we wszystkich podziałach czasowych podpisu w kontekście przedstawionych wcześniej progów decyzyjnych.

W kolejnym kroku sygnatura porównywana jest ze wszystkimi pozostałymi 55 profi-



Rysunek 18.6. Schemat działania programu do klasyfikacji podpisów (źródło: opracowanie własne).

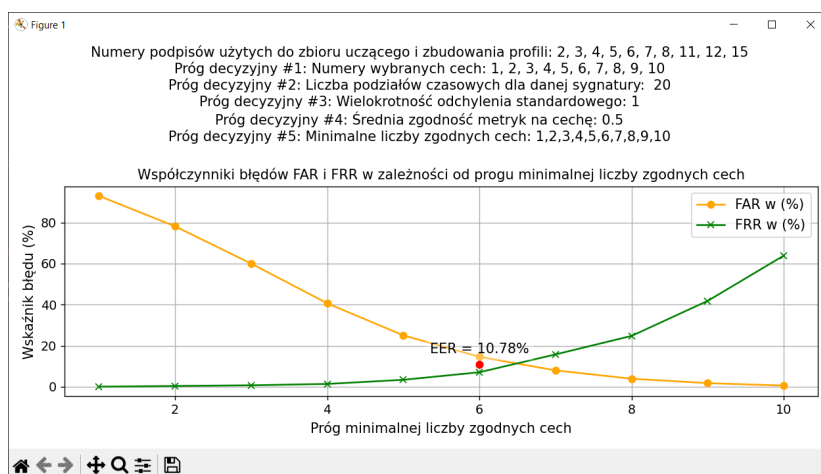
lami osób w bazie. Narzędzie podejmuje tu decyzję o ewentualnym zliczeniu wystąpienia błędu FAR. Następuje to w sytuacji kiedy podpis osoby porównywany do innego obcego profilu zostanie zaakceptowany.

W niniejszej implementacji klasyfikatora **współczynnik błędu FRR** oraz **współczynnik błędu FAR** to miary stosowane w procesie weryfikacji danego użytkownika. Zatem są dozwolone sytuacje, w których podpis danego użytkownika zostanie błędnie zaakceptowany przez większą liczbę obcych profili.

Następnie w module klasyfikatora wyliczane są **średnie współczynniki błędów fałszywej akceptacji (18.1)** oraz **fałszywego odrzucenia (18.2)**. Jeżeli program został ustawiony na wczytywanie tylko podpisów ze zbioru testowego to maksymalna łączna liczba dokonanych fałszywych prób wyniesie 16445, z kolei maksymalna łączna liczba dokonanych autentycznych prób będzie równa 299.

Skrypt generuje ostateczne wyniki w postaci wyliczonych podstawowych **metryk klasyfikacyjnych** opisanych we wcześniejszym rozdziale oraz wykresów podobnych do przykładu z rysunku 18.7. W podtytule diagramu zawarte są zawsze informacje o konfiguracji systemu. Współczynniki błędów FAR (kolor żółty) i FRR (kolor zielony) są przedstawiane w zależności od **progów minimalnej liczby zgodnych cech**. Zbudowany

system zakłada, że na każdym diagramie **zrównoważony wskaźnik błędu (EER)** będzie wyliczany dla najbliższego progu, w którym uzyska najniższą wartość jako średnia odpowiadających mu **współczynników FAR i FRR**.



Rysunek 18.7. Przykładowy wykres wartości współczynników błędów FAR i FRR w zależności od progu minimalnej liczby zgodnych cech dla średniej zgodności metryk na charakterystykę równej 0,5 (źródło: opracowanie własne).

W pracy inżynierskiej zaimplementowano również dwa klasyfikatory bazujące na klasycznych modelach uczenia maszynowego w celu porównania ich wyników z autorskim rozwiązaniem. Pierwszym z nich jest algorytm **KNN** (ang. **K-nearest neighbors**), tj. **K-najbliższych sąsiadów**. W uproszczeniu polega on na tym, że program próbuje określić przynależność danej próbki do odpowiedniej klasy na podstawie innych elementów znajdujących się w jej bezpośrednim otoczeniu. Drugim zaimplementowanym klasyfikatorem jest ten oparty o model **SVM** (ang. **Support Vector Machines**), tj. **maszyna wektorów nośnych**. Pomimo tego, że domyślnie jest on **klasyfikatorem binarnym**, to ma wbudowane mechanizmy, które obsługują **klasyfikację wieloetykietową**. Na potrzeby niniejszej pracy algorytm działa w trybie **jeden kontra reszta** (ang. **one-versus-rest**). W takim wypadku, dla każdego z 56 uczących zestawów podpisów tworzony jest osobny klasyfikator. Wszystkie z nich traktują próbki z pozostałych 55 klas jako błędne.

18.4. Uzyskane wyniki

W ramach realizacji pracy inżynierskiej przeprowadzono dwa główne badania. Pierwsze z nich polegało na **przetestowaniu opracowanego modułu rejestracji podpisów wykonywanych w powietrzu** przez pewną grupę osób podczas indywidualnych spotkań w trybie stacjonarnym (18.4.1.). Zwieńczeniem tych eksperymentów było wypełnienie przez respondentów przygotowanej wcześniej **ankiety elektronicznej dotyczącej oceny wypróbowanej przez nich nowej techniki biometrycznej**.

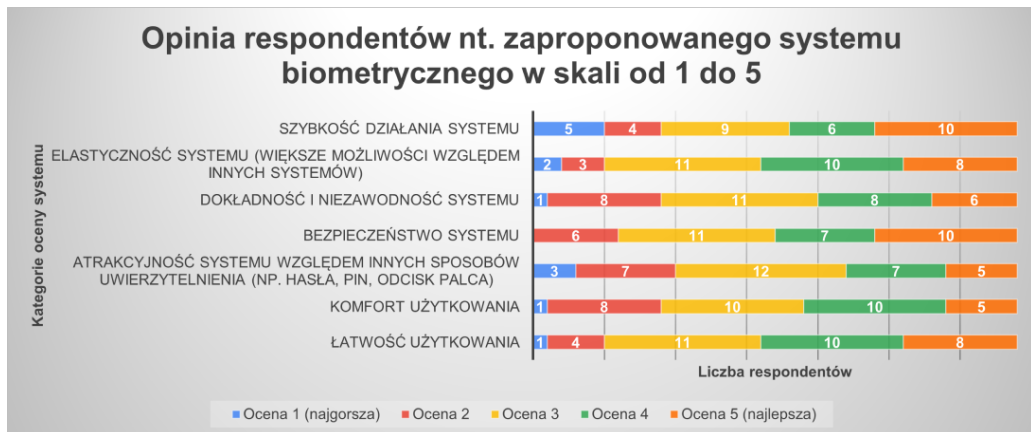
Drugie z kolei badanie dotyczyło **przeprowadzenia kilku eksperymentów na zbudowanym ekstraktorze cech i klasyfikatorze podpisów** (18.4.2.). Polegały one na

zmienianiu niektórych z zaimplementowanych w systemie progów decyzyjnych i sprawdzaniu wpływu tych działań na jakość generowanych przez narzędzie wyników, a w szczególności ich poprawność.

18.4.1. Wyniki testów modułu rejestracji podpisów

Badanie dotyczące **testów modułu rejestracji podpisów w powietrzu** udało się przeprowadzić na **35 uczestnikach** podczas **56 stacjonarnych sesji**. Wyniki ankiety elektronicznej pozwoliły na zebranie informacji o ogólnym stanie wiedzy badanej grupy na temat biometrii, zabezpieczeń oraz podpisów. Jednak jej najważniejszym aspektem były pytania dotyczące oceny przetestowanego modułu rejestracji sygnatur wykonywanych w powietrzu.

Odpowiedzi na jedno z nich przedstawiono na rysunku 18.8. W tym pytaniu uczestnicy wyrazili swoje opinie o narzędziu pod kątem **siedmiu kategorii**, do których należały **szybkość działania programu, elastyczność, dokładność i niezawodność, bezpieczeństwo, atrakcyjność względem innych sposobów uwierzytelniania, komfort oraz łatwość użytkowania**. Dla każdej z nich ankietowany mógł wybrać **numery od 1 do 5**, które pełniły funkcję oceny systemu od najgorszej do najlepszej w kontekście danej charakterystyki.



Rysunek 18.8. Wykres skumulowany słupkowy dotyczący opinii respondentów nt. zaproponowanego systemu biometrycznego w skali od 1 do 5 według kilku kategorii (źródło: wykres i pytania stanowią opracowanie własne).

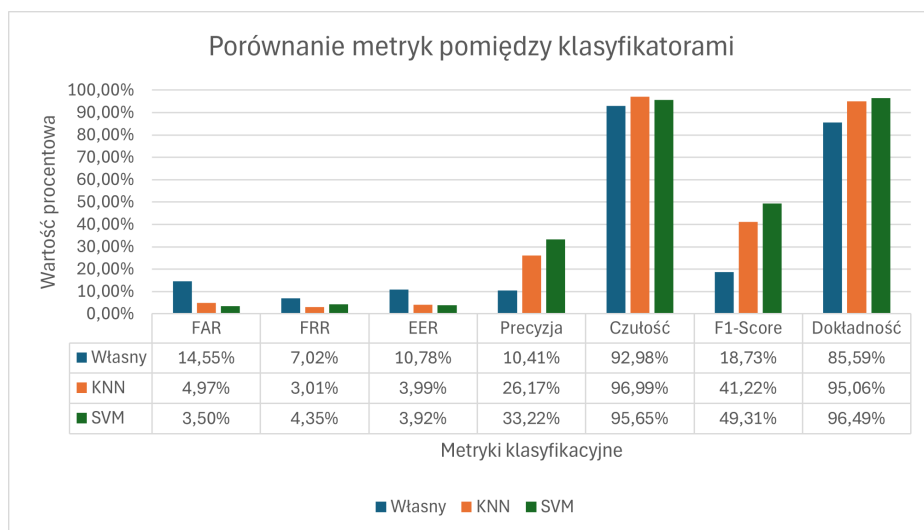
Biorąc pod uwagę wszystkie ocenione aspekty systemu uznano, że **większość badanych wyraziła o nim co najmniej zadowalającą opinię**. Widoczny jest trend, w którym **prawie dla każdej kategorii największa liczba ocen to 3**. Według respondentów narzędzie wypada najlepiej pod kątem **bezpieczeństwa (jedyna charakterystyka bez oceny 1)**, **łatwości użytkowania** oraz **elastyczności**. Kategorie, nad którymi należałoby się szczególnie skupić podczas przyszłego rozwijania systemu to jego **atrakcyjność, komfort użytkowania, dokładność i niezawodność oraz szybkość działania**.

18.4.2. Wyniki testów modułu ekstrakcji cech i klasyfikacji podpisów

Po zebraniu pełnej bazy próbek przeprowadzono kilka eksperymentów na zbudowanym ekstraktorze cech oraz klasyfikatorze podpisów. W ramach pierwszego z nich sprawdzono **jakość generowanych wyników** przez narzędzie po wybraniu **zbioru treningowego oraz testowego sygnatur** do porównywania z poszczególnymi profilami użytkowników. Kolejne eksperymenty obejmowały **usuwanie po jednej z dziesięciu zdefiniowanych w programie cech** oraz **zwiększanie liczby podziałów czasowych podpisów**. Wyniki badań zobrazowano w pracy przez odpowiednie wykresy oraz tabele z wartościami opisanych wcześniej metryk klasyfikacyjnych.

Głównym wnioskiem z pierwszego eksperymentu było to, że **próbki ze zbioru treningowego** użyte do zbudowania profili **mają większą szansę na ich prawidłowe dopasowanie niż w przypadku podpisów testowych**, co wpływa pozytywnie na ogólną jakość klasyfikacji. Z badania drugiego wynikało, że **usunięcie jakiegokolwiek jednej cechy powoduje spadek współczynnika FAR oraz czułości, a także wzrost takich metryk jak FRR, precyzja i dokładność**. Eksperyment trzeci pokazał z kolei, że **zwiększanie liczby podziałów czasowych powoduje ogólne pogorszenie się jakości systemu względem wyniku bazowego segmentowania danego podpisu na 20 części**. Z kolei jej zmniejszanie jest przyczyną poprawy działania klasyfikatora.

Wyniki własnej implementacji klasyfikatora porównano również do rozwiązań opartych na klasycznych modelach uczenia maszynowego KNN oraz SVM. Przedstawiono je na wykresie 18.9. Eksperymenty wykazały, że autorska implementacja narzędzia jest w minimalnym stopniu mniej efektywna pod względem zastosowanych miar w stosunku do pozostałych dwóch algorytmów. Niemniej jednak metryki te nadal prezentują zadowalający poziom jakości klasyfikacji, który nie odbiega tak bardzo od standardowych rozwiązań.



Rysunek 18.9. Porównanie wartości metryk między zaimplementowanymi klasyfikatorami (źródło: opracowanie własne).

Algorytmy KNN oraz SVM prezentują zbliżony poziom jakości klasyfikacji na podstawie tych samych danych treningowych i testowych. Wszystkie trzy zaimplementowane rozwiązania mają stosunkowo niską wartość precyzji spowodowaną problemami z przewidywaniem zbyt dużej liczby fałszywie pozytywnych przypadków w stosunku do rzeczywistych zdarzeń, co wynika ze specyficznego zastosowania współczynnika FAR, tj. W kontekście procesu weryfikacji, a nie identyfikacji. Klasyfikator oparty na modelu KNN w przypadku zmian progu liczby podziałów czasowych na podpis wykazuje niemal identyczne trendy jak zaproponowane autorskie rozwiązanie. Z kolei algorytm SVM zachowuje największą spośród pozostałych rozwiązań stabilność wyników dla poszczególnych metryk podczas stosowania modyfikacji w granicach decyzyjnych. Dalsze badania w tym zakresie można oprzeć na testowaniu innych modeli uczenia maszynowego.

18.5. Podsumowanie

W ramach pracy **udało się opracować system biometryczny** oparty na trzech głównych modułach, tj. **rejestracji podpisów, ekstrakcji cech szczególnych z sygnatur oraz ich klasyfikacji**. Wykorzystano również **klasyczne modele uczenia maszynowego**, których celem była klasyfikacja podpisów na bazie tego samego zbioru treningowego oraz testowego. Oprócz tego przeprowadzono **liczne eksperymenty** i oceniono na ich podstawie stopień poprawności klasyfikacji próbek biometrycznych, który porównano między wykorzystanymi algorytmami.

Zbudowany **system biometryczny pozostawia wiele przestrzeni do dalszych badań** nad konfiguracjami granic w celu uzyskania jak najbardziej optymalnych wartości metryk. Pomimo tego, że narzędzie implementuje tylko 10 cech, to możliwe jest swobodne dokładanie nowych wielkości. Kolejne badania narzędzia mogłyby oprzeć się na testowaniu innych konfiguracji zestawów progów decyzyjnych oraz adaptacji nowych charakterystyk i sprawdzaniu jaki mają one wpływ na jakość przeprowadzanej klasyfikacji. Do ich realizacji można wykorzystać, za odpowiednią zgodą ankietowanych, zbudowaną już **bazę podpisów składającą się z 859 próbek**.

Z uzyskanych dotychczas wyników badań wywnioskowano, że podpisy w powietrzu mogłyby zostać wykorzystane jako **uzupełniający składnik weryfikacji tożsamości**, bowiem **błędy EER oscylują w granicach 4%**. Największej wartości upatruje się jednak w zastosowaniu jej do zdalnych procesów uwierzytelniania – wykonanie podpisu do kamery telefonu, czy komputera.

Podsumowując, opracowany system biometryczny, zgromadzona baza próbek oraz wyniki eksperymentów mogą zostać wykorzystane do przyszłych badań nad rozwojem możliwości biometrycznej podpisów w powietrzu. Obszar literatury, na którym bazuje praca, jest mało wyeksploatowany, więc niniejszy tekst stanowi potencjalny duży wkład w rozwój tej tematyki. Jest to przykład interdyscyplinarnego połączenia tematyki biometrii, cyberbezpieczeństwa, analizy danych oraz sztucznej inteligencji. Co ważne, niniejsza praca inżynierska wykazała, że **biometria, pomimo swojej bogatej historii, do dziś pozostawia wiele przestrzeni do badań nad innowacyjnymi rozwiązaniami** nadal mającymi szansę na ich adaptację w życiu codziennym.

Bibliografia

- [1] Shao Y., Yang T., Wang H., Ma J., AirSign: Smartphone authentication by signing in the air, *Sensors*, **2020**, 21(1), 104. Dostępny online: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/104> (dostęp: 01-04-2025).
- [2] Regulation (EU) No 910/2014 of the European Parliament and of the Council of 23 July 2014 on electronic identification and trust services for electronic transactions in the internal market and repealing Directive 1999/93/EC, Dostępny online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32014R0910> (dostęp: 21-11-2024).
- [3] Fayyaz M., Saffar M. H., Sabokrou M., Hoseini M., Fathy M., Online signature verification based on feature representation, 2015 International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP), Mashhad, Iran, 2015, Opublikowano w materiałach konferencyjnych IEEE.
- [4] File:Barack Obama signature.svg, Dostępny online: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Barack_Obama_signature.svg (dostęp: 17-11-2024).
- [5] How Graphometric Signature and Verification is performed, Dostępny online: <https://www.andxor.com/supported-signatures.html> (dostęp: 17-11-2024).
- [6] ISO/IEC 2382-37:2022(en) Information technology — Vocabulary — Part 37: Biometrics, Dostępny online: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:2382:-37:ed-3:v1:en:sec:37.01.01> (dostęp: 26-11-2024).
- [7] Air Signature Creation using OpenCV, Dostępny online: <https://medium.com/@sarves021999/air-signature-creation-using-opencv-40f1536ecb8b> (dostęp: 17-11-2024).

Implementacja wybranych weryfikatorów normy biometrycznej jakości obrazu ISO/IEC 29794-5 i zaproponowanie alternatywnych rozwiązań

inż. Paulina Otlík
Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo
Katedra Podstaw Informatyki Politechniki Wrocławskiej

Rozpoznawanie twarzy jest jedną z najczęściej stosowanych form weryfikacji biometrycznej. Wraz ze zwiększającą się skutecznością oraz bezpieczeństwem rozwiązania rośnie też jego użycie w dziedzinie specjalistycznej. Biorąc pod uwagę, iż proces weryfikacji obejmuje tysiące osób, często w zróżnicowanych warunkach oraz przy użyciu sprzętu o różnych parametrach, próbki biometryczne są mieszanej jakości. W związku z tym powstała potrzeba zdefiniowania warunków, w których próbka biometryczna jest obiektywnie dobra dla systemu. W tym celu powstaje międzynarodowa norma ISO/IEC 29794-5 [1], zawierająca zdefiniowane weryfikatory jakości oraz opis sugerowanej implementacji. Prace nad normą wciąż trwają, jednak większa część merytoryczna została zakończona, i to na jej podstawie oparto poniższe rozwiązania. Poniższe opracowanie zawiera implementację dwóch systemów oceny jakości zdjęcia twarzy, bazujących na wybranych weryfikatorach normy. Pierwszy sugeruje się zaleceniami wprost z normy, zaś konkurencyjny korzysta z najnowszych rozwiązań naukowych i komercyjnych. Docelowo zostają one porównane przy użyciu bazy zdjęć zróżnicowanej demograficznie i jakościowo.

19.1. Cel i założenia

Celem pracy była analiza normy ISO/IEC 29794-5 [1] oraz implementacja programu do oceny jakości obrazu twarzy na podstawie wybranych weryfikatorów. Opracowano również program alternatywny - złożony z tych samych weryfikatorów, jednak z zastosowaniem mechanizmów oraz części obliczeniowej zgodnych z najnowszymi trendami technicznymi. Oba programy zwracają ogólną procentową ocenę, składającą się z ważonych wyników weryfikatorów. Na podstawie tej oceny oraz własnych obserwacji przeprowadzone zostało porównanie obu programów. Główne założenia projektowe realizowanej pracy zawierały:

- analiza i interpretacja normy ISO/IEC 29794-5 [1] wraz z wyborem weryfikatorów,

- implementacja weryfikatorów zgodnie z normą do programu w języku Python,
- przegląd obecnego stanu techniki w obszarze oceny jakości i wybór metod do testów,
- implementacja programu konkurencyjnego z użyciem najefektywniejszych metod,
- przeprowadzenie eksperymentów porównujących działanie programów, analiza wyników, stworzenie rekomendacji.

19.2. Wstęp teoretyczny

W tej sekcji omówiono procedurę weryfikacji biometrycznej na podstawie zdjęcia twarzy, a także opisano pojęcie norm ISO. Wyodrębniono poszczególne problemy jakości obrazu oraz przeanalizowano ich wpływ na omawiany problem.

19.2.1. Weryfikacja biometryczna

Weryfikacja biometryczna to proces potwierdzania tożsamości na podstawie cech fizycznych lub behawioralnych, takich jak odcisk palca, układ tęczówki, sposób pisania czy rysy twarzy. System biometryczny składa się z dwóch głównych etapów - rejestracji i weryfikacji. Błędy związane ze zbyt niską jakością mogą pojawić się w dwóch miejscach - podczas pobierania wzorca i podczas pobierania próbki do weryfikacji. Mimo iż obecnie coraz więcej algorytmów minimalizuje te problemy, ujednolicenie warunków pobierania próbek może znacznie wpłynąć na skuteczność weryfikacji.

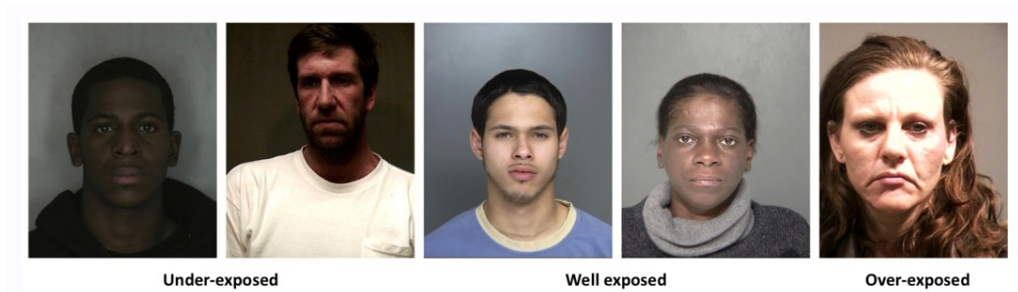
19.2.2. Norma ISO/IEC 29794-5

Normy ISO to opracowywane przez specjalistów w danej dziedzinie wytyczne i wymagania pozwalające na standaryzację produktów, procesów czy systemów. W przypadku omawianej normy określone są optymalne warunki, które powinny zostać spełnione, aby zdjęcie twarzy było odpowiednie do przetwarzania przez system biometryczny. Podczas pisania niniejszej analizy prace nad normą nadal trwają, jednak większa część merytoryczna została opublikowana jako wersja robocza. To na niej będą bazowane wszelkie odniesienia do normy.

19.2.3. Problemy jakości obrazu w weryfikacji biometrycznej

Oświetlenie

Oświetlenie jest jednym z najbardziej złożonych wyzwań dla systemów rozpoznawania twarzy. Problem nie dotyczy jedynie zdjęć niedoświetlonych bądź prześwietlonych, ale także subtelnych cieni wynikających z kierunku padania światła. Refleksy świetlne mogą deformować cechy charakterystyczne twarzy, zaburzając pobieranie adekwatnej próbki biometrycznej. Dodatkowo trudności wprowadzają źródła światła o zmiennej barwie np. lampy LED, powodujących nienaturalne odcienie skóry będące nieprzewidzianym wyzwaniem dla algorytmu.



Rysunek 19.1. Twarze w różnym świetle: niedoświetlenie, prawidłowe, prześwietlenie. [3]

Okluzje twarzy

Okluzje traktujemy jako przysłonięcie fragmentu twarzy, zazwyczaj w formie przedmiotów trzecich. Często skutkują one brakiem wykrycia, co skutecznie uniemożliwia przeprowadzenie weryfikacji. Można wyróżnić wiele rodzajów i form okluzji, niektóre z nich:

- Okluzje twarzy (maski, długie włosy, nakrycia głowy)
- Okluzje ust i nosa (maseczki ochronne, gęsty zarost, pozycje dłoni)
- Okluzje oczu (okulary przeciwsłoneczne, odbicie światła w okularach korekcyjnych)



(a) Okluzja twarzy. [4]

(b) Okluzja oczu. [4]

(c) Okluzja ust i nosa. [4]

Rysunek 19.2. Różne rodzaje okluzji twarzy przesłaniające punkty charakterystyczne.

Ostrość i rozdzielczość obrazu

Ostrość obrazu dotyczy poziomu wyrazistości szczegółów twarzy, zależnej zarówno od ruchu użytkownika jak i utratą skupienia kamery. Jest to aspekt szczególnie istotny, w systemach, gdzie weryfikacja jest wykonywana samodzielnie przez użytkownika na urządzeniach osobistych, narażonych na błędy ludzkie i zróżnicowaną jakość sprzętu. Z tego względu coraz częściej rozważa się wykluczenie słabych urządzeń z procesu weryfikacji, aby zachować wysoki poziom bezpieczeństwa.



Rysunek 19.3. Przykłady zdjęć twarzy o niskiej ostrości i rozdzielczości. [2]

19.3. Projekt i wykonanie

Norma proponuje kilkadziesiąt weryfikatorów jakości obrazu twarzy, zróżnicowanych pod kątem ocenianego aspektu i sposobu implementacji. Spośród nich wybrano pięć pozwalających na zabezpieczenie przed szeroką skalą błędów systemu: obecność pojedynczej twarzy, otwartość oczu, naturalny kolor, pozycja twarzy oraz rozkład luminancji. Część metod wymaga dodatkowych funkcji pomocniczych, takich jak wykrywanie punktów charakterystycznych czy segmentacja twarzy.

Implementację weryfikatorów podzielono na dwa etapy, różniące się systematyką wdrażania. Wersja zgodna z normą wymagała przekształcenia opisu i wzorów udostępnionych w standardzie, do postaci kodu. W przypadku implementacji własnej, należało przeprowadzić analizę najnowszych rozwiązań technicznych, a następnie przetestować i wybrać odpowiednie metody dla każdego przypadku.

Każdy weryfikator został stworzony tak, aby zwracać wynik jakości znormalizowany w skali od zera do stu, gdzie oceny kolejno wyznaczały bardzo złe i perfekcyjne warunki dla systemu biometrycznego. Wynik końcowy obliczano jako średnią ważoną wszystkich weryfikatorów, według wzoru:

$$QC_{\text{końcowy}} = QC_1 \cdot w_1 + QC_2 \cdot w_2 + \dots + QC_5 \cdot w_5 \quad (19.1)$$

gdzie wartości kolejnych parametrów QC wyznaczają wyniki poszczególnych weryfikatorów, a parametry w - wagi do nich przypisane. Na potrzeby uproszczenia interpretowania wyników, wagi zostały znormalizowane tak, aby wynik końcowy również mieścił się w skali od 0 do 100.

Następnie ważony wynik końcowy przekształcono na skalę słowną, zrozumiałą dla użytkownika, za pomocą poniżej przedstawionej logiki:

$$QC_{\text{słowny}} = \begin{cases} \text{zła,} & \text{dla } QC_{\text{końcowy}} < a \\ \text{dobra,} & \text{dla } a \leq QC_{\text{końcowy}} \leq b \\ \text{bardzo dobra,} & \text{dla } b < QC_{\text{końcowy}} \end{cases} \quad (19.2)$$

gdzie parametry a oraz b stanowią progi zmiany słownej oceny jakości.

Takie podejście pozostawia dwa aspekty, które powinny zostać poddane testom: wagi poszczególnych weryfikatorów i progi skali końcowej. Opracowano procedurę testowania

wpływu obu czynników na skuteczność rozwiązania.

W celu zilustrowania przykładowego procesu implementacji, poniżej przedstawiono skrócony opis jednego z weryfikatorów - otwartości oczu.

19.3.1. Implementacja zgodna z normą

Oczy stanowią kluczowy element identyfikacji biometrycznej, a odstępstwa od naturalnego wyglądu, jak całkowite zamknięcie, czy nadmierne otwarcie, mogą prowadzić do błędów wynikających z braku widocznej tęczówki lub przesunięć punktów charakterystycznych twarzy.

W celu ich dokładnej identyfikacji, proces rozpoczynamy od wykrycia twarzy, a następnie jej punktów charakterystycznych, przy pomocy modelu ADNet[5], co umożliwia obliczenie trzech dystansów:

- T - liczba pikseli, mierzona od brody do punktu między oczami.
- D_L - największy dystans między górną a dolną powieką oka lewego.
- D_R - największy dystans między górną a dolną powieką oka prawego.

Następnie spośród wartości D_L i D_R wybieramy mniejszą z nich i oznaczamy jako D_{PAL} . Dzięki temu możemy obliczyć otwartość oczu następującym wzorem:

$$\omega = \frac{D_{PAL}}{T} \quad (19.3)$$

Na jego podstawie oblicza się weryfikator jakości:

$$QC = \text{ROUND}(100(1 - \text{SIGMOID}(\omega, 0.2, 0.06))) \quad (19.4)$$

19.3.2. Implementacja konkurencyjna

Do porównania wybrano trzy algorytmy, korzystające z różnych rozwiązań: punktów charakterystycznych, wykrywania tęczówki oraz proporcji koloru. Każdy z nich skupia się na innym aspekcie, dzięki czemu ich działanie sprawdza się lepiej w różnych warunkach.

Obliczenia z punktów charakterystycznych

Mapowanie punktów charakterystycznych umożliwia precyzyjną identyfikację części twarzy, nawet trudnych do wyodrębnienia. Wykorzystano bibliotekę MediaPipe[6] tworząc siatkę punktów charakterystycznych. Po zidentyfikowaniu punktów wokół oczu, wyodrębniono te znajdujące się na skraju powiek, a następnie wyliczono dystans między nimi i porównano z wysokością twarzy uzyskując proporcję oczu do twarzy - D , zgodnie ze wzorem:

$$D = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{h} \quad (19.5)$$

gdzie (x_1, y_1) i (x_2, y_2) to współrzędne punktów powieki dolnej i górnej, a h to wysokość twarzy. Obliczenia przeprowadzono dla obu oczu.

Na podstawie uzyskanych wyników, określono procent powierzchni twarzy zajmowany przez otwarte oczy, ustalając tym samym próg dla weryfikatora. Po przeprowadzeniu

testów na zróżnicowanym zbiorze zdjęć twarzy, zdefiniowano następujące progi:

$$D = \begin{cases} D \leq 0.05 & \text{oczy zamknięte} \\ 0.05 < D \leq 0.15 & \text{oczy otwarte} \\ D > 0.15 & \text{błędne wykrycie} \end{cases} \quad (19.6)$$

Proporcja koloru

Wykorzystanie analizy koloru pozwala na rozróżnienie między oczami otwartymi a zamkniętymi, niezależnie różnic anatomicznych powieki. Skupiono się na kolorze twardówki, gdyż kolor biały nie występuje naturalnie na żadnym innym obszarze twarzy. Korzystając z wykrytych wcześniej punktów charakterystycznych[6], wyznaczono region oczu, przekonwertowano go na przestrzeń barw HSV i zliczono wszystkie piksele ($n_{regionu}$) oraz białe piksele (n_{bieli}), aby określić ich stosunek - P. Skorzystano z następującego wzoru:

$$P = \frac{n_{bieli}}{n_{regionu}} \quad (19.7)$$

Następnie parametr P przyrównano do wyznaczonych progów, wyznaczonymi na podstawie własnej analizy oraz testów przeprowadzonych na zróżnicowanym zbiorze zdjęć, uwzględniającym różne warunki mogące wpłynąć na wyniki.

$$QC = \begin{cases} P < 0.3 & \text{oczy zamknięte} \\ 0.3 \leq P \leq 0.6 & \text{oczy otwarte} \\ P > 0.6 & \text{błędne wykrycie} \end{cases} \quad (19.8)$$

Wykrywanie tęczówki

Analiza pozycji tęczówki, choć nie stworzona do wykrywania otwarcia oczu, stanowi praktyczną alternatywę. Metoda koncentruje się na detekcji kształtu tęczówki, odporną na zmienne oświetlenie czy różnice anatomiczne. W implementacji skorzystano z biblioteki MediaPipe[6] do wykrycia twarzy i współrzędnych prostokąta jej ograniczającego. Górną część regionu przekształcono do odcieni szarości i zastosowano filtr Gaussa w celu zmniejszenia szumów. Następnie, przy pomocy transformacji Hougha[7], odnaleziono okręgi odpowiadające tęczówkom oczu.

Wybór metody

Analiza trzech metod wykazała, iż każda sprawdza się lepiej w różnych warunkach ze względu na swoje unikalne cechy. Wykorzystanie punktów charakterystycznych twarzy wykazywało dobrą skuteczność w warunkach standardowych, jednak nietypowa anatomia oczu wprowadzała problemy przy wyliczaniu neutralnych progów klasyfikacji. Proporcja koloru najlepiej sprawdzała się w równomiernym oświetleniu, tracąc na skuteczności w wypadku prześwietleń i niedoświetleń. Analiza pozycji tęczówki wyróżniła się odpornością na różne scenariusze, radząc sobie w sytuacjach problematycznych dla pozostałych metod. Mimo iż nie weryfikowała otwarcia oczu bezpośrednio, sprawdziła się najlepiej

w precyzyjnym określaniu wartości weryfikatora.



Rysunek 19.4. Przedstawione działanie wybranej metody z zaznaczonymi tęczęwkami.

Implementacja wybranej metody

Implementacja została przeprowadzona zgodnie z opisem 19.3.2.. Po uzyskaniu liczby wykrytych okręgów n , wartość weryfikatora jakości obliczamy w następujący sposób:

$$QC = \begin{cases} 0 & \text{dla } n = 0 \\ 80 & \text{dla } n = 1 \\ 100 & \text{dla } n = 2 \\ \frac{100}{n} & \text{dla } n > 2 \end{cases} \quad (19.9)$$

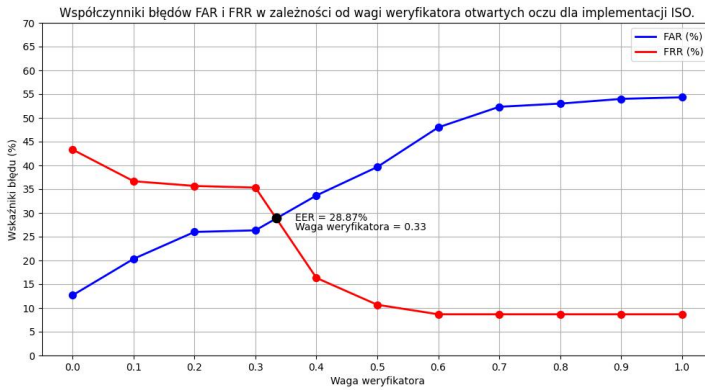
19.3.3. Optymalizacja i testy

Testy obejmowały analizę wpływu wag weryfikatorów na końcową ocenę jakości oraz modyfikację progów w skali trzystopniowej. Ustalono które komponenty mają największy wpływ i jak ich zmiany oddziałują na adekwatną ocenę.

Do testów stworzono dedykowany zbiór składający się ze zdjęć twarzy pochodzących z Lagenda[8] oraz LFW[9], podzielonych na kategorie jakości, uwzględniając różnorodność wiekową i etniczną. Zdjęcia dobrano w taki sposób, aby były jak najbardziej reprezentatywne, pod kątem jakości ocenianej przez każdy z weryfikatorów. Następnie każdemu przydzielono odpowiednią kategorię jakości. Skuteczność systemu oceniano za pomocą wskaźników FAR, FRR oraz EER, pozwalających na analizę wydajności, wskazując na zdolność systemu do prawidłowej weryfikacji jakości.

Analiza wag weryfikatorów

Testy przeprowadzono dla klasyfikacji ISO i własnej, stosując tę samą metodologię. Stopniowo zwiększano wagę weryfikatora, zaczynając od wartości 0, a kończąc na 1, dokonując zmian co 0,1. Następnie, na potrzeby testów przyjęto założenia dotyczące progów oceny końcowej. To pozwoliło na zdefiniowanie wyników końcowych, co umożliwiło porównanie z rzeczywistymi etykietami zbioru i wyliczenie miar skuteczności weryfikacji.



Rysunek 19.5. Przykładowy wykres przedstawiający współczynniki błędów FAR, FRR oraz EER w zależności od wagi weryfikatora otwartych oczu dla implementacji ISO.

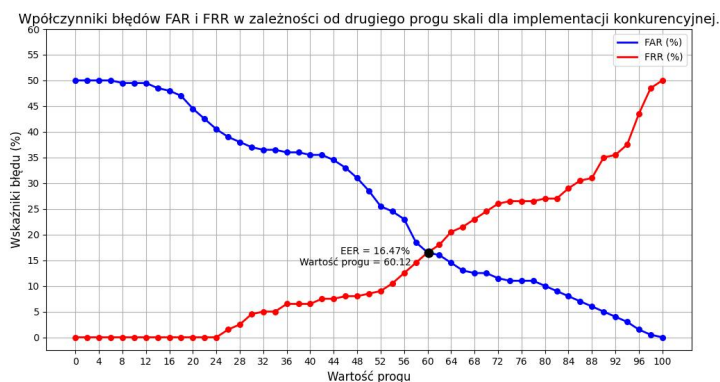
Analiza wyników wszystkich weryfikatorów wskazuje, że pod kątem ogólnej efektywności implementacja własna przewyższa wersję zgodną z normą ISO. Uzyskuje niższe wartości współczynnika EER, a dodatkowo wyniki są stabilniejsze i bardziej przewidywalne co czyni ją bardziej niezawodną w praktyce.

Weryfikator	Wartości wag dla weryfikatorów ISO	Wartości wag dla weryfikatorów konkurencyjnych
Obecność pojedynczej twarzy	0,28	0,042
Naturalny kolor twarzy	0,128	0,4
Otwarte oczy	0,264	0,308
Pozycja twarzy	0,264	0,167
Rozkład luminancji	0,064	0,083

Tabela 19.1. Wartości najlepszych wag dla weryfikatorów ISO i konkurencyjnych.

Analiza progu wyniku końcowego

Po ustaleniu optymalnych wag dla każdego z weryfikatorów, należało zweryfikować progi, służące do przeliczania końcowego wyniku jakości na skalę słowną. Dla obu progów, przy skorzystaniu z ustalonych najlepszych wag, obliczono końcowe wartości ważone z krokiem 2. Następnie, na podstawie otrzymanych wyników i etykiet znajdujących się w zbiorze danych, wyliczono wartości FAR i FRR dla poszczególnych progów.



Rysunek 19.6. Przykładowy wykres przedstawiający współczynniki błędów FAR, FRR oraz EER w zależności od drugiego progu skali dla implementacji konkurencyjnej.

Analiza progów wykazała istotne różnice: implementacja ISO wyróżnia się dużą czułością, skutkując gwałtownymi zmianami FAR i FRR w wąskim zakresie progów, co może być przydatne przy dużej precyzji, ale zwiększa podatność na zmienność danych. Z kolei implementacja własna wykazuje większą stabilność wskaźników w całym zakresie progów, zapewniając lepszą odporność na różnorodne dane wejściowe i wyższą niezawodność.

Próg	Wartości progów dla implementacji ISO	Wartości progów dla implementacji konkurencyjnej
Próg dolny	47,29	23,65
Próg górny	65,33	60,12

Tabela 19.2. Wartości najlepszych progów dla implementacji ISO i konkurencyjnej.

19.4. Uzyskane wyniki

Po dobraniu wag oraz progów, przetestowano zoptymalizowane programy pod kątem skuteczności i dokładności. Ostateczne wskaźniki błędów zaprezentowano poniżej:

Wskaźnik błędu	Implementacja ISO	Implementacja konkurencyjna
FAR	0,23	0,17
FRR	0,22	0,17

Tabela 19.3. Wskaźniki błędów dla zoptymalizowanych implementacji ISO i konkurencyjnej.

Wyniki wskazują, że implementacja własna jest skuteczniejsza o 5% dla obu wskaźników, co odzwierciedla wysoką jakość nowoczesnych algorytmów. Na niekorzyść metod implementacji zgodnych z normą działały przestarzałe rozwiązania zalecone przez autorów. W rezultacie, bardziej nowoczesne podejście zastosowane we własnej implementacji okazało się bardziej efektywne i trafne w ocenie jakości, wykazując lepszą adaptację do zmieniających się warunków obserwowanych na zdjęciach.

19.5. Podsumowanie

W pracy opracowano dwa konkurencyjne systemy służące do oceny jakości zdjęcia, przy użyciu wybranych weryfikatorów normy ISO/IEC 29794-5. Jeden oparto na zaleceniach powstającej normy, drugi na najnowszych osiągnięciach w dziedzinie analizy obrazu. Oba umożliwiają użytkownikowi ustawienie własnych wag weryfikatorów oraz progów oceny końcowej oraz oferują parametry zoptymalizowane testami na specjalnym zbiorze danych. Eksperymenty wykazały wyższą skuteczność konkurencyjnego systemu, podczas gdy norma wprowadza adekwatne, lecz przestarzałe rozwiązania.

Wdrożenie systemu oceny jakości zdjęcia w systemach biometrycznych jest kluczowe dla efektywności sektorów biznesowych i przemysłowych. Analiza jakości zdjęcia umożliwia dokładniejsze mapowanie błędów systemu i zwiększa jego wyjaśnialność, co jest istotne w systemach wysokiego ryzyka. Dodatkowo automatyczna analiza jakości pozwala na zwiększenie skuteczności identyfikacji małym kosztem operacyjnym, szczególnie w sektorach opierających się na samodzielnej weryfikacji użytkowników, takich jak bankowość czy usługi publiczne. Wraz z wprowadzeniem normy, możemy spodziewać się integracji systemów oceny jakości z platformami biometrycznymi, dzięki czemu nieodwracalnie staną się stałym elementem infrastruktury, zwiększając automatyzację i minimalizując błędy.

Bibliografia

- [1] ISO/IEC. ISO/IEC 29794-5:2025 – Information technology: Biometric sample quality – Part 5: Face image data. *ISO Standard* **2025**, 1st ed., Geneva.
- [2] Wang Z., Miao Z., Wu J. Q. M., Wan Y., Tang Z., Low-resolution face recognition: a review. *Visual Computer* **2014**, 30, s. 359–386.
- [3] Face Recognition. Dostęp online: http://www.bernardsmith.eu/computer_science/computer_security/face_recognition/ (dostęp: 15-11-2024).
- [4] OFIQ Project Images. Dostęp online: <https://github.com/BSI-OFIQ/OFIQ-Project/> (dostęp: 10-09-2024)
- [5] Huang, Y.; Yang, H.; Li, C.; Kim, J.; Wei, F., ADNet: Leveraging Error-Bias Towards Normal Direction in Face Alignment, ICCV 2021, s. 3080–3090. Dostęp online: <https://github.com/huangyangyu/ADNet> (dostęp: 01-09-2024)
- [6] Google AI Edge, *MediaPipe*, 2019. Dostęp online: <https://github.com/google-ai-edge/mediapipe> (dostęp: 01-09-2024)
- [7] Biranje, U.; Suryavanshi, S.; Khatkar, R.; Khalifa, A.; Joshi, S., Circle Detection Using Circular Hough Transform, *Int. J. Sci. Res. Eng. Dev.*, 2019, 2 (5), ISSN: 2581-7175.
- [8] Kuprashevich, M.; Tolstykh, I., *MiVOLO: Multi-input Transformer for Age and Gender Estimation*, 2023. Dostęp online: <https://arxiv.org/abs/2307.04616> (dostęp: 06-04-2025).
- [9] Huang, G.B.; Ramesh, M.; Berg, T.; Learned-Miller, E., *Labeled Faces in the Wild: A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments*. Technical Report No. 07-49, University of Massachusetts, Amherst, październik 2007.

Symulacja procesu sterowania przy zastosowaniu wybranego narzędzia oraz protokołu TwinCAT ADS lub/i OPC/UA

inż. Barbara Sipa

Informatyczne Systemy Automatyki

dr inż. Andrzej Jabłoński

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Praca dyplomowa została poświęcona zagadnieniu symulacji procesów produkcyjnych oraz integracji systemów sterowania z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi i protokołów komunikacyjnych. Projekt zrealizowano we współpracy z firmą Beckhoff, co umożliwiło zastosowanie rozwiązań zgodnych ze standardami przemysłowymi. Celem pracy było przeprowadzenie przeglądu dostępnych technologii oraz wykonanie implementacji sterowania dla przykładowego procesu w środowisku symulacyjnym. Do realizacji zadania wykorzystano program Factory I/O jako platformę symulacyjną oraz środowisko TwinCAT 3 przeznaczone do programowania sterowników PLC. Komunikacja między elementami systemu została zrealizowana przy użyciu protokołu OPC UA, co pozwoliło na stworzenie elastycznej i niezawodnej infrastruktury wymiany danych. Efektem projektu było opracowanie rozwiązania umożliwiającego wierną reprezentację procesów technologicznych w warunkach wirtualnych, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości ich bezpiecznego sterowania. System wykazał wysoką przejrzystość i skalowalność, a jego architektura pozwala zarówno na wykorzystanie w procesach dydaktycznych, jak i jako wzorzec integracji w praktyce przemysłowej.

20.1. Cel i założenia

Celem niniejszej pracy dyplomowej było opracowanie symulacji dla procesu sterowania umożliwiającej zarówno poszerzenie swoich umiejętności w zakresie programowania sterowników PLC oraz w dalszych etapach - wykorzystanie wyżej wspomnianej struktury dla tworzenia cyfrowych bliźniaków. Praca objęła zarówno analizę zagadnień, jak praktyczne rozwiązanie zaprojektowane zgodnie z wyznaczonymi wymaganiami. Głównymi założeniami projektowymi realizowanej pracy są:

- przeprowadzenie przeglądu narzędzi umożliwiających symulację procesów produkcyjnych,

- przedstawienie systemów sterowania wykorzystywanych we współczesnej automatyce,
- analiza i opis wybranych protokołów komunikacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem TwinCAT ADS oraz OPC UA,
- zapoznanie się z działaniem i funkcjonalnością środowiska Factory I/O oraz sterownika wirtualnego prod. Beckhoff,
- opracowanie koncepcji symulacji wybranego procesu technologicznego,
- stworzenie wizualizacji procesu w środowisku Factory I/O oraz programu sterującego dla sterownika PLC,
- integracja systemu przez utworzenie komunikacji między sterownikiem PLC a symulacją,
- przetestowanie i analiza poprawności działania stworzonego systemu,
- przygotowanie dokumentacji umożliwiającej realizację symulacji dla podobnych systemów,
- opracowanie wniosków końcowych oraz wskazanie perspektyw dalszego rozwoju projektu.

20.2. Wstęp teoretyczny

Automatyzacja procesów przemysłowych stanowi jeden z kluczowych obszarów współczesnej inżynierii, a jej rozwój bezpośrednio wpływa na efektywność, bezpieczeństwo i niezawodność produkcji. Wymaga to stosowania systemów sterowania zdolnych do pracy w zróżnicowanych warunkach technologicznych oraz zapewnienia odpowiednich standardów komunikacji między urządzeniami. W literaturze i praktyce inżynierskiej wyróżnia się kilka podstawowych typów systemów sterowania. Do najczęściej stosowanych należą systemy PLC, charakteryzujące się wysoką elastycznością i niezawodnością; DCS, dedykowane dla określonych aplikacji przemysłowych, cenione za stabilność, lecz ograniczone pod względem modyfikacji; SCADA, które poza sterowaniem umożliwiają także wizualizację i archiwizację danych; a także stosunkowo nowe rozwiązania IoT, oferujące szerokie możliwości integracyjne, jednak obciążone ryzykiem związanym z komunikacją przez sieć publiczną.

Równolegle istotnym obszarem badań i praktyki jest symulacja procesów sterowania, która pozwala na projektowanie, testowanie i optymalizację systemów jeszcze przed ich wdrożeniem w warunkach rzeczywistych. Dostępne środowiska, takie jak AnyLogic, Simulink czy Factory I/O, różnią się zakresem funkcjonalności oraz poziomem zaawansowania. W niniejszej pracy wykorzystano aplikację Factory I/O, która dzięki przejrzystemu interfejsowi, wysokiej jakości wizualizacji 3D oraz możliwości integracji z rzeczywistymi sterownikami PLC, stanowi narzędzie powszechnie stosowane w dydaktyce i badaniach.

Nieodłącznym elementem nowoczesnych systemów automatyki są protokoły komunikacyjne, umożliwiające wymianę danych między urządzeniami i systemami nadrzędnymi. Szczególne znaczenie mają tutaj protokoły deterministyczne i niezawodne, które gwarantują poprawną synchronizację i bezpieczeństwo pracy systemu. Wśród nich wyróżnić należy TwinCAT ADS – wewnętrzny protokół środowiska Beckhoff, zapewniający spójną wymianę danych oraz wysoką elastyczność, oraz OPC UA – standard uznawany za

fundament rozwoju koncepcji Przemysłu 4.0, oferujący skalowalność i zaawansowane mechanizmy zabezpieczeń.

W ramach niniejszej pracy zrealizowano implementację systemu sterowania opartego na sterowniku PLC Beckhoff, zintegrowanego z wirtualnym środowiskiem Factory I/O, przy wykorzystaniu komunikacji z zastosowaniem protokołów TwinCAT ADS oraz OPC UA. Takie podejście pozwala na odwzorowanie rzeczywistych procesów przemysłowych w warunkach laboratoryjnych, a jednocześnie stanowi podstawę do dalszych badań nad efektywnością i bezpieczeństwem wymiany danych w zautomatyzowanych systemach produkcyjnych.

20.3. Projekt i wykonanie

Na podstawie analizy problemu oraz założeń projektowych zostało zaproponowane rozwiązanie. Koncepcja skupiła w sobie stworzenie symulacji w środowisku Factory I/O, a następnie połączenie jej bezpośrednio ze sterownikiem PLC. W tym celu został wykorzystany protokół OPC UA. Dodatkowo, wykorzystano również protokół TwinCAT ADS, który umożliwił komunikację między urządzeniem z systemem Windows 10 pozwalającym na stworzenie oraz monitorowanie programu, a sterownikiem wirtualnym. Poniżej, na rysunku 20.1, został przedstawiony schemat, w jaki zostały połączone kolejne elementy projektu.

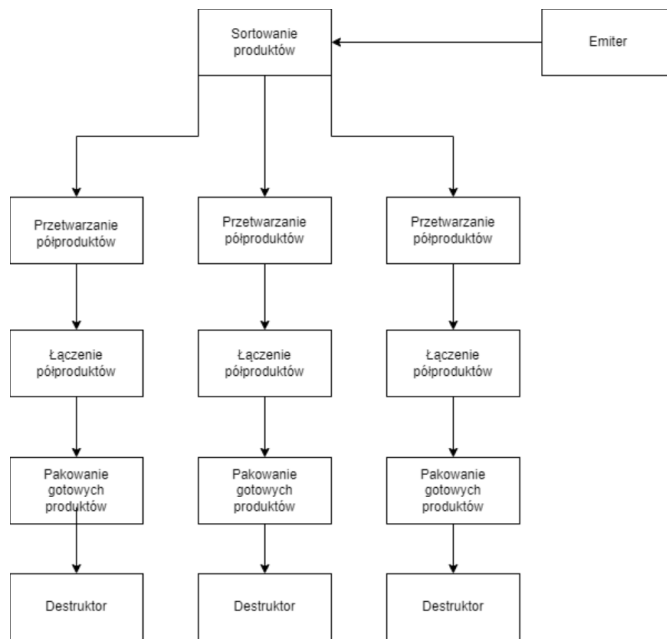


Rysunek 20.1. Schemat połączenia wszystkich komponentów

20.3.1. Opis projektu symulacji

Głównym zamysłem towarzyszącym powstaniu symulacji była realizacja jednej z części całego, większego procesu. Środowisko Factory I/O zostało stworzone w taki sposób, że nie jest w stanie zapewnić ciągłości procesów. Znajdują się w nim natomiast narzędzia, które pełnią funkcje rozpoczęcia i zakończenia konkretnych części procesu. W tym celu zostały wykorzystane: emiter oraz destruktor, które kolejno wytwarzały materiał, a następnie usuwały go z symulacji.

Na rysunku 20.2 został przedstawiony schemat blokowy, na podstawie którego stworzono symulację.



Rysunek 20.2. Schemat przebiegu symulacji

Cechą charakterystyczną dla powyższego schematu jest powtarzalność. Po zakończeniu procesu sortowania materiały zostawały poddawane kolejnym identycznym procesom, dostosowanym pod konkretny rodzaj surowca. Zaprojektowanie linii produkcyjnej w ten sposób pozwoliło na odwzorowanie działania charakterystycznego dla powszechnie stosowanych rozwiązań przemysłowych. Jednocześnie, dodało kolejne wyzwanie na etapie tworzenia sterowania – algorytm sterujący musiał być w łatwy sposób skalowalny dla kolejnych części linii.

Rysunek 20.3 przedstawia rzut z lotu ptaka na wykonaną symulację.

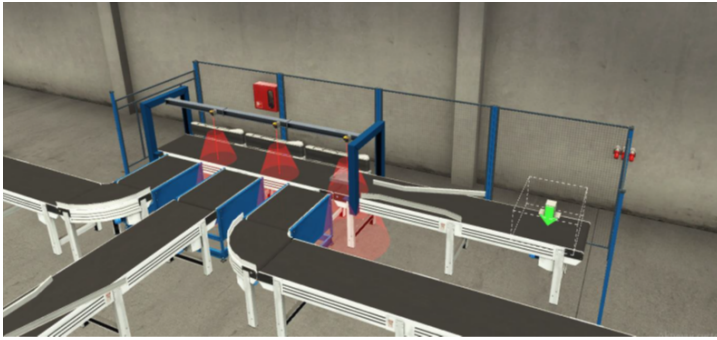


Rysunek 20.3. Proces symulacyjny

W oparciu o realizowane zadania możliwe jest wyodrębnienie czterech działań mających kluczowe znaczenie dla prawidłowego przebiegu procesu:

1. Sortowanie produktów

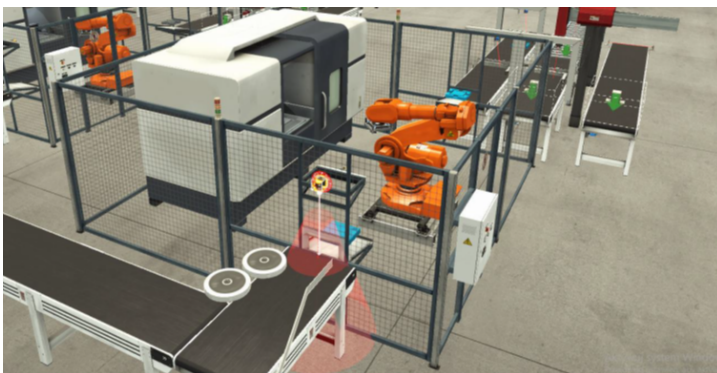
Jest to pierwszy, a zarazem kluczowy etap realizacji procesu. Umożliwia on dalszą, bezawaryjną pracę całej symulacji. Do jego poprawnego działania zostały wykorzystane: trzy sensory wizyjne, trzy ramiona sortujące o możliwości swobodnego ruchu oraz trzy przenośniki taśmowe wyposażone w wagi. Rysunek 4 przedstawia rozmieszczenie wyżej wspomnianych elementów. Logika programu odpowiednio wykrywa materiał, który następnie za pomocą ruchomego ramienia jest przesuwany na odpowiednią część linii produkcyjnej. Zakończenie ruchu ramienia odbywa się w momencie, gdy przenośnik wykryje wzrost wagi.



Rysunek 20.4. Działanie procesu sortowania

2. Przetwarzanie półproduktów

Przetwarzanie półproduktów realizowane jest w Centrum Obróbczym, które odpowiada za wytwarzanie elementów konstrukcyjnych z surowców. W ramach projektu stanowisko pełni funkcję produkcji podstaw. Proces technologiczny inicjowany jest przez pobranie materiału przez manipulator i umieszczenie go w maszynie CNC, gdzie następuje obróbka w zadanym cyklu czasowym wynoszącym od 3 do 6 s w zależności od rodzaju produktu. Dodatkowo w układzie zastosowano sensor wizyjny, umożliwiający detekcję nadchodzącego przedmiotu, co zwiększa niezawodność procesu. Wyżej przedstawiony proces znajduje się na rysunku 20.5.



Rysunek 20.5. Działanie procesu przetwarzania półproduktów

3. Łączenie półproduktów

Na tym etapie procesu dochodzi do połączenia półproduktu wytworzonego wcześniej w maszynie CNC z nowym elementem. W efekcie powstaje gotowy produkt, składający się z podstawy oraz pokrywy (rysunek 20.6).

W realizacji zadania wykorzystano następujące elementy stanowiska:

- pozycjonery – umożliwiające prawidłowe ułożenie materiału przez jego zaciśnięcie; sterowanie realizowane jest przy użyciu zmiennych typu BOOL,
- czujniki dyfuzyjne – odpowiedzialne za detekcję obecności obiektu w określonym obszarze, działające w oparciu o zmienne typu BOOL,
- emiter pokryw – generujący gotowy półprodukt w postaci pokrywy,
- dwuosiowe ramię robota typu Pick and Place – posiadające dwie możliwe konfiguracje sterowania; w projekcie zastosowano wariant wykorzystujący zmienne analogowe w standardzie napięciowym 0–10 V.

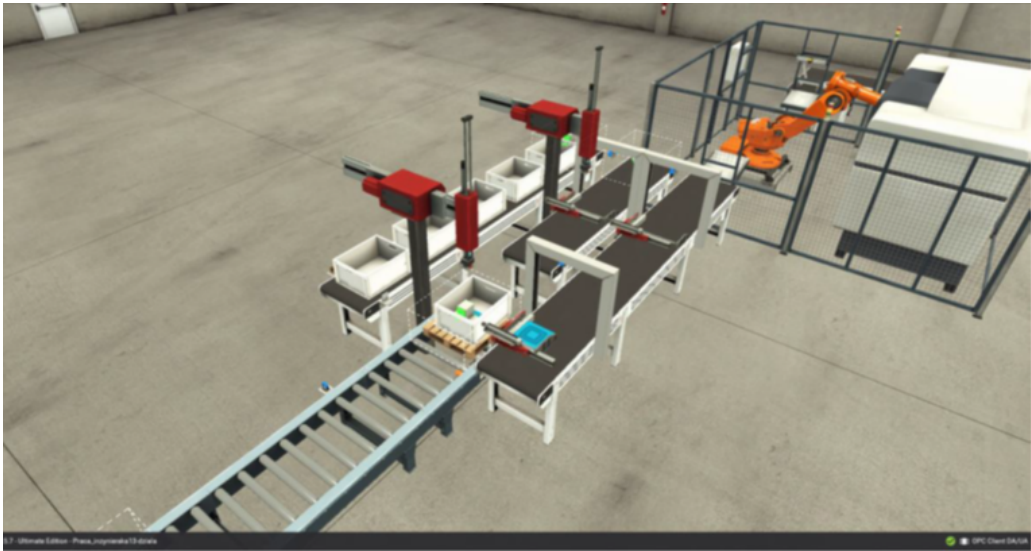


Rysunek 20.6. Działanie procesu łączenia półproduktów

4. Pakowanie gotowych produktów

Proces końcowy symulacji obejmuje pakowanie gotowych produktów do skrzynek oraz umieszczanie ich na paletach. Zadanie to obejmuje przeniesienie skrzynek z przenośnika taśmowego na drewniane palety znajdujące się na przenośniku rolkowym, który następnie transportuje paletę do strefy usunięcia przy użyciu destruktora, zamykając tym samym cały proces. Jego działanie zostało przedstawione na rysunku 20.7. W realizacji etapu wykorzystano następujące urządzenia:

- dwuosiowe ramię robota typu Pick and Place,
- trzy czujniki dyfuzyjne,
- czujnik optyczny refleksyjny z reflektorem – detekcja skrzynek przez przerwanie wiązki światła, zmienna typu BOOL,
- pozycjoner,
- emiter palet,
- emiter skrzynek.



Rysunek 20.7. Działanie procesu pakowania gotowych produktów

Przedstawiona powyżej dokumentacja opisuje proces tworzenia symulacji, który następnie posłużył jako podstawa do opracowania systemu sterowania

20.3.2. Realizacja procesu sterowania

Na tym etapie pracy opracowano projekt oraz symulacyjną implementację systemu sterowania dla opisanego procesu produkcyjnego. Podstawą systemu była struktura zmiennych globalnych odwzorowujących stany oraz sygnały wejściowe i wyjściowe elementów linii. Poszczególne moduły procesu zostały zintegrowane w spójny układ, co zapewniło płynność działania systemu. Sterowanie zaimplementowano w środowisku TwinCAT 3.

Sterowanie procesem sortowania materiałów zrealizowano w oparciu o prosty algorytm warunkowy, który – wykorzystując dane z czujników i wag – umożliwił automatyczne wyłączanie ramienia sortującego, zwiększając wydajność i ograniczając błędy. Kluczową rolę odegrał blok funkcyjny FB_Sorting, zastosowany wielokrotnie do różnych surowców.

Dla centrum obróbczego opracowano sterowanie zabezpieczające pracę robota i zapewniające realizację kolejnych zadań: pobrania materiału, obróbki i odkładania gotowego półproduktu. Wykorzystano blok FB_Machining_Center, którego instancje przypisano do poszczególnych materiałów, co ułatwiło skalowalność programu. Najbardziej złożony okazał się etap produkcji i pakowania gotowego wyrobu, wymagający kontroli pozycji robota oraz obsługi licznych bloków funkcyjnych. Program umożliwiał tworzenie produktów przez łączenie półfabrykatów, ich pakowanie do skrzynek oraz automatyczne przełączanie na kolejne palety po wypełnieniu poprzednich. Algorytm programu wykorzystywał nie tylko informacje z czujników, ale została również zaimplementowana maszyna stanów, która umożliwiała płynne przechodzenie między kolejnymi krokami. W tym celu zostały wykorzystane enumeratory, które nie tylko umożliwiały poprawne działanie programu, ale również umożliwiały podgląd, w jakim stanie znajduje się maszyna. Rysunek 20.8 przedstawia wykorzystane enumeratory.

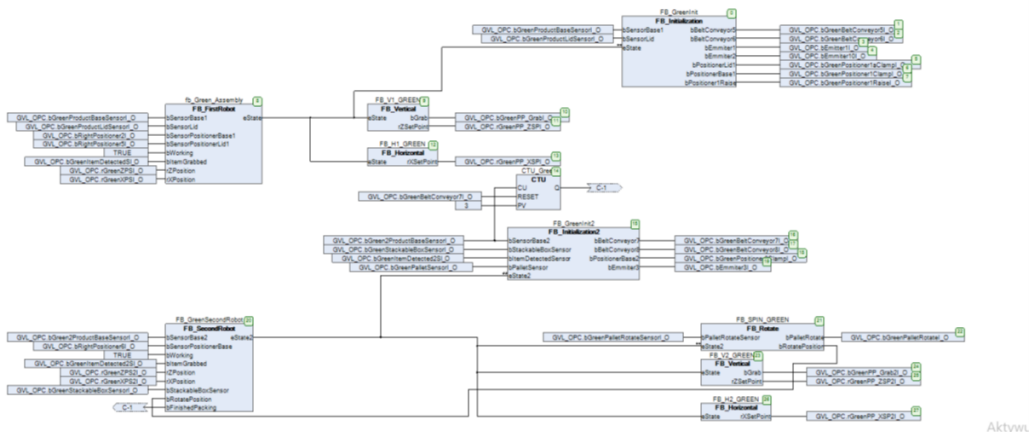
```

(attribute 'qualified_only')
TYPE E_Assembly_State :
(
    eInitializationState := 0,
    eReady:=5,
    eGoingDownFunctionEmpty:=10,
    ePickingUp:=20,
    eFromLeftToRight:=30,
    eGoingDownWithProduct:=40,
    eGoingUpEmpty:=50,
    eMovingFromRightToLeft:=60,
    eMovingFromRightToLeft2Robot:=65,
    eFinished:=70,
    eRotating:=80,
    eFinishedPacking:=90
)INT := eInitializationState;
END_TYPE

```

Rysunek 20.8. Enumeratory występujące w programie

Cały program został napisany w języku angielskim, co zwiększyło jego czytelność oraz umożliwiło wykorzystanie przez szersze grono odbiorców. Jednocześnie program został napisany przy pomocy blozków funkcyjnych, dostosowanych do konkretnego działania, co pozwoliło na zaimplementowanie programowania obiektowego i utworzenie szablonów bloków, a następnie odpowiednich instancji w zależności od materiału czy sekwencji. Na Rysunek 9 przedstawiono wykorzystane bloczki dla jednego z materiałów przy implementacji algorytmu sterowania odpowiedzialnego za łączenie i pakowanie gotowych produktów.



Rysunek 20.9. Działanie bloków funkcyjnych odpowiedzialnych za łączenie i pakowanie produktów

Jednocześnie, kolejnym kluczowym aspektem pracy było skonfigurowanie połączenia między sterownikiem wirtualnym, a środowiskiem symulacyjnym. Protokołem komunikacyjnym wykorzystanym w pracy był protokół OPC UA, który umożliwił nie tylko bezpieczne, ale również niezawodne przesyłanie danych. W pracy została wykorzystana konfiguracja, w której sterownik pełnił rolę serwera OPC UA, natomiast scena przygotowana w środowisku Factory I/O została przypisana do roli klienta. Jednocześnie, w celu

zadbania o bezpieczeństwo przesyłania danych, została skonfigurowana autoryzacja użytkowników oraz szyfrowanie. Dla poprawnego działania komunikacji między sterownikiem, a symulacją należało wykorzystać kilka dodatkowych programów, które umożliwiły diagnostykę oraz stworzenie trwałego połączenia.

20.4. Podsumowanie

Projekt został zakończony pomyślnie, realizując wszystkie założone na etapie planowania cele i spełniając wymagania stawiane wobec systemu sterowania. W ramach pracy zrealizowano konfigurację połączeń komunikacyjnych, implementację logiki sterowania oraz integrację z systemem symulacyjnym. Kluczowym elementem projektu było zapewnienie poprawnej wymiany danych między środowiskiem wykonawczym a sterownikiem PLC, co umożliwiło stabilne i efektywne działanie całej linii.

Wykorzystanie nowoczesnych technologii komunikacyjnych, takich jak OPC UA i TwinCAT ADS, pozwoliło na osiągnięcie wysokiego poziomu niezawodności oraz bezpieczeństwa systemu. Zastosowane rozwiązania wpłynęły również na elastyczność i skalowalność systemu, co może znacząco wpłynąć na jego dalszy rozwój.

Istotnym usprawnieniem było zastosowanie protokołu OPC UA, który umożliwił dostęp do zmiennych za pomocą ich nazw zamiast numerów rejestrów. Rozwiązanie to nie tylko zwiększyło czytelność i przejrzystość struktury programu, ale również zredukowało czas potrzebny na implementację i obsługę systemu. Dzięki temu sterowanie stało się bardziej intuicyjne, nawet dla osób posiadających ograniczone doświadczenie w zakresie programowania sterowników PLC.

Praca posiada także znaczący potencjał aplikacyjny. Może stanowić wzorzec integracji środowiska Factory I/O z rzeczywistymi sterownikami PLC marki Beckhoff z wykorzystaniem protokołu OPC UA. Zastosowane rozwiązania mogą być wykorzystywane nie tylko w środowisku przemysłowym, ale również w edukacji. Szczególnie cenne jest ich zastosowanie w laboratoriach dydaktycznych, gdzie mogą umożliwić naukę programowania i testowania systemów sterowania bez konieczności zakupu dodatkowego sprzętu czy rozbudowanej infrastruktury.

Dalszy rozwój pracy może obejmować zastosowanie opracowanego systemu do budowy cyfrowych bliźniaków, które są jednym z kluczowych elementów koncepcji Przemysłu 4.0. Wirtualna reprezentacja procesu produkcyjnego pozwala na monitorowanie, analizę i optymalizację systemu w czasie rzeczywistym, a także na bezpieczne testowanie nowych rozwiązań bez ingerencji w fizyczne urządzenia.

Podsumowując, opracowany projekt nie tylko potwierdził skuteczność wykorzystanych technologii, ale również pokazał ich szeroki potencjał zastosowania – zarówno w przemyśle, jak i w edukacji. Dzięki swojej elastyczności oraz możliwości dalszej rozbudowy, stworzony system może stanowić solidny fundament do rozwijania kolejnych, bardziej złożonych aplikacji w obszarze automatyki i cyfrowych technologii produkcyjnych.

Opracowanie rozwiązania opartego na introspekcji maszyn wirtualnych, służącego do wykrywania złośliwego oprogramowania typu rootkit

mgr inż. Daria Pietraszko
Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo
Katedra Podstaw Informatyki

Rootkity stanowią jedną z najbardziej niebezpiecznych form złośliwego oprogramowania, charakteryzując się zdolnością do ukrywania swojej obecności przed tradycyjnymi rozwiązaniami bezpieczeństwa. Ich rosnąca złożoność sprawia, iż standardowe techniki wykrywania okazują się niewystarczające. Niniejsza praca koncentruje się na opracowaniu, implementacji oraz analizie systemu detekcji złośliwego oprogramowania typu rootkit przy wykorzystaniu technologii umożliwiającej obserwację systemu operacyjnego z poziomu wirtualizacji - z założenia niedostępnego dla analizowanego oprogramowania. Zaimplementowano trzy mechanizmy detekcji oparte na strukturach wewnętrznych systemu operacyjnego Windows: wykrywanie ukrytych procesów, identyfikację modyfikacji w tablicach importów oraz weryfikację integralności deskryptorów wywołań systemowych. Eksperymenty przeprowadzone na rzeczywistych próbkach oprogramowania typu rootkit potwierdziły wysoką skuteczność wdrożonych metod w testowanych scenariuszach. Wyniki wskazują na potencjał zastosowanej technologii w kontekście detekcji zaawansowanego złośliwego oprogramowania, jednocześnie podkreślając konieczność dalszego rozwoju mechanizmów bezpieczeństwa w odpowiedzi na ewoluujące zagrożenia.

21.1. Cel i założenia

Niniejsza praca poświęcona jest problematyce detekcji zaawansowanego złośliwego oprogramowania typu rootkit przy wykorzystaniu technik introspekcji maszyn wirtualnych. Główny cel realizowanej pracy stanowiło opracowanie, implementacja oraz kompleksowa analiza systemu umożliwiającego skuteczną detekcję złośliwego kodu działającego w środowisku systemów operacyjnych z rodziny Microsoft Windows. System został zaprojektowany z myślą o wykrywaniu zagrożeń funkcjonujących zarówno w przestrzeni użytkownika, jak i w przestrzeni jądra systemu operacyjnego, przy wykorzystaniu hipernadzorcy Xen oraz biblioteki LibVMI.

Do głównych założeń pracy należą:

- implementacja architektury opartej na hipernadzorcy typu pierwszego Xen jako platformy wirtualizacyjnej zapewniającej izolację środowiska badawczego,
- wykorzystanie technik introspekcji maszyn wirtualnych umożliwiających monitorowanie stanu systemu operacyjnego bez konieczności modyfikacji jego struktury wewnętrznej,
- ograniczenie zakresu badań do systemu operacyjnego z rodziny Microsoft Windows w architekturze x86-64, w wersji 10 21H2,
- implementacja rozwiązania w języku programowania C z zastosowaniem biblioteki LibVMI jako interfejsu dostępu do pamięci maszyny wirtualnej,
- wykorzystanie publicznie dostępnych próbek złośliwego oprogramowania typu root-kit w celu walidacji skuteczności opracowanych mechanizmów.

21.2. Wstęp teoretyczny

Niniejsza sekcja poświęcona została wprowadzeniu teoretycznemu dotyczącemu trzech konceptów: wirtualizacji systemów operacyjnych, złośliwemu oprogramowaniu typu root-kit oraz introspekcji maszyn wirtualnych.

21.2.1. Wirtualizacja systemów operacyjnych

Wirtualizacja systemów operacyjnych to technologia umożliwiająca równoczesne uruchamianie wielu odizolowanych środowisk systemowych, określanych jako maszyny wirtualne (*ang. Virtual Machines*), na wspólnej platformie sprzętowej. Każda maszyna wirtualna funkcjonuje jako logicznie odrębny system, posiadający pozornie dedykowany dostęp do zasobów fizycznych, takich jak jednostka centralna, pamięć operacyjna czy urządzenia wejścia/wyjścia. W rzeczywistości zasoby te są współdzielone i zarządzane przez wyspecjalizowaną warstwę pośredniczącą, zwaną hipernadzorcą (*ang. hypervisor*), odpowiedzialną za wirtualizację, przydział oraz izolację zasobów między instancjami systemów operacyjnych.

Koncepcja wirtualizacji została po raz pierwszy przedstawiona w latach 60. XX wieku przez firmę IBM w ramach systemów klasy mainframe, jako odpowiedź na potrzebę efektywnego wykorzystania zasobów obliczeniowych oraz zapewnienia izolacji między współdzielonymi środowiskami. Fundamenty te zostały usystematyzowane przez Popeka oraz Goldberga, którzy w [2] sformułowali formalne kryteria dotyczące architektury wirtualizacji. Kryteria te pozostają do dziś istotnym punktem odniesienia w projektowaniu nowoczesnych systemów.

Klasyfikacja hipernadzorców

Klasyfikacja hipernadzorców na typ pierwszy oraz typ drugi została zaproponowana przez Popeka oraz Goldberga w [2]. Podział ten opiera się na relacji hipernadzorcy względem warstwy sprzętowej oraz systemu operacyjnego gospodarza.

Hipernadzorca typu pierwszego (*ang. bare-metal hypervisor*) funkcjonuje bezpośrednio na fizycznej platformie sprzętowej, eliminując konieczność pośrednictwa systemu

operacyjnego gospodarza. Taka architektura pozwala na bezpośrednią kontrolę nad zasobami sprzętowymi, co przekłada się na wyższą wydajność operacyjną oraz zwiększony poziom bezpieczeństwa systemu. Do przykładów hipernadzorców typu pierwszego należą m.in. *VMware ESXi*, *Microsoft Hyper-V Server*, *Xen* oraz *KVM* (w trybie natywnym).

Hipernadzorca typu drugiego (*ang. hosted hypervisor*) działa jako proces w ramach istniejącego systemu operacyjnego gospodarza, korzystając z jego usług służących pośredniczeniu w dostępie do zasobów sprzętowych. Choć implementacja tego typu hipernadzorczy jest prostsza i bardziej elastyczna w środowiskach użytkowników końcowych, wprowadza ona dodatkowe narzuty wydajnościowe oraz potencjalne punkty awarii, związane z zależnością od stabilności i bezpieczeństwa systemu gospodarza. Przykłady rozwiązań tego typu stanowią *VMware Workstation*, *Oracle VirtualBox* oraz *Parallels Desktop*.

21.2.2. Złośliwe oprogramowanie typu rootkit

Rootkit jest zaawansowaną formą złośliwego oprogramowania, zaprojektowaną w celu ukrywania swojej obecności oraz działań innych programów szkodliwych w systemie komputerowym. Nazwa pochodzi od połączenia terminu *root* - oznaczającego najwyższy poziom uprawnień w systemach Unix/Linux - oraz słowa *kit* (zestaw narzędzi), co odzwierciedla pierwotny cel tego oprogramowania, jakim jest utrzymanie nieautoryzowanego, uprzywilejowanego dostępu do systemu.

Według Hoglunda i Butlera w [1], rootkit definiowany jest jako *zestaw programów oraz kodu pozwalającym na trwałą i niewykrywalną obecność w obcym komputerze*. Kluczową cechą tego typu złośliwego oprogramowania jest jego zdolność do działania w kontekście różnych warstw systemu operacyjnego, wobec czego może zostać ono sklasyfikowane zgodnie z poziomem uprzywilejowania, w ramach którego funkcjonuje:

- **rootkity operujące w przestrzeni użytkownika (pierścień 3)** ingerują w działanie aplikacji przez modyfikację procesów użytkownika, plików wykonywalnych oraz bibliotek współdzielonych. Choć ze względu na ograniczony poziom uprzywilejowania są one relatywnie łatwiejsze do wykrycia i neutralizacji, pozostają skuteczne w środowiskach o niskim poziomie zabezpieczeń, szczególnie w przypadku braku integralnej kontroli systemowych komponentów wykonywalnych.
- **rootkity funkcjonujące w przestrzeni jądra (pierścień 0)** operują z najwyższym poziomem uprzywilejowania, co umożliwia im bezpośrednią ingerencję w struktury danych jądra, tablice wywołań systemowych oraz sterowniki urządzeń. Z uwagi na swój niski poziom operacyjny i możliwość ukrywania się przed mechanizmami detekcji działającymi w przestrzeni użytkownika, są one wyjątkowo trudne do wykrycia oraz eliminacji, stanowiąc jedno z najbardziej zaawansowanych zagrożeń w obszarze złośliwego oprogramowania.

21.2.3. Introspekcja maszyn wirtualnych

Introspekcja maszyn wirtualnych (*ang. Virtual Machine Introspection*, VMI) stanowi zaawansowaną technikę analizy oraz monitorowania stanu systemów operacyjnych uruchomionych w środowiskach zwirtualizowanych, realizowaną z poziomu warstwy hipernadzorczy. Metoda ta umożliwia pozyskiwanie informacji o aktywności systemu gościa bez ko-

nieczności instalowania jakiegokolwiek oprogramowania w jego obrębie, a tym samym bez ingerencji w jego normalne funkcjonowanie oraz bez ryzyka kompromitacji mechanizmów monitorujących. Koncepcja introspekcji maszyn wirtualnych została po raz pierwszy zaprezentowana przez Garfinkela i Rosenbluma w [3] tj. pracy poświęconej systemowi *Livewire* — prototypowemu rozwiązaniu klasy IDS (*ang. Intrusion Detection System*), działającemu na poziomie hipernadzorcy. Autorzy dowiedli, iż koncepcja ta umożliwia jednocześnie uzyskanie zalet charakterystycznych dla systemów detekcji opartych na analizie ruchu sieciowego (tj. wysoka izolacja i niewidoczność dla systemu monitorowanego) oraz systemów działających bezpośrednio w obrębie systemu operacyjnego (tj. pełna widoczność wewnętrznych struktur i procesów). Takie podejście stanowi nową klasę rozwiązań w dziedzinie bezpieczeństwa systemów informatycznych, charakteryzującą się zwiększoną odpornością na detekcję oraz przeciwdziałanie ze strony złośliwego oprogramowania funkcjonującego w systemie gościa.

21.3. Projekt i wykonanie

Opracowane rozwiązanie zostało zaimplementowane w języku programowania C ze względu na natywną kompatybilność z biblioteką LibVMI oraz możliwość precyzyjnej kontroli nad zarządzaniem pamięcią. Architektura aplikacji opiera się na modułowym podejściu, gdzie każdy mechanizm detekcji stanowi oddzielny komponent. Struktura katalogów została zorganizowana zgodnie ze standardowymi konwencjami języka C.

21.3.1. Mechanizm wykrywania ukrytych procesów

Mechanizm wykrywania ukrytych procesów wykorzystuje analizę porównawczą dwóch niezależnych źródeł informacji o procesach w systemie Windows: standardowej listy procesów oraz tablicy uchwytów systemowych. Techniki maskowania stosowane przez złośliwe oprogramowanie typu rootkit zazwyczaj obejmują modyfikację standardowych struktur związanych z enumeracją procesów, usuwając z nich swoje wpisy, często pozostawiając jednak ślady w obrębie innych elementów systemu operacyjnego. Opracowany system analizuje dwukierunkową listę struktur EPROCESS, stanowiącą fundamentalną reprezentację aktywnych procesów w jądrze systemu, równolegle prowadząc inspekcję tablicy uchwytów procesu systemowego oraz przechowujących referencje do obiektów jądra. Wykrycie procesu obecnego w tablicy uchwytów, lecz niewidocznego na oficjalnej liście EPROCESS, wskazuje na potencjalne jego maskowanie. Istotne wyzwanie implementacji stanowiło uwzględnienie mechanizmu obfuskacji pola `TypeIndex` wprowadzonego w systemie Windows 10. Mechanizm ten zwiększa bezpieczeństwo struktur jądra przez wprowadzenie dynamicznego dekodowania wartości pól z wykorzystaniem operacji XOR oraz globalnej wartości `ObHeaderCookie`. Rozwiązanie tego problemu wymagało implementacji algorytmu dekodowania oraz wykorzystania zewnętrznych źródeł informacji dotyczących oficjalnie nieudokumentowanych aspektów systemu operacyjnego Windows.

21.3.2. Mechanizm detekcji zaczepień w tablicach IAT

Implementacja systemu detekcji zaczepień w tablicach adresów importów (*ang. Import Address Table, IAT*) wymagała uprzedniego rozwiązania problemu mapowania wirtualnych bibliotek DLL. Ze względu na wdrożenie mechanizmu zestawów odwzorowań API (*ang. API sets*) począwszy od systemu operacyjnego Windows 10, konieczne było mapowanie wirtualnych bibliotek na rzeczywiste biblioteki zawierające odpowiednie implementacje. W tym celu wykorzystano zbiór odwzorowań API opracowany w ramach projektu apisets¹. Ze względu na niekompletność wykorzystanego zbioru, uzupełniony został on o mechanizmy heurystyczne dla bibliotek nieobecnych w zbiorze referencyjnym.

System detekcji został oparty na analizie porównawczej oczekiwanych oraz faktycznych adresów funkcji importowanych. Ze względu na obecność w systemach Microsoft Windows mechanizmów tworzących uzasadnione przekierowania funkcji, w szczególności mechanizmu przekierowywania bibliotek DLL (*ang. DLL Forwarding*), zastosowanie binarnej klasyfikacji detekcji prowadziłoby do znaczącego obniżenia skuteczności systemu.

W związku z tym faktem zaimplementowano system oceny ryzyka, składający się z pięciu testów heurystycznych, z których każdy otrzymuje określoną wartość punktową w zależności od stopnia krytyczności wykrytej anomalii:

- **Test nr 1: Przekierowanie do głównego pliku wykonywalnego (8 punktów)**

Najwyższa wartość punktową w systemie oceny ryzyka przyznawana jest w przypadkach, gdy adres docelowy funkcji importowanej znajduje się w przestrzeni adresowej należącej do analizowanego procesu. Taka konfiguracja stanowi znaczące odchylenie w kontekście standardowej architektury systemu operacyjnego, w której funkcje bibliotek systemowych są implementowane w dedykowanych bibliotekach DLL, nie w ramach kodu źródłowego aplikacji użytkowych. Przekierowanie wywołań funkcji systemowych do przestrzeni adresowej procesu aplikacyjnego może wskazywać na implementację mechanizmów przechwytywania charakterystycznych dla technik stosowanych przez złośliwe oprogramowanie.

- **Test nr 2: Przekierowanie poza autoryzowane biblioteki (3 punkty)**

Dodatkowe punkty ryzyka są przyznawane, gdy adres docelowy funkcji nie znajduje się w zakresie żadnego z modułów uznawanych za autoryzowane: pierwotnej biblioteki DLL zawierającej oryginalną implementację funkcji, alternatywnej biblioteki wskazanej przez pole `alt_host` w mapowaniu zestawów API, biblioteki `kernelbase.dll` stanowiącej podstawę warstwy API systemu Windows, ani biblioteki `ntdll.dll` będącej interfejsem do wywołań systemowych jądra. Przekierowania do modułów spoza tego zbioru autoryzowanych bibliotek systemowych mogą świadczyć o wykryciu nieautoryzowanego kodu o potencjalnie złośliwym charakterze.

- **Test 3: Analiza wzorców kodu maszynowego (2-4 punkty)**

System analizuje 16 bajtów pamięci procesu w poszukiwaniu charakterystycznych wzorców instrukcji:

- Wzorec `PUSH/RET` (instrukcje `0x68` oraz `0xC3`) otrzymuje 4 punkty jako charakterystyczny dla prostych funkcji trampolinowych.
- Instrukcje skoku względnego lub pośredniego (wzorce `0xE9` oraz `0xFF 0x25`) otrzymują 2 punkty, przy czym kod dodatkowo analizuje obecność wypełnienia

¹<https://github.com/learn-more/apisets>

- jeśli bajty od pozycji 5 do 9 są identyczne lub wypełnione kodami 0xCC, może to wskazywać na funkcję niezłośliwą.
- Wzorzec podwójnych prefiksów instrukcji (kody 0xF0, 0xF2, 0xF3) w kolejnych pozycjach otrzymuje 2 punkty jako potencjalnie złośliwy.

- **Klasyfikacja końcowa**

Na podstawie sumy punktów z wszystkich testów system dokonuje klasyfikacji wykrytego zaczepienia:

- Przedział 0-3 punkty: zaczepienie niskiego ryzyka (LOW RISK).
- Przedział 4-6 punktów: zaczepienie średniego ryzyka (MEDIUM RISK).
- Przedział 7-10 punktów: zaczepienie wysokiego ryzyka (HIGH RISK).

System punktowy pozwala na efektywne rozróżnienie między standardowymi przekierowaniami funkcji a potencjalnie złośliwymi modyfikacjami, minimalizując liczbę fałszywych alarmów przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej czułości detekcji rzeczywistych zagrożeń.

21.3.3. Mechanizm detekcji zaczepień w tablicy SSDT

Mechanizm detekcji zaczepień w tablicy SSDT (*ang. System Service Descriptor Table*) został zaimplementowany w oparciu o weryfikację integralności wskaźników procedur obsługi przypisanych do poszczególnych indeksów. Koncepcja detekcji opiera się na fundamentalnym założeniu, iż autoryzowane procedury obsługi wywołań systemowych powinny znajdować się wyłącznie w przestrzeni adresowej jądra, konkretnie w przestrzeni adresowej modułu `ntoskrnl.exe`. Opracowane rozwiązanie identyfikuje adres bazowy modułu `ntoskrnl.exe` przez analizę struktury `PsLoadedModuleList`, która zawiera listę wszystkich załadowanych komponentów jądra. Następnie przeprowadzana jest iteracyjna analiza wpisów w tablicy SSDT wraz z równoczesną weryfikacją, czy obliczony adres procedury obsługi mieści się w granicach tego modułu.

21.4. Uzyskane wyniki

W niniejszym rozdziale przedstawiono rezultaty przeprowadzonych badań dotyczących skuteczności opracowanych mechanizmów detekcji złośliwego oprogramowania typu root-kit. Analiza obejmuje wyniki testów wszystkich trzech zaimplementowanych metod wraz z oceną ich efektywności oraz szczegółową identyfikacją ograniczeń i możliwości zastosowania w różnych scenariuszach zagrożeń.

21.4.1. Wyniki detekcji ukrytych procesów

Testy mechanizmu wykrywania ukrytych procesów przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzia `HideProcess`², które implementuje technikę bezpośredniej manipulacji obiektami jądra (*ang. Direct Kernel Object Manipulation, DKOM*). Proces `notepad.exe` został celowo ukryty przez modyfikację struktury listy `EPROCESS`, co pozwoliło na weryfikację skuteczności opracowanego mechanizmu detekcji w realistycznym scenariuszu ataku.

²<https://github.com/landhb/HideProcess/tree/master>

Rezultat badań

Zaimplementowane rozwiązanie skutecznie wykryło wszystkie trzy uchwytów należące do ukrytego procesu notepad.exe. Błędy VMI_ERROR generowane przez bibliotekę LibVMI podczas próby lokalizacji struktury EPROCESS dla procesu notepad.exe potwierdzają skuteczność zastosowanej techniki ukrywania oraz prawidłowe działanie opracowanego mechanizmu detekcji.

Analiza skuteczności mechanizmu wykrywania ukrytych procesów

Zaimplementowany mechanizm charakteryzuje się wysokim prawdopodobieństwem detekcji technik należących do grupy DKOM, w szczególności metody polegającej na odłączeniu procesu z listy EPROCESS. Skuteczność ta wynika z zastosowania porównawczej analizy procesu na podstawie dwóch niezależnych źródeł informacji: listy EPROCESS oraz tablicy uchwytów jądra systemu. Manipulacja polegająca na modyfikacji wskaźników FLINK i BLINK w strukturze ActiveProcessLinks zostaje wykryta, ponieważ proces mimo usunięcia z listy wciąż posiada korespondujący mu wpis w tablicy uchwytów systemowych.

Mechanizm wykazuje się również skutecznością w identyfikacji efektów zaczepień w funkcjach systemowych odpowiedzialnych za enumerację procesów, takich jak NtQuerySystemInformation. Jeśli złośliwe oprogramowanie modyfikuje działanie tych funkcji w sposób, aby filtrowały zwracaną do narzędzi monitorujących listę procesów, mechanizm porównawczy zidentyfikuje takie procesy jako nieobecne na owej liście, ale obecne w tablicy uchwytów.

Istotnym atutem rozwiązania jest fakt, iż nie wymaga ono bezpośredniego wykrywania samych zaczepień, a jedynie ich efektów w postaci ukrytych procesów, co zwiększa odporność mechanizmu na zaawansowane techniki ich implementacji.

Rozwiązanie wykazuje jednak pewne ograniczenia w kontekście wykrywania technik ukrywania procesów opartych na manipulacji pamięcią legalnego procesu. W przypadku technik Process Hollowing, mechanizm nie jest w stanie ich zidentyfikować, ponieważ proces wciąż pozostaje widoczny w obu analizowanych strukturach (liście procesów oraz tablicy uchwytów) - modyfikacji podlega jedynie zawartość pamięci procesu, co znajduje się poza zakresem analizy implementowanego mechanizmu.

Analogicznie, techniki DLL Injection uznać należy w kontekście omawianej aplikacji za niewykrywalne, gdyż nie wpływają na widoczność procesu w strukturach jądra, a jedynie wprowadzają złośliwy kod do przestrzeni adresowej procesu docelowego. Proces, do którego wstrzyknięto bibliotekę DLL, nadal figuruje zarówno wśród elementów listy EPROCESS, jak i w tablicy uchwytów jądra.

Najbardziej zaawansowane techniki ukrywania, które synchronicznie modyfikują obie badane struktury (zarówno listę EPROCESS, jak i wpisy w tablicy uchwytów), również mogą pozostać niewykryte. Skuteczność mechanizmu opiera się na założeniu rozbieżności między tymi źródłami informacji, więc spójna modyfikacja obu struktur zniwelowałaby podstawę metodologiczną detekcji.

21.4.2. Wyniki detekcji zaczepień w tablicach IAT

Detekcja zaczepień w tablicach IAT została przetestowana z wykorzystaniem próbki IAT Hooking PoC³ implementującej złośliwe przekierowanie funkcji MessageBoxA oraz procesu explorer.exe jako próbki referencyjnej. Zastosowany system punktowej oceny ryzyka umożliwił precyzyjną klasyfikację wykrytych anomalii oraz minimalizację fałszywych alarmów.

Rezultat badań

Analiza próbki IAT Hooking PoC wykazała pełną skuteczność detekcji złośliwego zaczepienia funkcji MessageBoxA w bibliotece USER32.dll. Mechanizm przyznał zaczepieniu maksymalną ocenę ryzyka (10/10 punktów HIGH RISK) głównie ze względu na przekierowanie do przestrzeni adresowej głównego pliku wykonywalnego. Test procesu explorer.exe wygenerował dwa błędy typu fałszywie pozytywnego klasy niskiego ryzyka (2/10 punktów LOW RISK) dotyczące funkcji SetThreadpoolTimer oraz InterlockedPushEntrySList, co stanowi wskaźnik fałszywych alarmów na poziomie 0,19% (2 z 1065 przeanalizowanych funkcji).

Analiza skuteczności mechanizmu detekcji zaczepień w tablicach IAT

Zaimplementowany mechanizm detekcji zaczepień w tablicach IAT charakteryzuje się wysokim prawdopodobieństwem wykrycia technik związanych z przekierowaniem wywołań funkcji przez modyfikację wskaźników w strukturze IAT. Skuteczność ta wynika z zastosowania porównawczej analizy funkcji importowanych na podstawie dwóch niezależnych źródeł informacji: faktycznych adresów zapisanych w tablicy IAT procesu oraz oczekiwanych adresów funkcji pozyskanych z tablic eksportów odpowiednich bibliotek DLL. Manipulacja polegająca na nadpisaniu oryginalnych wskaźników funkcji zostaje wykryta przez identyfikację rozbieżności między adresem rzeczywistym a adresem przewidywanym dla danej funkcji.

Istotną zaletą zastosowanego rozwiązania jest wykorzystanie heurystycznej analizy kodu w obszarze pamięci, do którego następuje przekierowanie. Umożliwia to dodatkową weryfikację potencjalnie złośliwej aktywności. Zaimplementowane podejście istotnie zwiększa precyzję detekcji, ponieważ uwzględnia zarówno sam fakt wystąpienia modyfikacji, jak i charakter oraz właściwości docelowego kodu wykonywalnego.

Opracowane rozwiązanie wykazuje istotne ograniczenia w zakresie detekcji technik zaczepień opartych wyłącznie na manipulacji tablicą wyszukiwania importów, zwaną również tablicą ILT, przy równoczesnym braku modyfikacji w kontekście tablicy adresów importów - tablicy IAT. W przypadkach, gdy atakujący dokonuje ingerencji w strukturę tablicy ILT, zachowując integralność tablicy IAT, zaprojektowany mechanizm detekcyjny okazuje się nieskuteczny. Wynika to z faktu, iż jego implementacja koncentruje się wyłącznie na porównywaniu końcowych wpisów tablicy IAT z wartościami referencyjnymi, ignorując wczesne fazy procesu wczytywania bibliotek DLL do pamięci operacyjnej, w których tablica ILT odgrywa kluczową rolę.

³<https://github.com/adamhlt/IAT-Hooking/tree/main>

Techniki określane jako Just-in-time Hooking, polegające na dynamicznej modyfikacji tablic importów w momencie wywołania funkcji, a następnie niemal natychmiastowym przywróceniu ich oryginalnych wartości, wykraczają poza zakres detekcji zastosowanego mechanizmu. Wykorzystanie tejże metody może prowadzić do istotnego ograniczenia skuteczności mechanizmów detekcyjnych, zależnie od temporalnego aspektu przeprowadzonych badań.

Techniki wykorzystujące dynamiczne ładowanie bibliotek za pośrednictwem funkcji LoadLibrary lub GetProcAddress również mogą pozostać niewykryte. Skuteczność mechanizmu opiera się bowiem na założeniu wykorzystania standardowych struktur PE w procesie importowania funkcji, wobec czego całkowite obejście owego mechanizmu skutkowałoby eliminacją podstawy metodologicznej opracowanego procesu detekcji.

21.4.3. Wyniki detekcji zaczepień w tablicy SSDT

Testy mechanizmu detekcji zaczepień w tablicy SSDT przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzia MasterHide⁴, które implementuje zaczepienia w standardowej tablicy SSDT oraz tablicy Shadow SSDT. Mechanizm wykrył wszystkie modyfikacje w standardowej tablicy SSDT, jednak nie zidentyfikował zaczepień w tablicy Shadow SSDT ze względu na ograniczenia implementacyjne.

Rezultat badań

Mechanizm wykrył 7 z 12 zaimplementowanych zaczepień, osiągając pełną skuteczność dla standardowej tablicy SSDT przez identyfikację wszystkich siedmiu zaczepień funkcji: NtQuerySystemInformation, NtOpenProcess, NtAllocateVirtualMemory, NtFreeVirtualMemory, NtWriteVirtualMemory, NtLoadDriver, NtDeviceIoControlFile.

Ze względu na brak implementacji analizy tablicy Shadow SSDT, wdrożone rozwiązanie nie zidentyfikowało jednak pięciu zaczepień zlokalizowanych w owej strukturze: NtUserFindWindowEx, NtUserWindowFromPoint, NtUserBuildHwndList, NtGetForegroundWindow, NtUserQueryWindow.

Pominięcie tablicy Shadow SSDT w procesie detekcji skutkuje ogólną skutecznością na poziomie 58,3%.

Analiza skuteczności mechanizmu detekcji zaczepień w tablicy SSDT

Zaimplementowane rozwiązanie charakteryzuje się wysoką skutecznością dotyczącą wykrywania klasycznych zaczepień w tablicy SSDT. Efektywność zastosowanej metody wynika z faktu, iż w niezmodyfikowanym systemie wszystkie adresy procedur obsługi wywołań systemowych powinny mieścić się w przestrzeni adresowej zaalokowanej przez moduł jądra ntoskrnl.exe.

Niniejsza implementacja wykazuje jednakże istotne ograniczenia w kontekście detekcji zaawansowanych technik modyfikacji SSDT. Po pierwsze, algorytm nie uwzględnia możliwości występowania autoryzowanych rozszerzeń systemowych, takich jak sterowniki oprogramowania antywirusowego lub narzędzia bezpieczeństwa, które implementują wła-

⁴<https://github.com/crvvdev/MasterHide>

sne procedury obsługi wywołań systemowych, znajdujące się poza przestrzenią adresową ntoskrnl.exe. Powyższa sytuacja skutkować może wzmożonym występowaniem wyników fałszywie pozytywnych, wskazujących na obecność złośliwego oprogramowania w sytuacji, gdy dotyczy ona funkcjonalności autoryzowanej przez administratora systemu.

Mechanizm detekcji nie identyfikuje także technik określanych terminem inline hooking, modyfikujących zawartość oryginalnych funkcji przy jednoczesnym braku ingerencji w wartości wskaźników w strukturze SSDT. W przypadku zastosowania tejże metody, adres w tablicy SSDT pozostaje niezmodyfikowany, nieprzerwanie wskazując na przestrzeń adresową należącą do modułu ntoskrnl.exe. Równocześnie, instrukcje początkowe funkcji zostają wówczas zastąpione kodem realizującym przekierowanie sterowania do modułu złośliwego oprogramowania.

Implementacja nie obejmuje również analizy modyfikacji tablicy Shadow SSDT. Koncentracja wyłącznie na głównej strukturze SSDT może prowadzić do pominięcia znaczących manipulacji realizowanych w kontekście interfejsów USER oraz GDI, co stanowi istotną lukę w zakresie mechanizmu detekcji.

21.5. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań opracowano w pełni funkcjonalne narzędzie umożliwiające detekcję złośliwego oprogramowania działającego zarówno w przestrzeni użytkownika, jak i w przestrzeni jądra systemu operacyjnego. Kluczową cechą zaprojektowanego rozwiązania jest jego modułowa architektura, która umożliwia dalszy rozwój systemu przez łatwą integrację kolejnych mechanizmów detekcyjnych. Opracowane mechanizmy, pomimo pewnych ograniczeń, charakteryzują się wysoką skutecznością w detekcji generycznych próbek złośliwego oprogramowania typu rootkit.

Za kluczowy wniosek wynikający z procesu implementacji narzędzia oraz przeprowadzonych analiz należy uznać konieczność ciągłego udoskonalania i rozwijania mechanizmów detekcyjnych, zarówno pod względem ich precyzji, jak i zakresu wykrywanych zagrożeń. Ewolucja złośliwego oprogramowania zachodzi w sposób ciągły i dynamiczny, co sprawia, że obszar detekcji staje się polem nieustającego wyścigu między twórcami złośliwego kodu a specjalistami odpowiedzialnymi za bezpieczeństwo systemów informatycznych. Należy podkreślić, iż nie istnieje rozwiązanie o charakterze absolutnym – żadne rozwiązanie antywirusowe nie jest w stanie zapewnić całkowitej ochrony, gdyż stale powstawać mogą nowe techniki, które pozwalają na skuteczne obejście konkretnych mechanizmów detekcyjnych.

Kolejnym istotnym wnioskiem płynącym z przeprowadzonych prac badawczych jest obserwowany wzrost złożoności współczesnych systemów operacyjnych oraz jego istotny wpływ na inżynierię mechanizmów detekcji. Wraz z kolejnymi iteracjami systemów operacyjnych z rodziny Microsoft Windows, następuje systematyczne zwiększanie liczby wbudowanych funkcjonalności, w tym także i zaawansowanych mechanizmów bezpieczeństwa, takich jak ochrona integralności jądra (np. *Kernel Patch Protection*), systemy kontroli integralności sterowników oraz zaostrzające się polityki kontroli dostępu. Należy jednak zauważyć, że równoczesny wzrost liczby komponentów oraz ich wzajemnych zależności przekłada się na istotne podniesienie poziomu złożoności architektury systemu, co stanowi

istotne wyzwanie w kontekście projektowania efektywnych i niezawodnych mechanizmów detekcyjnych. Uwzględnienie rosnącej złożoności systemu operacyjnego jest niezbędne dla zapewnienia adekwatnej skuteczności procesów wykrywania zagrożeń.

Znaczącym wyzwaniem w realizacji badań było operowanie na surowej pamięci systemowej przy wykorzystaniu biblioteki LibVMI. W odróżnieniu od konwencjonalnych rozwiązań antywirusowych funkcjonujących wewnątrz systemu operacyjnego, prezentowane podejście nie dysponuje dostępem do wysokopoziomowych mechanizmów i interfejsów upraszczających interpretację danych. W związku z tym niezbędna jest manualna analiza składniowa struktur pamięci oraz dogłębna znajomość architektury systemu operacyjnego wraz z formatami przechowywanych w pamięci danych. Taki tryb działania cechuje się znacznie wyższym poziomem złożoności oraz większą podatnością na błędy, co stanowi istotną przeszkodę w implementacji efektywnych mechanizmów detekcji. Pomimo powyższych trudności, zastosowanie niskopoziomowego monitoringu pozwala na wykrywanie zagrożeń funkcjonujących na najniższych warstwach systemu, które pozostają niewidoczne dla tradycyjnych rozwiązań bezpieczeństwa działających w przestrzeni użytkownika.

Bibliografia

- [1] Hoglund G., Butler J., *Rootkits*, Addison-Wesley Educational, Boston, MA, USA, 2005.
- [2] Popek G. J., Goldberg R. P., Formal requirements for virtualizable third generation architectures. *Communications of the ACM* 1974, 17, s. 412–421.
- [3] Garfinkel T., Rosenblum M., A Virtual Machine Introspection Based Architecture for Intrusion Detection. Network and Distributed System Security Symposium, 2003.

System kontroli geometrii otulin polietylenowych

mgr inż. Aleksander Kłak
Informatyczne Systemy Automatyki

dr inż. Adam Ratajczak
Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

W produkcji otulin polietylenowych nawet milimetrowe odchylenia mogą decydować o jakości produktu. Ręczna kontrola geometrii otulin jest powolna i podatna na błędy. W odpowiedzi na problem, zaprojektowano i wdrożono zautomatyzowany system kontroli jakości. Sercem rozwiązania jest skaner laserowy, zintegrowany z linią produkcyjną za pomocą sterownika przemysłowego. Dedykowana aplikacja komputerowa w czasie rzeczywistym zbiera i analizuje dane pomiarowe, takie jak średnica czy liczba defektów. System alarmuje o przekroczeniu limitu defektów na wybranym odcinku produktu, czy o pulsacji średnicy. Aplikacja umożliwia tworzenie własnych kryteriów jakości dla każdego produktu. Opracowane rozwiązanie jest znacznym usprawnieniem w stosunku do tradycyjnych metod, oferując ciągły monitoring. Z pomocą utworzonego narzędzia dokonano badań wpływu parametrów procesu, prędkości linii produkcyjnej oraz temperatury głowicy na cechy produktu.

22.1. Cel i założenia

Celem pracy była integracja skanera laserowego z systemem kontroli jakości na linii produkcyjnej otulin polietylenowych. Projekt zakładał stworzenie rozwiązania, od sprzętu po oprogramowanie, automatyzującego pomiary i umożliwiającego zaawansowanej analizie procesu produkcyjnego. Założenia projektowe pracy to:

- zaprojektowanie i wykonanie mobilnego stanowiska pomiarowego oraz integracja komponentów (skaner, sterownik PLC) w spójny, działający system,
- stworzenie dedykowanej aplikacji do akwizycji, wizualizacji, przetwarzania statystycznego i archiwizacji danych pomiarowych w czasie rzeczywistym,
- zbadanie zjawiska pulsacji średnicy otuliny oraz analiza korelacji między parametrami geometrycznymi a warunkami procesu, takimi jak prędkość linii i temperatura głowicy,
- możliwość opracowania własnych kryteriów diagnostycznych, umożliwiających konfigurowalną przez użytkownika ocenę jakości produktu.

22.2. Wstęp teoretyczny

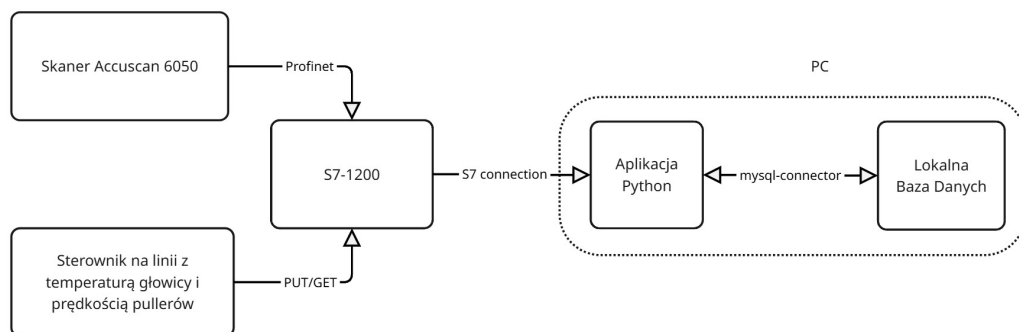
Otuliny polietylenowe, produkowane w procesie wytłaczania, są stosowane do izolacji termicznej w systemach rur preizolowanych. Skuteczność izolacji zależy od precyzji geometrycznej, gdzie niewielkie odchylenia średnicy, grubości ścianki czy owalności mogą prowadzić do problemów montażowych i obniżenia właściwości izolacyjnych [1]. Proces wytłaczania, jest wydajny, ale też wrażliwy na zmiany parametrów technologicznych, takich jak temperatura polimeru, prędkość linii, ciśnienie gazu, co utrudnia utrzymanie stałej jakości produktu. Tradycyjna kontrola jakości oparta na ręcznych pomiarach suwmiarką jest niewystarczająca. Ze względu na niską częstotliwość nie pozwala na śledzenie dynamiki procesu i szybkie reagowanie na nieprawidłowości. Z tego powodu niezbędne jest wdrożenie bezkontaktowego narzędzia pomiarowego, takiego jak skaner laserowy [2]

22.3. Projekt i wykonanie

Realizacja projektu obejmowała zaprojektowanie i budowę systemu, składającego się z komponentów sprzętowych oraz dedykowanego oprogramowania. Poniżej przedstawiono główne elementy wdrożonego rozwiązania.

22.3.1. Architektura systemu

System zaprojektowano w trójwarstwowej architekturze, która zapewnia wydajny przepływ i przetwarzanie danych 22.1.



Rysunek 22.1. Schemat architektury systemu.

Pierwszą warstwę stanowi skaner laserowy Accuscan 6050, który dokonuje bezkontaktowego pomiaru geometrii otuliny. Drugą warstwę tworzy sterownik logiczny PLC Siemens S7-1200, będący bramą sieciową i koncentratorą danych. Komunikuje się on ze skanerem przy pomocy sieci Profinet IO. Sterownik agreguje informacje z innych czujników na linii, takich jak prędkość produkcji czy temperatura głowicy. Najwyższą warstwę stanowi komputer PC z autorską aplikacją okienkową. Program jest centrum analityczno-wizualizacyjnym. Komunikacja aplikacji ze sterownikiem PLC odbywa się cyklicznie przez sieć Ethernet z wykorzystaniem protokołu S7, przez który pobierane są dane procesowe i wysyłane sygnały sterujących.

22.3.2. Stanowisko pomiarowe

Istotne było również wykonanie mobilnego stanowiska pomiarowego 22.2. Sztywna konstrukcja została wykonana z systemowych profili aluminiowych i umieszczona na czterech skrętnych kołach. Mobilność pozwala na wdrożenie systemu na różnych liniach produkcyjnych bez ingerencji w istniejącą infrastrukturę. Stanowisko wyposażono w szafkę sterowniczą zawierającą sterownik PLC i zasilacz, komputer przemysłowy oraz monitor na wysięgniku. Duo-klatki utrzymują otulinę w stałej, osiowej pozycji względem głowicy skanera, minimalizując wibracje i ryzyko deformacji produktu.



Rysunek 22.2. Widok ogólny zmontowanego stanowiska pomiarowego.

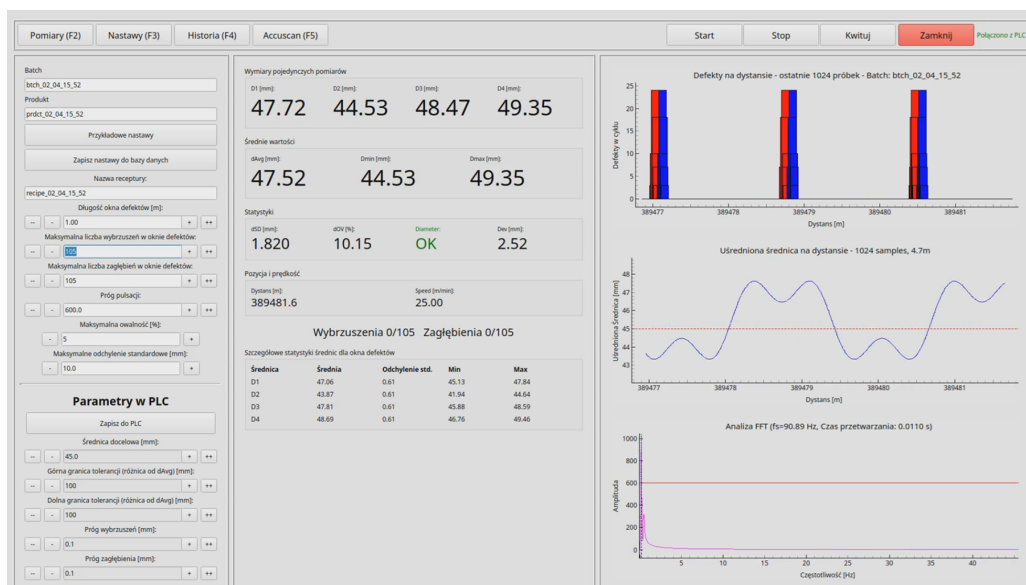
22.3.3. Oprogramowanie analityczno-wizualizacyjne

Aplikacja okienkowa została napisana w języku Python, a interfejs graficzny, widoczny na rysunku 22.3, został stworzony przy pomocy biblioteki PyQt5. Oprogramowanie prezentuje surowe dane oraz dokonuje analizy w czasie rzeczywistym. Najważniejsze funkcjonalności programu to:

- akwizycja danych ze skanera oraz z linii produkcyjnej,
- obliczanie wskaźników jakości dla okna ruchomego produktu na podstawie wartości

średnich, minimalnych, maksymalnych, odchylenia standardowego dla każdej osi pomiaru oraz owalności średnicy produktu

- algorytm analizy gęstości wybrzuszeń i wgnieceń produktu w przesuwającym się oknie pomiarowym,
- algorytm szybkiej transformaty Fouriera wykrywający pulsację średnicy produktu,
- definiowanie własnych kryteriów jakościowych,
- prezentacja parametrów jakościowych produktu na wykresach "online"
- alarmowanie przy pomocy sygnalizacji i sygnału dźwiękowego, gdy nastąpi przekroczenie zdefiniowanych kryteriów jakościowych dla danego produktu. Alarmy są samokwitujące.
- archiwizacja nastaw kryteriów dla produktów oraz stanów alarmowych.



Rysunek 22.3. Główny interfejs aplikacji okienkowej.

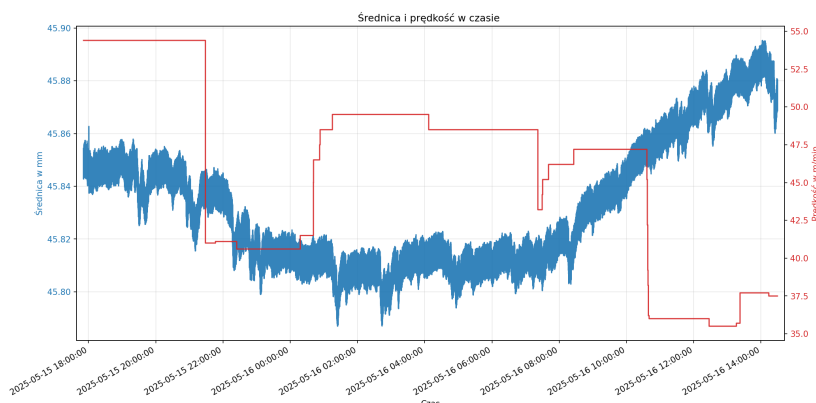
22.4. Uzyskane wyniki

Wdrożony system został poddany testom w warunkach rzeczywistej produkcji, podczas których w ciągu około 20 godzin pracy zebrano i przeanalizowano blisko 4,5 miliona próbek pomiarowych. Walidacja funkcjonalna potwierdziła niezawodność i stabilność działania oprogramowania. Analiza tak obszernego zbioru danych pozwoliła na identyfikację zależności między parametrami procesu a jakością finalnego produktu.

22.4.1. Wpływ parametrów procesu na stabilność wymiarową

Analiza szeregów czasowych wykazała silną korelację między prędkością linii produkcyjnej a średnią średnicą otuliny 22.4. Zaobserwowano, że w okresach pracy z niższą prędkością (ok. 35-40 m/min) średnica produktu była nie tylko wyższa, ale również charakteryzowała się znacznie większą zmiennością krótkookresową. Zwiększenie prędkości linii (do 47-55

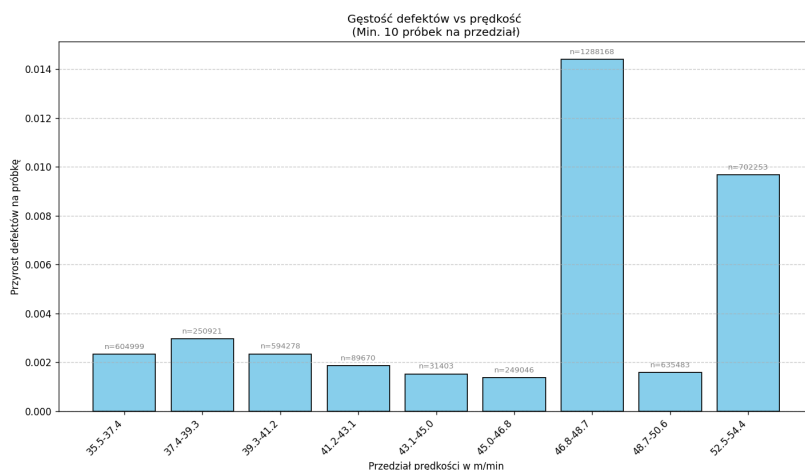
m/min) prowadziło do stabilizacji wymiarów na niższym poziomie. Podobną zależność stwierdzono dla temperatury głowicy, gdzie jej gwałtowne zmiany korelowały ze wzrostem niestabilności geometrycznej produktu.



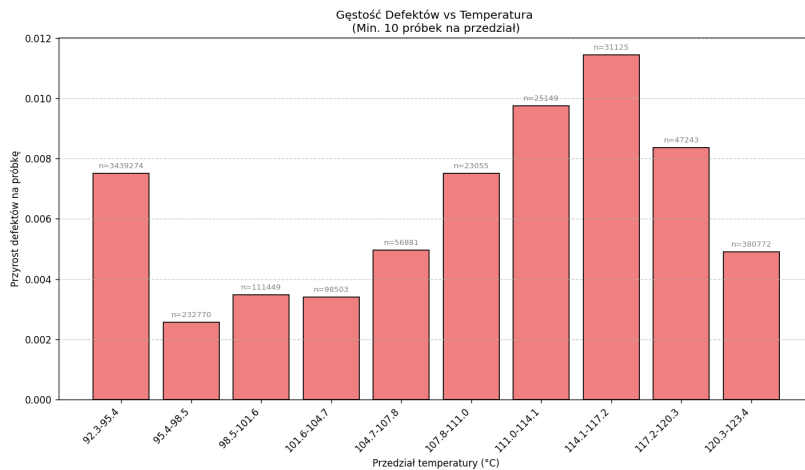
Rysunek 22.4. Przebieg średnicy uśrednionej oraz prędkości linii w funkcji czasu.

22.4.2. Analiza gęstości defektów

Po zliczeniu defektów w odniesieniu do parametrów procesu, przeprowadzono analizę ich gęstości. Wyniki wskazują na złożoną, nieliniową zależność między warunkami pracy a częstotliwością występowania wad. Jak pokazano na rysunku 22.5, najwyższą średnią gęstość defektów zaobserwowano nie przy skrajnych, lecz przy specyficznych, pośrednich prędkościach pracy linii (w zakresie 46.8-48.7 m/min). Na rysunku 22.6 pokazano, że nieliniowa zależność wystąpiła także w przypadku temperatury głowicy. Podwyższone ryzyko defektów pojawiało się zarówno w najniższym zakresie temperatury, jak i w najwyższych. Identyfikacja takich "okien procesowych" o podwyższonym ryzyku dostarcza wskazówek dla optymalizacji produkcji i minimalizacji strat.



Rysunek 22.5. Średnia gęstość defektów w zależności od prędkości linii produkcyjnej.



Rysunek 22.6. Średnia gęstość defektów w zależności od temperatury głowicy.

22.5. Podsumowanie

Opracowano i wdrożono zautomatyzowany system do kontroli geometrii otulin polietylenowych, który zastępuje tradycyjne metody manualne. System, integrujący skaner laserowy, sterownik PLC oraz autorską aplikację, mierzy i analizuje pomiary parametrów produktu na linii produkcyjnej w czasie rzeczywistym. Przeprowadzone testy potwierdziły stabilność jego działania, a mobilna konstrukcja stanowiska pozwala na łatwe wdrożenie w warunkach przemysłowych. Analiza danych zebranych przez system pozwoliła zidentyfikować zależności niewykrywalne metodami tradycyjnymi. Wykazano, że parametry procesowe, jak prędkość linii i temperatura głowicy, wpływają na stabilność wymiarową produktu (rys. 22.4) oraz na gęstość występowania defektów. Potwierdzono nieliniowy charakter tych zależności i zidentyfikowano konkretne okna procesowe o podwyższonym ryzyku powstawania wad (rysunki: 22.5 oraz 22.6), co stanowi podstawę do optymalizacji produkcji. Stworzony system jest nie tylko narzędziem do bieżącej kontroli jakości, ale również platformą analityczną. Dostarczane przez niego dane w czasie rzeczywistym umożliwiają szybką reakcję na problemy produkcyjne oraz, w dłuższej perspektywie, optymalizację parametrów procesu w celu redukcji strat materiałowych.

Bibliografia

- [1] Qenos, *Pipe and tubing extrusion, Technical Guide*, 2020.
- [2] Intelgic, Contact vs. Non-Contact Measurement in Manufacturing: A Comprehensive Guide. Dostępny online: <https://inteligic.com/contact-measurement-vs-non-contact-measurement-manufacturing-a-comprehensive-guide> (dostęp: 13-05-2025).

Analiza zastosowania szkiców danych w algorytmach detekcji anomalii

mgr inż. Krzysztof Wołkonowski
Informatyka Algorytmiczna

dr inż. Karol Gotfryd
Katedra Podstaw Informatyki

W tej pracy omawiamy wybrane strumieniowe algorytmy detekcji anomalii wykorzystujące szkice danych. Skupiamy się na metodach, które korzystają z technik aproksymowania gęstości rozkładu danych przy użyciu jedynie niewielkiej ilości pamięci. Pokazujemy, że wykorzystywana w innej publikacji [1] metoda jest obciążona błędem. Proponujemy również dwa alternatywne podejścia, uzyskujące lepsze od niej wyniki. Skuteczność algorytmów badamy, przeprowadzając eksperymenty na rzeczywistych zbiorach danych pochodzących z różnych dziedzin nauki i techniki. Przy pomocy metod *goodness of fit* mierzymy także jakość uzyskanych aproksymacji wybranych syntetycznych rozkładów prawdopodobieństwa. Proponujemy rozszerzenie stosowanej w literaturze metody o strumieniowy estymator wariancji i estymację gęstości prawdopodobieństwa metodami jądrowymi (KDE) oraz pokazujemy, że zwiększa to precyzję aproksymacji dla wybranych klas rozkładów. Uzyskane przez nas wyniki świadczą, że w większości badanych scenariuszy testowych skuteczność strumieniowych algorytmów detekcji anomalii jest zbliżona do tych uzyskiwanych przy pomocy statycznego algorytmu Isolation Forest. Co więcej, rozważane przez nas metody strumieniowe charakteryzują się znacznie mniejszym zużyciem pamięci.

23.1. Cel i założenia

Celem pracy jest opracowanie nowych wariantów wybranych algorytmów dla problemu wykrywania anomalii w dużych zbiorach danych, zwłaszcza generowanych dynamicznie w postaci strumieni danych. Szczególna uwaga poświęcona jest wykorzystaniu technik opartych o wybrane typy szkiców danych, jak na przykład różne warianty histogramów, w tym konstruowanych dynamicznie. Głównymi założeniami pracy są:

- zapoznanie się ze współczesnymi wydajnymi technikami detekcji anomalii w dużych zbiorach danych, wybranymi algorytmami klasyfikacji oraz metodami konstruowania szkiców danych,

- zbadanie możliwości wykorzystania wybranych klas szkiców danych (takich jak np. różne warianty dynamicznie konstruowanych histogramów) i technik klasyfikacji do problemu efektywnej detekcji anomalii w dużych zbiorach danych,
- opracowanie modyfikacji wybranego algorytmu lub zaproponowanie własnej metody detekcji anomalii,
- przygotowanie scenariuszy i zestawów danych testowych, zaimplementowanie algorytmów,
- przeanalizowanie zaproponowanej metody pod względem wydajności i skuteczności detekcji anomalii,
- przeprowadzenie analizy porównawczej zaproponowanej metody z innymi algorytmami znanymi ze współczesnej literatury,
- przeprowadzenie analizy podstawowych własności badanego algorytmu, takich jak złożoność obliczeniowa lub skuteczność wykrywania anomalii.

23.2. Wprowadzenie

Niezwykle istotnym problemem w wielu dziedzinach nauki i techniki jest wykrywanie zdarzeń rzadkich, występujących ze znacznie mniejszą częstotliwością od pozostałych. Zazwyczaj takie zjawiska są również zauważalnie odmiennie od najczęściej pojawiających się. W literaturze takie obserwacje są zazwyczaj nazywane odstępstwami (ang. outliers) bądź anomaliami (ang. anomalies). Detekcja anomalii znajduje zastosowanie w wielu obszarach [2]. W cyberbezpieczeństwie umożliwia wykrycie nietypowego ruchu sieciowego, kradzieży tożsamości bądź phishingu. W medycynie ułatwia diagnostykę chorób oraz monitorowanie stanu pacjentów, a w branży finansowej pozwala zidentyfikować oszustwa oraz nieautoryzowane transakcje. Ma również istotne zastosowanie w przemyśle, przez wykrywanie awarii czy defektów maszyn, a także w handlu, do analizowania łańcuchów dostaw i zmian popytu na dane towary. Anomalii poszukuje się również w fizyce i astronomii w celu wykrywania nieznanych dotąd gwiazd czy cząstek.

W pracy będziemy się koncentrować na algorytmach strumieniowych, pozwalających wykrywać anomalie w systemach czasu rzeczywistego. Strumień danych, z którego będziemy pobierać obserwacje, jest potencjalnie nieskończony, zatem nie możemy przechowywać i przetwarzać całego zbioru. Mamy do dyspozycji jedynie pewnego rodzaju próbkę bądź podsumowanie poprzednio odebranych punktów, które możemy aktualizować wraz z przetwarzaniem nowych obserwacji. Zastosujemy do tego celu szkice danych [3], czyli struktury wykorzystujące ograniczoną pamięć do wydajnego wyliczania wybranych właściwości zbioru danych.

23.3. Wstęp teoretyczny

W tym rozdziale opiszemy metodę LODA [1], pozwalającą na określenie anomalności danej obserwacji z przestrzeni wielowymiarowej przy pomocy projekcji na przestrzenie jednowymiarowe. Przyjrzymy się również szkicom danych pozwalającym aproksymować rozkład danych przy użyciu ograniczonej pamięci, w szczególności dynamicznie tworzonym histogramom.

23.3.1. Metoda LODA

Klasycznym sposobem analizowania wielowymiarowych danych przy pomocy zbioru histogramów są projekcje na przestrzenie jednowymiarowe. Możemy jednak skorzystać z metodologii wprowadzonej w pracy [1] i połączyć ten etap z redukcją wymiarowości.

Oznaczmy przez $\mathcal{S} = \{x_j \in \mathbb{R}^d\}_{j=1}^\infty$ strumień danych, który będziemy analizować. Na początku tworzymy k wektorów projekcji $\{w_i\}_{i=1}^k$ w taki sposób, że każdy z wektorów w_i ma $d^{\frac{1}{2}}$ niezależnie losowo wybranych niezerowych elementów wylosowanych z rozkładu $\mathcal{N}(0, 1)$. W pracy [4] pokazano, że z dużym prawdopodobieństwem tak skonstruowane przestrzenie będą do siebie parami ortogonalne. Inicjujemy również k szkiców danych, które będziemy wykorzystywać do wyliczenia funkcji wiarygodności w punkcie wyznaczonym przez każdą z projekcji.

Pobierając nowy punkt x ze strumienia $\mathcal{S}$, rzutujemy go na zbiór punktów $\{z_i\}_{i=1}^k$ przy pomocy wektorów $\{w_i\}_{i=1}^k$, tj. $z_i = x^T w_i$, a następnie dla każdego punktu wyznaczamy wartość funkcji wiarygodności $\tilde{p}_i$ przy pomocy szkiców danych. Funkcję wiarygodności w tym kontekście stanowi estymowana gęstość prawdopodobieństwa w punkcie z_i . Szczegółowy przebieg metody został opisany w pracy magisterskiej [5] oraz w oryginalnej pracy [1]. Wynikiem metody LODA dla punktu x jest wartość

$$f(x) = -\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \log \tilde{p}_i(x^T w_i), \quad (23.1)$$

tym większa, im bardziej anomalna jest dana obserwacja. Łatwo możemy zauważyć, że we wzorze (23.1) możemy stosować różne funkcje wiarygodności, zwracane przez różne struktury danych. Sprowadza to niejako (przy pewnych założeniach) zagadnienie wykrywania anomalii do zagadnienia aproksymacji dynamicznie zmieniającego się rozkładu danych.

23.3.2. Histogramy DADO

Histogramy DADO (Dynamic Average-Deviation Optimal) [6] zakładają, że mamy do dyspozycji k kubeków (przedziałów), a każdy z nich dzieli się dodatkowo na dwa mniejsze podkubeczki symetrycznie względem zakresu kubeczka. Celem tej metody będzie minimalizowanie *total within-cluster deviation* opisanego wzorem (23.2), pamiętając jedynie liczbę elementów wewnątrz podkubeków oraz przetwarzając nowe obserwacje w sposób strumieniowy.

Przez f_i oznaczmy łączną liczbę obserwacji w i -tym klastrze (kubeczku), $1 \leq i \leq B$, przez $f_{i,j}$ – liczbę wystąpień j -tego elementu, a przez $\bar{f}_i$ – średnią z wartości $f_{i,j}$ dla j z zakresu kubeczka (średnią liczbę elementów wewnątrz niego). Wówczas otrzymujemy

$$\epsilon_{L_1} = \sum_{i=1}^B (|f_{i,L} - \bar{f}_i| + |f_{i,R} - \bar{f}_i|). \quad (23.2)$$

Dodając nowy element do histogramu, dodajemy go do odpowiedniego podkubeczka. Następnie przechodzimy do zaktualizowania struktury histogramu, aby minimalizować wartość wyrażenia (23.2). Aby to osiągnąć, wyznaczamy trójkę kubeków: jeden, który

zostanie podzielony na dwie części – swoje podkubelki, oraz dwa, które zostaną połączone w jeden nowy, tak aby minimalizować odchylenie, rozumiane przez ϵ_{L_1} . Szczegółowy przebieg metody opisuje rozdział 2.2 pracy magisterskiej [5].

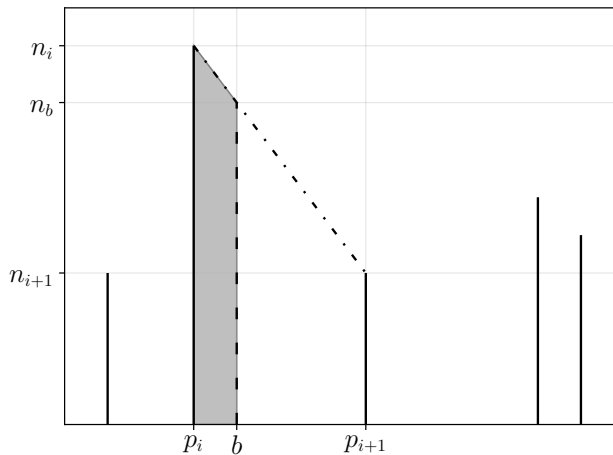
23.3.3. BH-histogramy

Inną metodą tworzenia histogramów w sposób dynamiczny jest metoda opisana w pracy [7]. Tu jednak przez histogramy będziemy rozumieli strukturę zawierającą liczności kubelków, oznaczane jako $n_1, n_2, \dots, n_B$ i odpowiadające im centroidy $p_1, p_2, \dots, p_B$. Warto podkreślić, że nie przechowujemy nigdzie jawnie ich granic. Innym sposobem wizualizacji tej struktury jest zbiór jednowymiarowych klastrów, podobnie jak w algorytmie k-means [8] z tą różnicą, że dodając punkt do klastra, nie przechowujemy go już nigdzie w sposób bezpośredni. Ponadto będziemy przechowywać również informację o zakresie histogramu (p_{min}, p_{max}), określonym przez najmniejszą i największą wartość, które do tej pory się pojawiły. Naturalną reprezentacją histogramu h o B kubelkach jest zatem

$$h = (\{(p_1, n_1), (p_2, n_2), \dots, (p_B, n_B)\}, p_{min}, p_{max}).$$

Procedury połączenia dwóch BH-histogramów, a także dodania nowego punktu do istniejącego opierają się na łączeniu dwóch kubelków o najbliższych centroidach, tak aby wynikowy BH-histogram miał dokładnie B kubelków. Nowo powstały kubelek reprezentuje wówczas centroid o liczności równej sumie liczby elementów w obu oryginalnych kubelkach oraz współrzędnej równej odpowiedniej średniej ważonej.

Zakładamy, że dla kubelka (p, n) , $\frac{n}{2}$ obserwacji znajduje się po lewej stronie punktu p i $\frac{n}{2}$ po prawej. Wobec tego liczba obserwacji na odcinku $[p_i, p_{i+1}]$ jest równa $\frac{n_i + n_{i+1}}{2}$, czyli polu trapezu o wierzchołkach $(p_i, 0)$, (p_i, n_i) , (p_{i+1}, n_{i+1}) , $(p_{i+1}, 0)$ podzielonemu przez wartość $(p_{i+1} - p_i)$. Analogicznie dla $p_i < b < p_{i+1}$ liczba obserwacji na odcinku $[p_i, b]$, oznaczona przez Q , jest zadana przez pole trapezu o wierzchołkach $(p_i, 0)$, (p_i, n_i) , (b, n_b) , $(b, 0)$ podzielone przez wartość $(p_{i+1} - p_i)$, gdzie n_b wyznaczamy przez punkt przecięcia prostej łączącej punkty (p_i, n_i) z (p_{i+1}, n_{i+1}) z prostą $x = b$. Ilustruje to rysunek 23.1.



Rysunek 23.1. Wyznaczanie liczby obserwacji na odcinku $[p_i, b]$ przez konstrukcję trapezu.

Mamy zatem

$$n_b = n_i + \frac{n_{i+1} - n_i}{p_{i+1} - p_i} (b - p_i), \quad (23.3)$$

$$Q(p_i, n_i, p_{i+1}, n_{i+1}, b) = \frac{(n_i + n_b)(b - p_i)}{2(p_{i+1} - p_i)}. \quad (23.4)$$

23.4. Zaproponowane modyfikacje algorytmów

W pracy [1] do wyznaczania aproksymowanej gęstości prawdopodobieństwa w punkcie $p_i < b \leq p_{i+1}$ ($0 \leq i \leq B$) wykorzystuje się wzór

$$\tilde{p}(b) = \frac{1}{N} \frac{p_i n_i + p_{i+1} n_{i+1}}{2(p_{i+1} - p_i)}. \quad (23.5)$$

Pokażemy, że powyższy wzór nie jest poprawnym estymatorem gęstości prawdopodobieństwa. Jak opisaliśmy w rozdziale 23.3.3., liczba obserwacji na odcinku $[p_i, p_{i+1}]$ jest równa $\frac{n_i + n_{i+1}}{2}$. Oczywiście na odcinku $(-\infty, \infty)$ uzyskamy w ten sposób N obserwacji. Zatem masa prawdopodobieństwa skupiona na odcinku $[p_i, p_{i+1}]$ jest równa $\frac{n_i + n_{i+1}}{2N}$, a gęstość zadana jest przez $\frac{n_i + n_{i+1}}{2N(p_{i+1} - p_i)}$. Tymczasem, korzystając ze wzoru (23.5), otrzymujemy

$$\int_{p_i}^{p_{i+1}} \frac{1}{N} \frac{p_i n_i + p_{i+1} n_{i+1}}{2(p_{i+1} - p_i)} db = \frac{p_i n_i + p_{i+1} n_{i+1}}{2N}.$$

Zatem zakładając jednostajny rozkład prawdopodobieństwa wewnątrz kubeczka, zamiast wzoru (23.5) powinniśmy stosować wyliczone powyżej

$$\tilde{p}(b) = \frac{n_i + n_{i+1}}{2N(p_{i+1} - p_i)}.$$

Zaproponujemy również dwie nowe metody estymowania gęstości rozkładu danych przy wykorzystaniu BH-histogramów.

23.4.1. Gęstość jako pochodna liczby obserwacji

W rozdziale 23.3.3. wyznaczyliśmy wzory (23.3) oraz (23.4) na liczbę obserwacji Q na odcinku $[p_i, b]$ dla $p_i < b < p_{i+1}$. Możemy wyznaczyć, jak zmienia się liczba obserwacji na przedziale $[p_i, b]$ ze zmianą wartości b , czyli wyliczyć pochodną

$$\frac{\partial Q(p_i, n_i, p_{i+1}, n_{i+1}, b)}{\partial b} = \frac{b(n_{i+1} - n_i) - p_i n_{i+1} + p_{i+1} n_i}{(p_{i+1} - p_i)^2}. \quad (23.6)$$

Zauważmy, że wartość tej pochodnej nie zależy od obserwacji w kubeczkach poprzedzających punkt p_i . W pracy magisterskiej pokazujemy, że równanie (23.6) określa również, jak ze wzrostem b zmienia się liczba obserwacji na przedziale $(-\infty, b]$. Po przekształceniach otrzymujemy

$$\tilde{p}(b) = \frac{b(n_{i+1} - n_i) - p_i n_{i+1} + p_{i+1} n_i}{N(p_{i+1} - p_i)^2}. \quad (23.7)$$

Można pokazać, że

$$\int_{p_i}^{p_{i+1}} \tilde{p}(b) db = \frac{n_{i+1} + n_i}{2N},$$

zatem zdefiniowana w równaniu (23.7) funkcja $\tilde{p}$ jest poprawną gęstością prawdopodobieństwa.

23.4.2. BH-histogramy z estymatorem wariancji

Drugą z proponowanych modyfikacji BH-histogramu jest wykorzystanie metody jądrowej estymacji gęstości [9] do estymowania rozkładu przy pomocy kernela gaussowskiego [10]. W tym celu rozszerzymy informację, którą zawiera każdy z kubełków, o estymator wariancji.

Możemy zauważyć, że dla BH-histogramu pozycje kubełków-centroidów są wyznaczone przez strumieniowy estymator średniej. Dla strumienia $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$ i kubełka (p, n) mamy

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i_j},$$

dla pewnego podciągu $\{x_{i_j}\}_{j=1}^{\infty}$ ciągu $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$, którego elementy należą do rozważanego kubełka.

Łatwo rozszerzyć tę metodę, aby strumieniowo wyznaczać również wariancję wewnątrz danego kubełka. Naiwnym podejściem byłoby wyliczanie wariancji w kubełku, korzystając z własności

$$\text{Var}(X) = \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2] = \mathbb{E}[X^2] - \mathbb{E}[X]^2$$

i obliczając

$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i_j} - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i_j}^2 - \bar{x}^2. \quad (23.8)$$

Niestety, wzór (23.8) jest podatny na błędy numeryczne. Gdy średnia $\bar{x}$ jest duża, a odchylenia od średniej niewielkie, odejmujemy od siebie dwie duże liczby, tracąc przy tym precyzję. Drugim problemem jest obciążenie estymatora określonego wzorem (23.8), gdy średnia $\bar{x}$ jest również estymowana.

Aby rozwiązać oba powyższe problemy, możemy zastosować algorytm Chana [11]. Przez $\bar{x}_n$ oznaczmy średnią po zaobserwowaniu n obserwacji, a przez $M_{2,n}$ – sumę kwadratów różnic od tej średniej, zadaną wzorem

$$M_{2,n} = \sum_{i=1}^n (x_{i_j} - \bar{x}_n)^2.$$

Wówczas dla nowego punktu x_{i_n} możemy zastosować równanie rekurencyjne (23.9). Estymator nieobciążony wariancji po zaobserwowaniu n obserwacji przyjmuje ostatecznie postać (23.10).

$$M_{2,n} = M_{2,n-1} + (x_{i_n} - \bar{x}_{n-1})(x_{i_n} - \bar{x}_n) \quad (23.9)$$

$$s_n^2 = \frac{M_{2,n}}{n-1} \quad (23.10)$$

Aby móc efektywnie wyliczać wariancję podczas pracy algorytmu, kubełki będziemy zatem reprezentować jako trójki (p, n, M_2) , gdzie p i n są zdefiniowane analogicznie jak w rozdziale 23.3.3., a ponadto

$$M_2 = \sum_{i=1}^n (x_{i_j} - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n (x_{i_j} - p)^2.$$

Aby połączyć kubełki $(p^{(1)}, n^{(1)}, M_2^{(1)})$ i $(p^{(2)}, n^{(2)}, M_2^{(2)})$ w nowy kubełek (p, n, M_2) , stosujemy algorytm Chana [11] opisany równaniami (23.11)–(23.14).

$$n = n^{(1)} + n^{(2)} \quad (23.11)$$

$$p = \frac{n^{(1)}p^{(1)} + n^{(2)}p^{(2)}}{n} \quad (23.12)$$

$$\delta = p^{(2)} - p^{(1)} \quad (23.13)$$

$$M_2 = M_2^{(1)} + M_2^{(2)} + \delta^2 \frac{n^{(1)}n^{(2)}}{n} \quad (23.14)$$

Zauważmy, że w równaniu (23.13) również występuje odejmowanie potencjalnie bliskich sobie liczb, jednak są one rzędów wielkości mniejsze niż w równaniu (23.8).

Aby wykorzystać obliczoną dla kubełka wariancję, skorzystamy z metody KDE z gausowskim kernelem [10], opisanej wzorami (23.15) oraz (23.16).

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(x - x_i) \quad (23.15)$$

$$K(y) = \phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (23.16)$$

Każdy kubełek zawiera n_i wartości, dla których powinniśmy wykonać estymację, zatem otrzymujemy

$$\hat{f}(b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^B n_i \frac{1}{\sqrt{2\pi s_i^2}} e^{-\frac{(b-p_i)^2}{2s_i^2}} \stackrel{\text{ozn.}}{=} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^B n_i G(b, p_i, s_i^2).$$

Problem z proponowaną metodą pojawia się, gdy wszystkie wartości tworzące kubełek są identyczne. Wówczas wariancja kubełka (zarówno estymowana s^2 , jak i prawdziwa σ^2) jest równa 0. Dla $s_i^2 \rightarrow 0$ mamy

$$G(b, p_i, s_i^2) \rightarrow \begin{cases} \infty & \text{dla } b = p_i \\ 0 & \text{dla } b \neq p_i. \end{cases}$$

Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie splotu z jednością aproksymacyjną w kubełkach o wariancji bliskiej 0, aby wygładzić wykres i uniknąć wystąpienia osłowności

ści w punkcie p_i . Korzystając z własności spłotu oraz własności niezależnych zmiennych losowych o rozkładzie Gaussa, otrzymujemy

$$G(b, p_i, 0) * \phi_\varepsilon(b) = G(b, p_i, \varepsilon).$$

W celu uniknięcia arbitralnego wyboru wartości ε zdecydowaliśmy, że będzie ona równa τ -percentylowi wybranego ze wszystkich niezerowych wariancji, ważonych liczbą obserwacji w kubelku. Dzięki temu uzyskujemy gwarancję, że wartość G będzie ograniczona. Formalna definicja ε wraz z uzasadnieniem znajduje się w pracy magisterskiej.

W pracy [5] jako alternatywę proponujemy również zmodyfikowaną metodę, w której na gęstość w punkcie $b \in (p_i, p_{i+1}]$ mają wpływ jedynie dwa sąsiadujące kubelki.

23.5. Metody badania algorytmów

Do oceny skuteczności rozważanych i proponowanych algorytmów będziemy korzystać z 12 rzeczywistych zbiorów danych pochodzących z różnych dziedzin nauki. Są one jednocześnie standardowo używane do ewaluacji metod detekcji anomalii [1, 12]. Pięć spośród nich reprezentuje dane medyczne, trzy stanowią dane z ataków sieciowych, a cztery – dane z satelitów i radarów. Zaimplementowane algorytmy detekcji anomalii skonstruowane na bazie metod dynamicznego tworzenia histogramów będziemy porównywać przy pomocy metryki AUC, jak przyjęło się w literaturze [12].

Ponadto będziemy analizowali, jak dokładna jest estymacja wybranych syntetycznych rozkładów danych przy pomocy metod *goodness of fit*, w szczególności dywergencji Kullbacka–Leiblera oraz statystyki Kołmogorowa–Smirnowa, zadanymi odpowiednio wzorami (23.17) oraz (23.18). Przez $p(x)$ oznaczmy gęstość prawdziwego rozkładu, a przez $\tilde{p}(x)$ – uzyskaną estymację gęstości. Analogicznie definiujemy prawdziwą i estymowaną dystrybucję $P(x)$ oraz $\tilde{P}(x)$.

$$D_{KL}(P||\tilde{P}) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log \frac{p(x)}{\tilde{p}(x)} dx \quad (23.17)$$

$$D_{KS} = \sup_x |\tilde{P}(x) - P(x)| \quad (23.18)$$

23.6. Uzyskane wyniki

W tabeli 23.1 prezentujemy wartości AUC wyznaczone dla każdego z rozważanych algorytmów na każdym ze zbiorów testowych. Pogrubione zostały najlepsze wyniki dla danego zbioru testowego oraz takie, których wartość AUC jest zbliżona do najlepszego. Podkreśleniem oznaczamy najskuteczniejszy spośród algorytmów strumieniowych.

Warto zauważyć, że algorytmy oparte o metodę LODA w 2 na 12 przypadków osiągnęły lepsze wyniki niż Isolation Forest [12], a ponadto w kolejnych 6 (dla metody DADO) i 8 (dla metod opartych na BH-histogramach) osiągnęły bardzo zbliżone wyniki do najlepszego. Należy tutaj podkreślić niezwykle małą złożoność pamięciową rozważanych i proponowanych algorytmów strumieniowych.

Tabela 23.1. Wyniki AUC dla poszczególnych algorytmów.

Nazwa zbioru	k	B	iForest	DADO	BH	BH-d	BH-KDE
arrhythmia	30	30	0,783	0,757	0,757	0,764	0,771
ionosphere	30	30	0,811	0,765	0,762	0,763	0,778
pima	30	30	0,665	0,562	0,556	0,573	0,545
forestcover	30	30	0,643	0,326	0,283	0,309	0,319
smtpt	10	50	0,640	0,918	0,911	0,923	0,917
kddcup	10	50	0,981	0,737	0,624	0,720	0,695
http	10	50	0,996	0,799	0,826	0,790	0,820
anthyroid	30	50	0,720	0,687	0,688	0,682	0,698
mammography	30	30	0,883	0,874	0,885	0,872	0,863
shuttle	30	50	0,995	0,974	0,980	0,977	0,977
breastw	15	50	0,987	0,857	0,964	0,863	0,912
satellite	30	30	0,665	0,727	0,721	0,734	0,727
multivariate	30	30	0,705	0,675	0,676	0,676	0,677

Tabele 23.2 i 23.3 prezentują metryki *goodness of fit* na wybranych syntetycznych rozkładach danych. Do eksperymentów stosowaliśmy rozkład Gaussa, mieszaninę rozkładów Beta(100, 1) i Beta(1, 100), a także mieszaniny odpowiednio 3 i 30 rozkładów jednostajnych. Z racji, że wiele wyników było do siebie zbliżonych, zamiast zaznaczać jedynie pojedyncze najlepsze wyniki, pogrubione zostały wszystkie najlepsze – zbliżone do siebie. Pozwala to zauważyć, że w przypadku rozkładów syntetycznych proponowane przez nas autorskie modyfikacje oparte o wykorzystanie wariancji zapewniają lepsze estymacje rozkładu niż dotychczas stosowana w przypadku dynamicznych BH-histogramów. W pracy [5] pokazujemy ponadto, że dla takiej samej ilości pamięci wykorzystywanej przez metody strumieniowe, zastosowanie modyfikacji opartych o estymowanie wariancji daje lepsze rezultaty niż zwiększenie liczby kubełków. Prezentujemy tam również wyniki pokazujące poprawę metryk *goodness of fit* po skorygowaniu wzorów, jak opisano w rozdziale 23.4.

Tabela 23.2. Wartości dywergencji Kullbacka–Leiblera dla rozważanych rozkładów.

Nazwa zbioru	DADO	BH	BH-d	BH-KDE
Normal	0,007078	0,003526	0,001213	0,001631
Uniform3	1,817243	1,881229	2,007550	0,508136
Uniform30	2,048688	2,008749	2,018128	2,046967
BetaMixture	0,080065	1,390611	2,254505	0,037502

Tabela 23.3. Wartości statystyki Kołmogorowa–Smirnowa dla rozważanych rozkładów.

Nazwa zbioru	DADO	BH	BH-d	BH-KDE
Normal	0,004548	0,004348	0,005100	0,007104
Uniform3	0,020972	0,025121	0,028781	0,006002
Uniform30	0,313737	0,311961	0,311785	0,315832
BetaMixture	0,018222	0,136687	0,134260	0,055502

W tabeli 23.4 prezentujemy średnie czasy wykonania algorytmów na rzeczywistych danych testowych. Pogrubione zostały wszystkie najszybsze przebiegi wykonania na danym zbiorze danych, a także zbliżone do najszybszych. Z wyjątkiem pojedynczych przypadków widzimy, że algorytmy oparte o metodę LODA radzą sobie szybciej niż algorytm Isolation Forest, który nie operuje w wariancie strumieniowym. Na podstawie czasów pracy proponowanych i rozważanych metod nie możemy jednoznacznie stwierdzić, która z nich radzi sobie skuteczniej od pozostałych. Nasuwa to sugestię, że najbardziej czasochłonną operacją wykonywaną przez algorytmy oparte o metodę LODA jest wielokrotne liczenie iloczynów skalarnych podczas rzutowania na losowo wybrane płaszczyzny.

Tabela 23.4. Średni czas pracy poszczególnych algorytmów [ms].

Nazwa zbioru	k	B	iForest	DADO	BH	BH-d	BH-KDE
anthyroid	30	50	155,76	149,82	150,71	147,64	147,78
arrhythmia	30	30	20,97	26,08	26,17	26,49	26,48
breastw	15	50	15,82	7,67	6,67	7,51	7,08
forestcover	30	30	12 830,25	7 972,98	7 933,16	7 805,67	7 919,44
http	10	50	5 304,90	2 105,58	2 095,26	2 039,59	2 087,17
ionosphere	30	30	20,36	8,08	8,30	8,31	7,77
kddcup	10	50	477,85	345,38	333,87	336,10	334,80
mammography	30	30	258,85	189,74	184,33	184,24	182,86
pimza	30	30	29,68	14,18	14,39	14,65	14,11
satellite	30	30	165,00	140,79	139,06	140,46	138,66
shuttle	30	50	1 449,06	1 304,94	1 353,98	1 333,24	1 279,98
smtp	10	50	1 793,02	389,86	417,81	419,80	400,43
multivariate	30	30	2 293,46	1 588,00	1 581,42	1 581,03	1 576,43

23.7. Podsumowanie

W pracy omówiliśmy algorytm wykrywania anomalii przy pomocy szkiców danych estymujących ich rozkład. Badaliśmy metody dynamicznego tworzenia histogramów ze strumienia danych i zaproponowaliśmy ich modyfikacje, używając do aproksymacji rozkładu wiedzy o wariancji wewnątrz kubelka. Poprawiliśmy również wzory z pracy wykorzystującej BH-histogramy do detekcji anomalii, proponując takie, które spełniają definicję gęstości prawdopodobieństwa.

Uzyskane wyniki pokazują, że szybkie strumieniowe metody wykrywania anomalii nie muszą znacznie odbiegać skutecznością od algorytmów statycznych. Proponowane przez nas modyfikacje metod oparte o wykorzystanie wariancji poprawiają jakość estymacji dla niektórych klas rozkładów, osiągając wyższą skuteczność niż zwiększenie liczby kubelków.

Metody oparte o histogramy używają znacznie mniej pamięci od standardowo stosowanych algorytmów detekcji anomalii, wymagając zaledwie kilkunastu kilobajtów. Należy również zauważyć, że skuteczność metod strumieniowych na początku ich pracy jest słabsza od metod statycznych, ponieważ struktury trenują się wraz z przetwarzaniem danych. Biorąc pod uwagę oba te czynniki, widzimy, że proponowane metody spełniły wymagania,

które przed nimi stawialiśmy. Dalszym kierunkiem badań może być dostosowanie rozważanych tu algorytmów do pracy w wariancie rozproszonym, na przykład do wykrywania anomalii w danych pozyskiwanych przy pomocy sieci czujników.

Bibliografia

- [1] Tomáš P., Loda: Lightweight on-line detector of anomalies. *Machine Learning* **2015**, 102, s. 275–304.
- [2] Chandola V., Banerjee A., Kumar V., Anomaly Detection: A Survey. *Computer Science & Engineering (CS&E) Technical Reports* **2007**, 07-017.
- [3] Cormode G., Garofalakis M., Haas P., Jermaine C., Synopses for Massive Data: Samples, Histograms, Wavelets, Sketches. *Foundations and Trends® in Databases* **2012**, 4, s. 1–294.
- [4] Li P., Very Sparse Stable Random Projections for Dimension Reduction in l_α ($0 < \alpha \leq 2$) Norm. Proceedings of the 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Jose, California, USA, 2007, s. 440–449.
- [5] Wołkonowski K., Analiza zastosowania szkiców danych w algorytmach detekcji anomalii. praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, 14-06-2025.
- [6] Donjerkovic D., Ioannidis Y., Ramakrishnan R., Dynamic Histograms: Capturing Evolving Data Sets. Proceedings of 16th International Conference on Data Engineering, San Diego, California, USA, 2000, s. 86–.
- [7] Ben-Haim Y., Tom-Tov E., A Streaming Parallel Decision Tree Algorithm. *Journal of Machine Learning Research* **2010**, 11, s. 849–872.
- [8] Nie F., Li Z., Wang R., Li X., An Effective and Efficient Algorithm for K-Means Clustering With New Formulation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* **2023**, 11, s. 3433–3443.
- [9] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J., *The elements of statistical learning*, wydanie drugie.; Wydawnictwo Springer, New York, USA, 2009.
- [10] Gramacki A., *Nonparametric kernel density estimation and its computational aspects*, wydanie pierwsze.; Wydawnictwo Springer International Publishing, Cham, Szwajcaria, 2018.
- [11] Chan T., Golub, G., LeVeque R., Updating Formulae and a Pairwise Algorithm for Computing Sample Variances. COMPSTAT 1982 5th Symposium, Toulouse, Francja, 1982, s. 30–41.
- [12] Liu F., Ting K., Zhou Z., Isolation Forest. 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, 2008, s. 413–422.

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Projekt i realizacja modułowego urządzenia umożliwiającego analizę ruchu kończyn z funkcją wieloosiowego pomiaru przyspieszenia

inż. Michał Kimbar
Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Tomasz Grysiński
Katedra Inżynierii Biomedycznej

Praca przedstawia projekt i realizację modułowego urządzenia umożliwiającego analizę ruchu kończyn z funkcją wieloosiowego pomiaru przyspieszenia. System tworzą cztery autonomiczne moduły mocowane na segmentach ciała, które prowadzą lokalną akwizycję danych z czujnika LSM9DS1¹ sterowanego przez mikrokontroler ESP32. Stosowana jest hierarchiczna, bezprzewodowa komunikacja w topologii gwiazdy za pomocą protokołu ESP-NOW: moduły *slave* przekazują dane do modułu *master*, który przesyła je przez Bluetooth do urządzenia zewnętrznego. Na komputerze realizowane są zapis i synchronizacja pakietów danych, następnie filtracja sygnałów akcelerometru przez filtr IIR² oraz obliczania kątów orientacji używając filtra komplementarnego. Wyniki prezentowane są jako wykresy 2D oraz animacje 3D w programie Blender. Testy w warunkach statycznych i dynamicznych potwierdzają poprawność toru pomiarowego, stabilność łącza i wysoką precyzję. Urządzenie cechuje się modułową budową, niskim poborem mocy i prostą obsługą. System stanowi prototypową podstawę do dalszego rozwoju, m.in. miniaturyzacji, zwiększenia częstotliwości próbkowania oraz implementacji metod przetwarzania danych o wyższym stopniu zaawansowania.

24.1. Cel i założenia

Celem pracy jest opracowanie i wykonanie urządzenia w postaci elektronicznych modułów, które pozyskują i bezprzewodowo transmitują wyniki pomiarów. Modułowa konstrukcja umożliwia dostosowanie systemu pomiarowego do wybranego wzorca lub rodzaju ruchu kończyny, szybką zmianę miejsca montażu oraz elastyczne skalowanie liczby punktów pomiarowych.

¹LSM9DS1, STMicroelectronics: 3-osiowy akcelerometr, 3-osiowy żyroskop, 3-osiowy magnetometr.

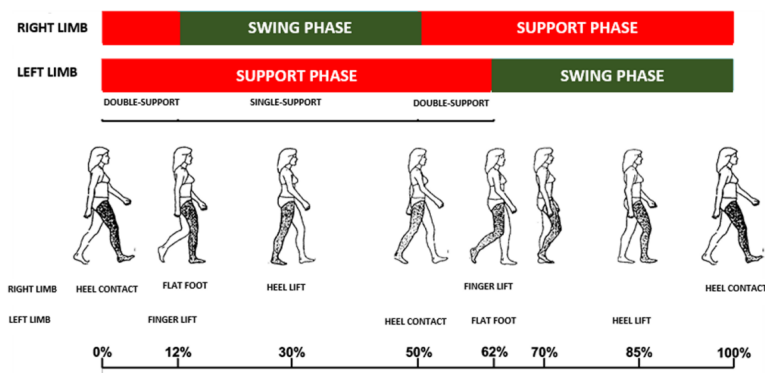
²IIR (Infinite Impulse Response) cyfrowy filtr o nieskończonej odpowiedzi impulsowej, w pracy użyto dolnoprzepustowego wariantu do wygładzania sygnałów akcelerometru.

Główne założenia projektowe to:

- **modułowość i skalowalność:** umożliwienie autonomicznej pracy jednego lub wielu modułów pomiarowych (1-N),
- **łączność bezprzewodowa:** topologia gwiazdy oparta na ESP-NOW między modułami *slave* a modulem *master*, a następnie wysyłanie danych do komputera przez Bluetooth,
- **akwizycja o stałej częstotliwości próbkowania:** ciągła rejestracja danych z LSM9DS1 z lokalnym buforowaniem oraz identyfikatorem modułu w pakiecie,
- **ergonomia:** kompaktowa, lekka obudowa oraz możliwość powtarzalnego montażu na segmencie kończyny,
- **post-processing na komputerze:** zapis oraz filtracja wstępna danych z akcelerometru, następnie przetwarzanie danych na kąty orientacji przy pomocy filtra komplementarnego, końcowo wizualizacja 2D/3D.

24.2. Wstęp teoretyczny

Analiza kinematyczna opisuje geometrię ruchu: trajektorie, kąty stawowe, prędkości i przyspieszenia segmentów ciała. Umożliwia wykrywanie asymetrii, kompensacji oraz odchyłeń od wzorca, co ma znaczenie diagnostyczne i rehabilitacyjne [1]. W odniesieniu do kończyn dolnych kluczowym kontekstem jest cykl chodu (Rys. 24.1, faza podporu i przenoszenia), którego parametry m.in. symetria, długość kroku i czasy faz korelują ze stanem funkcjonalnym pacjenta [2].



Rysunek 24.1. Diagram cyklu chodu człowieka [1].

Reprezentacja i estymacja orientacji

Orientację segmentu ciała opisuje się m.in. kątami Eulera: *pitch* (θ), *roll* (ϕ) i *yaw* (ψ). Kąty θ i ϕ można wyznaczyć z danych akcelerometru [3]:

$$\theta = \arctg 2 \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right), \quad \phi = \arctg 2 \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right), \quad (24.1)$$

natomiast ψ wymaga odniesienia magnetycznego oraz kompensacji przechyłów. W warunkach dynamicznych pojedyncze czujniki mają naturalne ograniczenia: akcelerometr dostarcza dane stabilne w dłuższej perspektywie, ale jest podatny na szum i na przyspieszenia liniowe wynikające z ruchu. Żyroskop jest precyzyjny krótkookresowo, lecz integracja jego sygnału powoduje narastający dryft. Magnetometr jest podatny na lokalne zakłócenia pola magnetycznego [4].

24.3. Projekt i wykonanie

Proces realizacji rozpoczęto od projektowania modułu pomiarowego, którego zadaniem jest współpraca z płytą mikrokontrolera ESP32. Moduł pomiarowy został zaprojektowany z uwzględnieniem wcześniej opisanych założeń.

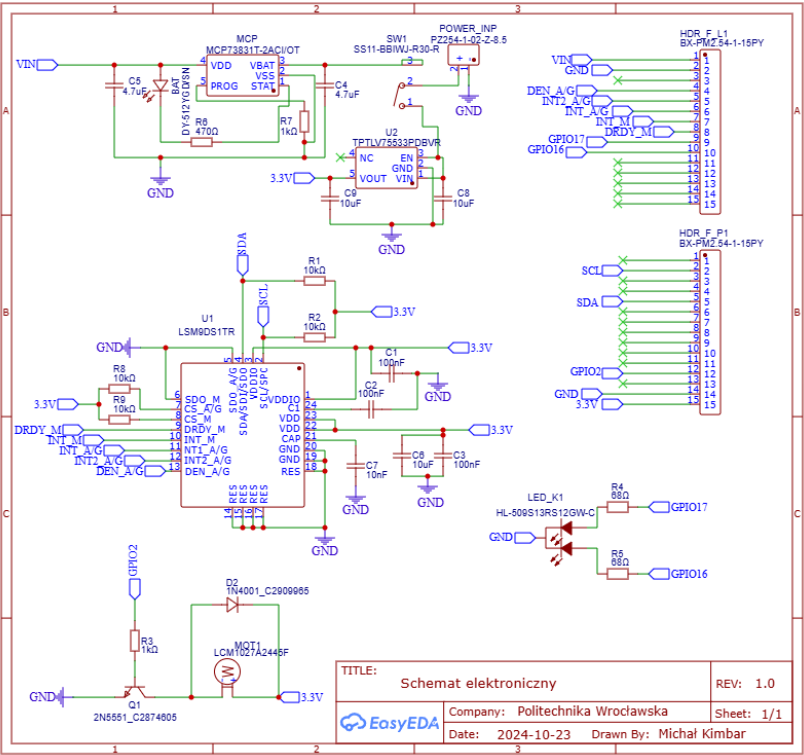
24.3.1. Płyta drukowana i interfejsy

Moduł pomiarowy zaprojektowano jako nakładkę współpracującą z płytą ESP32. Zastosowano połączenie *stackowane* na złączach gold-pin: płyta ESP32 ma złącza męskie, a moduł czujnikowy żeńskie. Wielopinowy wcisk zapewnia stabilność mechaniczną i elektryczną podczas ruchu, eliminuje ryzyko zwarcia między pinami oraz pozostawia pełny dostęp do wyprowadzeń mikrokontrolera dla czujnika i peryferiów.

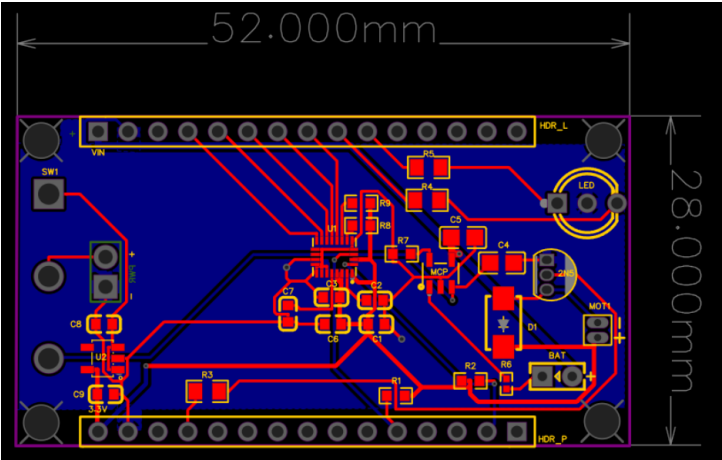
Sekcję zasilania (Rys.24.2) zaprojektowano z dwoma trybami pracy, przełączanymi przełącznikiem SPDT: tryb akumulatorowy oraz tryb USB. W trybie akumulatorowym napięcie z ogniwa 3.7 V trafia na stabilizator TPTLV75533, który zapewnia 3.3 V dla modułu. Układ MCP73831 pozostaje wtedy nieaktywny. W trybie USB akumulator jest odłączany od TPTLV75533 i połączony z układem MCP73831 (ładowanie z 5 V), a zasilanie zapewnia stabilizator AMS1117 na płycie ESP32 (5 V $\rightarrow$ 3.3 V). Dioda BAT sterowana wyprowadzeniem STAT MCP73831 sygnalizuje stan ładowania (świeci podczas ładowania, gaśnie po zakończeniu). Zastosowanie dwóch stabilizatorów wynika z ograniczeń AMS1117, który nie utrzymuje 3.3 V przy wejściu < 4.8 V. TPTLV75533 gwarantuje poprawną pracę w trybie akumulatorowym.

Czujnik LSM9DS1 podłączono magistralą I²C: linie SDA (GPIO22) i SCL (GPIO21) wyposażono w rezystory podciągające do zasilania, zgodnie z notą aplikacyjną. Wybrano I²C ze względu na wystarczającą przepustowość oraz doświadczenie konstruktora z protokołem. Maksymalna częstota aktualizacji magnetometru (80 Hz) wyznaczała maksymalną częstotliwość pomiarową, dlatego przyjęto interwał próbkowania 15 ms, zapewniający zapas na przetwarzanie i transmisję.

Na płycie umieszczono także prosty interfejs użytkownika: sterowanie silnikiem wi-bracyjnym realizowane jest tranzystorem, za sygnalizację stanów odpowiada dioda BAT powiązana z układem ładowania oraz dioda LED_{K1} dopełniająca informujące o statusie pracy urządzenia (Rys. 24.3).



Rysunek 24.2. Schemat modułu pomiarowego podłączanego do płytki ESP32.

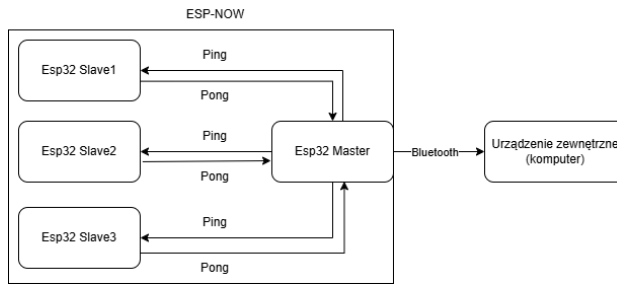


Rysunek 24.3. Projekt obwodu drukowanego.

24.3.2. Architektura systemu pomiarowego

System pracuje w topologii gwiazdy (Rys. 24.4). Moduł *master* cyklicznie odpytuje moduły *slave* (model *ping-pong*) przez ESP-NOW, a następnie przekazuje zebrane pakiety danych do komputera przez Bluetooth. Przetwarzanie realizowane jest na komputerze, co

upraszcza firmware modułów i ułatwia skalowanie liczby punktów pomiarowych.



Rysunek 24.4. Schemat blokowy połączeń komunikacyjnych.

24.3.3. Oprogramowanie modułów

Firmware realizuje inicjalizację peryferiów, stało-próbkową akwizycję danych z IMU, lokalne buforowanie w pamięci ESP32 oraz odpowiedzi na zapytania *mastera*. Firmware pracuje jako prosta maszyna stanów: INIT → IDLE → ACQ/RESP. W INIT realizowana jest konfiguracja peryferiów i czujnika. Stan IDLE oczekuje na zdarzenia: tik zegara próbkowania (T_s) lub zapytanie *mastera*. Tik T_s uruchamia ACQ (odczyt IMU i dopisanie do buforowej tablicy), a zapytanie *mastera* — RESP (wysłanie pakietu danych). Zastosowano podwójne buforowanie, aby zapewnić miejsce w pamięci na ciągły zapis pomiarów.

24.3.4. Komunikacja bezprzewodowa

Transmisję między modułami zrealizowano z użyciem ESP-NOW. Moduł *master* posiada listę adresów MAC modułów *slave* i cyklicznie je odpytuje o dane. Każde zapytanie inicjuje przesłanie przez *slave* zbuforowanej tablicy danych, co redukuje narzut protokołu i minimalizuje ryzyko utraty pojedynczych próbek podczas odpowiedzi. *Master* pełni rolę bramki: odebrane bloki są kolejgowane i wysyłane paczkami na komputer przez Bluetooth. Takie rozdzielenie (ESP-NOW → *master* → Bluetooth) upraszcza firmware *slave* i umożliwia płynne skalowanie liczby punktów pomiarowych przez wzgląd na możliwość zwiększenia liczby modułów podrzędnych jak i nadrzędnych.

24.3.5. Format danych i zapis

Ramka danych zawiera identyfikator modułu (1 B), a następnie $N=12$ kolejnych zestawów pomiarowych IMU ($a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, m_x, m_y, m_z$). Każda składowa zapisywana jest jako liczba 16-bitowa (porządek bajtów: *hi*, *lo*). Łączny rozmiar bloku wynosi 217 B (1 B + 12 × 18 B). Po stronie komputera realizowany jest odbiór, kontrola kompletności i zapis do plików CSV, co ułatwia dalszą analizę oraz ponowne odtwarzanie pomiaru.

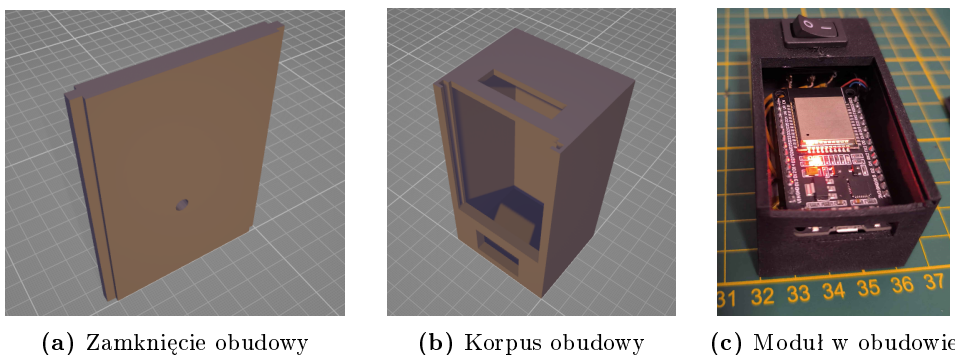
24.3.6. Aplikacja PC i post-processing

Po stronie komputera realizowany jest odbiór pakietów przez Bluetooth, demultipleksacja strumienia po identyfikatorze modułu, następnie dane są zapisywane do plików CSV

i przetwarzane. Przetwarzanie obejmuje filtrację dolnoprzepustową (IIR) sygnałów akcelerometru w celu wygładzenia składowej grawitacyjnej oraz obliczanie kątów *roll* oraz *pitch* za pomocą filtra komplementarnego. Składowe magnetometru są jedynie rejestrowane kąt *yaw* nie jest w bieżącej wersji wyznaczany. Wyniki prezentowane są jako wykresy 2D oraz animacje 3D w programie Blender przez mapowanie kątów na armaturę modelu.

24.3.7. Obudowa i montaż modułu

Zadaniem obudowy jest ochrona elektroniki oraz zapewnienie powtarzalnego i stabilnego mocowania modułu na segmencie kończyny. Konstrukcja jest dwuelementowa: korpus oraz pokrywa (Rys. 24.5a–b). Po złożeniu (Rys. 24.5c) uzyskuje się kompaktową i lekką bryłę, co sprzyja komfortowi użytkowania podczas ruchu.



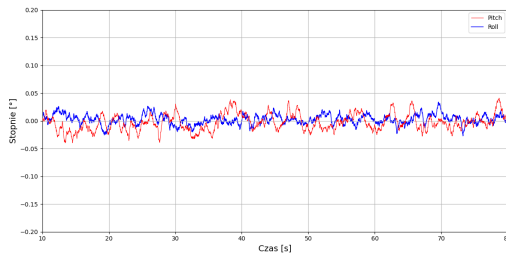
Rysunek 24.5. Moduł pomiarowy, obudowa oraz przykład montażu.

24.4. Uzyskane wyniki

Niniejszy rozdział zbiera najważniejsze rezultaty pracy pomiarowej: stabilność kątów w statyce, porównanie metod wyznaczania kątów, odpowiedź na kontrolowane obroty wokół osi X oraz Y , zgodność przebiegów dla obu piszczeli oraz przykład wizualizacji 3D. Dla statystyki w spoczynku.

24.4.1. Statyka: kąty *pitch* oraz *roll*

W spoczynku rejestrowano przebiegi kątów *pitch* oraz *roll* po filtracji IIR oraz fuzji filtrem komplementarnym (Rys. 24.6). Wartości oscylują blisko zera w wąskim zakresie, bez trendu długookresowego, co potwierdza stabilność toru i skuteczne kompensacje niedoskonałości czujników. Podstawowe statystyki (średnia, mediana, odchylenie standardowe, zakres min–max) zestawiono w Tab. 24.1.



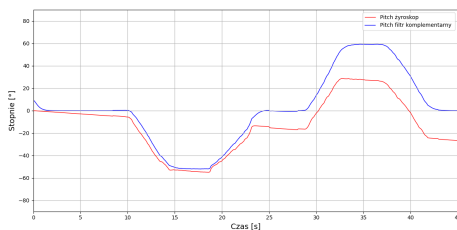
Rysunek 24.6. Wartości kątów Pitch i Roll przy pomiarze statycznym.

Tabela 24.1. Wartości parametrów statystycznych kątów stosując filtr komplementarny

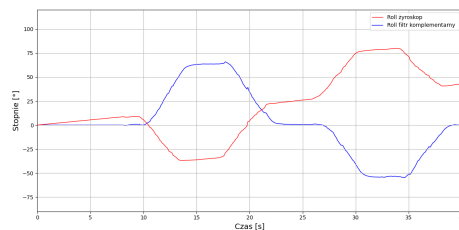
Kąt	Średnia	Mediana	Wariancja	SD (σ)	Min	Max
Pitch	-0.0022	-0.0033	0.0002	0.0147	-0.0398	0.0408
Roll	0.0019	0.0021	0.0001	0.0092	-0.0292	0.0339

24.4.2. Porównanie metod: integracja żyroskopu vs. filtr komplementarny

Rys. 24.7 zestawia przebiegi kątów uzyskane z samej integracji sygnału żyroskopu z wynikami filtra komplementarnego. Widoczna jest redukcja dryftu i gładzszy kształt toru po zastosowaniu filtra, przy zachowaniu dynamiki zmian zarówno dla kąta *pitch*, jak i *roll*.



(a) Wartości kąta pitch

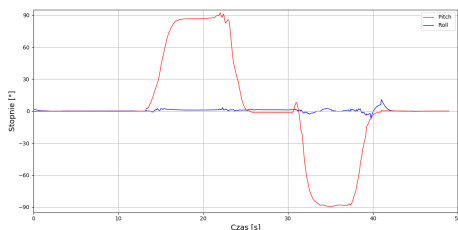


(b) Wartości kąta roll

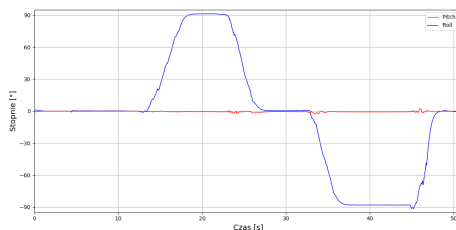
Rysunek 24.7. Porównanie metod przetwarzania: wykorzystującą żyroskop i filtr.

24.4.3. Obroty kontrolowane wokół osi *X* oraz *Y*

Podczas kontrolowanych obrotów modułu pomiarowego (Rys. 24.8) zaobserwowano, że implementacja algorytmu obliczania kątów orientacji, mimo poprawnego odwzorowania ogólnego trendu zmian, wykazuje pewne ograniczenia. Dla obrotu wokół osi *X* oczekiwano zmiany wartości kąta Pitch przy utrzymaniu kąta Roll bliskiego zera, jednak na wykresie widoczne są niepożądane wahania składnika Roll. Analogicznie, dla obrotu wokół osi *Y*, mimo że główną zmienną powinna być wartość kąta Roll, obserwuje się lokalne skoki kąta Pitch. Zjawiska te wynikają z charakterystyki zastosowanego filtra komplementarnego oraz ograniczeń w sposobie wyznaczania kątów na podstawie funkcji trygonometrycznej (równanie 24.1), które prowadzą do błędnej interpretacji pozycji w określonych zakresach orientacji.



(a) Obrót względem osi X

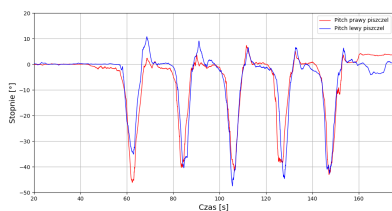


(b) Obrót względem osi Y

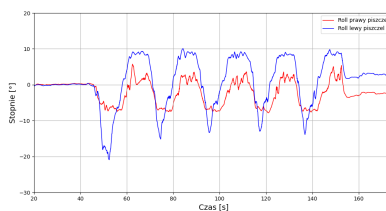
Rysunek 24.8. Obracanie modułu względem osi X, wartość pitch oraz osi Y wartość roll.

24.4.4. Porównanie symetrii wzorca ruchowego

Na Rys. 24.9 pokazano kąty *pitch* oraz *roll* lewego i prawego piszczeła. Przedstawione przebiegi są zbliżone amplitudowo i zgodne fazowo między kolejnymi cyklami, co wskazuje na powtarzalność ruchu.



(a) Wyznaczone kąty pitch piszczeli



(b) Wyznaczone kąty roll piszczeli

Rysunek 24.9. Porównanie zebranych danych z obu kończyn dolnych.

24.4.5. Wizualizacja 3D

Wyniki katowe *pitch* oraz *roll* mapowano na armaturę w programie Blender (Rys. 24.10). Wizualizacja ułatwia szybką, jakościową ocenę kierunku i zakresu ruchu w zgodzie z przebiegami czasowymi.

**Rysunek 24.10.** Wizualizacja 3D w programie Blender.

24.5. Podsumowanie

Opracowane urządzenie umożliwia analizę ruchu kończyn przez odtwarzanie orientacji przestrzennej elementów układu ruchu. Konstrukcja modułowa i skalowalna pozwala na elastyczne dopasowanie liczby czujników do specyfiki pomiaru, a kompaktowa obudowa zapewnia ochronę mechaniczną i łatwość montażu.

Zaimplementowany algorytm obliczania kątów orientacji, oparty na filtrze komplementarnym, umożliwił uzyskanie stabilnych i powtarzalnych wyników w warunkach statycznych, jednak w warunkach dynamicznych ujawniono ograniczenia związane z dryftem żyroskopu i błędami w określonych zakresach orientacji.

Dalsze prace powinny koncentrować się na miniaturyzacji modułów, implementacji obliczeń kwaternionowych, wprowadzeniu procedur kalibracji oraz zastąpieniu filtra komplementarnego bardziej zaawansowanym filtrem Kalmana. Udoskonalenia te pozwolą zwiększyć dokładność, stabilność i wiarygodność pomiarów, a także rozszerzyć możliwości systemu. Opracowane rozwiązanie stanowi bazę prototypową do dalszych prac w dziedzinie analizy ruchu oraz rehabilitacji.

Bibliografia

- [1] Instituto de Biomecánica de Valencia, *MODUŁ: BIOMECHANIKA CHODU. Jednostka dydaktyczna A: Biomechanika chodu normalnego*, 2021. Dostępny online: https://teach.ibv.org/wp-content/uploads/sites/18/2021/07/BG_A_Didactic_Unit_PL.pdf.
- [2] Gawel M., Potulska-Chromik A., Choroby neurodegeneracyjne: choroba Alzheimera i Parkinsona. *Postępy Nauk Medycznych* 2015, 28(7), s. 468–476.
- [3] Fisher C. J., Using an Accelerometer for Inclination Sensing. *Analog Devices*, Nota aplikacyjna AN-1057. Dostępny online: <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-1057.html>.
- [4] Beeby S., Ensell G., Kraft M., White N., *MEMS Mechanical Sensors*, Microelectromechanical Systems Series, Artech House, 2004.

Projekt i realizacja urządzenia wspomagającego prowadzenie treningu sportowego z funkcją pomiaru sygnału elektromiograficznego

inż. Maksymilian Steckiewicz

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Tomasz Grysiński

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Urazy mięśni oraz tkanek łącznych stanowią częsty problem osób aktywnych fizycznie, w tym zawodowych sportowców. Dolegliwości takie jak przewlekłe stany zapalne, naderwania ścięgien czy uszkodzenia więzadeł wynikają m. in z nadmiernego obciążenia treningowego oraz braku odpowiedniej diagnostyki obciążenia mięśni. Zastosowanie elektromiografii powierzchniowej (sEMG) pozwala skutecznie monitorować aktywność mięśni i tym samym zapobiegać urazom. Jednak obecnie wykorzystanie tej technologii jest ograniczone ze względu na wysokie koszty zaawansowanych, bezprzewodowych systemów pomiarowych oraz ograniczoną funkcjonalność stacjonarnych urządzeń. Niniejsza praca przedstawia projekt oraz realizację ekonomicznego, bezprzewodowego urządzenia do pomiaru powierzchniowego sygnału sEMG, opartego na płycie mikrokontrolera ESP32S3-devkitc-1n8 oraz wzmacniaczach instrumentalnych AD8221AR. Opracowany system składa się z przenośnego modułu elektronicznego oraz dedykowanego oprogramowania komputerowego, umożliwiającego optymalizację obciążeń treningowych dostosowanych do indywidualnych możliwości tkanek oraz założonych celów treningowych. Dzięki temu możliwe jest znaczne zmniejszenie ryzyka urazów mięśniowo-szkieletowych. Mobilność urządzenia pozwala na jego szerokie zastosowanie zarówno w treningu stacjonarnym, jak i w dynamicznych dyscyplinach sportowych, takich jak wspinaczka czy sporty walki.

25.1. Cel i założenia

Niniejsza praca dyplomowa dotyczy zaprojektowania oraz realizacji urządzenia służącego do bezprzewodowej akwizycji sygnału EMG podczas pomiaru powierzchniowego (sEMG). Zadaniem urządzenia jest wspomaganie treningu sportowego przez analizę pracy mięśni, co ma przełożyć się na poprawę osiąganych rezultatów i zmniejszenie ryzyka kontuzji.

Założenia projektowe realizowanej pracy to:

- Zaprojektowanie i wykonanie urządzenia do akwizycji oraz kondycjonowania sygnału sEMG.
- Umożliwienie bezprzewodowej transmisji danych do komputera w celu ich dalszej analizy.
- Opracowanie oprogramowania pozwalającego na wizualizację sygnału w czasie rzeczywistym oraz analizę charakterystyki częstotliwościowej wykonanej przy użyciu transformaty Fouriera.
- Przeprowadzenie testów z użyciem różnych protokołów komunikacyjnych oraz weryfikacja działania podczas aktywności.

25.2. Wstęp

25.2.1. Kontuzje w sporcie

Sport uprawiany zawodowo lub ekstremalnie, bez odpowiedniej profilaktyki, jest najczęstszym źródłem urazów oraz kontuzji. Zgodnie z artykułem opublikowanym przez amerykański instytut zdrowia [1], główne przyczyny urazów sportowych to m. in. :

Zła technika – niepoprawne technicznie wykonywanie ćwiczeń, z obciążeniem masy ciała lub dodatkowym ciężarem, może powodować mikrourazy, których pogłębienie przyczynia się do powstania kontuzji.

Zespół przetrenowania – powodowany przez zbyt częste, intensywne bądź długotrwałe uprawianie aktywności fizycznej. W efekcie tkanka mięśniowa nie jest w stanie odpowiednio szybko się regenerować, co przekłada się na większą podatność na uszkodzenia. Według badań, około 30% zawodowych sportowców zmagało się z tym problemem przynajmniej raz w życiu [2].

Niewystarczające przygotowanie tkanek do obciążenia – Siła mięśni wzrasta szybciej niż odporność na rozciąganie ścięgien. Przy długotrwałym nadwyrężaniu tkanek może to prowadzić do **tendinopatii**¹, a w skrajnych przypadkach skutkuje **naderwaniem** bądź **zerwaniem** tkanek łącznych.

Naciągnięcie i zerwanie mięśni – uszkodzenia powodowane zbyt niskim poziomem rozciągnięcia tkanki bądź jej przeciążeniem. Skutkują naruszeniem lub całkowitym przerwaniem ciągłości tkanek, a nawet oderwaniem przyczepu mięśnia od kości.

Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi na grupie sportowców w wieku od 14 do 21 lat [4], można zauważyć korelację między liczbą i rodzajem urazów, a sposobem uprawiania aktywności fizycznej. Sportowcy biorący udział w badaniu doznawali od 2 do 3

¹Tendinopatia – ogólny termin dotyczący współistnienia stanu zapalnego towarzyszącego niezdefiniowanej kontuzji [3]. Objawia się sztywnością ścięgien i bólem, co przekłada się na ograniczenie ruchomości i upośledzenie zdolności regeneracyjnych tkanek.

kontuzji na każde 1000 h treningu. Najwięcej urazów zanotowano u piłkarzy (7.21%). Do tych najczęściej zgłaszanych należały: naderwania mięśni (11.24%), uszkodzenia stawów kolanowych, ramieniowych i skokowych, w tym najczęściej skręceń stawu skokowego (11.98%).

25.2.2. Profilaktyka

Najważniejszym narzędziem pozwalającym na ograniczenie występowania ww. urazów jest profilaktyka. Wspólną przyczyną poszczególnych kontuzji jest nadmierne obciążenie tkanek. Dobranie właściwego obciążenia pozwoli na wywołanie pożądanej reakcji mięśni i zmniejszenie ryzyka kontuzji. Reakcje tkanki mięśniowej na aktywność fizyczną można podzielić na trzy kategorie:

- **Rozwój siłowy** – wpływa na zwiększenie siły mięśnia przy niewielkim przyroście masy mięśniowej.
- **Rozwój hipertoficzny** – pozwala na osiągnięcie znacznego przyrostu masy mięśniowej przy jednoczesnym zwiększeniu możliwości siłowych.
- **Rozwój wytrzymałościowy** – zwiększa zdolności aerobowe tkanki dzięki czemu można dłużej prowadzić aktywność.

Podział ten jest istotny dla specjalizacji w konkretnej dyscyplinie. Analizując potrzeby sportowców uprawiających różne dyscypliny można sprecyzować wymagania dot. sylwetki oraz możliwości układu mięśniowego, pożądanych w celu osiągnięcia dobrych wyników sportowych.

Wywołanie pożądanej reakcji tkanek mięśniowych zależy od ilości wykonanych powtórzeń oraz stopnia aktywacji mięśnia [5]:

- **siła mięśni** – najbardziej optymalne będzie wykonywanie od 1 do 5 powtórzeń w zakresie 80-100% MA².
- **hipertrofia** – najbardziej optymalne będzie wykonywanie od 6 do 12 powtórzeń w zakresie 60-80% MA.
- **wytrzymałość** – najbardziej optymalne będzie wykonywanie powyżej 15 powtórzeń poniżej 60% MA.

25.2.3. Dostępne rozwiązania diagnostyczne

Obecnie najczęściej wykorzystywaną metodą diagnostyczną w badaniach pracy mięśni jest badanie **EMG**³, które znajduje szerokie zastosowanie kliniczne w diagnostyce patologii tkanek mięśniowych i problemów neurologicznych. Zgodnie z artykułem autorstwa Laury McManus [6], najczęściej wykorzystywaną techniką jest **iEMG**⁴. Technika ta nie znajduje zastosowania w przypadku omawianego problemu z dwóch powodów:

- **Stacjonarna jednostka pomiarowa** – uniemożliwia analizę sygnału podczas dy-

²Maksymalnej aktywacji – mowa o poziomie aktywacji jednostek motorycznych określanym na podstawie amplitudy sygnału.

³Elektromiografia – badanie potencjałów nerwowych generowanych przez repolaryzację ładunków po obu stronach błony nerwowej podczas aktywacji mięśni. Amplituda sygnału, w zależności od obiektu badanego, zawiera się w przedziale od 10 μV do 10 mV w zakresie częstotliwości od 10 do 500 Hz.

⁴Elektromiografia igłowa – badanie inwazyjne wykorzystujące do pomiaru potencjałów nerwowych elektrodę igłową.

namicznych ćwiczeń, a przewody poprowadzone do elektrod tworzą ryzyko uszkodzenia urządzenia w razie wypadku.

- **Inwazyjność** – elektrody igłowe stosowane podczas pomiaru powodują dyskomfort i uniemożliwiają poprawne wykonanie ćwiczenia.

Rozwiązaniem problemu jest diagnostyka **sEMG**⁵. Nieinwazyjna metoda gwarantuje komfort i bezpieczeństwo badanego, jednak jej możliwości są zależne od jednostki pomiarowej podłączonej do sieci. W wypadku sportowców należy skorzystać z mobilnej jednostki bezprzewodowej.

25.2.4. Aparatura dostępna na rynku

Urządzenia bezprzewodowe do akwizycji sygnału sEMG, takie jak FreeEMG[8] czy bezprzewodowe urządzenia do akwizycji sygnałów biologicznych, takie jak Trigno Wireless Foundation System [9] znajdują się daleko poza granicą finansowych możliwości większości konsumentów. Za urządzenie FreeEMG w konfiguracji 8 kanałowej trzeba zapłacić kwotę około 50 tys. złotych. Tańszą alternatywą są firmy MyonTec [10]. Zestaw pozwalający na badanie mięśni kończyn oraz torsu, w zależności od konfiguracji, kosztuje od 28 do 35 tys. złotych. W celu zwiększenia dostępności urządzenia dla jak największej grupy odbiorców, należy zaprojektować je tak, aby łączyło przystępność cenową oraz jakość.

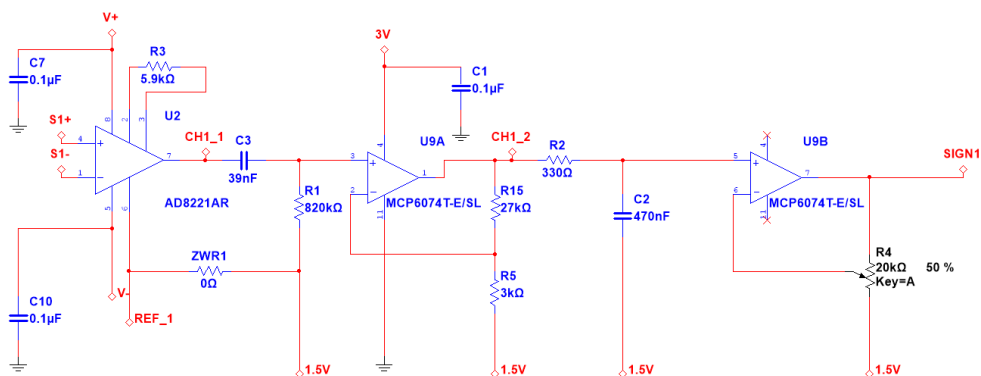
25.3. Zaproponowane rozwiązanie

Zrealizowane przez autora pracy urządzenie umożliwia bezprzewodową analizę sygnału sEMG, jednocześnie spełniając kryterium ekonomiczne, zwiększając dostępność urządzenia dla większej grupy odbiorców. Amplituda surowego sygnału sEMG nie przekracza 10 mV, a pasmo użyteczne analitycznie znajduje się w zakresie od 6 do 500 Hz. Największe wartości notowane są w zakresie od 20 do 150 Hz[7]. Część analogowa urządzenia została wyposażona w układ filtrujący i kondycjonujący sygnał według ww. parametrów, pozwalając na poprawny odczyt danych przez przetwornik analogowo-cyfrowy mikrokontrolera i przesłanie danych do komputera.

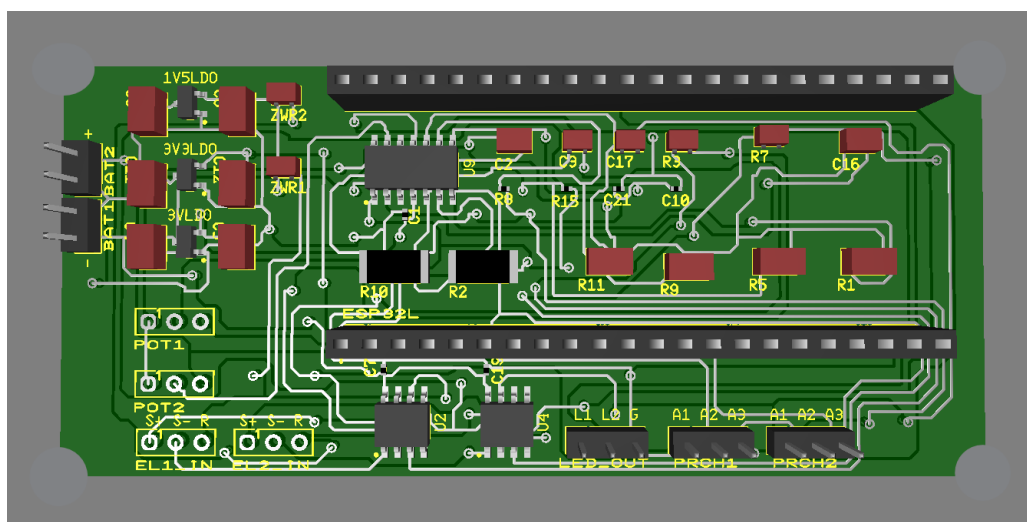
25.3.1. Część konstrukcyjna

Przy wykorzystaniu programu NI Multisim zaprojektowano urządzenie (rysunek 25.1), a przy pomocy oprogramowania został zaprojektowany obwód drukowany PCB w technologii SMT (rysunek 25.2). Prezentowany układ pozwala na filtrację w zakresie 5 Hz - 1000 Hz, dzięki czemu nie zostaje naruszone pasmo użyteczne sygnału. Przefiltrowany sygnał zostaje wzmocniony na poziomie 200 V/V. Płytką została zmontowana ręcznie, z zastosowaniem odpowiedniego ekranowania by zabezpieczyć sygnał przed interferencją sygnałów zewnętrznych, oraz została wyposażona w złączki typu "krokodyl" w celu podłączenia elektrod żelowych (rysunek 25.3).

⁵sEMG - surface electromyography (ang. elektromiografia powierzchniowa) – technika pozwalająca na analizę sygnałów generowanych przez zmiany potencjałów nerwowych z mięśni przy wykorzystaniu elektrod przykładanych do odpowiednio przygotowanej skóry.



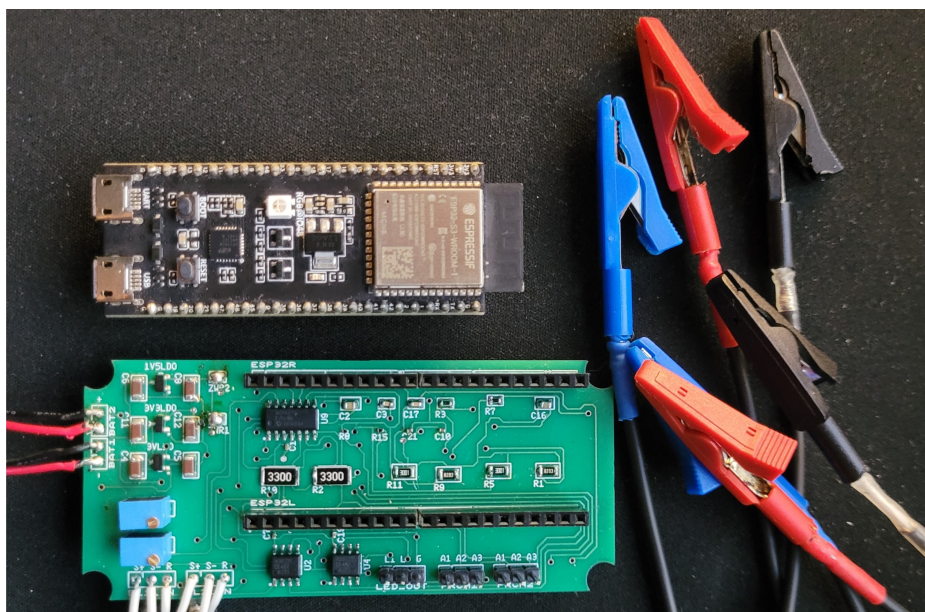
Rysunek 25.1. Projekt części akwizycji i obróbki sygnału, kanał 1 z 2 – grafika własna



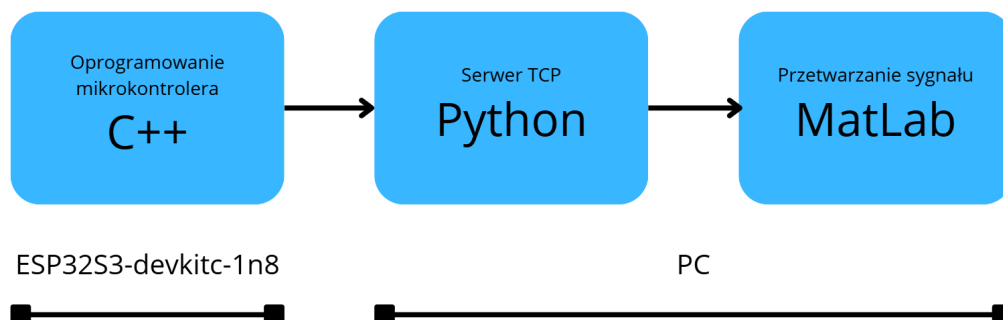
Rysunek 25.2. Projekt 3D płytki PCB – grafika własna

25.3.2. Część programowa

Struktura oprogramowania urządzenia została przedstawiona na rysunku 25.4. Program mikrokontrolera ma za zadanie formować 300-bajtowe paczki danych, które są następnie przesyłane do serwera TCP hostowanego przez komputer. Zadaniem serwera jest buforowanie danych w celu zachowania ich integralności w czasie, oraz przekazywanie danych do programu MatLab. W programie MatLab został stworzony graficzny interfejs użytkownika (GUI), pozwalający na odczyt i analizę pomiaru oraz sterowanie urządzeniem.



Rysunek 25.3. Gotowy układ razem z mikrokontrolerem



Rysunek 25.4. Schemat blokowy części programowej – grafika własna

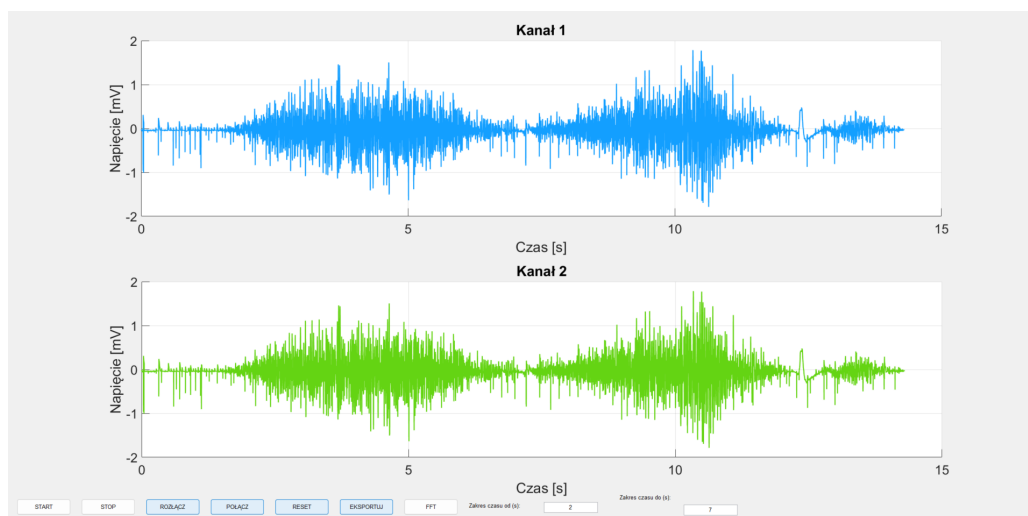
25.3.3. Program do analizy wyników

Zadaniem programu jest wyświetlanie danych w czasie rzeczywistym oraz przeprowadzanie analizy częstotliwościowej z wykorzystaniem FFT⁶. Przy pomocy przycisków można kontrolować połączenie z serwerem, sterować urządzeniem oraz zapisać dane do pliku .xlsx oraz ustawić parametry okna czasowego do analizy częstotliwościowej.

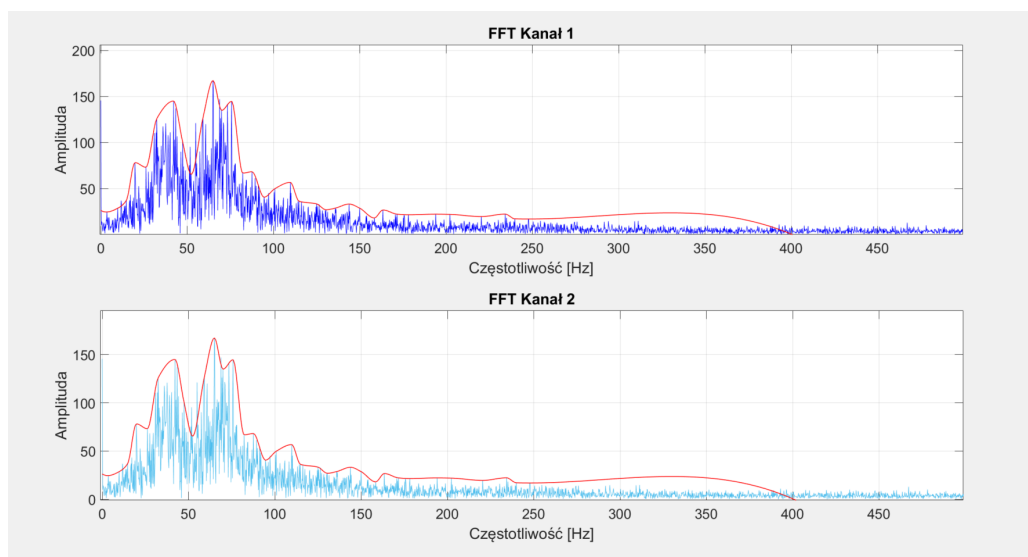
25.4. Wyniki

Przy pomocy zbudowanego urządzenia została stworzona charakterystyka stopnia aktywacji głowy długiej mięśnia dwugłowego, odpowiadającej za ruch przywodzący podczas

⁶FFT – Fast Fourier Transform (ang. szybka transformacja Fouriera) – algorytm wykonujący transformację Fouriera na podstawie określonego odcinka sygnału bez zbędnego obciążania jednostki obliczeniowej.



Rysunek 25.5. Główny interfejs programu – grafika własna

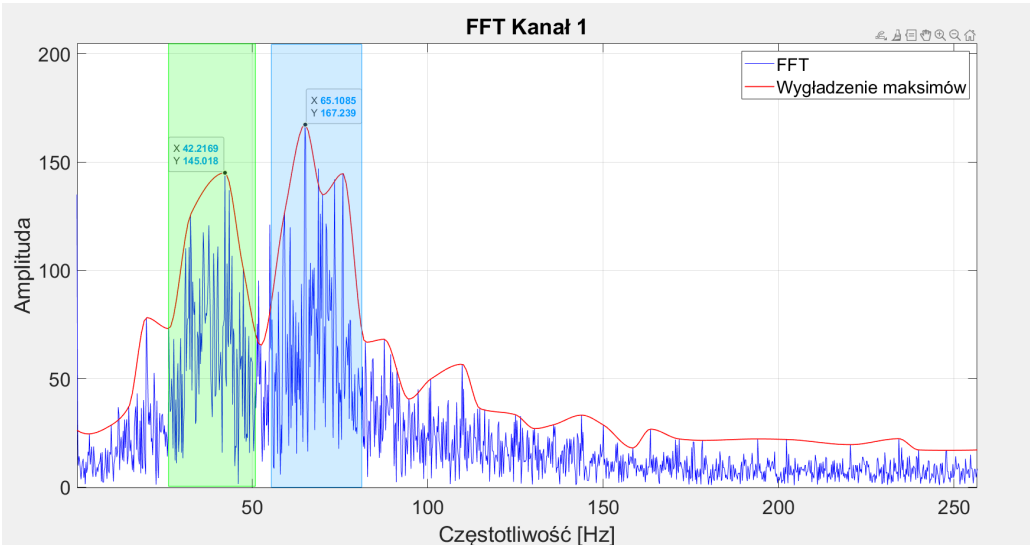


Rysunek 25.6. Interfejs programu w widoku FFT – grafika własna

podnoszenia obciążenia.

Na podstawie danych pomiarowych (przykładowy pomiar na rysunku 25.7) uzyskanych dla obciążeń w zakresie 1 kg - 15.5 kg⁷. Następnie na podstawie aproksymacji wielomianowej uzyskano charakterystykę stopnia aktywacji mięśnia od obciążenia (rysunek 25.8). Rozwiązując równanie funkcji dla wartości aktywacji wspomnianych w rozdziale 25.2.2. uzyskano wartości obciążenia odpowiednie dla badanego dla trzech rodzajów wysiłku (tabela 25.1).

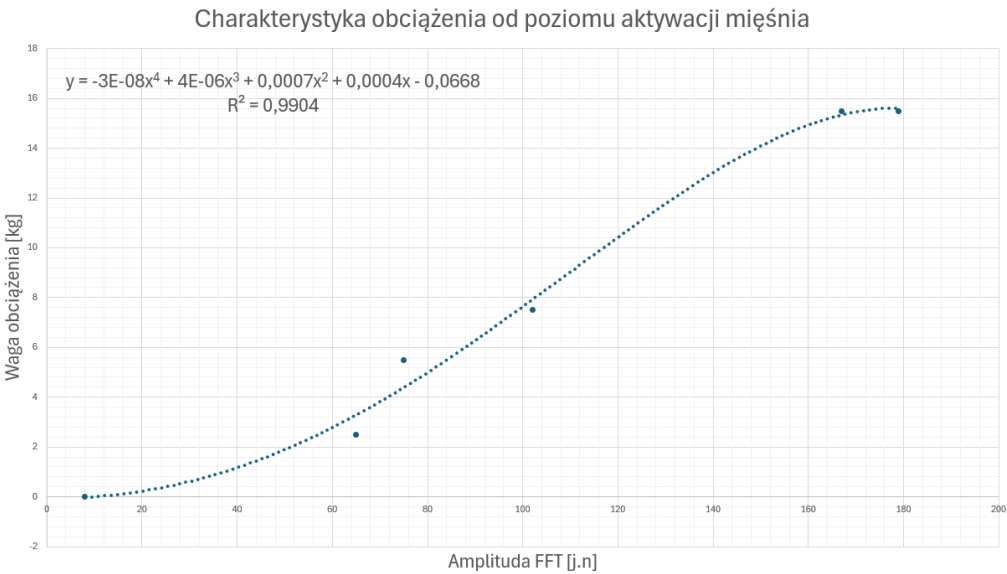
⁷Wartość górna przedziału została uzyskana eksperymentalnie podczas weryfikacji możliwości siłowych badanego i obserwacji maksymalnej amplitudy sygnału w trakcie ćwiczenia z zakresie 14-20 kg



Rysunek 25.7. Wyniki pomiaru sEMG – grafika własna

Tabela 25.1. Określenie założeń treningowych na podstawie badań

Rozwój	Obciążenie	Ilość powtórzeń
Siłowy	15.5 - 12.6 kg	1-5
Hipertroficzny	12.6 - 3.9 kg	6-12
Wytrzymałościowy	≤ 3.9 kg	≥ 15



Rysunek 25.8. Wyniki pomiarów sEMG z aproksymacją wielomianową – grafika własna

25.5. Wnioski

25.5.1. Wykaz kosztów

Jak wspomniano w rozdziale 25.2.3., obecnie dostępne na rynku rozwiązania charakteryzują się wysokimi kosztami. Opracowanie urządzenia w przystępnej cenie, które jednocześnie zachowuje wysoką jakość przetwarzania sygnału, umożliwiłoby szerokiej grupie odbiorców skuteczne wykorzystanie analizy sygnału sEMG w profilaktyce urazów treningowych.

Tabela 25.2. Wykaz kosztów komponentów wykorzystanych przy budowie urządzenia na dzień 30.12.2024 r.

Komponent	Il. Sztuk	Cena/szt.	Koszt
AD8221ARZ	2	26.40 PLN	52.80 PLN
MCP6074E/SL	1	11.77 PLN	11.77 PLN
ESP32S3-devkitc-1n8	1	75.37 PLN	75.37 PLN
Rezystory	10	~ 1 PLN	~ 10 PLN
Kondensatory	16	~ 1.5 PLN	~ 24 PLN
Przewód ekranowany (1m)	6	3.67 PLN	22.02 PLN
Zaciski	6	4.50 PLN	27 PLN
Szyny montażowe	2	1.5 PLN	3 PLN
Potencjometry	2	13,07 PLN	26.15 PLN
Stabilizatory Napięcia	3	~ 2 PLN	~ 6 PLN
Akumulatory	2	16.10 PLN	32.20 PLN
Godzina pracy studenta	10	0 PLN	0 PLN
Płytki PCB	1	20 PLN	20 PLN
Suma	-	-	310.31 PLN

Tabela 25.3. Porównanie kosztu wykonania urządzenia z ceną produktów dostępnych na rynku na dzień 30.12.2024 r.

Nazwa urządzenia	Cena/zestaw
MyonTec	28-35 tys. PLN
FreeEMG	ok. 50 tys. PLN
Układ sEMG	310.31 PLN

Koszt skonstruowania jednego urządzenia można zredukować, zastępując płytkę ESP32S3-devkitc-1n8 jednostką procesora z niezbędnymi peryferiami. Porównując koszt urządzenia (tabela 25.2) z produktami dostępnymi na rynku (tabela 25.3), można stwierdzić, że jest to tania alternatywa, pozwalająca na wykonanie pomiarów sEMG poza środowiskiem klinicznym, przy zachowaniu poprawnego odwzorowania sygnału.

25.5.2. Funkcjonalność

Skonstruowane urządzenie spełnia założenia projektowe i pozwala na wykonywanie pomiaru sEMG w celu wspomagania treningu sportowego. Sekcja programowa umożliwia przetwarzanie użytecznego zakresu częstotliwości. Interfejs działa poprawnie, pozwala na prowadzenie pomiarów na żywo oraz analizę częstotliwościową sygnału po wykonaniu

pomiaru. Urządzenie podczas pomiaru nie ogranicza ruchów, wymaga to jedynie zabezpieczenia przewodów do elektrod przyklejonych na ciele, np. wykorzystując przyklepic materiałowy bądź elastyczną opaskę materiałową.

25.5.3. Możliwości rozwoju

W trakcie testowania urządzenia oraz przeprowadzonych pomiarów zaobserwowano kilka problemów, które powinny zostać uwzględnione i rozwiązane w kolejnej iteracji projektu.

Rozmiar – zintegrowanie mikroprocesora oraz niezbędnych peryferiów z płytą pozwoliłyby na zmniejszenie urządzenia. Wykonanie projektu na elastycznej płycie PCB jeszcze bardziej ograniczyłoby rozmiar, z uwagi na usunięcie obudowy polimerowej.

Oprogramowanie – w obecnej wersji wymaga od użytkownika podstawowej wiedzy z zakresu analizy sygnałów, niezbędnej do prawidłowego przeprowadzenia pomiarów. Stworzenie aplikacji, która automatycznie wykonywałaby obliczenia pomiarowe, znacznie zwiększyłoby dostępność urządzenia dla użytkowników niemających specjalistycznego przeszkolenia w tym obszarze.

Bibliografia

- [1] USA National Institute of Health, *Sports injuries*, 2024. Dostępny online: <https://www.niams.nih.gov/health-topics/sports-injuries> (dostęp: 2 czerwca 2024).
- [2] Cheng A.J., Jude B., Lanner J.T., Intramuscular mechanisms of overtraining. *Redox Biology* 2020, 34, nr 101480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101480>.
- [3] Charnoff J., Ponnarasu S., Naqvi U., Tendinosis, 2024. Dostępny online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448174/> (dostęp: 2 czerwca 2024).
- [4] Martínez-Castill J.L., Prieto-González P., Epidemiology of sports-related injuries and associated risk factors in adolescent athletes: An injury surveillance. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021, 18(9). Dostępny online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8125505/>.
- [5] Schoenfeld B.J., Grgic J., Van Every D.W., Plotkin D.L., Loading recommendations for muscle strength, hypertrophy, and local endurance: A re-examination of the repetition continuum. *MDPI Sports* 2021, 22(9). Dostępny online: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/article/s/PMC7927075/>.
- [6] Lowery M.M., McManus L., De Vito G., Analysis and biophysics of surface EMG for physiotherapists and kinesiologists: Toward a common language with rehabilitation engineers. *Frontiers* 2020, 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.576729>.
- [7] Konrad P., *ABC EMG: Praktyczne wprowadzenie do elektromiografii kinezyjologicznej*. TECHNOMEX Spółka z o.o., 2007.
- [8] Urządzenia firmy FreeEMG. Dostępny online: <https://koordynacja.com.pl/sklep/aparatura-diagnostyczna/emg-sep-ncv/bezprzewodowe-emg-bts-freeemg-4ch/>.
- [9] Urządzenia firmy Trigno Wireless Foundation System. Dostępny online: <https://www.adinstruments.com/products/trigno-wireless-foundation-system>.
- [10] Urządzenia firmy MyonTec. Dostępny online: <https://newlevelsport.pl/kategoria-produktu/elektromiografia/>.

Projekt i realizacja urządzenia do wspomagania treningu wspinaczkowego z funkcją wykonywania testów siłowych

inż. Patrycja Wysowska

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Tomasz Grysiński

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Wspinaczka to dynamicznie rozwijająca się dyscyplina sportowa, łącząca w sobie siłę, precyzję i wytrzymałość. Jednym z kluczowych czynników wpływających na osiągane wyniki jest siła chwytu, w szczególności palców, decydująca o zdolności utrzymania się na niewielkich krawędziach i strukturach skalnych. W odpowiedzi na potrzebę jej obiektywnego monitorowania opracowano przenośne urządzenie wspomagające trening wspinaczkowy, które umożliwia wykonywanie testów siłowych i analizę postępów. Zastosowano w nim czujnik tensometryczny współpracujący z mikrokontrolerem ESP32, odpowiadającym za przetwarzanie i prezentację danych. Opracowane rozwiązanie pozwala na pomiar siły i wytrzymałości chwytu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, wspierając wspinaczy w treningu oraz procesach rehabilitacyjnych po urazach dłoni i palców.

26.1. Cel i założenia

Celem pracy było stworzenie przenośnego urządzenia wspomagającego trening wspinaczkowy przez możliwość pomiaru maksymalnej siły i wytrzymałości chwytu. Projekt obejmował zarówno opracowanie konstrukcji mechanicznej i elektronicznej, jak i przygotowanie oprogramowania odpowiedzialnego za obsługę pomiarów. Urządzenie miało być lekkie, proste w obsłudze i pozwalać wspinaczom na regularne monitorowanie postępów oraz bezpieczne zwiększanie obciążeń treningowych.

Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- możliwość pomiaru siły oraz wytrzymałości chwytu wspinaczkowego,
- implementacja trzech trybów pracy: pomiaru siły maksymalnej, testu wytrzymałości i trybu treningowego,
- zastosowanie belki tensometrycznej do precyzyjnego pomiaru obciążenia,

- wykorzystanie mikrokontrolera ESP32 jako jednostki sterującej,
- zapewnienie intuicyjnej obsługi dzięki ekranowi LCD i panelowi przycisków,
- opracowanie kompaktowej i mobilnej konstrukcji z wydajnym systemem zasilania,
- przeprowadzenie testów w celu weryfikacji działania oraz dokładności urządzenia.

26.2. Wstęp teoretyczny

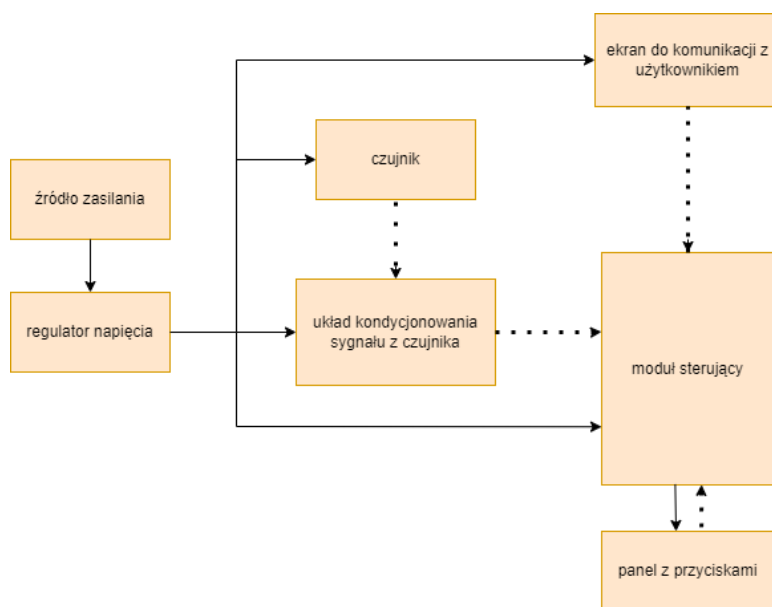
Rozwój wspinaczki sportowej sprawił, że coraz większą uwagę poświęca się analizie czynników wpływających na skuteczność treningu. Jednym z kluczowych parametrów decydujących o sprawności wspinacza jest siła chwytu, ściśle związana z pracą mięśni zginaczy palców oraz zdolnością do utrzymania ciała w wymagających pozycjach [1]. Wysoki poziom tej siły oraz odpowiednia wytrzymałość pozwalają na dłuższe utrzymanie chwytu, co przekłada się bezpośrednio na osiągane wyniki [2]. Jednocześnie nadmierne przeciążenia mogą prowadzić do urazów troczków, ścięgien i stawów, dlatego w treningu wspinaczkowym coraz częściej stosuje się metody umożliwiające kontrolę i obiektywną ocenę obciążeń [3, 4]. Zrozumienie mechaniki chwytu oraz właściwe monitorowanie parametrów siłowych stanowi podstawę do opracowywania bezpiecznych i efektywnych planów treningowych [5].

26.3. Projekt i wykonanie

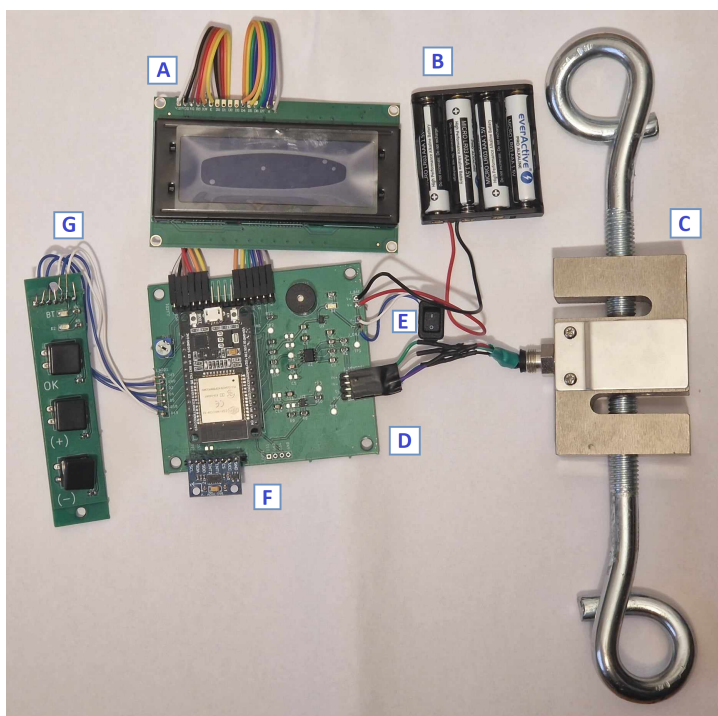
Projekt urządzenia obejmował opracowanie części mechanicznej, elektronicznej oraz oprogramowania mikrokontrolera. Ogólną koncepcję systemu przedstawiono na rysunku 26.1. Głównym elementem pomiarowym jest belka tensometryczna typu S, przetwarzająca przyłożone obciążenie na sygnał elektryczny proporcjonalny do wartości siły. Sygnał ten jest następnie wzmacniany przez wzmacniacz instrumentalny i przekazywany do przetwornika analogowo-cyfrowego wbudowanego w mikrokontroler ESP32. Jednostka ta odpowiada za akwizycję danych, ich przetwarzanie, wyznaczanie wartości siły oraz prezentację wyników na wyświetlaczu LCD.

W celu rozszerzenia funkcjonalności systemu zastosowano akcelerometr, umożliwiający odczyt położenia urządzenia w przestrzeni. Dane z czujnika pozwalają określić orientację przyrządu podczas pomiaru i wychwycić ewentualne przesunięcia wynikające z nieprawidłowego ustawienia. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie bardziej wiarygodnych i powtarzalnych wyników testów, szczególnie w warunkach terenowych.

Urządzenie zostało wyposażone w panel przycisków umożliwiający wybór trybu pracy oraz rozpoczęcie pomiaru. Zaprogramowano trzy tryby działania: pomiar siły maksymalnej, test wytrzymałościowy oraz tryb treningowy oparty na metodzie „7/53” opracowanej przez Erica Hörsta (trenera wspinaczki i autora publikacji dotyczących treningu siły chwytu)[6, 7]. Każdy z nich pozwala analizować różne aspekty pracy mięśni — od krótkotrwałego wysiłku siłowego po długotrwałe utrzymanie obciążenia. W trybie treningowym urządzenie steruje cyklem wysiłku i odpoczynku, emitując sygnały dźwiękowe informujące użytkownika o rozpoczęciu i zakończeniu poszczególnych faz. Takie rozwiązanie umożliwia realizację powtarzalnych sesji treningowych bez konieczności stałego monitorowania czasu.



Rysunek 26.1. Uproszczony schemat projektu urządzenia. Ciągłymi liniami zaznaczono połączenia zasilania, natomiast kropkowanymi linie sygnałowe.



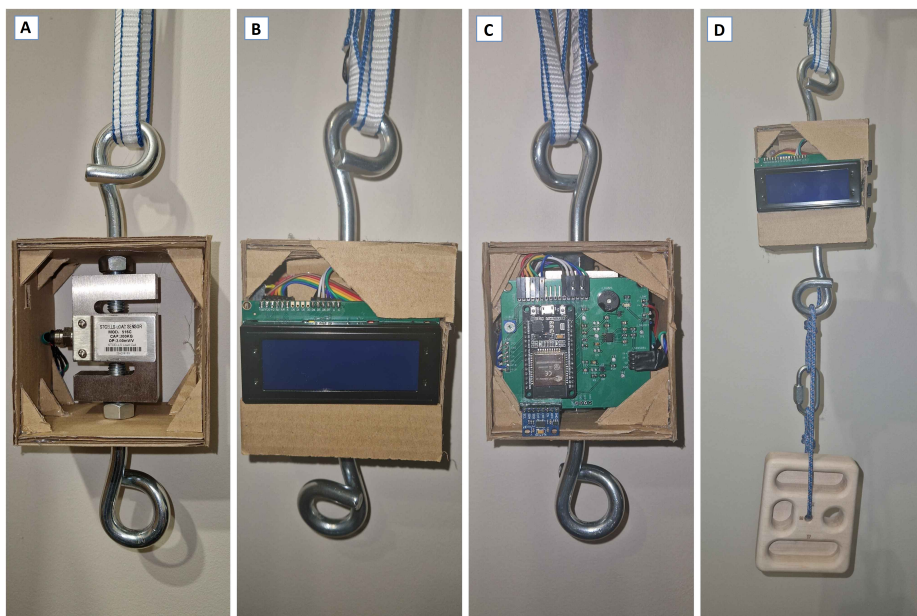
Rysunek 26.2. Prototyp urządzenia z oznaczonymi elementami: A) ekran LCD, B) koszyk na baterie, C) czujnik tensometryczny z wkręconymi hakami, D) główna płytki z modulem ESP32, E) włącznik, F) akcelerometr ADXL345, G) panel przycisków

Na rysunku 26.2 przedstawiono prototyp zmontowanego urządzenia z oznaczeniem jego podstawowych elementów. Układ zasilany jest z czterech baterii AAA przez stabilizator napięcia, co zapewnia mobilność i niezależność od zewnętrznych źródeł energii. Do komunikacji między modułami zastosowano przewody taśmowe, co ułatwia integrację poszczególnych elementów. Oprogramowanie mikrokontrolera przygotowano w środowisku Arduino IDE. Zaimplementowano w nim obsługę czujnika tensometrycznego i akcelerometru, przetwarzanie sygnałów pomiarowych, sterowanie ekranem LCD oraz interfejsem użytkownika. Wbudowany system sygnalizacji dźwiękowej i komunikatów na wyświetlaczu informuje o przebiegu testu oraz ewentualnych błędach, zapewniając płynną obsługę całego procesu pomiarowego.

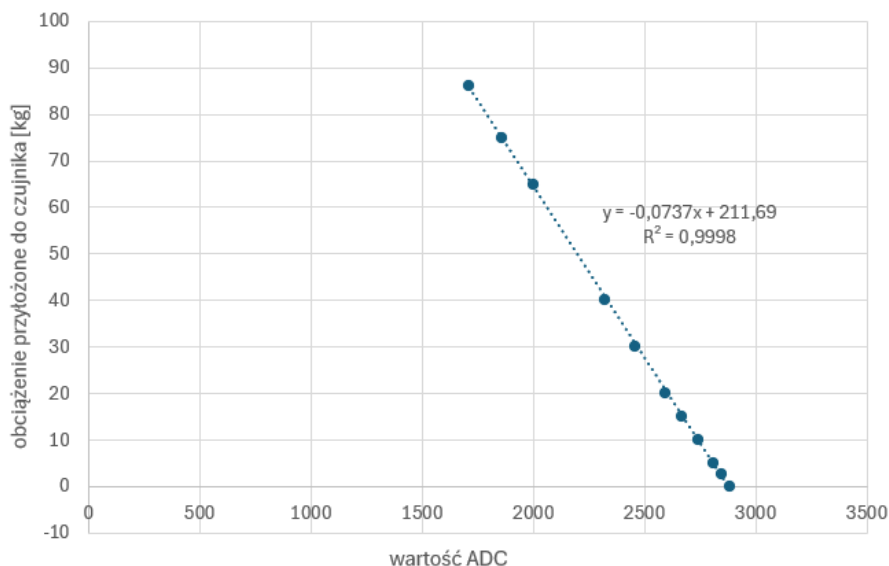
26.4. Uzyskane wyniki

W celu weryfikacji poprawności działania opracowanego urządzenia wykonano serię testów pomiarowych obejmujących proces kalibracji czujnika, pomiary dynamiczne oraz próby praktyczne z wykorzystaniem chwytotablicy. Widok gotowego urządzenia podczas testów przedstawiono na rysunku 26.3.

Pierwszym etapem badań była kalibracja belki tensometrycznej, wykonana jeszcze przed złożeniem całego urządzenia. W jej trakcie określono zależność między wartością napięcia na wyjściu przetwornika ADC, a rzeczywistym obciążeniem przyłożonym do czujnika. Uzyskana charakterystyka wykazała bardzo dobrą liniowość w pełnym zakresie pomiarowym, co przedstawiono na rysunku 26.4. Współczynnik determinacji $R^2 = 0,9998$ potwierdza wysoką dokładność i stabilność toru pomiarowego.

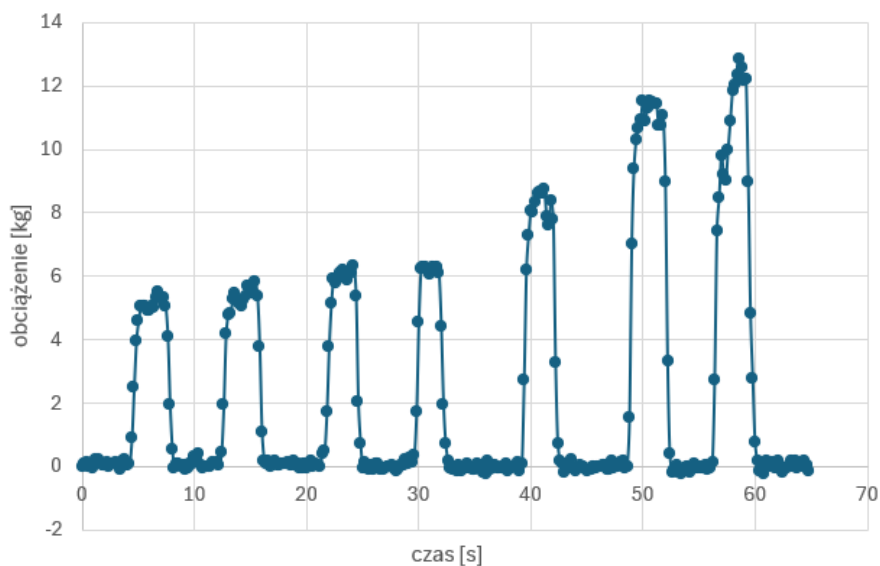


Rysunek 26.3. Widok gotowego urządzenia podczas testów: (A) czujnik tensometryczny, (B) wyświetlacz LCD, (C) płyta główna z mikrokontrolerem ESP32, (D) konfiguracja pomiarowa z chwytotablicą



Rysunek 26.4. Zależność obciążenia przykładanego do czujnika od uśrednionej wartości ADC

W dalszej części badań przeprowadzono testy cyklicznego obciążania czujnika, które miały na celu ocenę jego zachowania przy powtarzających się zmianach siły. Przykładowy przebieg zarejestrowany podczas serii pomiarów przedstawiono na rysunku 26.5. Widoczne piki odpowiadają kolejnym fazom obciążania i odciążania czujnika, a analiza wykresu potwierdza poprawną reakcję układu na zmieniające się wartości siły. Rejestrowane sygnały po zakończeniu cyklu wracają do poziomu zerowego, co świadczy o stabilnym działaniu toru pomiarowego oraz braku istotnego dryfu odczytów.



Rysunek 26.5. Zależność obciążenia od czasu podczas cyklicznego obciążania czujnika

Wykonano również dodatkowe testy funkcjonalne i porównawcze, obejmujące ocenę czasu reakcji układu, stabilności odczytów przy długotrwałym obciążeniu oraz wpływu położenia urządzenia na uzyskiwane wyniki. Uzyskane rezultaty potwierdziły prawidłową pracę wszystkich elementów systemu, wysoką powtarzalność działania oraz dokładność pomiarową na poziomie około $\pm 0,1$ kg, co świadczy o precyzyjnym i stabilnym działaniu toru pomiarowego.

Ostateczne testy przeprowadzone z wykorzystaniem chwytotablicy potwierdziły praktyczną funkcjonalność urządzenia. System poprawnie rejestrował wartości siły oraz czasu utrzymania chwytu, umożliwiając prowadzenie pomiarów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Uzyskane wyniki potwierdziły spełnienie założeń projektowych w zakresie dokładności, stabilności i ergonomii działania układu.

26.5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły, że opracowane urządzenie spełnia założenia projektowe i stanowi skuteczne narzędzie wspomagające trening wspinaczkowy. System umożliwia przeprowadzanie testów siłowych i wytrzymałościowych, a także realizację prostego trybu treningowego opartego na metodzie „7/53”. Zastosowana kompaktowa chwytotablica pozwala odwzorować warunki rzeczywiste, umożliwiając pomiar siły ciągnięcia przy różnych głębokościach chwytu. Wyniki pomiarów wyrażane w kilogramach pozwalają łatwo odnosić je do masy ciała użytkownika, co umożliwia analizę tzw. siły względnej, kluczowego parametru w treningu wspinaczkowym.

Przeprowadzone testy potwierdziły wysoką precyzję działania czujnika, którego odchylenie standardowe wyniosło około $\pm 0,1$ kg. Uzyskana dokładność jest w pełni wystarczająca do monitorowania postępów treningowych oraz oceny efektywności ćwiczeń.

W praktycznym użytkowaniu istotne jest zachowanie odpowiedniej pozycji urządzenia oraz jego prawidłowa kalibracja, co minimalizuje błędy pomiarowe i gwarantuje wiarygodność wyników. Zaimplementowany akcelerometr wspomaga kontrolę położenia, a system ostrzegania informuje o nieprawidłowej orientacji podczas testu.

Opracowane rozwiązanie stanowi solidną podstawę do dalszego rozwoju. Możliwe kierunki udoskonaleń obejmują zastosowanie precyzyjniejszego przetwornika ADC, optymalizację zużycia energii oraz integrację mikrokontrolera z płytką PCB w celu poprawy kompaktowości i niezawodności. W przyszłych wersjach projektu warto rozważyć również dodanie komunikacji bezprzewodowej i dedykowanej aplikacji mobilnej, umożliwiającej zapisywanie oraz analizę wyników w czasie rzeczywistym. Takie rozszerzenia pozwoliłyby zwiększyć funkcjonalność urządzenia i jego atrakcyjność wśród użytkowników trenujących wspinaczkę sportową.

Bibliografia

- [1] Saul D., Steinmetz G., Lehmann W., Schilling A.F., Determinants for success in climbing: A systematic review. *Journal of Exercise Science and Fitness* **2019**, 17(3), s. 91–100.
- [2] Baláš J., Pecha O., Martin A.J., Cochrane D., Hand-arm strength and endurance as predictors of climbing performance. *European Journal of Sport Science* **2012**, 12(1), s. 16–25.
- [3] Schöffl V., Popp D., Küpper T., Schöffl I., Injury trends in rock climbers: Evaluation of

a case series of 911 injuries between 2009 and 2012. *Wilderness & Environmental Medicine* **2015**, *26*(1), s. 62–67.

- [4] Schöffl I., Schöffl V.R., Injuries to the finger flexor pulley system in rock climbers: Current concepts. *Journal of Hand Surgery* **2006**, *31*(4), s. 647–654.
- [5] Saeterbakken A.H., Pedersen H., Stien N., et al., The connection between resistance training, climbing performance, and injury prevention. *Sports Medicine – Open* **2024**, *10*(1), s. 10.
- [6] Hörst E., Video: 7/53 hangboard training protocol for developing finger strength. Dostępny online: <https://trainingforclimbing.com/video-advanced-hangboard-training-protocol/> (dostęp: 15-10-2025).
- [7] Eric Hörst's "7/53" finger strength hangboard routine. Dostępny online: <https://strengthclimbing.com/eric-horst-7-53-hangboard-routine/> (dostęp: 15-10-2025).

Analiza numeryczna wpływu stosowania implantu w procesie leczenia palucha koślawego

inż. Małgorzata Majta

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Jakub Słowiński

Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej

Paluch koślawy to częste schorzenie, charakteryzujące się bocznym odchyleniem palucha, które często wymaga interwencji chirurgicznej z zastosowaniem implantów. W niniejszej pracy przygotowano cztery numeryczne modele stopy: stopy zdrowej, stopy z deformacją oraz dwa warianty stopy po korekcie przy użyciu śrub i płytki kostnej. Analizowano rozkład naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w powstałym układzie, oceniając wpływ zastosowanych implantów na leczenie. Dzięki analizie numerycznej przeprowadzonej w środowisku programu Ansys Workbench 2024 R2 określono skuteczność różnych implantów. Badano obciążenia typowe dla codziennych sytuacji, wskazując obszary narażone na powikłania. Wyniki potwierdziły dane literaturowe, a korekcja metodą Lapidus z płytką pozwoliła uzyskać najmniejsze naprężenia w tkance kostnej.

27.1. Cel i założenia

W pracy przeprowadzono numeryczną analizę biomechaniczną palucha koślawego i porównanie efektywności różnych technik jego korekcji. Opracowano cztery modele stopy: zdrowej, z deformacją oraz po dwóch typach operacji. Modele geometryczne wykonano przy użyciu modelera Ansys SpaceClaim 2024 R2, a analizy numeryczne metodą elementów skończonych przeprowadzone zostały w środowisku Ansys Workbench 2024 R2. Badano obciążenia w trzech sytuacjach: stanie na jednej i dwóch nogach oraz wstawianie z pozycji siedzącej. Omówiono wyniki naprężeń, przemieszczeń i odkształceń oraz powikłania pooperacyjne. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- opracowanie czterech modeli geometrycznych stopy wraz z warunkami brzegowymi,
- dyskretyzacja i implementacja odpowiednich ograniczeń modeli, odzwierciedlających rzeczywiste warunki mechaniczne stopy,
- przeprowadzenie analizy numerycznej w celu oceny rozkładu naprężeń zredukowanych, przemieszczeń oraz odkształceń, a także porównanie wyników i ocena skuteczności zastosowanych metod korekcji.

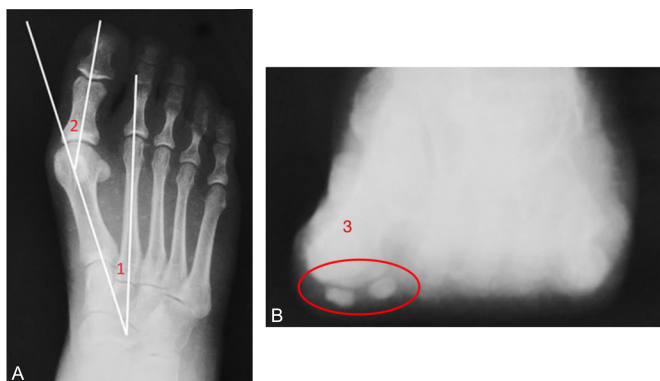
27.2. Wstęp teoretyczny

Stopa jest skomplikowaną strukturą anatomiczną, pełniącą kluczową rolę w podparciu całego ciała człowieka i jego lokomocji. Składa się z 26 kości podzielonych na trzy grupy: kości stępu, śródstopia i paliczków. Kości stępu obejmują siedem elementów, takich jak kość piętowa, skokowa czy łódkowata. Śródstopie tworzy pięć ponumerowanych kości, a paliczki, w układzie po 3, budują palce, przy czym paluch zbudowany jest z tylko 2 paliczków. Ruchomość w stopie zapewniają 33 stawy, w tym istotny staw Lisfranca łączący śródstopie ze stępem. Stabilność stopy zapewnia 107 więzadeł oraz liczne mięśnie, ścięgna i tkanki miękkie. Dzięki swojej budowie stopa dynamicznie adaptuje się do obciążeń i warunków ruchowych [1].

Deformacja prowadząca do koślawości palucha rozpoczyna się od bocznego odchylenia i pronacji palucha oraz przyśrodkowego przesunięcia pierwszej kości śródstopia, co powoduje podwichnięcie stawu śródstopno-paliczkowego. Występujące równoległe wady jak płaskostopie lub palec młotkowaty, przyspieszają rozwój schorzenia, a uszkodzenia więzadeł i trzeczeczek są pierwszymi objawami [2].

27.2.1. Ocena radiologiczna

Ocenę stanu stopy i stopnia zaawansowania deformacji wykonuje się przez obrazowanie rentgenowskie w warunkach pełnego obciążenia. Umożliwia to klasyfikację rozbudowania deformacji na podstawie parametrów kątowych. Na rysunku 27.1 przedstawiono obraz, na którym zaznaczono najbardziej użyteczne z kątów: HVA, czyli kąt palucha koślawego oraz IMA (kąt międzysródstopny). Klasyfikacji dokonuje się według podziału widocznego w tabeli 27.1.



Rysunek 27.1. A: Tradycyjne miejsce wyznaczenia odpowiednich parametrów kątowych w widoku przednio-tylnym: 1-IMA, 2-HVA, w stopie prawej. B: Widok osiowy kości trzeczczkowych (3), ukazujący ich prawidłowe anatomiczne położenie [2].

27.2.2. Rodzaje procedur leczniczych

Leczenie palucha koślawego obejmuje metody nieoperacyjne i operacyjne, zależnie od stopnia deformacji [3]. Zabiegi operacyjne, skuteczniejsze w zaawansowanych przypad-

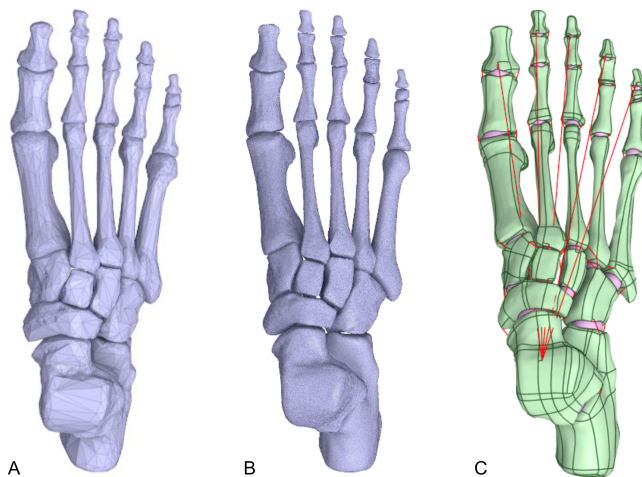
Tabela 27.1. Tradycyjna klasyfikacja radiograficzna deformacji palucha koślawego (w zależności od stopnia nasilenia) [2].

Dotkliwość zniekształcenia palucha koślawego	Kąt HVA	Kąt IMA	Leczenie
Normalna	$<15^\circ$	$<9^\circ$	Brak
Łagodna	$<20^\circ$	$9^\circ - 11^\circ$	Osteotomia dystalna oraz zabiegi tkanek miękkich
Umiarkowana	$20^\circ - 40^\circ$	$11^\circ - 16^\circ$	Osteotomia proksymalna oraz zabiegi tkanek miękkich
Ciężka	$>40^\circ$	$>16^\circ$	Osteotomia proksymalna lub artrodeza stępowo-śródstopna

kach, obejmują osteotomię Akin (usunięcie klina kostnego), osteotomię szalikową (trzy nacięcia osteotomiczne) oraz technikę Lapidus (zespolecie pierwszego stawu stępowo-śródstopnego) [4].

27.3. Projekt i wykonanie

Modele geometryczne elementów kostnych zostały opracowane przy wykorzystaniu zasobów bazy Anatomography [5]. Zaimportowano wybrane struktury w ułożeniu anatomicznym.



Rysunek 27.2. Etapy tworzenia modelu stopy prawidłowej. A: surowy model stopy prawidłowej bez edycji, B: model stopy prawidłowej po edycji siatki, C: model stopy prawidłowej ze strukturami (kości - kolor zielony, połączenia stawowe - kolor różowy, więzadła - kolor czerwony)

27.3.1. Opracowanie modelu stopy prawidłowej

Model kości stopy zaimportowany do środowiska SpaceClaim jako plik STL - rysunek 27.2A, wymagał przebudowania siatki oraz usunięcia artefaktów - rysunek 27.2B.

W dalszych krokach opracowano model objętościowy elementów kostnych oraz dodano połączenia stawowe oraz więzadła - rysunek 27.2C.

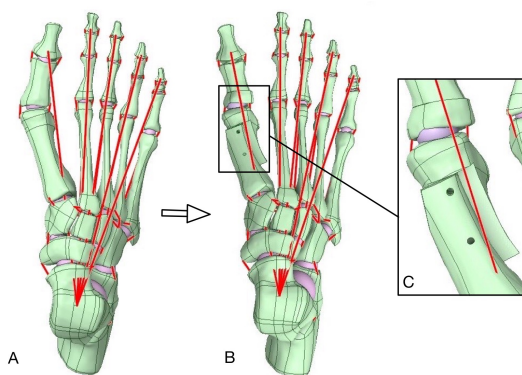
27.3.2. Opracowanie modelu stopy z paluchem koślawym

Model stopy patologicznej opracowano wykrzywiając pierwszy promień stopy. Zrealizowano to za pomocą przemieszczeń oraz rotacji elementów modelu stopy prawidłowej, czego efekt widoczny jest na rysunku 1.3A.

27.3.3. Opracowanie modelu stopy po korekcji palucha koślawego — fuzja osteotomii Akin oraz osteotomii szalikowej

W modelu zastosowano osteotomię szalikową dla umiarkowanego palucha koślawego. Procedura obejmowała trzy cięcia osteotomiczne (0,5 mm) i boczne przesunięcie części podszwowej pierwszej kości śródstopia. Usunięto boczny fragment grzbietowy i wykonano dwa otwory pod śruby (2 mm, 13 mm), w odpowiednich odległościach od stawów TMT (staw stępowo-śródstopny) i MTP (staw śródstopno-palczkowy).

Stabilizację zapewniono dwiema śrubami, których działanie zastąpiono warunkami kontaktowymi. W roli elementu stabilizującego odcłamy kostne użyto modelu zszywki, która wykazuje lepsze parametry niż inne metody stabilizacji po osteotomii Akin [6]. Model stopy po obu osteotomiach przedstawiono na rysunku 27.3.

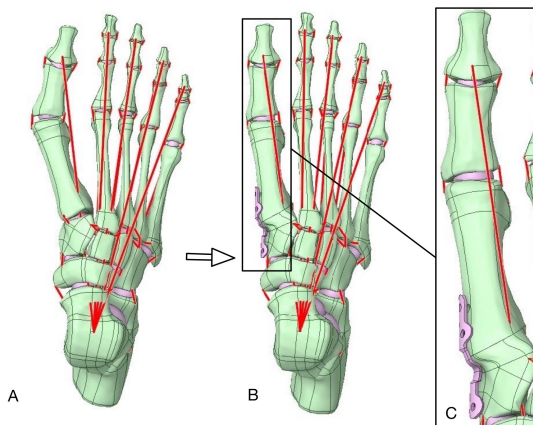


Rysunek 27.3. A: Model stopy z paluchem koślawym. B: Model stopy po korekcji palucha koślawego osteotomią szalikową uzupełnioną osteotomią Akin. C: Obszar stopy objęty osteotomią szalikową oraz Akin.

27.3.4. Opracowanie modelu stopy po korekcji palucha koślawego — zmodyfikowany zabieg Lapidus (z płytką)

W modelu usunięto pierwszy staw TMT zgodnie z techniką zabiegu i ręcznie skorygowano położenie pozostałych elementów. Dzięki symulacji nastawiania pierwszego promienia nie było potrzeby cięcia w rejonie stawu MTP. Szczelinę kostną zastąpiono przeszczepem kostnym oraz zaprojektowano płytkę dopasowaną do indywidualnej geometrii modelu, wzorując się na płytce Lapidus No Step (Medline Unite Foot and Aakle) [7]. W modelu

umieszczono pięć otworów na śruby mocujące, a do symulacji ich działania użyto kontaktów typu *Joint - Fixed*. Końcowy model stopy po korekcy przedstawiono na rysunku 27.4.



Rysunek 27.4. A: Model stopy z paluchem koślawym. B: Model stopy po korekcy palucha koślawego zmodyfikowanym zabiegiem Lapidus z zastosowaniem płytki. C: Obszar stopy objęty zabiegiem Lapidus.

27.3.5. Warunki brzegowe

Na podstawie przeglądu literaturowego, zebrano najczęściej powtarzające się wartości modułu Younga i współczynnika Poissona dla więzadeł i tkanki kostnej [8], tkanki chrzęstnej [9] oraz użytego stopu tytanu Ti6Al4V [10](płytki w zabiegu Lapidus), które zebrano w tabeli 27.2.

Tabela 27.2. Wybrane wartości parametrów poszczególnych struktur, niezbędne do analizy elementów skończonych.

	Tkanka kostna	Więzadła	Tkanka chrzęstna	Stop tytanu Ti6Al4V
E [MPa]	7300	260	10	110 000
ν [-]	0,3	0,4	0,4	0,35

W analizie numerycznej uwzględniono podane wartości, pomijając rozgraniczenie tkanki kostnej na korową i gąbczastą. Model dyskretny składał się z ponad 700 tysięcy elementów, z podstawową wielkością 2,5 mm, zagęszczoną do 0,7 mm w obszarach stawów i 0,2 mm w miejscach krytycznych. Połączenia kontaktowe między elementami kostnymi i stawowymi zdefiniowano jako kontakt związany. Połączenie kontaktowe płytki wykorzystanej w zabiegu Lapidus z elementami kostnymi zdefiniowano jako kontakt tarcowy.

Na podstawie danych udostępnionych przez National Center for Health Statistics [11], określono obciążenie dla stania obunóż dla osoby po 20 r.ż. - 407,5 N. Natomiast dla osoby o tej samej masie podczas stania na jednej nodze na płaskim podłożu, wartość obciążenia wyniosła 827,4 N. Ostatni analizowany przypadek, to siły działające na stopę podczas wstawania z pozycji siedzącej na obie nogi, co wyniosło około 150% masy ciała. Oznacza to, że wartości siły dla tego przypadku to około 1200 N [12].

Mocowanie modelu polegało na ograniczeniu wyselekcjonowanych węzłów w odpowiednich obszarach stopy. W rejonie podeszwowym kości piętowej część węzłów została całkowicie zablokowana. Natomiast w obszarze paliczków i kości śródstopia umożliwiono translacyjne ruchy modelu (w osi X) do maksymalnie 2 mm względem nieruchomego podłoża.

27.4. Uzyskane wyniki

W analizie uwzględniono całkowite i kierunkowe przemieszczenia w osi Z, pomijając X i Y z powodu narzuconych ograniczeń ruchu.

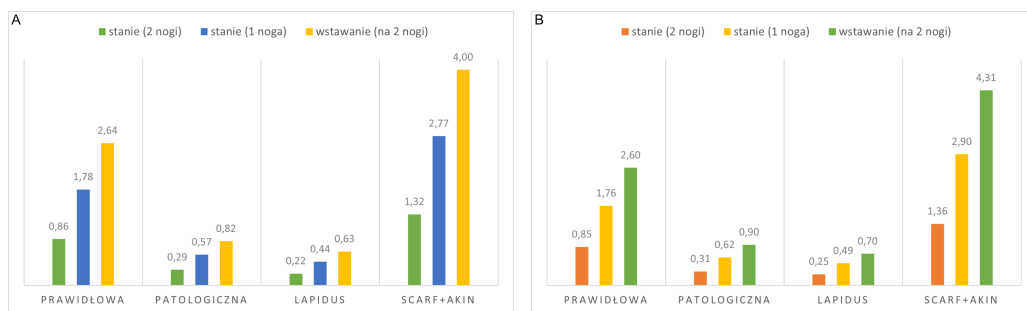
Największe przemieszczenia występują w rejonie kości stępu, mniejsze w śródstopiu, a najmniejsze w pięcie, co wynika z podparcia i nacisku ciała. Śródstopie i paliczki przesuwają się nieco do przodu. Model nie uwzględnia tkanek miękkich, wpływających na te wartości. Analiza w osi z pokazuje nieznaczne uniesienie tylnej części pięty i obniżenie kości stępu, zwłaszcza po stronie przyśrodkowej.

Analizując przemieszczenia kierunkowe w osi pionowej, dodatkowo zaobserwowano nieznaczne uniesienie się tylnej części kości piętowej ku górze. Pozostałe kości zmieniają swoje położenie na niższe, co jest szczególnie widoczne w przypadku części przyśrodkowej kości stępu.

We wszystkich modelach rozkład skrajnych przemieszczeń całkowitych jest analogiczny. Zakresy wartości osiąganych przez modele przedstawia wykres na rysunku 27.5A.

Przemieszczenia w każdym modelu rosną proporcjonalnie do siły. Wzrost wynosi około 0,9 mm dla stopy prawidłowej, 0,3 mm dla patologicznej, 0,22 mm po zmodyfikowanym zabiegu Lapidus i 1,3 mm po fuzji osteotomii szalikowej i Akin. Najmniejsze przemieszczenia występują po zabiegu Lapidus z powodu unieruchomienia stawu TMT, a największe po osteotomiach ze względu na większą ingerencję w stabilność stopy. Stopa patologiczna wykazuje mniejsze przemieszczenia niż prawidłowa, co wynika z osłabienia łuków i większej powierzchni styku z podłożem.

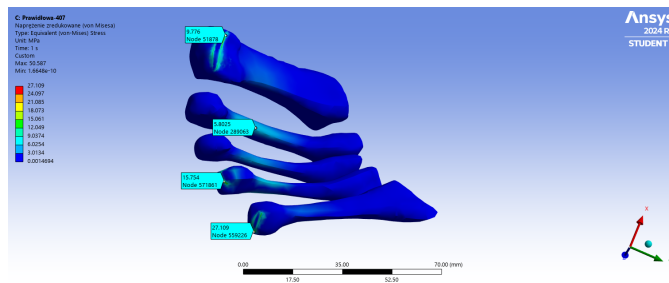
Całkowity zakres przemieszczeń kierunkowych w osi z przedstawia wykres na rysunku 27.5B. Tendencja tych przemieszczeń kierunkowych jest zgodna z przemieszczeniami całkowitymi.



Rysunek 27.5. Zakres przemieszczeń [mm]: A - całkowitych dla wszystkich analizowanych modeli w trzech przypadkach obciążenia, B - kierunkowych w osi Z dla wszystkich modeli i przypadków obciążenia

Granica plastyczności kości wynosi około 115 MPa [13]. Żadne z otrzymanych wyników naprężeń zredukowanych według hipotezy Hubera-von Misesa nie spowoduje zniszczenia kości, lecz możliwe jest wskazanie rejonów najbardziej narażonych na złamania lub innego rodzaju zniszczenia.

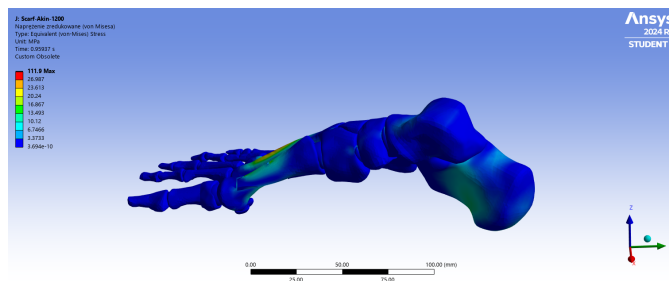
W stopie prawidłowej maksymalne naprężenia (ponad 50 MPa) wystąpiły w obszarze mocowania modelu. Pominęto koncentracje naprężeń w pięcie (przez wprowadzone ograniczenia modelu) i stawach (naturalne ze względu na przenoszenie obciążeń z kości), koncentrując analizę na kościach śródstopia. Największe przeciążenia dotyczą głów kości śródstopia, szczególnie podstawy trzyczek i trzonów drugiego promienia. Obszar poddany dokładnej analizie obejmował wszystkie kości śródstopia, tak jak jest to widoczne na rysunku 27.6.



Rysunek 27.6. Rozkład naprężeń zredukowanych w kościach śródstopia modelu stopy prawidłowej, obciążenie 1200 N.

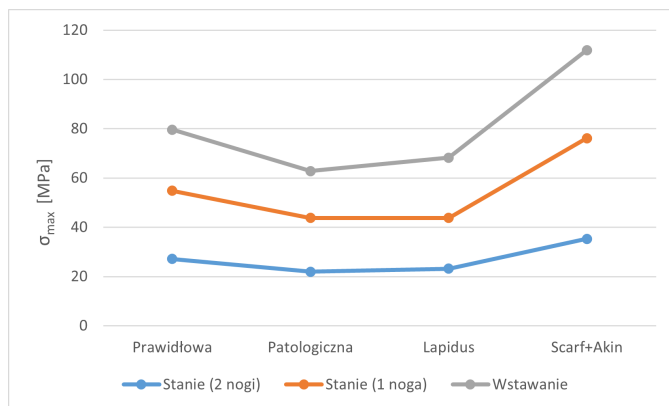
W modelu stopy przed korektą naprężenia koncentrują się na głowie pierwszej kości śródstopia (przez wykrzywienie tego promienia w deformacji palucha koślawego). Po korekcie metodą Lapidus maksymalne naprężenia (68,2 MPa) dotyczą głowy piątej kości śródstopia. Jest to wartość o około 10 MPa mniejsza niż w stopie zdrowej. Po fuzji osteotomii szalikowej i Akin naprężenia osiągają 111 MPa, z koncentracją wokół otworów pod śruby i w trzonach drugiej i trzeciej kości śródstopia. Jest to największa uzyskana wartość naprężenia zredukowanego we wszystkich wynikach, lecz nie przekracza doraźnej wytrzymałości na ściskanie/rozciąganie kości [13].

W przypadku naprężeń zredukowanych w modelu stopy po korekcie osteotomią szalikową i Akin widzimy tendencję do zwiększania się naprężeń w rejonie przewężenia kości piętowej (rysunek 27.7), co jest także obserwowane w modelu stopy prawidłowej.



Rysunek 27.7. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelu stopy po korekcie fuzją osteotomii szalikowej i Akin, obciążenie 1200 N

Zmiany wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych według hipotezy Hubera-von Misesa w rejonie kości śródstopia przedstawia wykres na rysunku 27.8.



Rysunek 27.8. Maksymalne naprężenia zredukowane we wszystkich modelach dla trzech przypadków obciążenia

We wszystkich modelach wartości odkształceń w rejonie śródstopia są znikome i wynoszą poniżej 5%. W największym obciążeniu wartości osiągają maksymalnie około 0,1%, a w mniejszych obciążeniach nawet 0,01%. Wartości te zlokalizowane są w rejonie głów kości śródstopia. Największe odkształcenia w ujęciu globalnym modeli obserwowane są na stawach, zwłaszcza stawie skokowym dolnym. Jest to sytuacja naturalna ze względu na specyfikę pracy połączeń stawowych.

27.5. Podsumowanie

Podczas analizy numerycznej struktur anatomicznych, takich jak stopa, kluczowe jest uwzględnienie uproszczeń modelu. W pracy skonstruowano modele geometryczne stopy, obejmujące kości, stawy i więzadła, pomijając jednak skórę i tkanki miękkie. Te uproszczenia wpływają na dokładność symulacji, lecz wyniki pozostają użyteczne dla oceny naprężeń i sił w stopie.

Charakter rozkładu naprężeń zredukowanych w analizie numerycznej jest zbliżony do danych literaturowych [14–16]. Wysokie naprężenia występują w rejonie głów i trzonów kości śródstopia oraz wokół trzeszczek. Kliniczne obserwacje wskazują na koncentrację ciśnienia podszewowego pod drugą i trzecią kością śródstopia oraz pod palcami, co potwierdzają uzyskane wyniki.

Badania wykazały, że osteotomia szalikowa i Akin zwiększają naprężenia w obszarze głów kości śródstopia, co może prowadzić do osłabienia struktur i złamań. Pomimo większej ruchomości stopy i szybszej rekonwalescencji, metoda ta zwiększa ryzyko nawrotu deformacji. Z kolei zabieg Lapidus, choć wymaga dłuższej rekonwalescencji, charakteryzuje się lepszą biomechaniką i mniejszymi wartościami naprężeń, co czyni go bardziej stabilnym rozwiązaniem [2].

Podczas analizy naprężeń według hipotezy Hubera-von Misesa odnotowano wzrost naprężeń w rejonie przewężenia kości piętowej po osteotomii szalikowej i Akin. Może to

prowadzić do typowych złamań w tym rejonie, zwłaszcza przy urazach mechanicznych [17, 18]. W przypadku zabiegu Lapidus nie zaobserwowano podobnych naprężeń, co zmniejsza ryzyko złamań w obrębie kości piętowej i skokowej.

Przeanalizowano wyniki otrzymane dla modelu stopy zdrowej, z paluchem koślawym, po zabiegu Lapidus oraz po fuzji osteotomii szalikowej i Akin. Stwierdzono przewagę w leczeniu palucha koślawego metodą Lapidus z uwzględnieniem płytki do mocowania odłamów kostnych. Przesłanki, które przyczyniły się do tej oceny to m.in. mniejsza koncentracja naprężeń zredukowanych w obrębie głów kości śródstopia oraz mniejsze wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych. Istnieje wiele metod chirurgicznej korekcy palucha koślawego, z których każdą należy analizować pod kątem korzyści i ryzyka powikłań.

Bibliografia

- [1] Ficke J., Byerly D.W., *Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb: Foot*, wydanie pierwsze.; StatPearls Publishing LLC, Stany Zjednoczone, 2023.
- [2] Ray J., Friedmann A., Hanselman E., et al., Hallux Valgus. *Foot & Ankle Orthopaedics* **2019**, 4, s. 1–9.
- [3] Fraissler L., Konradsc C., Hoberg M., Rudert M., Treatment of hallux valgus deformity. *Open Reviews* **2016**, 1.
- [4] Acker A., Zainudin T.N.T., Schauer E., Peurière L., Reymond N., Drittenbass L., Dubois-Ferrière V., Assal M., Significant Early Loss of Correction in Modified Lapidus Compared to Original Lapidus for Hallux Valgus. *Foot Ankle Orthop.* **2023**, 8.
- [5] BodyParts3D/Anatomography. Dostępny online: <https://lifesciencedb.jp/bp3d/> (dostęp: 31-08-2024).
- [6] Montiel V., Suárez Á., Riera L., Akin osteotomy: Is the type of staple fixation relevant? *International Orthopaedics (SICOT)* **2020**, 44, s. 1435–1439.
- [7] Lapidus Plates. Dostępny inline: <https://medlineunite.com/product/lapidus-plates/> (dostęp: 20-11-2024).
- [8] Akrami M., Qian Z., Zou Z., Li Q., Subject-specific finite element modelling of the human foot complex during walking: sensitivity analysis of material properties, boundary and loading conditions. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* **2018**, 17, s. 559–576.
- [9] Guo J., Wang L., Mao R., Chang C., Wen J., Fan Y., Biomechanical Evaluation of the First Ray in Pre-/Post-Operative Hallux Valgus: a Comparative Study. *Clinical Biomechanics* **2018**.
- [10] Grade 5 Ti-6Al-4V Alloy (UNS R56200). Dostępny online: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9299> (dostęp: 01-11-2024).
- [11] Body Measurements. Dostępny online: <https://www.cdc.gov/nchs/fastats/body-measurements.htm> (dostęp: 23-10-2024).
- [12] Loading of Orthopaedic Implants. Dostępny online: <https://orthoload.com/> (dostęp: 01-12-2024).
- [13] Morgan E.F., Unnikrisnan G.U., Hussein A.I., Bone Mechanical Properties in Healthy and Diseased States. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* **2018**, 20, s. 119–143.
- [14] Wong D.W-Ch., Wang Y., Zhang M., Kam-Lun Leung A., Functional restoration and risk of non-union of the first metatarsocuneiform arthrodesis for hallux valgus: a finite element approach. *Journal of Biomechanics* **2015**, 48, s. 3142–3148.
- [15] Ozen M., Sayman O., Havitcioglu H., Modeling and stress analyses of a normal foot-ankle and a prosthetic foot-ankle complex. *Acta Bioeng Biomech* **2013**, 15, s. 19–27.

- [16] Bogucz M., Chojnacka-Brożek A., Modelowanie numeryczne kości stopy po operacji palucha kosławego. *Aktualne Problemy Biomechaniki* **2015**, 9, s. 7–12.
- [17] Wong D.W-Ch., Niu W., Wang Y., Zhang M., Finite Element Analysis of Foot and Ankle Impact Injury: Risk Evaluation of Calcaneus and Talus Fracture. *PLoS One* **2016**, 11
- [18] Nie B., Giudice J.S., Poulard D., Wu T., Panzer M.B., Evaluation and injury investigation of a finite element foot and ankle model for small female occupants. *International Journal of Crashworthiness* **2018**, 24, s. 580–591.

Implementacja dynamicznej transformaty czasowej do oceny podobieństwa biosygnalów u pacjentów po krwotoku podpajęczynówkowym

inż. Radosław Pławecki

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Agnieszka Uryga

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Krwotok podpajęczynówkowy może prowadzić do dysfunkcji autonomicznego układu nerwowego oraz zaburzeń autoregulacji mózgowej, co ma istotne znaczenie w kontekście monitorowania stanu klinicznego pacjenta. Celem niniejszej pracy była implementacja algorytmu dynamicznej transformaty czasowej (DTW) w celu oceny stopnia dopasowania między metrykami opisującymi aktywność autonomicznego układu nerwowego i autoregulacji mózgowej. Do analizy wykorzystano sygnały ciśnienia tętniczego krwi i regionalnego utlenowania zarejestrowane u pacjentów po przebytym krwotoku podpajęczynówkowym. Na ich podstawie, przy użyciu oprogramowania ICM+ oraz języka Python, wyznaczono odpowiednie metryki. Analiza z wykorzystaniem DTW prowadzona była w blokach czasowych odpowiadających kolejnym etapom leczenia, zarówno w ujęciu globalnym, jak i z zastosowaniem ruchomego okna. Wyniki porównano z danymi klinicznymi pacjentów. Zaobserwowano, że większa desynchronizacja między badanymi metrykami może wiązać się z gorszymi rokowaniami. Przeprowadzone badanie wskazuje na potencjał zastosowania DTW jako narzędzia wspierającego ocenę stanu neurologicznego pacjentów po krwotoku podpajęczynówkowym.

28.1. Cel i założenia

Celem pracy była implementacja algorytmu dynamicznej transformaty czasowej (ang. *dynamic time warping*, DTW) do oceny podobieństwa biosygnalów, charakteryzujących autonomiczny układ nerwowy oraz autoregulację mózgową u pacjentów po krwotoku podpajęczynówkowym przy zastosowaniu języka programowania Python. Praca obejmowała:

- opracowanie literaturowe dotyczące:
 - biosygnalów¹ oraz wyznaczonych na ich podstawie parametrów, opisujących

¹**Biosygnaly** – sygnały fizjologiczne emitowane przez organizmy żywe, które można ciągle mierzyć i monitorować.

- autonomiczny układ nerwowy (czułość baroreceptorów tętniczych oraz zmienność rytmu zatokowego w dziedzinie czasu i częstotliwości),
- biosygnarów oraz wyznaczonych na ich podstawie parametrów, opisujących autoregulację mózgową (wskaźnik utlenowania tkanek),
- algorytmu dynamicznej transformaty czasowej (ang. *dynamic time warping*, DTW) z uwzględnieniem takich pojęć jak koszt obliczeniowy algorytmu, macierz lokalnych odległości, odległość euklidesowa, funkcja odległości);
- wstępne opracowanie (ang. *pre-processing*) wysokoczęstotliwościowych biosygnarów przy pomocy oprogramowania Intensive Care Monitor (ICM+),
- wyznaczenie parametrów autonomicznego układu nerwowego oraz autoregulacji mózgowej w programie ICM+,
- zaimplementowanie przy zastosowaniu języka programowania Python algorytmu dynamicznej transformaty czasowej (ang. *dynamic time warping*, DTW) z uwzględnieniem długości sygnału (analiza w ruchomym oknie),
- obliczenie wartości DTW dla parametrów autonomicznego układu nerwowego i autoregulacji mózgowej, wyznaczonych z biosygnarów pochodzących od pacjentów po krwotoku podopieczynówkowym oraz ocena podobieństwa odpowiednich szeregów czasowych utworzonych z wyznaczonych parametrów,
- analiza statystyczna uzyskanych wyników z uwzględnieniem danych klinicznych pacjentów po krwotoku podopieczynówkowym.

28.2. Wprowadzenie

Autonomiczny układ nerwowy (AUN) odpowiada za utrzymanie homeostazy organizmu przez regulację czynności serca, mięśni gładkich oraz gruczołów [1]. Działa on niezależnie od woli, w przeciwieństwie do układu somatycznego, a jego uszkodzenie, obejmujące struktury takie jak podwzgórze czy rdzeń kręgowy, prowadzi do, zwykle nieodwracalnych, zaburzeń autoregulacji. Jednym z najważniejszych mechanizmów utrzymania stabilności układu krążenia jest barorefleks, oparty na działaniu baroreceptorów zlokalizowanych w łuku aorty i zatokach szyjnych. Receptory te reagują na rozciąganie ścian tętnic, przesyłając impulsy do rdzenia przedłużonego, gdzie sygnały są przetwarzane i przekazywane do narządów efektorowych [2]. Wzrost ciśnienia tętniczego prowadzi do aktywacji baroreceptorów, które przez hamowanie ośrodka naczynioruchowego wywołują rozszerzenie naczyń i spadek ciśnienia krwi, natomiast spadek ciśnienia inicjuje reakcję odwrotną. W ten sposób barorefleks stanowi pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego, utrzymującą stabilne ciśnienie tętnicze.

Skuteczność działania tego mechanizmu opisuje się przez czułość barorefleksu (BRS), definiowaną jako stosunek zmiany odstępów R–R do zmiany skurczowego ciśnienia krwi [3]. Pomiar BRS wymaga jednoczesnej rejestracji sygnału EKG i ABP. W analizie często stosowana jest metoda $xBRS$, wykorzystująca wzajemną korelację między sygnałami ABP i BBI w ruchomych oknach czasowych [4]. Umożliwia ona ocenę dynamicznych zmian w reaktywności baroreceptorów oraz wpływu układu współczulnego na regulację ciśnienia. Z kolei zmienność rytmu zatokowego (HRV) odzwierciedla fluktuacje odstępów R–R w zapisie EKG i stanowi nieinwazyjny wskaźnik aktywności autonomicznego układu ner-

wowego [5]. Wysokie wartości HRV świadczą o prawidłowej równowadze między częścią współczulną a przywspółczulną, natomiast obniżenie HRV może wskazywać na zaburzenia tej równowagi. Analiza HRV może być prowadzona w dziedzinie czasu, np. z wykorzystaniem wskaźnika RMSSD, lub w dziedzinie częstotliwości, gdzie stosunek mocy pasm niskich (LF) do wysokich (HF) określa przewagę aktywności współczulnej bądź przywspółczulnej.

Podobny mechanizm regulacyjny występuje w krążeniu mózgowym. Autoregulacja przepływu krwi mózgowej utrzymuje stałe ukrwienie mózgu mimo zmian ciśnienia perfuzji mózgowej [6]. Zależność między przepływem krwi mózgowej (CBF) a średnim ciśnieniem tętniczym (MAP) opisuje krzywa Lassena, która wyróżnia zakres autoregulacji oraz obszary hipo- i hiperperfuzji. Utrata zdolności autoregulacyjnych, na przykład po krwotoku podpajęczynówkowym (SAH), prowadzi do niestabilności przepływu i zwiększonego ryzyka niedotlenienia tkanki mózgowej. Do oceny tego zjawiska stosowany jest wskaźnik utlenowania tkanek (TOXA), obliczany jako współczynnik korelacji między średnimi wartościami rSO_2 i ABP, który pozwala ocenić skuteczność mechanizmów kompensacyjnych w czasie rzeczywistym.

Zaburzenia autoregulacji mózgowej są kluczowe w patogenezie udarów mózgu, będących skutkiem nieprawidłowego przepływu krwi w obrębie mózgowia. Udar może mieć charakter niedokrwienny lub krwotoczny, a jego konsekwencje stanowią jedną z najpoważniejszych przyczyn zgonów i niepełnosprawności na świecie. W Polsce zapadalność wynosi około 150 przypadków na 100 tys. osób rocznie [7]. Szczególną formą udaru krwotocznego jest krwotok podpajęczynówkowy z pękniętego tętniaka (aSAH), który najczęściej występuje w obrębie koła Willisa [8]. Częstość jego występowania sięga 10 przypadków na 100 tys. osób, a śmiertelność może dochodzić do 50%. W przebiegu aSAH wyróżnia się trzy fazy: ostrą, charakteryzującą się gwałtownym wzrostem ciśnienia wewnątrzczaszkowego i spadkiem przepływu mózgowego; podostrą, w której dominują procesy zapalne i działanie toksycznych produktów degradacji krwi; oraz przewlekłą, obejmującą regenerację tkanki z udziałem astrocytów i aktywację procesów naprawczych [9]. Zrozumienie zależności między autoregulacją mózgową, funkcją barorefleksu oraz parametrami hemodynamicznymi stanowi podstawę dla interpretacji zmian fizjologicznych u pacjentów po krwotoku podpajęczynówkowym i oceny skuteczności mechanizmów kompensacyjnych układu nerwowego.

28.3. Projekt i wykonanie

28.3.1. Grupa badawcza

Analizie poddano dane pacjentów hospitalizowanych w Oddziale Anestezjologii i Intensywnej Terapii Szpitala Uniwersyteckiego we Wrocławiu w latach 2014–2017. Dostęp do nich uzyskano dzięki współpracy z Uniwersyteckim Szpitalem Klinicznym we Wrocławiu przy wsparciu pani dr n. med. Małgorzaty Burzyńskiej.

Dane były w pełni zanonimizowane i pochodziły z rejestru prospektywnego, a analiza miała charakter w pełni retrospektywny. Uzyskano zgodę Lokalnej Komisji Etycznej (KB-620/2020, KB-133/2023), zgodnie z Deklaracją Helsińską. Do badania włączono pacjentów ≥ 18 r.ż z potwierdzonym krwotokiem podpajęczynówkowym z pękniętego tętniaka

(aSAH) w tomografii komputerowej. Wykluczono osoby z wcześniejszą diagnozą kardiomiopatii, niewydolności serca, chorób wieńcowych lub ośrodkowego układu nerwowego.

28.3.2. Akwizycja danych

Sygnały ciśnienia tętniczego (ABP) i regionalnego wysycenia tlenem (rSO_2) rejestrowano prospektywnie i analizowano retrospektywnie. Ciśnienie tętnicze mierzono inwazyjnie z tętnicy promieniowej lub udowej przy użyciu przetwornika Argon Standalone DTX Plus, a wartości rSO_2 – symetrycznie z obu półkul czołowych przy użyciu oksymetru Foresight Elite (CASMED, USA) opartego na spektroskopii w bliskiej podczerwieni (NIRS).

28.3.3. Przetwarzanie danych w ICM+

Analizę parametrów autoregulacji mózgowej i autonomicznego układu nerwowego przeprowadzono w oprogramowaniu ICM+ (Cambridge Enterprise Ltd, UK). Po zaimportowaniu sygnałów ABP i rSO_2 przeprowadzono ich weryfikację wizualną, usunięcie artefaktów (globalnych i lokalnych) oraz skalowanie zakresu czasowego. Następnie utworzono profil obliczeniowy, umożliwiający wyznaczenie kluczowych metryk:

- autonomiczny układ nerwowy: czułość baroreceptorów (BRS), składnik wysokoczęstotliwościowy zmienności rytmu serca (HRV_HF) oraz stosunek LF/HF, wyznaczone z sygnału ABP przy użyciu funkcji `BaroIndex` i `HRVpsd`.
- autoregulacja mózgowa: wskaźnik TOXA, obliczony jako ruchomy współczynnik korelacji między rSO_2 a ABP (funkcja `Correl`, okno analizy 300 s, aktualizacja co 10 s).

Dodatkowo wyznaczono wartości średnie ABP, rSO_2 oraz tętna (HR) za pomocą funkcji `Mean` i `FundFrq`.

28.3.4. Wstępne przetwarzanie sygnałów

Wstępne przetwarzanie przeprowadzono w języku Python przy użyciu autorskiej klasy `PreprocessData`. Obejmowało ono:

- weryfikację poprawności pliku i obecności wymaganych kolumn,
- usuwanie wartości odstających metodą rozstępu międzykwartylowego (IQR, próg 3.0),
- interpolację liniową przerw w sygnale (max. 5 minut przerwy),
- normalizację danych (metoda logiki uogólnionej (GL)).

Normalizacja GL oparta została na dopasowaniu funkcji logistycznej do dystrybucji empirycznej (ECDF), co umożliwia przeskalowanie danych do przedziału (0, 1) i zapewnia odporność na wartości odstające.

28.3.5. Analiza podobieństwa – algorytm DTW

Do porównania metryk zastosowano algorytm dynamicznej transformaty czasowej (DTW). Umożliwia on dopasowanie dwóch szeregów czasowych o różnej długości i zmieniającym tempie zmian przez minimalizację całkowitego kosztu dopasowania.

Algorytm został zaimplementowany w języku Python jako klasa DTW. Buduje on macierz kosztów $D_{i,j}$ zgodnie z równaniem:

$$D_{i,j} = |x_i - y_j| + \min(D_{i-1,j-1}, D_{i-1,j}, D_{i,j-1}), \quad (28.1)$$

a następnie wyznacza optymalną ścieżkę dopasowania (**traceback**) o minimalnym koszcie. Złożoność obliczeniowa algorytmu wynosi $O(n \cdot m)$, gdzie n i m oznaczają długości analizowanych szeregów czasowych.

28.4. Uzyskane wyniki

28.4.1. Dostępność danych

Przeprowadzono analizę dostępności metryk, aby wybrać pliki i sygnały nadające się do dalszej analizy. Procentową dostępność sygnałów η obliczono jako stosunek liczby dostępnych próbek do całkowitej długości sygnału. Za próg przyjęto 50% – pliki lub metryki o niższej dostępności nie zostały uwzględnione w dalszych etapach. W wyniku selekcji odrzucono metryki BRS i HRV_LFHF, a także część plików z niską dostępnością sygnału TOXA lub większości metryk.

28.4.2. Wstępne przetwarzanie

Dane przetworzono przy użyciu klasy `PreprocessData`, a następnie ustandaryzowano do długości 60 godzin (21600 próbek), co zapewniło jednolite warunki analizy.

28.4.3. Sposoby analizy

Sygnały podzielono na trzy bloki czasowe odpowiadające fazie ostrej (24 h), podostrej (24 h) i przewlekłej (12 h). Przeprowadzono:

- analizę blokową – obliczanie kosztu dopasowania DTW dla całego bloku.
- analizę z okienkowaniem – analiza w ruchomym 6-godzinym oknie z 1-godzinnym nakładaniem; następnie uśrednianie kosztu dopasowania dla bloku.

Koszt dopasowania porównano z danymi klinicznymi dotyczącymi przeżycia pacjentów, stosując testy Shapiro-Wilka, ANOVA lub Friedmana oraz testy t-Studenta i U Manna-Whitneya w zależności od rozkładu danych.

28.4.4. Analiza blokowa i z okienkowaniem

W analizie blokowej dla par HR-TOXA oraz HRV_HF-TOXA uzyskano istotność statystyczną między kosztem dopasowania a danymi klinicznymi dla jednej z zastosowanych metod wyznaczania kosztu dopasowania. Natomiast w analizie z okienkowaniem istotne statystycznie wyniki uzyskano jedynie dla pary HRV_HF-TOXA.

28.4.5. Porównanie sposobów analizy

Uśrednione koszty dopasowania dla bloków porównano między analizą blokową a analizą z okienkowaniem. Testy statystyczne wykazały, że metoda wyznaczenia kosztu dopasowania istotnie wpływała na otrzymany koszt dopasowania.

28.5. Podsumowanie

Zrealizowano cel pracy, jakim było zaimplementowanie algorytmu dynamicznej transformaty czasowej (ang. *dynamic time warping*, DTW) do oceny podobieństwa biosygnalów, charakteryzujących autonomiczny układ nerwowy oraz autoregulację mózgową u pacjentów po krwotoku podpajeczynówkowym przy zastosowaniu języka programowania Python.

28.5.1. Charakterystyka metryk

Aby poprawnie porównać sygnały za pomocą algorytmu DTW, konieczna jest ich normalizacja. Przy braku jej zastosowania, np. przy porównaniu funkcji liniowej i przesuniętego wielomianu czwartego stopnia, algorytm może błędnie uznać sygnały za identyczne, dopasowując dominujący sygnał do siebie.

Przed analizą dokonano wstępnego przetwarzania danych: usunięto artefakty i wartości odstające, a powstałe przerwy w sygnale wypełniono interpolacją liniową. Zauważono, że metryki AUN i autoregulacji mózgowej różnią się znacznie skalą wartości, co bez normalizacji prowadziłoby do niemal idealnego, lecz fałszywego dopasowania.

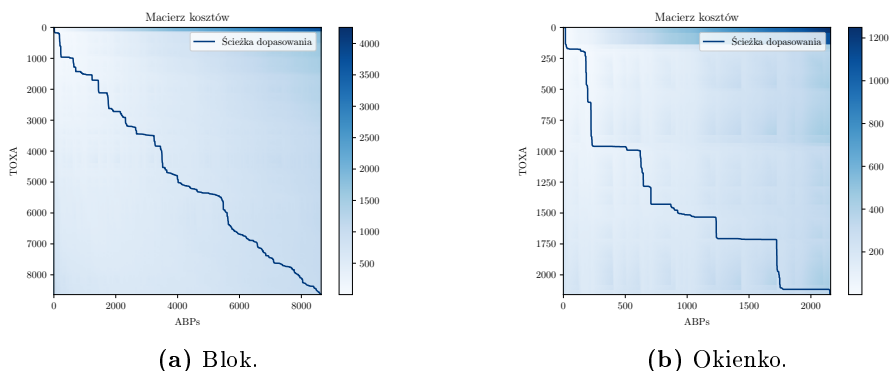
W pracy zastosowano algorytm normalizacji GL, który przekształca dane z zakresu $(-\infty, \infty)$ do $(0, 1)$, uwzględniając rzeczywisty rozkład danych. Jest bardziej odporny na wartości odstające niż metody min-max czy z-score, które zakładają regularne rozkłady. Algorytm GL może jednak napotkać problemy optymalizacyjne przy wyznaczaniu wartości znormalizowanych.

Normalizacja umożliwiła sprowadzenie wszystkich metryk do wspólnego zakresu, pozostawiając do analizy jedynie różnice w kształcie sygnałów, co pozwoliło na prawidłowe zastosowanie DTW.

28.5.2. Porównanie sposobów analizy

Zaproponowano dwa podejścia do analizy danych. W pierwszym etapie metryki podzielono na trzy bloki odpowiadające fazom: ostrą (24 godziny), podostrą (24 godziny) i przewlekłą (12 godzin).

W analizie blokowej obliczano koszt dopasowania dla całego bloku. W analizie z okienkowaniem każdy blok dzielono na 6-godzinne okienka z nakładaniem 1-godzinnym; dla każdego okienka wyznaczano koszt dopasowania, a następnie obliczano średnią dla wszystkich okienek w bloku.



Rysunek 28.1. Porównanie macierzy kosztów dla bloku i okienka.

Wyniki uzyskane metodą odległościową i metodą kosztu nie różniły się w zależności od wybranego sposobu analizy, co było spodziewane po normalizacji do zakresu $[0, 1]$. Istotną różnicę statystyczną stwierdzono jednak w metodzie czasowo-odległościowej dla wszystkich analizowanych metryk. Wynika to z faktu, że w analizie blokowej dostępnych jest więcej próbek, co zwiększa rozmiar macierzy, długość ścieżki dopasowania oraz wartość dopasowania, zgodnie z równaniem DTW (28.1).

Metoda czasowo-odległościowa normalizowana jest przez długość ścieżki, która zmienia się w zależności od sposobu analizy i dopasowania sygnałów. Dlatego jest najbardziej wrażliwa na dynamiczne zmiany między sygnałami, co stanowi potencjalny kierunek dalszych badań nad zastosowaniem DTW.

28.5.3. Koszt dopasowania a dane kliniczne

Następstwami krwotoku podpajęczynówkowego są degradacja hemoglobiny, stan zapalny oraz neurodegeneracja, które prowadzą do uszkodzenia autonomicznego układu nerwowego. To z kolei istotnie wpływa na jego parametry. Istnieje udokumentowany związek między tymi zjawiskami a parametrami autoregulacji, przy czym kierunkowość tej zależności wymaga dalszych badań [10] [11].

Niektóre prace wskazują, że u pacjentów z aSAH oraz rozwojem skurczu naczyń mózgowych, odwrotna korelacja między BRS a autoregulacją mózgową zanika [12]. Upośledzenie zarówno BRS, jak i autoregulacji mózgowej może znacząco wpłynąć na wynik kliniczny pacjentów, co podkreśla wagę monitorowania obu parametrów w leczeniu i prognozowaniu po aSAH. Sugeruje to również, że dla innych parametrów autonomicznego układu nerwowego, podobnie jak dla BRS, w porównaniu z parametrami autoregulacji mózgowej, może nastąpić analogiczny zanik odwrotnej korelacji, a zatem istnieje między nimi związek.

Zaproponowano zastosowanie metody DTW do zestawiania metryk autonomicznego układu nerwowego oraz autoregulacji mózgowej, indywidualnie dla danego pacjenta. Wyniki sugerują potencjalną zależność między kosztem dopasowania a przeżywalnością pacjentów. We wszystkich przypadkach, w których zaobserwowano istotność statystyczną między dopasowaniem a danymi klinicznymi, odnotowano wyższy koszt dopasowania. Oznacza to, że potencjalna desynchronizacja między sygnałami może stanowić negatywny

prognostyk przeżywalności po krwotoku podpajęczynówkowym. Może to również sugerować, że u pacjentów, którzy przeżyli, po krwotoku organizm dąży do dopasowania metryk autonomicznego układu nerwowego i autoregulacji mózgowej.

Tabela 28.1. Podsumowanie wyników analizy statystycznej dla analizy blokowej

Metoda	Istotność statystyczna między kosztem dopasowania poniższych metryk a danymi klinicznymi		
	ABPs i TOXA	HR i TOXA	HRV_HF i TOXA
Metoda odległościowa	Brak istotności statystycznej	Brak istotności statystycznej	Brak istotności statystycznej
Metoda czasowo-odległościowa	Brak istotności statystycznej	Tak, dla bloku I. ($p = 0.015$)	Brak istotności statystycznej
Metoda kosztu	Brak istotności statystycznej	Brak istotności statystycznej	Tak, dla średniej z bloków ($p = 0.0081$)

Tabela 28.2. Podsumowanie wyników analizy statystycznej dla analizy z okienkowaniem

Metoda	Istotność statystyczna między kosztem dopasowania poniższych metryk a danymi klinicznymi		
	ABPs i TOXA	HR i TOXA	HRV_HF i TOXA
Metoda odległościowa	Brak istotności statystycznej	Brak istotności statystycznej	Tak, dla średniej z bloków ($p = 0.046$)
Metoda czasowo-odległościowa	Brak istotności statystycznej	Brak istotności statystycznej	Tak, dla średniej z bloków ($p = 0.046$)
Metoda kosztu	Brak istotności statystycznej	Brak istotności statystycznej	Brak istotności statystycznej

Bibliografia

- [1] McCorry L. K. Physiology of the autonomic nervous system. *American Journal of Pharmaceutical Education* **2007**, 71(4), 78.
- [2] Kougias P., Weakley S. M., Yao Q., Lin P. H., Chen C. Arterial baroreceptors in the management of systemic hypertension. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research* **2010**, 16(1), RA1–RA8.
- [3] Lázaro J., Gil E., Orini M., Laguna P., Bailón R. Baroreflex Sensitivity Measured by Pulse Photoplethysmography. *Frontiers in Neuroscience* **2019**, 13, 339.
- [4] Wessel N., Gapelyuk A., Weiß J., Schmidt M., Kraemer J. F., Berg K., Malberg H., Stepan H., Kurths J. *Instantaneous Cardiac Baroreflex Sensitivity: α BRS Method Quantifies Heart Rate Blood Pressure Variability Ratio at Rest and During Slow Breathing*. *Frontiers in Neuroscience* **2020**, 14, 547433.
- [5] Shaffer F., Ginsberg J. P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health* **2017**, 5, 258.
- [6] Lidington D., Wan H., Bolz S. S. *Cerebral autoregulation in subarachnoid hemorrhage*. *Frontiers in Neurology* **2021**, 12, 688362.
- [7] Antecki J., Brelak E., Sobolewski P., Kozera G. Profilaktyka pierwotna i wtórna udaru niedokrwinnego mózgu w świetle obecnych zaleceń i rekomendacji. *Forum Medycyny Rodzinnej* **2018**, 12(3), 89–98.
- [8] Uryga A., Burzyńska M., Kasprzowicz M., Woźniak J. Monitorowanie utlenowania mózgu za pomocą spektroskopii w bliskiej podczerwieni u chorych po krwotoku podpajęczynówkowym z pękniętym tętniakiem. *Polski Przegląd Neurologiczny* **2018**, 14(1), 22–27.

- [9] Coulibaly A. P., Provencio J. J. Aneurysmal subarachnoid hemorrhage: An overview of inflammation-induced cellular changes. *Neurotherapeutics* **2020**, 17(1), 436–445.
- [10] Willie C. K., Tzeng Y.-C., Fisher J. A., Ainslie P. N. Integrative regulation of human brain blood flow. *The Journal of Physiology* **2014**, 592(5), 841–859.
- [11] Mankoo A., Roy S., Davies A., Panerai R. B., Robinson T. G., Brassard P., Beishon L. C., Minhas J. S. The role of the autonomic nervous system in cerebral blood flow regulation in stroke: A review. *Review Volume* **2023**, 246, 103082.
- [12] Uryga A., Nasr N., Kasproicz M., Budohoski K., Sykora M., Smielewski P., Burzyńska M., Czosnyka M. Relationship between baroreflex and cerebral autoregulation in patients with cerebral vasospasm after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Frontiers in Neurology* **2022**, 12, 2397.

Ocena biochemiczna i biofizyczna procesu starzenia i eryptozy krwinek czerwonych w trakcie przechowywania

mgr inż. Weronika Torończak

Inżynieria Biomedyczna, Informatyka Medyczna

dr inż. Tomasz Walski

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Zrozumienie przemian strukturalnych i funkcjonalnych zachodzących w krwinkach ma kluczowe znaczenie dla oceny jakości koncentratów krwinek czerwonych i efektywności transfuzji. Badania przeprowadzone w ramach pracy dyplomowej miały interdyscyplinarny charakter, łącząc elementy biofizyki, biochemii, hematologii i zaawansowanej techniki laboratoryjnej. Wykorzystując nowoczesne metody pomiarowe, znacznie poszerzono tradycyjną diagnostykę, opartą dotąd głównie na morfologii i podstawowej biochemii. Zastosowano kompleksowy zestaw metod do oceny stanu RBC, ze szczególnym uwzględnieniem analizy reologicznej. Kształt i odkształcalność erytrocytów monitorowano przy użyciu ektacytomietru-sytlektometru LORRCA. Ponadto, w celu uzyskania pełnej informacji o stanie komórek, zastosowano techniki biochemiczne oraz jonometrię. Pomiarów te dostarczyły danych o metabolizmie komórkowym i ewentualnych zaburzeniach gospodarki jonowej, stanowiących istotne markery funkcjonalności i wskaźniki eryptozy. Zebrane dane poddano wielowymiarowej i kompleksowej interpretacji, wykorzystując zaawansowane narzędzia statystyczne i informatyczne. To podejście umożliwiło nie tylko rejestrację zmian RBC w czasie, ale także identyfikację zależności o potencjalnym znaczeniu klinicznym i diagnostycznym.

29.1. Cel i założenia

Skuteczna transfuzja krwi zależy od jakości jednostek przechowywanych w bankach krwi. W pracy przeanalizowano zmiany biochemiczne, biofizyczne i reologiczne zachodzące w czerwonych krwinkach (RBC) w trakcie ich przechowywania *in vitro*. Zrealizowane badania rzucają nowe światło na proces starzenia erytrocytów. Wykazano, że zmiany sztywności i odkształcalności błony komórkowej mogą mieć kluczowe znaczenie dla zdolności krwinek do transportowania tlenu. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- przeprowadzenie doświadczeń in vitro na koncentratkach krwinek czerwonych z zastosowaniem wybranych technik biochemicznych i biofizycznych,
- określenie znaczenia badań reologicznych w monitorowaniu procesów starzenia erytrocytów,
- kompleksowa analiza wyników z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi analizy statystycznej, metod chemometrycznych oraz modeli uczenia maszynowego,
- interpretacja otrzymanych wyników i wskazanie kluczowych czynników wpływających na proces starzenia się i eryptozę krwinek czerwonych.

29.2. Wstęp teoretyczny

Zgodnie z definicją National Institutes of Health (NIH) erytrocyty są rodzajem komórek krwi pozbawionych jądra, które nazywa się również krwinkami czerwonymi lub oznacza jako RBC (ang. red blood cell) [1]. Ich produkcja następuje w szpiku kostnym, a cykl życia u ssaków trwa od 2 do 5 miesięcy. Brak jąder oraz innych organelli wewnątrzkomórkowych w erytrocytach u ssaków, umożliwia osiąganie niewielkich rozmiarów. Istotny komponent każdego erytrocytu stanowi hemoglobina (Hb), która umożliwia transport tlenu po całym organizmie. Zarówno erytrocyty jak i hemoglobina są określane jako kluczowe składniki krwioobiegu.

29.2.1. Starzenie erytrocytów

Proces starzenia się erytrocytów jest naturalnym zjawiskiem zachodzącym zarówno w krążeniu organizmu, jak i podczas przechowywania krwi w warunkach laboratoryjnych. Wśród ludzi, erytrocyty mają przeciętną długość życia około 120 dni. Jest to parametr specyficzny dla danego gatunku. Wskazuje się jednak zależność, że wraz ze wzrostem szybkości metabolizmu i mniejszych rozmiarów krwinek ich czas przeżycia ulega skróceniu [2]. Proces starzenia polega na stopniowym zachodzeniu zmian biochemicznych i fizjologicznych, które prowadzą do eliminacji erytrocytów z krwioobiegu. Starzejące się krwinki czerwone tracą elastyczność, ich błona komórkowa ulega sztywnieniu, a także dochodzi do utraty asymetrii lipidowej — jednym z głównych sygnałów starzenia się komórki jest ekspozycja fosfatydyloseryny (PS) na zewnętrznej warstwie błony komórkowej, co ułatwia ich rozpoznanie i fagocytozę przez makrofagi, głównie w śledzionie, wątrobie i szpiku kostnym. W trakcie procesu starzenia erytrocyty tracą około 30% swojej objętości oraz 15–20% zawartości hemoglobiny. Pomimo tej utraty, stężenie hemoglobiny wewnątrz komórki wzrasta o około 14%, co powoduje wzrost gęstości całej komórki [3]. Z biegiem czasu w erytrocytach spada również poziom ATP, niezbędnego do utrzymania integralności błony komórkowej oraz 2,3-DPG (2,3-difosfoglicerynianu), który wpływa na powinowactwo hemoglobiny do tlenu. Spadek 2,3-DPG skutkuje utrudnionym oddawaniem tlenu przez hemoglobinę do tkanek, co obniża skuteczność transportu tlenu w organizmie. Dodatkowo w miarę starzenia się krwinek dochodzi do akumulacji uszkodzeń oksydacyjnych [3].

29.2.2. Eryptoza

Wszystkie opisane powyżej zmiany prowadzą do tzw. eryptozy, czyli programowanej śmierci erytrocytów, analogicznej do procesu apoptozy w innych typach komórek. W przeciwieństwie do naturalnej eliminacji, eryptoza może zostać wywołana przedwcześnie pod wpływem różnych stresorów, takich jak stres oksydacyjny, szok osmotyczny, niedobór energii, ekspozycja na ksenobiotyki, antybiotyki czy metale ciężkie [4]. Proces eryptozy charakteryzuje się trzema głównymi cechami morfologicznymi: skurczeniem się komórki, powstawaniem pęcherzyków na błonie komórkowej (ang. blebbing) oraz ekspozycją fosfatydyloseryny (PS) na zewnętrznej warstwie błony. Proces ten można uznać za mechanizm ochronny organizmu, eliminujący uszkodzone erytrocyty i zapobiegającym hemolizie. Jednakże nadmierna aktywacja eryptozy może stanowić jedną z przyczyn niedokrwistości.

29.3. Projekt i wykonanie

Badaniu poddano zbiór próbek ludzkiej krwi pełnej pochodzących z Regionalnego Centrum Krwiodawstwa i Krwiolecznictwa, znajdującego się we Wrocławiu przy ulicy Czerwonego Krzyża 5. Z zakupionego materiału badawczego przygotowano koncentraty krwinek czerwonych w roztworze SAGM w stosunku objętościowym 4:1.

29.3.1. Metody badawcze

W niniejszym rozdziale przedstawiono zrealizowane metody pomiarowe. Wybór różnorodnych technik – biofizycznych, biochemicznych i reologicznych – był kluczowy ze względu na złożony charakter zmian parametrów komórkowych obserwowanych podczas procesu starzenia.

Morfologia i gazometria

Do pomiarów morfologicznych krwi oraz koncentratów krwinek czerwonych używano analizatora hematologicznego firmy Mindray BC-2800VET. Jonometrię oraz gazometrię krwi wykonano posługując się analizatorem Edan i15 Blood Gas and Chemistry Analyzer.

Podatność osmotyczna erytrocytów i ocena hemolizy

Metoda pomiaru podatności osmotycznej erytrocytów polega na ocenie stopnia ich hemolizy w roztworach o różnym stężeniu NaCl, co odzwierciedla odporność błony komórkowej na działanie środowiska hipoosmotycznego. Oznaczenia wykonano wg procedury opisane w pracy Walski i in. [5]. Z kolei do pomiaru stężenia wolnej hemoglobiny wykorzystano metodę Drabkina opierającą się na reakcji hemoglobiny z cyjankiem potasowym i żelazocyjankiem potasowym zawartymi w odczynniku. Efektem reakcji jest powstanie cyjanometemoglobiny, która charakteryzuje się ciemnoczerwoną barwą. Pomiary przeprowadzono wg wcześniej opisanej procedury [6].

Rozdział erytrocytów w gradiencie gęstości

Metoda polega na wykorzystaniu gradientu gęstości przy użyciu odczynnika Percoll do frakcjonowania erytrocytów na podstawie ich gęstości, co koreluje z ich wiekiem. Starsze erytrocyty mają wyższą gęstość i osiadają w dolnych warstwach gradientu, podczas gdy młodsze pozostają w górnych warstwach.

Metody biochemiczne

Do pomiarów zmian parametrów biochemicznych analizowanych próbek wykorzystano następujące metody opierające się na oznaczaniu aktywności enzymów antyoksydacyjnych:

1. oznaczenie aktywności katalazy (CAT) metodą Aebiego,
2. oznaczenie aktywności peroksydazy glutationowej (GPX) metodą Paglia i Valentine,
3. oznaczenie aktywności dysmutazy ponadtlenkowej (SOD).

Hemoreologia

Pomiary parametrów reologicznych wykonano przy pomocy ektacytomietru LORRCA MaxSis. Podstawą działania urządzenia jest analiza wzoru dyfrakcyjnego światła. Wbudowany laser oświetla zawieszinę erytrocytów poddawanych kontrolowanym warunkom, takim jak np. zmienne naprężenie ścinające. W efekcie powstaje charakterystyczny wzór dyfrakcyjny, którego kształt i rozmiar odzwierciedlają stopień odkształcenia komórek. Rejestrowane zmiany umożliwiają ocenę elastyczności erytrocytów. W prezentowanej pracy mierzono 3 charakterystyki: Deformability, Osmoscan, Oxygenscan.

Analiza zmian morfologicznych

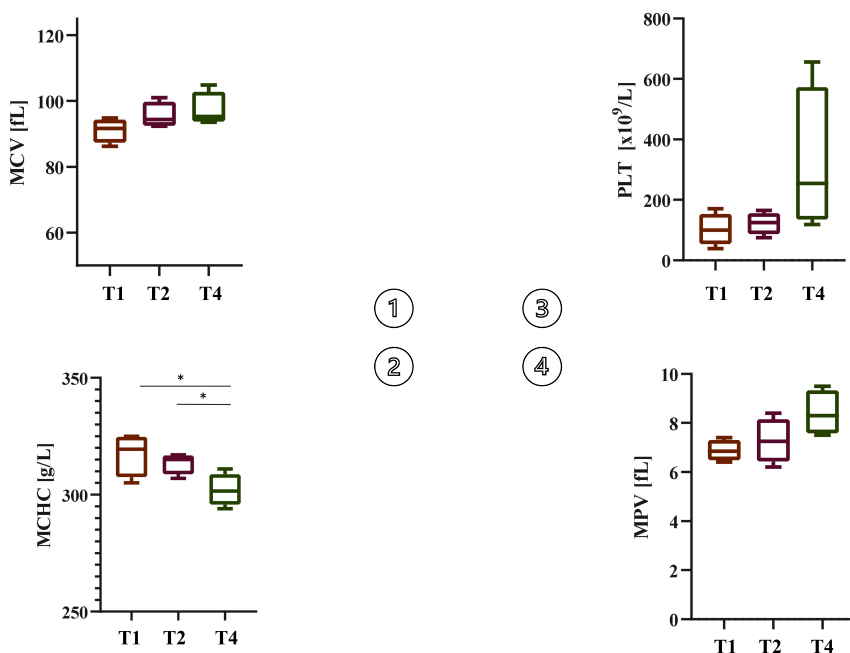
Kolejnym narzędziem wykorzystanym do analizy zmian właściwości erytrocytów w trakcie postępującego procesu starzenia była aplikacja RedTell. Zastosowano ją do automatycznej klasyfikacji komórek na podstawie obrazów mikroskopowych, dzieląc erytrocyty na dwie podstawowe formy morfologiczne: dyskocyty (komórki o prawidłowym kształcie) oraz echinocyty (komórki z wypustkami na powierzchni). Konieczne było wykonanie modyfikacji wykonanych zdjęć mikroskopowych, tak aby posiadały odpowiedni rozmiar oraz rozdzielczość umożliwiające korzystanie z narzędzia. Następnie dokonywano ręcznej adnotacji 250 losowo wybranych komórek (dyskocyty – „0”, echinocyty – „1”). Jako rezultat otrzymywano wyniki klasyfikacji przy pomocy 3 modeli uczenia maszynowego: Decision Tree (DT), Random Forest (RF) oraz LightGBM.

29.4. Wyniki

Wyniki opisują dwie niezależne, lecz przeprowadzone według tej samej procedury serie pomiarowe, które umożliwiły ocenę powtarzalności oraz zwiększyły wiarygodność obserwowanych trendów. Uzupełnieniem tych analiz była seria trzecia, wykorzystująca rozdział komórek w gradiencie gęstości z użyciem Percollu, w której uzyskane frakcje pozwalały na określenie zależności pomiędzy gęstością a wiekiem krwinek. W poniższym zestawieniu zaprezentowano tylko najważniejsze wyniki.

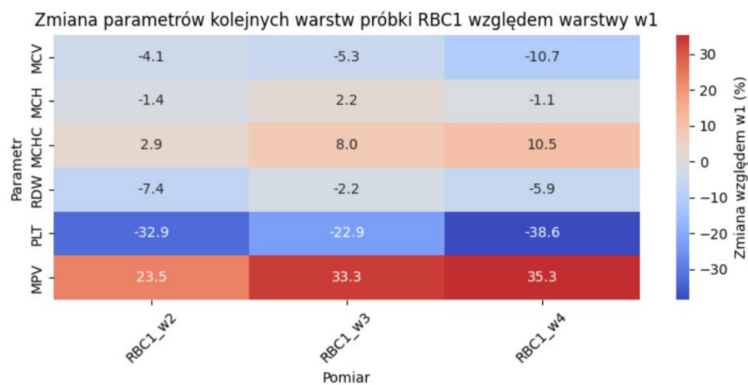
29.4.1. Morfologia

Z uwagi na specyfikę wykonywanego doświadczenia tylko wybrane parametry badań morfologicznych podlegały analizie. Były to: MCV, MCH, MCHC, RDW, PLT oraz MPV. Rysunek 29.1 wskazuje na wzrost średniej objętości komórek co oznacza, że komórki pęcznieją, a w tym samym czasie średnia gęstość Hb w erytrocytach spada, co może być wynikiem stopniowego wycieku tego białka z wnętrza komórek. Obserwowany wzrost liczby oraz objętości płytek krwi najprawdopodobniej wynika z błędnego zliczania przez analizator fragmentów zhemolizowanych erytrocytów, które są interpretowane jako płytki krwi.



Rysunek 29.1. Wykresy zmian morfologicznych całych populacji komórek rejestrowanych przez 4 tygodnie. 1) Zmiana średniej objętości RBC, 2) zmiana średniego stężenia hemoglobiny, 3) zmiana liczności płytek krwi, 4) zmiana objętości płytek krwi. Gwiazdką (*) oznaczono różnice istotne statystycznie dla ustalonego poziomu istotności $p < 0.05$

Analiza subpopulacji wyodrębnionych metodą frakcjonowania w gradiencie gęstości Percoll wykazała natomiast, że kolejne warstwy w obrębie jednej próbki wykazują tendencję do zmniejszania objętości i jednoczesnego wzrostu średniej gęstości komórek (rys. 29.2). Może to sugerować, że w miarę starzenia się komórki ulegają obkurczeniu, co prowadzi do zwiększenia średniego stężenia hemoglobiny. Jednakże, w połączeniu z analizą zmian zachodzących w poszczególnych frakcjach na przestrzeni 28 dni, zaobserwowano, że zarówno komórki należące do najmłodszej, jak i najstarszej subpopulacji stopniowo pęcznieją, a ich gęstość maleje. Wyniki te są zgodne z trendami zmian morfologicznych zaobserwowanymi w całych populacjach komórkowych.



Rysunek 29.2. Mapa korelacji prezentująca trend zmian występujących między kolejnymi warstwami rozdziału w gradiencie Percoll. Jako wartości odniesienia zdefiniowano pomiary dla warstwy najbliższych komórek "w1"

29.4.2. Jonometria / gazometria

Wyniki pomiarów zebrane w tabeli ??, jednoznacznie wskazują na istotne zmiany parametrów RBC zachodzące w trakcie starzenia, zgodne z procesami degradacyjnymi oraz przemianami metabolicznymi. Najbardziej zauważalne są zmiany w poziomach jonów sodu, glukozy, mleczanów oraz spadek pH.

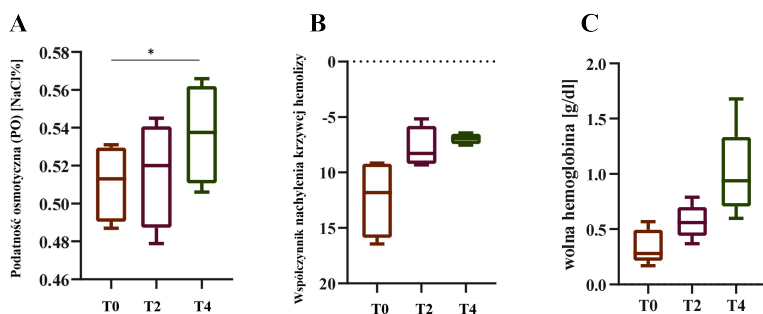
Tabela 29.1. Uśrednione wartości parametrów jonometrii oraz gazometrii, gdzie „»” powyżej zakresu oznaczalności, „...” wartość nieprawidłowa, „<” wartości poniżej normy. Symbolem δ oznaczono wartości odchyłeń standardowych. Przy parametrach, dla których określenie δ nie było możliwe, zapisano “b.d.”.

Parametr	Średnia T0	δ T0	Średnia T2	δ T2	Średnia T4	δ T4
pH	6,586	0,029	<6,50	b.d.	<6,50	b.d.
pO ₂	39,8	20	275	101	304,8	7,9
pCO ₂	12,4	1,7	19,1	4,9	17,7	4,2
HCT	55,4	2,9	53,4	4,8	50,0	5,1
Na ⁺	145	3,1	126,0	2,6	112,2	6,0
K ⁺	3,76	0,40	»	b.d.	...	b.d.
Ca ²⁺	1,23	0,10	1,6	0,50	1,5	0,7
Cl ⁻	127,6	3,4	125,0	0,89	124,0	0,9
Glu	248,8	29,2	142	50	91,2	50
Lac	37,1	5,5	116	16	120,2	5,2

29.4.3. Podatność osmotyczna i hemoliza

Zestawione na wykresach (rys. 29.3) wyniki pomiarów wskazują, że wraz z czasem przechowywania podatność osmotyczna erytrocytów przesuwają się w stronę wyższych stężeń NaCl. Oznacza to, że komórki krwinek z czasem przechowywania stają się wrażliwe na mniej hipotoniczne roztwory – podatność na stres osmotyczny wzrasta. Zaobserwowano również zmiany w nachyleniu krzywej hemolizy w kolejnych tygodniach eksperymentu (T0, T2, T4). Wartości te wskazują na stopniowe wypłaszczenie krzywej hemolizy co może wiązać się z utratą homogeniczności populacji komórek. Otrzymane wyniki konsekwentnie

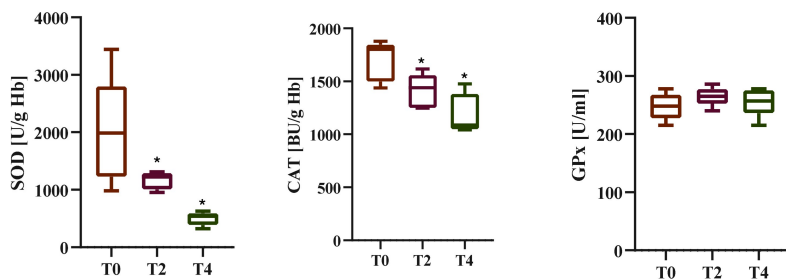
wskazują trend zwiększającej się zawartości wolnej hemoglobiny w kolejnych tygodniach (rys. 29.3C). Wzrost stężenia wolnej hemoglobiny w badanych próbkach może sugerować nasilający się w kolejnych tygodnia rozpad erytrocytów oraz wzmożony wyciek białka z wnętrza komórek RBC do medium zewnętrznego.



Rysunek 29.3. Wykresy zmian podatności osmotycznej podczas 4 tygodni przechowywania (A), zestawiony wraz z wykresem zmian współczynnika nachylenia krzywej w czasie (B) oraz zmianami stężenia wolnej hemoglobiny (C). Gwiazdką (*) oznaczono wyniki wykazujące statystycznie istotną różnicę między wynikami tygodnia T0 i T4 ($p < 0,05$)

29.4.4. Enzymy antyoksydacyjne

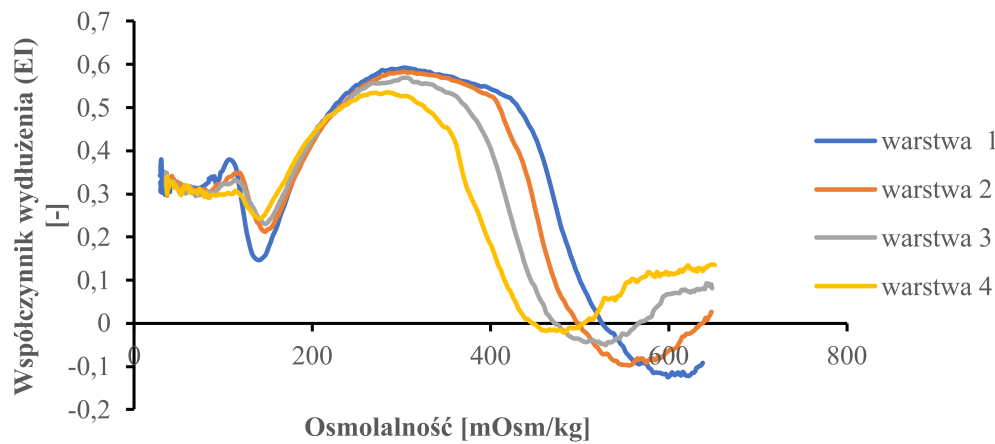
W ramach analizy biochemicznej dokonano oznaczenia aktywności trzech kluczowych enzymów antyoksydacyjnych: dysmutazy ponadtlenkowej (SOD), katalazy (CAT) oraz peroksydazy glutationowej (GPx). Pomiary przeprowadzono metodą spektrofotometryczną, opartą na rejestracji zmian absorbancji. Uzyskane wyniki przedstawiono na poniższych wykresach (rys. 29.4). Z prezentowanych wykresów wynika, że zmiany aktywności katalazy oraz dysmutazy ponadtlenkowej zmniejszają się wraz ze starzeniem się erytrocytów.



Rysunek 29.4. Wykres zmian aktywności dysmutazy ponadtlenkowej (SOD), katalazy (CAT) oraz peroksydazy glutationowej (GPx) w kolejnych tygodniach badań. Gwiazdką (*) oznaczono wyniki wykazujące statystycznie istotną różnicę między tygodniami T0 – T4, T2 – T4 dla ustalonego poziomu istotności $p < 0.05$

29.4.5. Hemoreologia

Szczególnie istotne okazały się pomiary charakterystyk odkształcalność RBC w gradiencie osmolalności (rys. 29.5) oraz gradiencie nasycenia tlenem. Co ważne, dla poszczególnych subpopulacji RBC, pomiary te każdorazowo wykazywały tę samą zależność między kolejnymi warstwami, potwierdzając istnienie spójnego trendu zmian.



Rysunek 29.5. Charakterystyka Osmoscan próbki RBC 1, w tygodniu 0. Krzywe na wykresie "warstwa 1 - 4" odpowiadają coraz gęstszym frakcjom zbieranych po rozdziale w gradiencie gęstości

29.4.6. Analiza obrazów mikroskopowych z wykorzystaniem narzędzia RedTell

Po zastosowaniu wskazanych modeli klasyfikacyjnych oraz przeprowadzeniu własnej interpretacji wyników uzyskano procentowy udział dyskocytów i echinocytów w analizowanych populacjach komórek. Przykładowe dane zestawiono w tabeli ?? . Analiza składu populacji została przeprowadzona wyłącznie dla modeli uczenia maszynowego, które nie przejawiały tendencji do przeuczenia.

Tabela 29.2. Zestawienie analizy ilościowej dyskocytów i echinocytów całej populacji na przestrzeni 4 tygodni. Wyniki uzyskano przy pomocy klasyfikacji RedTell, z użyciem modeli Random Forest oraz LightGBM.

Model	Tydzień	Liczba oznaczonych komórek [-]		Zawartość procentowa w populacji [%]	
		Dyskocyty	Echinocyty	Dyskocyty	Echinocyty
Random Forest	T0	878	675	56,5	43,5
	T2	156	339	31,5	68,5
	T4	91	208	30,4	69,6
LightGBM	T0	877	676	56,5	43,5
	T2	158	337	31,9	68,1
	T4	101	198	33,8	66,2

Analiza składu procentowego poszczególnych subpopulacji erytrocytów w kolejnych tygodniach wykazała natomiast wyraźną tendencję: w niższych warstwach obserwowano rosnący udział echinocytów oraz jednoczesny spadek liczby dyskocytów. Może to sugerować, że komórki o bardziej dysfunkcyjnej morfologii przemieszczają się w kierunku warstw o większej gęstości.

29.5. Podsumowanie

Praca badawcza opisuje przeprowadzoną ocenę biochemiczną i biofizyczną zmian zachodzących w erytrocytach w trakcie przechowywania *in vitro*. W zakres pracy wchodziło: realizacja pomiarów parametrów biochemicznych, biofizycznych oraz reologicznych, opracowanie własnej modyfikacji procedury rozdzielania próbek w gradiencie gęstości Percoll, opracowanie oraz wykonanie podstawowej analizy statycznej wyników, innowacyjne zastosowanie modułu Oxygenscan w kontekście oceny procesu starzenia, wykorzystanie zintegrowanej platformy uczenia głębokiego - RedTell oraz ocena działań wybranych modeli uczenia maszynowego na własnych danych.

Uzyskane wyniki pogłębiają wiedzę na temat procesów starzenia erytrocytów *in vitro*, obejmując takie aspekty jak morfologia, reologia, biochemia oraz adaptacyjne zmiany komórkowe. Wykazano, że obserwowane efekty starzenia mogą przybierać odmienne formy w zależności od przyjętego podejścia badawczego – zarówno na poziomie całej populacji komórek, jak i ich wyodrębnionych subpopulacji. Podkreśla to znaczenie precyzyjnego określenia skali i struktury analizowanych próbek przy interpretacji wyników dotyczących erytrocytów. Wskazano również, że mimo prawnie regulowanych 42 dni przechowywania komórek, już po 28 dniach mogą występować zmiany kluczowe dla poprawnego funkcjonowania RBC. Wyniki badań morfologicznych oraz jonometrycznych potwierdziły zmiany zachodzące zgodnie ze współcześnie znanym stanem wiedzy na temat przemian biochemicznych i metabolicznych krwinek czerwonych. Wskazano nowe potencjalne zastosowanie charakterystyki Oxygenscan do analizy zmian starzejących się erytrocytów. Powiązano w ten sposób parametry reologiczne krwinek, w warunkach przesycenia tlenem i niedotlenienia, z potencjalnymi zaburzeniami przy transporcie tlenu. Powyższa praca wskazała, iż występują zmiany, które mogą być kluczowe w rozumieniu zmian dysfunkcji RBC w czasie, natomiast ustalenie konkretnych trendów wymaga dalszych badań. Podkreślono znaczenie drugiego tygodnia przechowywania erytrocytów jako czasu największej zmienności – przede wszystkim w kontekście zaburzeń równowagi błon komórkowych i parametrów reologicznych. Potwierdzono skuteczność rozdzielania erytrocytów w gradiencie gęstości Percoll, bez konieczności stosowania ultrawirówki na etapie preparatyki. Wskazano trendy zmian postępujące w kolejnych subpopulacjach komórek oraz udowodniono słuszność stwierdzenia, iż warstwy najgęstsze charakteryzują się największą zawartością komórek występujących w formie echinocytów. Pozorna poprawa zdolności do odkształcalności przypadająca na czwarty tydzień badań może być wynikiem niekontrolowanej hemolizy, która pozornie może „poprawiać” parametry reologiczne poprzez rozpad najbardziej dysfunkcyjnych komórek z populacji. Fakt ten wskazuje potrzebę realizowania badań na pojedynczych układach komórkowych w celu dokładnego monitorowania stopniowych zmian zachodzących na pojedynczych obiektach badawczych. Konsekwentne obniżanie

się aktywności enzymów antyoksydacyjnych w czasie realizowanych badań i w rezultacie zwiększona podatność na destrukcyjne działanie reaktywnych form tlenu może być jednym z powodów zarejestrowanej wzmożonej hemolizy w kolejnych tygodniach. Zastosowanie rozwiązań opartych na modelach uczenia maszynowego do detekcji określonych form komórkowych znacząco usprawnia analizę składu populacji erytrocytów. Należy jednak zachować ostrożność przy doborze architektury modeli oraz parametrów treningu, zwracając szczególną uwagę na przebieg krzywych uczenia. Niewłaściwie dobrane parametry lub modele mogą prowadzić do przeuczenia (overfittingu) lub innych artefaktów analizy, co negatywnie wpływa na wiarygodność uzyskiwanych wyników. Różnice w przygotowaniach próbek pomiarów mikroskopowych mogą znacząco wpływać na obserwowane struktury komórek i składy badanych populacji. Przeprowadzone analizy pogłębiają wiedzę na temat procesów starzenia erytrocytów, ale również dostarczają solidnych podstaw do rozwijania bardziej zaawansowanych technik konserwacji krwi, co w przyszłości może znacząco przyczynić się do ratowania ludzkiego życia.

Przeprowadzone badania zostały sfinansowane ze środków grantu Narodowego Centrum Nauki (UMO-2022/47/D/ST7/02938).

Bibliografia

- [1] Definicja erytrocytu. National Cancer Institute. Dostępny online: <https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancerterms/def/erythrocyte> (dostęp: 17-02-2025).
- [2] Dąbrowski Z. (red.), *Fizjologia krwi: wybrane zagadnienia. Część II*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2000.
- [3] Bosman J.C.G.M., Survival of red blood cells after transfusion: processes and consequences. *Frontiers in Physiology* 2013, 4, s. 376. doi:10.3389/fphys.2013.00376.
- [4] Repsold L., Joubert A.M., Eryptosis: an erythrocyte's suicidal type of cell death. *BioMed Research International* 2018, 2018, s. 9405617. doi:10.1155/2018/9405617.
- [5] Walski T., Grzeszczuk-Kuć K., Gałęcka K., Trochanowska-Pauk N., Bohara R., Czerski A., Szuldrzyński K., Królikowski W., Detyna J., Komorowska M., Near-infrared photobio-modulation of blood reversibly inhibits platelet reactivity and reduces hemolysis. *Scientific Reports* 2022, 12(1), 4042. doi:10.1038/s41598-022-08053-y.
- [6] Walski T., Chludzińska L., Komorowska M., Witkiewicz W., Individual osmotic fragility distribution: a new parameter for determination of the osmotic properties of human red blood cells. *BioMed Research International* 2014, 2014, 162102. doi:10.1155/2014/162102.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w sprzedaży wysyłkowej:
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl
ISBN 978-83-8134-014-4

