

Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Wrocławski im. prof. Kazimierza Idaszewskiego

Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej

**Trendy i rozwiązania technologiczne
w elektrotechnice**



edycja 2023

Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej 2023

Trendy i rozwiązania technologiczne w elektrotechnice

Redakcja: dr inż. Remigiusz Mydlikowski

KOMITET NAUKOWY:

- dr inż. Dariusz Banasiak
- dr inż. Tomasz Grysiński, prof. uczelni
- dr inż. Maciej Gwoździewicz
- dr hab. inż. Michał Mazur, prof. uczelni
- dr inż. Remigiusz Mydlikowski
- dr inż. Wioletta Nowak
- dr inż. Mateusz Popek
- dr hab. inż. Piotr Serkies, prof. uczelni
- dr inż. Elżbieta Szul-Pietrzak
- dr hab. inż. Paweł Wachel, prof. uczelni
- dr inż. Adam Wąż
- dr hab. inż. Ryszard Zieliński, prof. uczelni

Redakcja techniczna i korekta: Stanisław Gancarz

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 2023

© Copyright by Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Wrocławski, Wrocław 2023

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

[http:// www.oficyna.pwr.edu.pl](http://www.oficyna.pwr.edu.pl)

email: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN: 978-83-7493-260-8

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

Spis treści

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, FOTONIKI I MIKROSYSTEMÓW	9
1. Waga analityczna do precyzyjnych pomiarów w zakresie mikrogramowym	11
<i>inż. Damian Walczyk, opiekun: dr hab. inż. Grzegorz Świrniak, prof. uczelni</i>	
2. Moduł LTCC do ochrony przeciwprzepięciowej zintegrowany z filtrem przeciwzakłóceń	19
<i>inż. Kamil Kajdas, opiekun: dr inż. Arkadiusz Dąbrowski</i>	
3. Sterowanie dronem za pomocą gestów dłoni z wykorzystaniem przetwarzania obrazów	33
<i>inż. Maciej Kaniewski, opiekun: dr inż. Wojciech Domski</i>	
4. Budowa małego mobilnego robota laboratoryjnego klasy (1,2)	43
<i>inż. Tomasz Lubelski, opiekun: dr inż. Robert Muszyński</i>	
5. Analiza wpływu wygrzewania na właściwości powierzchni i gazochromowe cienkich warstw tlenku wolframu	53
<i>mgr inż. Wiktoria Weichbrodt, opiekun: dr hab. inż. Michał Mazur, prof. uczelni</i>	
6. Zastosowanie metody bezczujnikowej w układzie monitorowania prędkości obrotowej wirnika silnika szczotkowego	63
<i>mgr inż. Przemysław Wewiór, opiekun: dr inż. Grzegorz Głomb</i>	
7. Analiza systemów typu Bin picking dla optymalizacji zastosowań w robotach współpracujących	75
<i>mgr inż. Dawid Grajoszek, opiekun: dr inż. Andrzej Jabłoński</i>	
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY	85
8. Przydomowa minielektrownia wodna	87
<i>inż. Jakub Totczyk, opiekun: dr inż. Krystian Krawczyk</i>	
9. Manipulator ramieniowy współpracujący z obrabiarką numeryczną CNC	95
<i>inż. Michał Strapoć, opiekun: dr inż. Marcin Pawlak</i>	

10. Modyfikacja procesu produkcyjnego mechanizmu autoregulacji hamulca tylnego postojowego – Cartridge z wykorzystaniem systemu wizyjnego firmy Cognex	105
<i>inż. Robert Puszyński, opiekun: dr inż. Krzysztof Dyrce</i>	
11. Analiza wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję zaburzeń przewodzonych w zakresie częstotliwości do 150 kHz wprowadzanych przez odbiorniki energii elektrycznej	113
<i>mgr inż. Wojciech Frydlewicz, opiekun: prof. dr hab. inż. Tomasz Sikorski</i>	
12. Rozmyte sterowanie modelem systemu kolejowego	121
<i>mgr inż. Tomasz Hojeński, opiekun: dr hab. inż. Marcin Kamiński, prof. uczelni</i>	
WYDZIAŁ INFORMATYKI I TELEKOMUNIKACJI	135
13. Wykrywanie żywotności twarzy w przestrzeni 3D uzyskanej z mapy głębi z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego	137
<i>inż. Adrian Skrobas, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
14. Projekt bezpiecznej sieci w dużej firmie/organizacji	145
<i>inż. Michał Józków, opiekun: dr inż. Marcin Jaroszewski</i>	
15. System uwierzytelniania i identyfikacji użytkownika na podstawie biometrii behawioralnej błędów popełnianych w trakcie pisania	151
<i>inż. Bartłomiej Marek, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
16. Projekt i implementacja skanera portów TCP	163
<i>inż. Jakub Derda, opiekun: dr inż. Michał Kucharzak</i>	
17. Implementacja oraz analiza protokołów FIDO\FIDO2 z użyciem kluczy fizycznych	173
<i>mgr inż. Patryk Mróz, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
WYDZIAŁ PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI	183
18. Projekt i realizacja modułowego manipulatora dla laboratorium biomedycznego	185
<i>inż. Piotr Karaś, opiekun: dr inż. Tomasz Grysiński, prof. uczelni</i>	
19. Projekt i konstrukcja robota karmiącego pacjenta z niedowładem kończyn górnych	201
<i>mgr inż. Agnieszka Adamczyk, opiekun: prof. dr hab. Krystian Kubica</i>	
20. Konstrukcja przyrządu do mierzenia sił nacisku szczęki	217
<i>inż. Marta Kaczmarek, opiekun: dr inż. Mateusz Popek</i>	

- 21. System wirtualnej rzeczywistości do nauki udzielania pomocy przedmedycznej** **227**
inż. Miłosz Bonikowski, opiekun: dr hab. inż. Cezary Siełużycki, prof. uczelni
- 22. Zastosowanie urządzeń mobilnych do diagnostyki i rehabilitacji cieśni nadgarstka** **241**
inż. Martyna Grygiel, opiekun: dr hab. inż. Mirosław Łątka, prof. uczelni

Przedmowa

Monografia stanowi podsumowanie działalności naukowej Stowarzyszenia Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej w 2023 roku. Stowarzyszenie realizuje swoją działalność statutową poprzez organizację konkursów na najlepsze prace dyplomowe inżyniersko-badawcze na czterech wydziałach Politechniki.

Wspomniane wydziały, które łączą pokrewne dyscypliny naukowe związane z obszarem szeroko pojętej elektryki (automatyka, elektronika i elektrotechnika, informatyka techniczna i telekomunikacja oraz inżynieria biomedyczna), są miejscem badań i innowacyjnych projektów. Każda z Komisji Konkursowych działających na poszczególnych wydziałach ocenia zgłoszone prace, kierując się kryteriami takimi jak:

- sposób rozwiązania problemu technicznego lub naukowego,
- powiązanie pracy z aktualnymi problemami gospodarki narodowej lub regionu,
- stopień samodzielności autora i oryginalność rozwiązania problemu.

Prace inżyniersko-badawcze zgłaszane do Konkursu wyróżniają się nie tylko wysokim poziomem merytorycznym, lecz także skupiają uwagę na aktualnych problemach naukowo-badawczych, odzwierciedlając obecne trendy w stosowanych rozwiązaniach technologicznych.

Monografia zawiera streszczenia wszystkich nagrodzonych prac dyplomowych z edycji Konkursu w roku 2023, rzucając światło na innowacyjność, kreatywność i zaangażowanie studentów Politechniki Wrocławskiej w dziedzinie szeroko rozumianej elektryki.

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

Wydział Elektroniki,
Fotoniki i Mikrosystemów

Waga analityczna do precyzyjnych pomiarów w zakresie mikrogramowym

inż. Damian Walczyk

Elektronika

dr hab. inż. Grzegorz Świrniak, prof. uczelni

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej

W pracy przedstawiono opis koncepcji oraz konstrukcji wagi elektronicznej, przeznaczonej do pomiaru bardzo małych mas. Zakres mikrogramów pokrywa masy najmniejszych obiektów spotykanych w życiu codziennym, które jednak nie są mierzone powszechnie, być może w związku z brakiem łatwego dostępu do urządzenia umożliwiającego takie pomiary przy ograniczonym nakładzie środków. Okazuje się, że do tego celu można wykorzystać prosty i szeroko stosowany miernik wskazówkowy. Zamocowany wewnątrz silnik zespolony ze wskazówką może posłużyć jako elektronicznie regulowany odważnik oraz ramię wagi. Dzięki wprowadzeniu czujnika położenia wskazówki możliwe jest wykonanie systemu regulacji w taki sposób kontrolującego zastępczy ciężar odniesienia, aby uzyskać równowagę, podobnie jak w tradycyjnych, czysto mechanicznych wagach. Regulator musi zostać rozważnie dobrany do właściwości takiego przetwornika masy, inaczej stabilna praca będzie niemożliwa. Efekt końcowy stanowi funkcjonalny przyrząd, oferujący dokładność oszacowaną na poziomie $20\% \pm 1 \mu\text{g}$, zdominowaną przez wpływ położenia próbki na szalce, co dowodzi technicznej możliwości realizacji koncepcji projektowej.

1.1. Cel i założenia

Celem pracy jest opracowanie, wykonanie i przetestowanie elektronicznej wagi analitycznej, umożliwiającej realizację precyzyjnych pomiarów w zakresie mikrogramowym. Urządzenie powinno wykorzystywać cyfrową akwizycję danych oraz posiadać konstrukcję przyjazną analizie, wprowadzaniu modyfikacji układowych i dającą możliwość dalszego rozwoju projektu. Główne założenia projektowe przewidują:

- analizę działania czujników i przetworników umożliwiających pomiar masy,
- opracowanie koncepcji, projektu i realizację wagi,
- analizę stabilności i optymalizację odpowiedzi impulsowej,
- oszacowanie błędów wskazań,
- opracowanie dokumentacji badawczej.

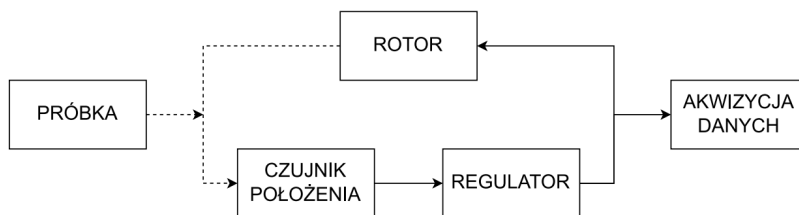
1.2. Wstęp teoretyczny

Prezentowany projekt wykorzystuje niekonwencjonalną konstrukcję przetwornika elektromagnetycznego, w działaniu przypominającą tradycyjną wagę równoramienną, gdzie doprowadza się do równowagi między ciężarem badanego obiektu a odważnikiem wzorcowym na zasadzie dźwigni dwustronnej. Podstawową różnicą jest to, że odważnik został zastąpiony sterowanym elektronicznie źródłem siły pochodzącej z oddziaływania pól elektromagnetycznych [1]. Efektem ubocznym jest wrażliwość na zmiany wartości przyspieszenia grawitacyjnego, jednak w praktyce badań laboratoryjnych istotne różnice mogą być obserwowane tylko dla najdokładniejszych systemów, a takie zwykle nie są mobilne [2]. Bliźniacze konstrukcje dowodzą możliwości uzyskania w ten sposób dobrej czułości pod warunkiem zachowania odpowiedniej precyzji, jak w przypadku wagi pracującej w National Institute of Standards and Technology z przetwornikiem elektrostatycznym [3].

Ze względu na wykorzystanie pętli sprzężenia zwrotnego w systemie pomiarowym jednym z zagadnień pracy jest zapewnienie stabilności. Jest ona tu rozumiana jako spełnienie nieformalnego warunku: wartości wyjściowe systemu są w stanie zmieniać się za wejściowymi według pewnej formuły. Aby zobrazować problem, można wyobrazić sobie układ, gdzie po przystąpieniu do pomiaru stałej wartości, wskazanie urządzenia waha się między dwoma skrajnymi punktami zakresu i nie reaguje na zmiany mierzonej wielkości. Podstawowym elementem pomocnym w zapewnieniu stabilności jest transmitancja, czyli funkcja charakteryzująca system, pozwalająca przewidzieć wartości wyjściowe na podstawie wejściowych. Może zostać przedstawiona w dziedzinie częstotliwości, to znaczy jako przebieg wzmocnienia i przesunięcia fazy w zależności od częstotliwości wejściowego sygnału sinusoidalnego. W pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego sygnał wyjściowy jest odejmowany od sygnału wejściowego, zatem gdy mieszane sygnały będą przesunięte względem siebie o 180° , operacja ta będzie odpowiadać dodawaniu, w związku z czym sprzężenie stanie się dodatnie, a wzmocnienie systemu znacznie wzrośnie, nawet do nieskończoności, uniemożliwiając regulację, a tym samym powodując utratę stabilności [4].

1.3. Projekt i wykonanie

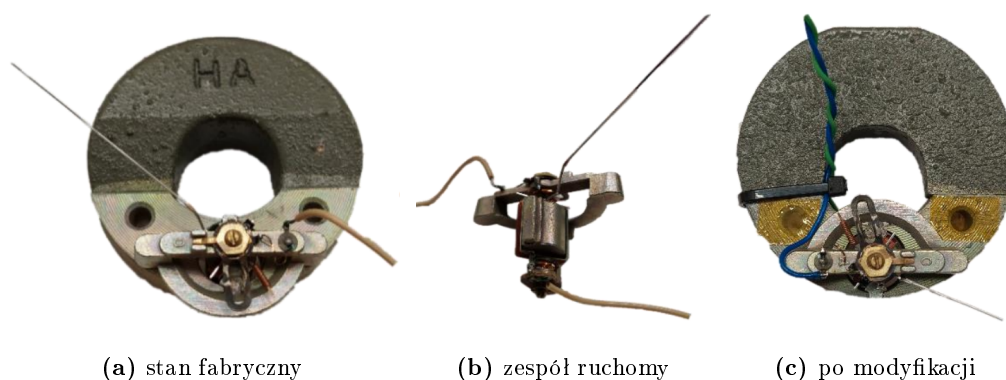
Na wstępnym etapie projektowania wydzielono bloki funkcyjne urządzenia. Ogólny schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1.1. Wejście systemu stanowi próbka masy, a wyjściami są cyfrowe dane pomiarowe, przetworzone przez system mikroprocesorowy i wyświetlane na panelu frontowym. Proces pomiaru odbywa się w pętli sprzężenia zwrotnego, gdzie szalka wagi utrzymywana jest w stałej pozycji horyzontalnej za pomocą regulatora. Monitoruje on pozycję szalki na podstawie sygnału z optycznego czujnika położenia i steruje rotorem ustroju w taki sposób, aby kompensować wszelkie odchyłki od zadanej pozycji. Pętla sprzężenia zwrotnego obejmuje rotor, czujnik położenia oraz regulator. Nośnikami danych w pętli są sygnały elektryczne, zaznaczone linią ciągłą i sygnały mechaniczne i optyczne, wyróżnione linią przerywaną. Najistotniejsze fragmenty systemu zostaną szerzej opisane w kolejnych podrozdziałach.



Rysunek 1.1. Schemat blokowy projektowanej wagi analitycznej

1.3.1. Przetwornik pomiarowy

Najważniejszym elementem systemu pomiarowego jest przetwornik. Założony zakres wartości mierzonych wymaga bardzo dużej czułości. Urządzenia magnetoelektryczne ze swej natury stanowią przyrządy do pomiaru prądu. Charakteryzują się małą bezwładnością, ponieważ zwykle pożądanym jest, aby wskazówka była w stanie nadążać za szybkimi zmianami wartości mierzonej. Ponadto opory ruchu nie są w nich mile widziane, gdyż przekładają się na ograniczenie działania do dużych zakresów prądów. Dlatego mają potencjał osiągnięcia pożądanego czułości w roli przetwornika do pomiaru masy. Urządzenie poddano modyfikacjom, które przedstawiono na rysunkach 1.2 i 1.3. Przede wszystkim usunięto obudowę wskaźnika oraz zmieniono orientację wskazówki, aby zwiększyć swobodę dostępu. Ze względu na planowany sposób sterowania rotorem urządzenia i montaż na stelażu, pełniącym również funkcję ekranującą, zadbane o izolację elektryczną elementów montażowych, znajdujących się w części obwodu magnetycznego. Zacisk ujemny wskaźnika jest fabrycznie połączony elektrycznie z pobliskimi metalowymi częściami, zapewne w celu poprawy odporności na zakłócenia oraz uproszczenia produkcji.



(a) stan fabryczny

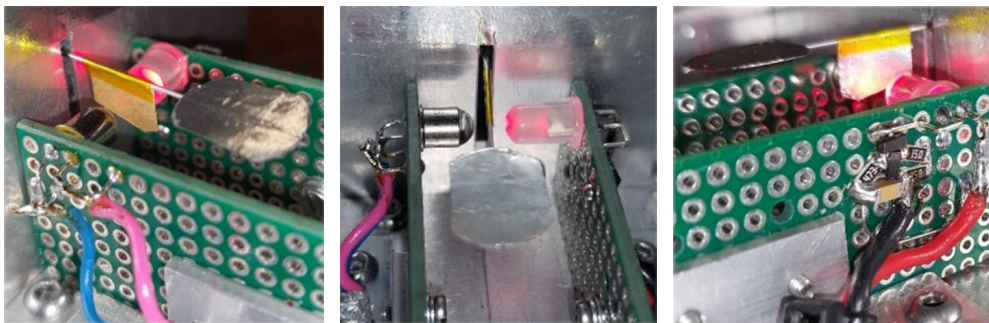
(b) zespół ruchomy

(c) po modyfikacji

Rysunek 1.2. Urządzenie magnetoelektryczne wykorzystane do konstrukcji przetwornika pomiarowego

Na końcówce wskazówki umieszczono szalkę wagi. Wykonano ją z lekkiej i sztywnej taśmy aluminiowej. Optyczny czujnik położenia składa się ze źródła światła LED, fotodiodego czujnika światła oraz przesłony. Przesłona znajduje się na wskazówce, w szczelinie pomiędzy fotodiodą a diodą LED. Dzięki temu pozycja ramienia jest związana z ilością

światła modulowaną przez przesłonę. Wzmocnienie tego układu ustalone jest za pomocą jasności źródła, czułości czujnika światła oraz kąta nachylenia przesłony. Należy zwrócić uwagę, że ze względu na okrągłe okienko wejściowe czujnika światła oraz ruch przesłony na torze wyznaczonym przez wycinek okręgu, wprowadzona zostaje nieliniowość działania, natomiast na drodze symulacji stwierdzono, że efekt jest niewielki i widoczny przede wszystkim w obszarze skrajnych położań. Niestety opisany układ ma wadę – reaguje wyłącznie na stopień zaciemnienia, więc nie jest w stanie rozróżnić kierunków zmiany położenia. Aby zachować stabilną pracę, konieczne jest ograniczenie mechaniczne zakresu ruchu ramienia wagi, co zostało osiągnięte przez odpowiednie obudowanie mechanizmu. Sygnał z tego czujnika jest w postaci prądu mającego źródło w fotodiodzie, który następnie poddawany jest zamianie na napięcie w układzie ze wzmacniaczem operacyjnym. W kolejnym stopniu następuje odjęcie składowej stałej z sygnału, ustalając tym samym umowny punkt odniesienia odpowiadający pozycji ramienia wagi. Stąd sygnał napięciowy jest gotowy do dalszego przetwarzania w regulatorze.



(a) widok z lewej strony

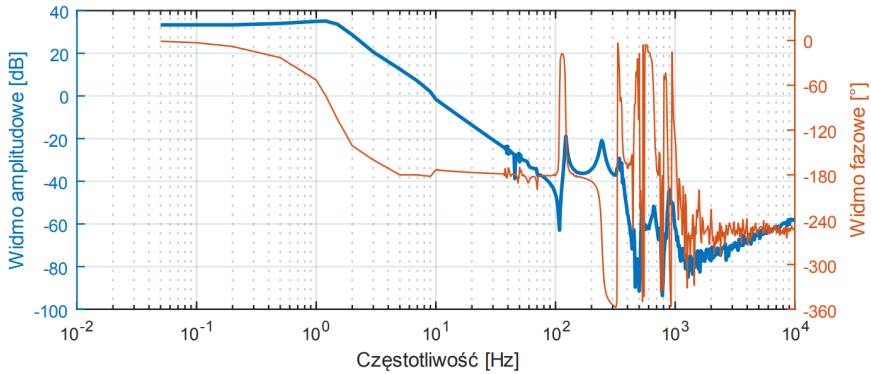
(b) widok centralny

(c) widok z prawej strony

Rysunek 1.3. Zdjęcie ramienia zamontowanego przetwornika pomiarowego (usunięto część obudowy)

1.3.2. Regulator

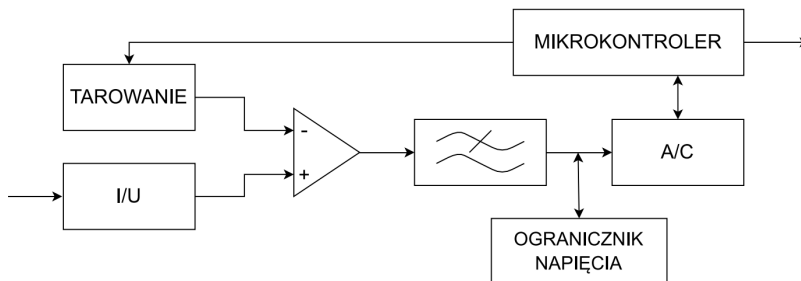
W celu zaprojektowania układu regulatora, przeprowadzono pomiary transmitancji opracowanego przetwornika masy. Wykorzystano zautomatyzowany system pomiarowy, składający się z zespołu oscyloskopu cyfrowo sterującego generatorem. Uzyskany wynik przedstawiono na rysunku 1.4. Jak można zauważyć, system wykazuje cechy układu dwubiegunowego, co może być uporczywie z perspektywy działania pętli sprzężenia zwrotnego ze względu na ryzyko utraty stabilności przy wprost zaaplikowanym sprzężeniu proporcjonalnym. Ponadto na częstotliwościach w zakresie 100 Hz–1 kHz występują silne zaburzenia charakterystyki związane z rezonansami pasożytniczymi układu, których kontrolowanie nie jest możliwe. Podjęto decyzję o implementacji regulatora typu PID z dodatkowymi blokami proporcjonalnymi na wejściu i wyjściu. Wykorzystano je do zmiany zakresów pomiarowych. Przełączanie wzmocnień odbywa się za pomocą tranzystorów typu MOSFET sterowanych mikroprocesorem.



Rysunek 1.4. Przebieg transmitancji przetwornika pomiarowego w dziedzinie częstotliwości – pomiar zautomatyzowany, około 500 punktów

1.3.3. Akwizycja danych

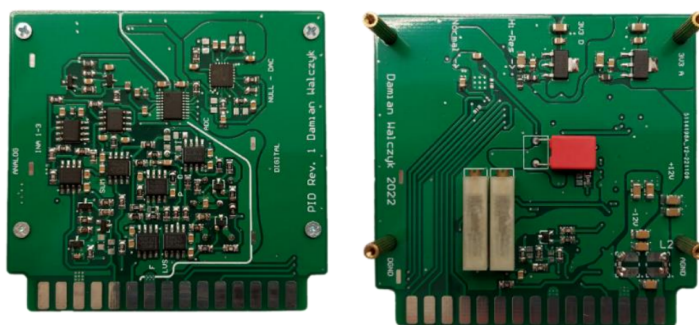
System pozyskiwania danych przedstawiono na rysunku 1.5. Sygnał pomiarowy stanowi prąd płynący przez rotor ustroju, odzwierciedlający siłę elektromotoryczną niezbędną do zrównoważenia ciężaru próbki, ale wielkością wyjściową regulatora jest napięcie. Konwersja następuje poprzez szeregowo umieszczone rezystory o dużej wartości. Napięcie odkładające się na jednym z nich jest buforowane i mieszane poprzez układ wzmacniacza instrumentalnego z poziomem odniesienia zadanym przez użytkownika w procesie tarowania wagi. Po jego wyzwoleniu wartość napięcia jest zapamiętywana w mikroprocesorze i służy nastawie cyfrowo sterowanego potencjometru (komunikacja I2C), fizycznie zerującego sygnał, który następnie kierowany już jest wprost na dedykowany przetwornik analogowo-cyfrowy. Aby proces przebiegał niezawodnie, niezbędne jest zastosowanie układu zabezpieczającego, gdyż zbyt duże napięcie na wejściu zastosowanego przetwornika analogowo-cyfrowego może doprowadzić do nagłej utraty jego funkcji. Układ regulatora jest zasilany wyższym napięciem, stąd ryzyko uszkodzenia. Ogranicznik podłączony jest do linii sygnałowej równolegle, dlatego wymaga zastosowania elementu kontrolującego ewentualny prąd zwarcia. Tę funkcję pełni pasywny filtr dolnoprzepustowy, który ogranicza też zakłócenia oraz uniemożliwia zjawisko aliasingu.



Rysunek 1.5. Schemat blokowy systemu akwizycji danych

Omówione układy umieszczono na płytce drukowanej, którą przedstawiono na rysunku 1.5. Mikroprocesor uzyskuje dane pomiarowe z przetwornika analogowo-cyfrowego

poprzez protokół SPI, aplikuje w stosunku do nich uśrednianie i wyświetla wynik pomiaru na wyświetlaczu LED (komunikacja SPI) z częstotliwością odświeżania rzędu 10 Hz. Sterowanie urządzeniem odbywa się z wykorzystaniem panelu zawierającego przełączniki z fizycznym układem chroniącym przed drganiem styków powstającymi przy przełączeniu oraz wyświetlacza OLED (komunikacja I2C), mogącego służyć prezentacji menu lub innych informacji.



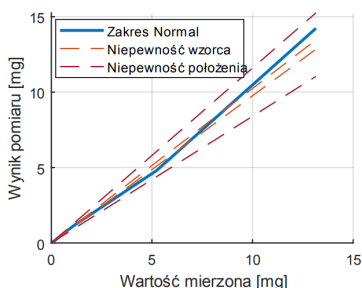
(a) strona górna

(b) strona dolna

Rysunek 1.6. Zdjęcia czterowarstwowej płytki drukowanej, zawierającej regulator i część systemu akwizycji

1.4. Uzyskane wyniki

W celu weryfikacji poprawności pracy skonstruowanej wagi przeprowadzono pomiar liniowości działania, którego wynik przedstawiono na rysunku 1.7. Określono niepewność statystyczną wskazań. Zbadano także wpływ pozycji próbki na szalce wagi. Wybrane dane pomiarowe przedstawiono w tabeli 1.1. Wykorzystane odważniki odniesienia zostały wykonane na drodze odmierzenia pewnych objętości drutu miedzianego o średnicy 0,08 mm. Gęstość materiału przyjęto na podstawie danych dużego producenta miedzi elektrolitycznej w Polsce, a szacunek dokładności wzorców przeprowadzono na podstawie reguły przenoszenia niepewności pomiarowych. Zaobserwowano istotną podatność na prądy powietrzne oraz zewnętrzne źródła wibracji. Bezwzględna niepewność wskazań wagi została oszacowana na poziomie $20\% \pm 1 \mu\text{g}$.



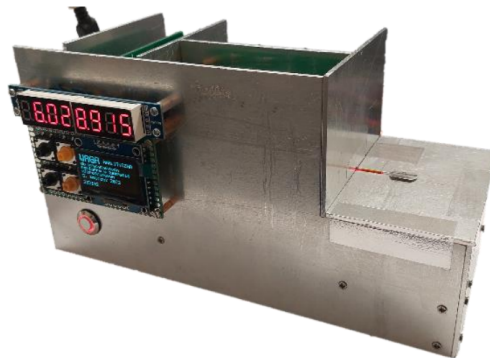
Rysunek 1.7. Wykres liniowości wskazań

Tabela 1.1. Wartości mas sporządzonych próbek

Masa wzorca [μg]	Niepewność wzorca [$\pm\%$]	Wartość zmierzona [μg]	Niepewność położenia [$\pm\%$]
210,5	3,28	203,0	13,9
461,0	2,61	479,5	14,3
1103	2,45	1135	14,6
5230	2,68	4800	13,5
13150	2,36	14230	13,5

1.5. Podsumowanie

Opracowano i wykonano działające urządzenie (rysunek 1.8), umożliwiające pomiar mas w zakresie mikrogramowym. Korzystając z ustroju magnetoelektrycznego przygotowano przetwornik pomiarowy. Na podstawie pomiarów transmitancji systemu zaprojektowano regulator, utrzymujący poprzez pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego stałą pozycję ramienia wagi. Stwierdzono, że ramię reaguje na pobudzenie przemieszczeniem w paśmie do kilkudziesięciu herców. Powyżej dostarczana energia służy praktycznie wyłącznie powstawaniu rezonansów pasożytniczych. Wykonano analizę niepewności pomiarowych. Niepewność przypadkową określono na $20\% \pm 1 \mu\text{g}$, a jej głównym źródłem jest błąd wprowadzany niepewnością położenia próbki na szalce, ponieważ została ona umieszczona bezpośrednio na ramieniu wagi. Bardzo dobrym uzupełnieniem projektu byłoby opracowanie bezprzewodowego systemu sterującego. Zaletą płynącą z takiego rozwiązania byłaby możliwość operowania urządzeniem, między innymi tarowania i wyzwalania/wstrzymywania pomiaru bez dotykania obudowy, co, jak się okazało, jest źródłem dużego zaburzenia wskazania, opóźniającego proces pomiaru. Innym kierunkiem rozwoju mogłoby być wykonanie zintegrowanego systemu zasilania z wykorzystaniem ogniw litowo-polimerowych, zawierających kontroler ładowania akumulatorów oraz przetwornicę wytwarzającą napięcia zasilające części analogową oraz cyfrową. Takie działanie będzie wymagało poświęcenia uwagi ograniczeniu EMI i weryfikację wpływu na wynik pomiaru.



Rysunek 1.8. Zdjęcie wykonanego urządzenia

Bibliografia

- [1] Schoonover R.M., A look at the electronic analytical balance, *Analytical Chemistry*, **1982**, 54(8), s. 973A–980A.
- [2] Andersen J.E.T., Understanding uncertainty to weighting by electronic-analytical balances, *Journal of AOAC International*, **2018**, 101(6), s. 1977-1984.
- [3] Ștefănescu D.M., *Handbook of force transducers, principles and components*, wydanie pierwsze, Springer Science & Business Media, Berlin, Niemcy, 2011.
- [4] Golnaraghi F., Kuo B., *Automatic control systems*, wydanie dziesiąte, McGraw Hill, Nowy Jork, Stany Zjednoczone, 2017.

Moduł LTCC do ochrony przeciwprzepięciowej zintegrowany z filtrem przeciwzakłóceniovym

inż. Kamil Kajdas

Elektronika i Telekomunikacja

dr inż. Arkadiusz Dąbrowski

Katedra Mikrosystemów

W niniejszej pracy przedstawione zostały rezultaty eksperymentów związanych z opracowaniem modułu ceramicznego służącego jednocześnie zarówno do ochrony przeciwprzepięciowej jak i przeciwzakłócenioviej. Uzyskane wyniki są odpowiedzią na pytanie, czy jest możliwe wykonanie modułu chroniącego układy elektroniczne przed zakłóceniami i przepięciami. Ponadto takie urządzenie musi charakteryzować bardzo duża niezawodność, niewielki rozmiar oraz stabilność i możliwość pracy w różnych warunkach. Z odpowiedzią przychodzi technologia LTCC i pomysł na połączenie układów tłumików przepięć i filtrów częstotliwościowych w kompletną wielowarstwową strukturę spełniającą podane założenia. Przeprowadzone w trakcie realizacji pracy serie pomiarowe potwierdzają założone oczekiwania. Struktury modułów przepięć charakteryzuje ochrona zarówno przed zakłóceniami, jak i przepięciami dla dwóch wariantów pracy – w układach dwuprzewodowych i trójprzewodowych. Wykonując kolejne serie pomiarowe dla różnych modyfikacji modułów potwierdzono możliwość wytworzenia kompletnego i niezawodnego urządzenia chroniącego układy elektroniczne pracujące w wielu konfiguracjach.

2.1. Cel i założenia

Celem pracy było wytworzenie i analiza pomiarów modułu do ochrony przeciwprzepięciowej zintegrowanego z filtrem przeciwzakłóceniovym (LC) wykonanym w technologii LTCC (ang. *Low Temperature Cofired Ceramic* – ceramika współwypalana niskotemperaturowo). Zakres pracy obejmował wytworzenie kilku struktur modułów w różnych konfiguracjach pomiarowych w celu zbadania możliwości układu i technologii, a także potwierdzenia wiedzy teoretycznej. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- zaprojektowanie i wykonanie dwóch rodzajów struktur modułu (łącznie osiem kompletnych układów elektronicznych),
- zaprojektowanie i wykonanie płytek PCB ułatwiających i ujednolicających pomiary,
- zaplanowanie, sporządzenie i analiza pomiarów.

2.2. Wstęp teoretyczny

Do zaprojektowania modułu, którego zadaniem jest jednocześnie ochrona przeciwzakłócenieniowa i przeciwprzepięciowa, oraz który nie może wpływać na pracę chronionych elementów, niezbędne jest zaczerpnięcie wiedzy teoretycznej z teorii obwodów i ogólnej elektroniki. Kolejną trudnością jest użycie technologii LTCC i zrozumienie zasad projektowania, od tego więc zaczęto redagować treść teoretyczną. Układy elektroniczne wykonane w tej technologii charakteryzuje bardzo dużo zaletm takich jak niski koszt, automatyzacja procesów wytwarzania, miniaturyzacja, dobre właściwości elektryczne, niezawodność, wytrzymałość czy odporność na wysokie temperatury [1].

Moduł zawiera filtr częstotliwościowy. Jego rolą jest przepuszczenie bez tłumienia sygnałów w określonym pasmie częstotliwości i stłumienie sygnałów leżących poza tym pasmem [2]. W tym celu został użyty filtr dolnoprzepustowy LC, składający się z równolegle połączonych ze sobą elementów biernych – cewki i kondensatora, których główną cechą jest zdolność do akumulacji, czyli gromadzenia energii elektrycznej. W kondensatorze energia gromadzi się w polu elektrycznym, natomiast w induktorze w polu magnetycznym. Charakterystyczną wartością opisującą te elementy jest reaktancja, inaczej opór bierny. Definicja reaktancji jest odpowiedzią na zagadnienie dotyczące magazynowania energii w tych elementach pod wpływem przepływu prądu przemiennego [3].

Filtr częstotliwościowy użyty w pracy posiada dwie cewki sprzężone ze sobą. Konsekwencją tego jest różne tłumienie sygnałów w konfiguracji wspólnej (większe wartości indukcyjności, aniżeli różnicowej (mniejsze wartości indukcyjności)). Gdy w układzie dwie cewki zostaną umieszczone w taki sposób, że strumień magnetyczny wytworzony przez jedną z nich kojarzy się z drugą następuje sprzężenie magnetyczne. W elementach sprzężonych magnetycznie zachodzi zjawisko przekazywania energii elektrycznej z jednego elementu do drugiego za pośrednictwem pola magnetycznego [2].

Podczas projektowania filtru należy również pamiętać o prawidłowym dobraniu obciążenia i uwzględnieniu faktu występowania rezonansu. Kluczowym parametrem jest transmitancja. Transmitancja jest stosunkiem napięcia wejściowego U_{we} do napięcia wyjściowego U_{wy} . Rezonans natomiast to taki stan pracy obwodu elektrycznego pasywnego, przy którym reaktancja wypadkowa obwodu lub susceptancja wypadkowa jest równa zero [2]. Jeśli nastąpi więc rezonans, napięcie i prąd na zaciskach obwodu są w zgodnej fazie. Admitancja i impedancja zespolona obwodu ma wartość równą zero, więc układ nie pobiera żadnej mocy biernej. Miarą ukazującą rezonans jest częstotliwość rezonansowa.

Drugim głównym elementem modułu jest tłumik przepięć. Wiedzę teoretyczną oparto na analizie wyładowań elektrycznych w gazach oraz scharakteryzowaniu przepięć, na których działanie narażone są układy elektroniczne. Elementarne procesy towarzyszące podczas wyładowania są procesami fizycznymi.

Wyładowanie elektryczne w gazie (dielektryku) następuje wtedy, gdy przepływa przez niego prąd o określonej wartości. Można wyróżnić dwa rodzaje wyładowań: niesamoistne, które zniknie po usunięciu czynników zewnętrznych aktywujące przepływ swobodnych nośników prądu, oraz samoistne, które mimo usunięcia tych czynników zostanie podtrzymane [4]. Ich skutkiem jest pojawianie się, znikanie lub zmiana stanu energetycznego cząstek czynnych. Zachodzą zarówno w objętości gazu, jak i na powierzchni elektrod

czynnych, oraz innych elementach konstrukcyjnych [5]. Cząstki czynne to: cząsteczki lub atomy gazów w stanie równowagi energetycznej, cząsteczki lub atomy wzbudzone, dodatnie i jony, elektrony oraz fotony. Zadaniem tłumika przepięć jest odseparowanie układu od wyładowania i rozproszenie jego energii.

Zastosowanie w układach elektrycznych i elektronicznych urządzeń do ochrony przepięć oznacza zwiększenie liczby elementów elektronicznych. Koniecznym jest zatem badanie i poprawa ich niezawodności na podstawie analizy właściwości ochronnych i testów wysokonapięciowych. Do grupy urządzeń chroniących przed przepięciami należą między innymi iskierniki, odgromniki wydmuchowe, ograniczniki warystorowe, a także dławiki, kondensatory, diody lub inne elementy elektroniczne w różnych konfiguracjach. Ze względu na prostotę budowy, funkcjonalność i możliwość wytworzenia w technologii LTCC w układzie modułu zdecydowano się na umieszczenie tłumika przepięć podobnego w swej budowie do iskiernika.

Konfiguracja wejść i wyjść filtru EMC może być różna. Koniecznym jest wzięcie tego pod uwagę przy pomiarach i zbadanie wszystkich konfiguracji. Innym problemem jest różna wartość impedancji wejściowej i wyjściowej układu. Aktualna wartość impedancji zależy od rodzaju sieci zasilającej obciążenia prądowego, a także od częstotliwości pracy sygnału testowego. Filtrowanie sygnału przez filtr EMC nie jest tak precyzyjne, jak na przykład w przypadku samego filtru dolnoprzepustowego LC. Zadaniem filtru jest dostarczenie wysokiej impedancji dla danego zakresu częstotliwości. Innymi słowy filtr EMC powinien stworzyć warunki maksymalnego niedopasowania impedancji dla niepożądanych wartości częstotliwości przy jednoczesnym maksymalnym dopasowaniu impedancji dla pożądaných wartości częstotliwości [6].

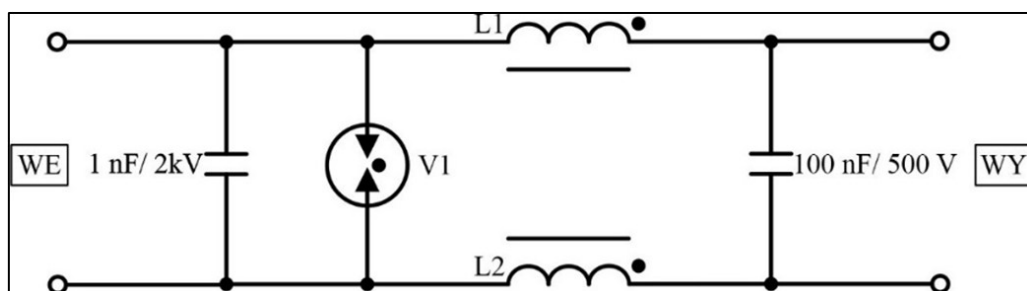
Jednymi z największych zagrożeń bezpieczeństwa i stabilności linii komunikacyjnych i sygnałowych są bez wątpienia wyładowania elektrostatyczne. Tłumiki gazowe GDT jako urządzenia przeciwprzepięciowe do ochrony linii i urządzeń mają cechy silnej obciążalności prądowej i małego prądu upływu. Po impulsie pioruna urządzenia o częstotliwości zasilania są zwarte, co powoduje zjawisko prądu upływu. Może to wpływać na normalną pracę urządzeń, co w konsekwencji prowadzi do ich uszkodzenia. Aby temu zapobiec, należy zbadać charakterystykę prądowo-napięciową danego tłumika oraz zjawisko prądu następczego i zaproponować środki ochrony w celu bezpiecznej pracy urządzeń [7].

2.3. Projekt i wykonanie

Struktury modułów przeciwprzepięciowych zintegrowanych z filtrem przeciwzakłóceniovym zaprojektowano w programie „CorelDraw” i zrealizowano w technologii LTCC (ang. *Low Temperature Cofired Ceramic*). Wiedzę teoretyczną, która została przełożona na praktyczne wykonanie urządzeń zaczerpnięto z pracy [8].

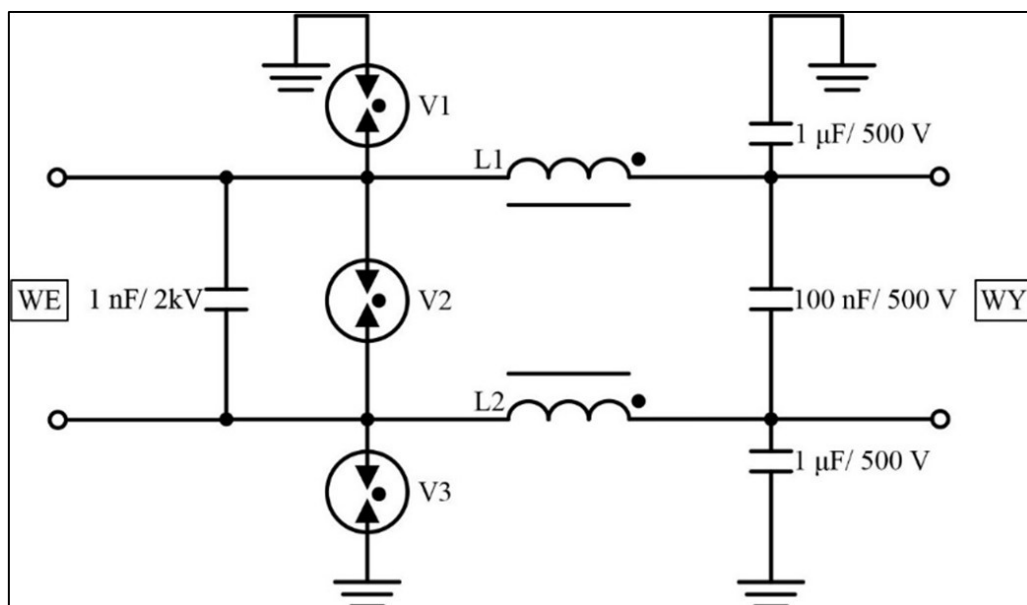
2.3.1. Projekt ideowy

Zaprojektowano dwa rodzaje struktur urządzeń – DC (dwuprzewodowa) i AC (trójprzewodowa). Schematy ideowe zostały pokazane na rysunkach 2.1 i 2.2.



Rysunek 2.1. Schemat ideowy struktury DC

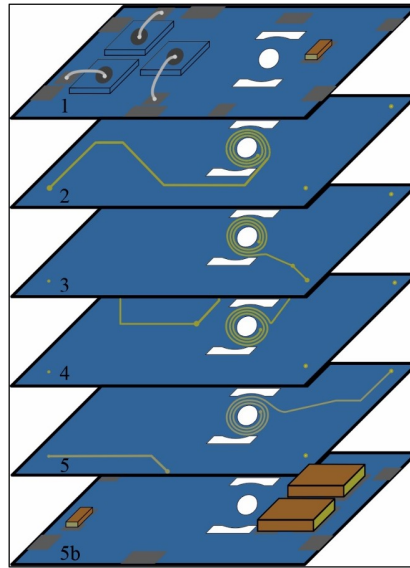
Różnicą między strukturą dwuprzewodową DC (rysunek 2.1) a strukturą trójprzewodową AC (rysunek 2.2) jest zastosowanie dodatkowej linii ochronnej. Każda z linii (L, N, PE) ma swoje własne zabezpieczenie w postaci tłumików przeciwprzepięciowych (V1, V2, V3) i dodatkowo zostały zaimplementowane kondensatory wyjściowe pomiędzy liniami L-PE i N-PE o wartości pojemności $1 \mu\text{F}$ i napięciu znamionowym 500 V.



Rysunek 2.2. Schemat ideowy struktury AC

2.3.2. Projekt technologiczny

Na rysunku 2.3 przedstawiono poglądowy projekt struktury modułu dla wariantu AC. Składa się on z pięciu warstw podłoży wykonanych z folii LTCC, z tym, że ostatnia warstwa (5b) pokazana na rysunku jest w rzeczywistości spodnią częścią piątej warstwy. Pierwotnie wykonano strukturę dla wariantu DC, jednak jest ona uproszczeniem wariantu AC.



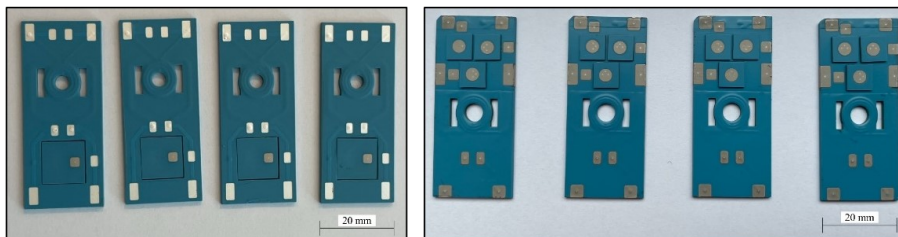
Rysunek 2.3. Poglądowy projekt technologiczny struktury modułu (wariant AC)
– technologia LTCC

2.3.3. Wykonanie struktur

Zostało wykonanych 8 struktur modułów, po 4 dla każdej konfiguracji. Wariant DC jest przedstawiony na rysunku 2.4a. Układ zawiera jeden tłumik przepięć umiejscowiony wewnątrz struktury oraz dwa wyjścia i wejścia linii (+, -). Rysunek 2.4b jest zdjęciem modułów dla wariantu AC. W strukturze zawarte są 3 tłumiki przepięć osadzone na powierzchni urządzenia oraz trzy wejścia i wyjścia (L, N, PE). Każdy z wariantów ma również wycięcie na rdzeń ferromagnetyczny, a także pola lutownicze na dołączenie elementów pasywnych filtra. Tłumiki przepięć w strukturze AC zmniejszono względem struktury DC ze względu na kompensację miejsca na podłożu. Całość procesu technologicznego została opisana w pracy krok po kroku.

Procesy towarzyszące powstawaniu struktur to kolejno:

- 1) zaprojektowanie i wykonanie masek,
- 2) sitodruk,
- 3) laminacja,
- 4) wypalanie.



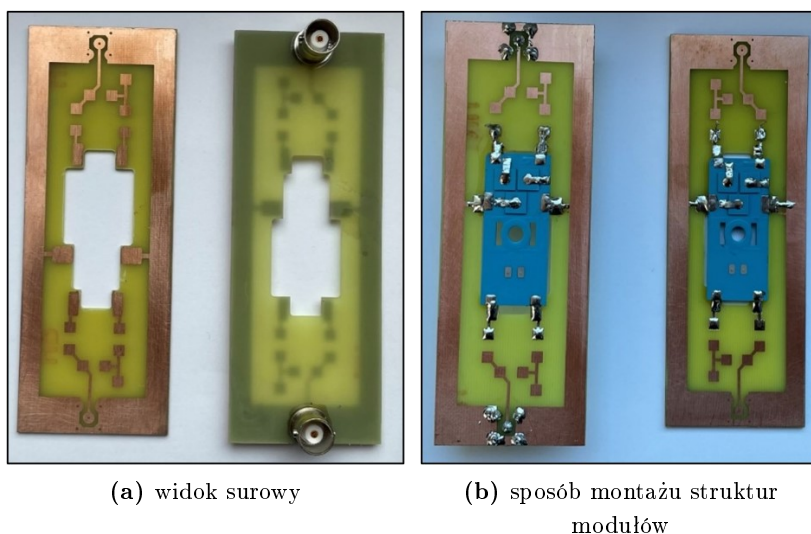
(a) wariant DC

(b) wariant AC

Rysunek 2.4. Struktury modułów przepięć

2.3.4. Płytki pomiarowe

Płytki zaprojektowano w programie „CorelDraw” oraz osadzono maski na laminat miedziany. Na płytki nałożono fotorezyst i wytrawiono gotowe płytki, a następnie wycięto otwory za pomocą obrabiarki CNC. Płytki pomiarowe wytworzono dla każdej struktury w celu uniknięcia wielokrotnego lutowania modułów i wygodnego wykonywania pomiarów. Dzięki różnemu rozmieszczeniu pól lutowniczych możliwe było wykonywanie kilku pomiarów poprzez modyfikację układu, jedynie umieszczając pomiędzy nimi elementy służące do zwierania. Na rysunku 2.5a przedstawiono płytki pomiarowe do pasma przenoszenia (dodatkowo złącze BNC) i tłumienia przepięć, a na rysunku 2.5b przedstawiono sposób montażu struktur na płytkach pomiarowych.



Rysunek 2.5. Płytki PCB do pomiaru pasma przenoszenia i tłumienia przepięć

2.4. Uzyskane wyniki

2.4.1. Pomiar indukcyjności cewek wraz z rdzeniem

W pierwszej kolejności dokonano pomiaru indukcyjności wykonanych cewek oraz obliczono wartość współczynnika sprzężenia magnetycznego z rdzeniem ferromagnetycznym umieszczonym w środku wyciętych otworów. Zmierzono indukcyjność samych cewek oznaczonych jako L_1 i L_2 i kolejno: L_A (indukcyjność dwóch połączonych cewek przy zgodnym strumieniu magnetycznym) oraz L_B (indukcyjność dwóch połączonych cewek przy przeciwnym strumieniu magnetycznym). Pomiarzy zrealizowano za pomocą mostka RLC przy częstotliwości 1 kHz. W tabeli 2.1 przedstawiono wyniki pomiarów dla wersji DC. W tabeli 2.2 przedstawiono wyniki pomiarów dla wersji AC. Wyprowadzenie wzoru na współczynnik sprzężenia k dwóch cewek przedstawiono w pracy.

Tabela 2.1. Wyniki pomiarów (wersja DC)

Próbka	1	2	3	4
L_1 [μH]	10,9	12,88	11,8	13,45
L_2 [μH]	10,78	12,81	11,6	14,2
R_1 [$\text{m}\Omega$]	186	190	182	183
R_2 [$\text{m}\Omega$]	262	229	217	223
L_A [μH]	43,4	52,2	46,5	57,37
L_B [μH]	0,019	0,09	0,02	0,23
k	1	1	0,99	0,98

Tabela 2.2. Wyniki pomiarów (wersja AC)

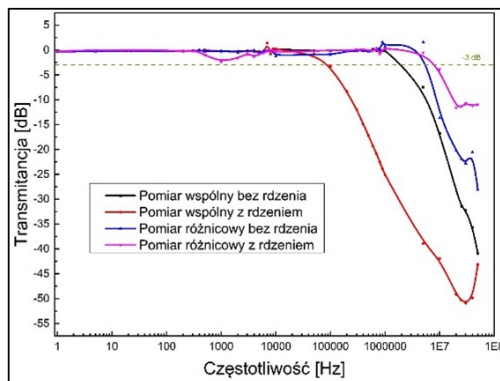
Próbka	1	2	3	4
L_1 [μH]	37,03	36,2	39,2	40,25
L_2 [μH]	37,15	38,3	39,2	40,5
R_1 [$\text{m}\Omega$]	303	290	320	314
R_2 [$\text{m}\Omega$]	319	292	297	296
L_A [μH]	172	164	160	164
L_B [μH]	0,4	0,42	0,41	0,4
k	1	0,99	1	1

2.4.2. Pomiar pasma przenoszenia

Pomiar pasma przenoszenia wykonano dla czterech różnych konfiguracji – układ na podstawie schematu różnicowego wraz z umieszczonym rdzeniem i bez rdzenia, a także układ wspólny w takich samych wariantach pomiarowych. Test miał za zadanie sprawdzić różnicę między szerokością pasma przenoszenia i częstotliwością odcięcia. Filtr ma za zadanie tłumić sygnał w paśmie określonym spadkiem wartości transmitancji o -3 dB.

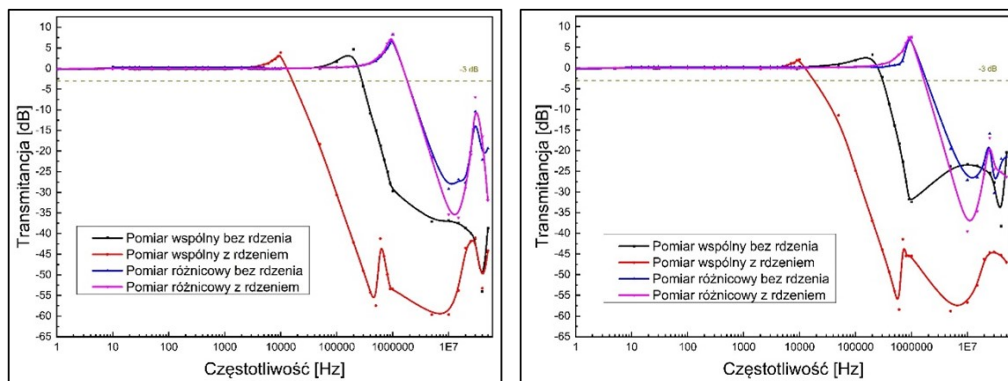
Na rysunku 2.6a przedstawiono charakterystyki pasma przenoszenia dla czterech różnych konfiguracji w celu łatwiejszego porównania ich ze sobą. Linia przerywaną zaznaczona została wartość -3 dB. Punkty przecięcia z charakterystykami zrzucone na oś x stanowią częstotliwość odcięcia (graniczną). Oznacza to, że sygnał od tego momentu zostaje stłumiony powyżej tej wartości. Najszerszy zakres pasma przenoszenia występuje w konfiguracji wspólnej z umieszczonym rdzeniem, od 100 kHz do 50 MHz. Jest tak dlatego, iż strumienie magnetyczne są zgodne, dzięki temu uzyskuje się większą indukcyjność.

Na rysunkach 2.7a i 2.7b przedstawiono charakterystyki pasma przenoszenia dla czterech różnych konfiguracji (oznaczenie AC) kolejno dla próbki 3 i 4. Są do siebie zbliżone. Różnice mogą wynikać z niewielkiego błędu pomiarowego i szumów aparatury (generatora). Oddziaływanie na wyniki ma również umieszczenie samego rdzenia wewnątrz wyciętych otworów.



(a) DC

Rysunek 2.6. Charakterystyki pasma przenoszenia dla próbki DC



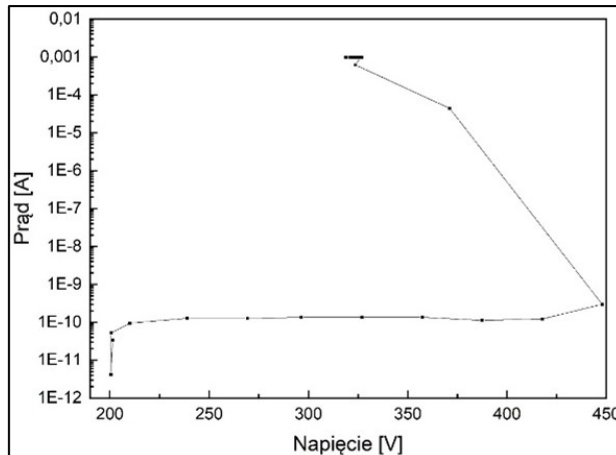
(a) dla próbki 3

(b) dla próbki 4

Rysunek 2.7. Charakterystyki pasma przenoszenia dla próbki AC

2.4.3. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej tłumików przepięć

Celem przeprowadzenia serii pomiarowej było wstępne zbadanie poprawności pracy tłumików przepięć dla dwóch typów struktur, oznaczonych jako AC i DC. Sporządzone zostały charakterystyki I-V w warunkach narostu wartości napięcia stałego. Przykładowa charakterystyka jest pokazana na rysunku 2.8.



Rysunek 2.8. Charakterystyka I-V tłumika przepięć
– przed testami przepięcia z zapaleniem wyładowania łukowego

Badano tłumiki umieszczone w strukturach 1–4 (oznaczone jako A_1 – A_4). Ponadto utworzono 9 dodatkowych tłumików i przeprowadzono taką samą serię pomiarową. Proces ten miał na celu porównanie powtarzalności pomiaru, czyli w tym przypadku wartości napięcia przebicia przed i po wyładowaniu. W tabeli 2.3 zestawiono wyniki pomiarów napięcia przebicia przed i po wyładowaniu. Szczelnie zamknięte struktury mają oznaczenie od A_1 do A_8 , intencjonalnie nieszczelne od B_1 do B_5 . Znak „–” oznacza, że wyładowanie nie nastąpiło dla

zakresu napięcia od 0 V do 1100 V. Rezultaty pomiarów charakteryzują się bardzo dużą rozbieżnością, czego wynikiem są różne odległości szczeliny pomiędzy elektrodami. W każdej strukturze modułu (1–4) znajdują się trzy tłumiki przepięć zapewniające ochronę poszczególnych linii. Zostały one pogrupowane i przedstawione w tabeli 2.4. Wyładowanie może wystąpić między przewodem fazowym a ochronnym (L – G), fazowym a neutralnym (L – N) lub neutralnym a ochronnym (N – G).

Analizując wyniki pomiarów charakterystyki prądowo-napięciowej dla struktury DC, zdecydowano się na zmniejszenie odległości szczeliny i zmodyfikowanie procedury laminacji przez umieszczenie w trakcie laminacji metalowej płytki między dolną a górną warstwą tłumika. Dzięki temu przestrzeń pomiędzy elektrodami była równomierna. Porównując struktury tłumików dla oznaczenia DC i AC, odnotowano znaczącą zmianę. Napięcia przebicia przed wyładowaniem są bardziej do siebie zbliżone. Wartości oscylują w zakresie od około 700 V do około 1000 V.

Tabela 2.3. Wyniki pomiaru charakterystyk I-V tłumików przepięć DC

Tłumik	Napięcie przebicia przed wyładowaniem [V]	Napięcie przebicia po wyładowaniu [V]
A1	738,58	475,18
A2	447,93	–
A3	834,26	–
A4	1015,2	–
A5	418,7	–
A6	446,02	–
A7	476,95	–
A8	400,37	–
B1	446,65	–
B2	537,78	414,3
B3	433,75	–
B4	506,03	–
B5	567,5	–

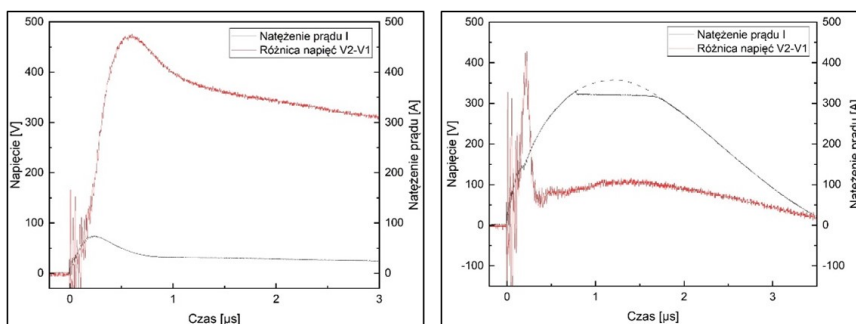
Tabela 2.4. Wyniki pomiaru charakterystyk I-V tłumików przepięć dla struktur AC

Tłumik	Napięcie przebicia przed wyładowaniem [V]	Napięcie przebicia po wyładowaniu [V]
1 (L – G)	806,14	658,89
1 (L – N)	1016,5	628,54
1 (N – G)	717,83	477,9
2 (L – G)	778,79	584,26
2 (L – N)	836,47	628,43
2 (N – G)	658,09	552,13
3 (L – G)	809,02	656,57
3 (L – N)	791,78	715,43
3 (N – G)	746,96	566,8
4 (L – G)	628,61	471,36
4 (L – N)	928,55	416,44
4 (N – G)	749,46	610,5

2.4.4. Pomiar przepięć

Pomiar przepięć wykonywany był w konfiguracji różnicowej. Do zasilacza wysokiego napięcia (HV) szeregowo podłączono rezystor w celu ograniczenia natężenia prądu ładowania kondensatora. Klucz tranzystorowy służył do podania chwilowego impulsu napięcia na układ. Dołożono rezystor pomiarowy, który służył do odczytu wartości prądu płynącego w trakcie wyładowania łukowego w strukturze tłumika przepięć.

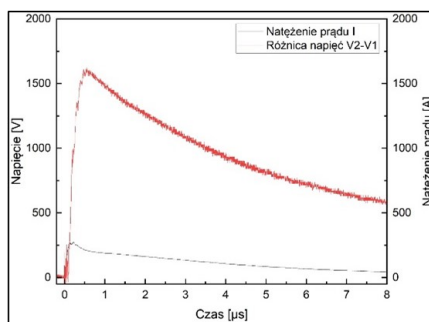
Analiza wszystkich struktur była wykonywana w zakresie od 500 V do 2000 V. Na rysunku 2.9a przedstawiono charakterystykę pomiaru przepięć dla wartości napięcia chwilowego 500 V z podłączonym tłumikiem przepięć. Na rysunku 2.9b przedstawiono charakterystykę pomiaru przepięć dla wartości napięcia chwilowego 1000 V z podłączonym tłumikiem przepięć. W tym przypadku tłumik zadziałał poprawnie i wyładowanie łukowe zostało wygaszone w czasie 3,5 μ s. Jego obrazem jest krzywa przedstawiająca wartość natężenia prądu (350 A). W celu dodatkowego porównania wyników przeprowadzono również serię pomiarową z odłączonym tłumikiem przepięć. Na rysunku 2.10a przedstawiono charakterystykę dla takich samych warunków jak poprzednio z wyjątkiem napięcia chwilowego o wartości 2000 V.



(a) dla wartości napięcia 500 V

(b) dla wartości napięcia 1000 V

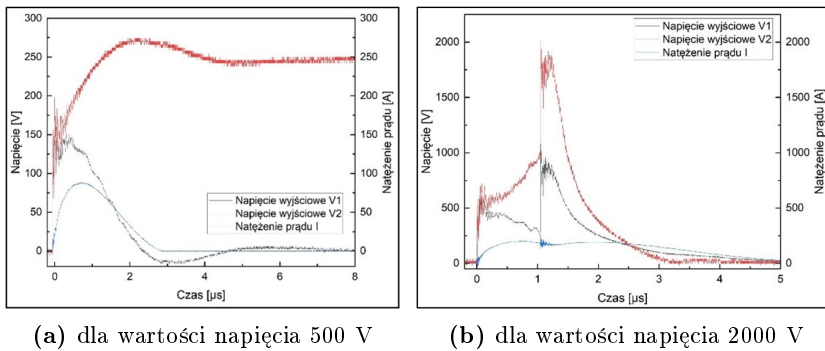
Rysunek 2.9. Charakterystyka pomiaru przepięć bez umieszczonego rdzenia ferromagnetycznego – wariant DC z podłączonym tłumikiem przepięć



(a) dla wartości napięcia 2000 V

Rysunek 2.10. Charakterystyka pomiaru przepięć bez umieszczonego rdzenia ferromagnetycznego – wariant DC z odłączonym tłumikiem przepięć

Analizując wyniki charakterystyk dla modułu oznaczonego jako DC zdecydowano się na pominięcie serii pomiarowej z odłączonymi tłumikami przepięć. W konstrukcji struktury AC zwiększono również liczbę otworów odpowiadających za połączenie elektrod z ich wyprowadzeniami, zapobiegając tym samym przed ich przepaleniem. Na rysunku 2.11a przedstawiono charakterystykę pomiaru przepięć dla wartości napięcia chwilowego 500 V. Żaden z trzech tłumików przepięć nie spowodował zapalenia wyładowania. Na rysunku 2.11b przedstawiono charakterystykę pomiaru przepięć dla wartości napięcia chwilowego 2000 V. Została ona pokazana, aby lepiej zobrazować działanie tłumików przepięć. W tym przypadku zadziały dwa w podobnym czasie i zabezpieczyły wyjście układu. W czasie od 0 do 1 μs wyładowanie zapaliło się w jednym tłumiku, od 1 do 3 μs , wyładowanie zapaliło się w drugim tłumiku. Maksymalny prąd wyniósł około 193 A.

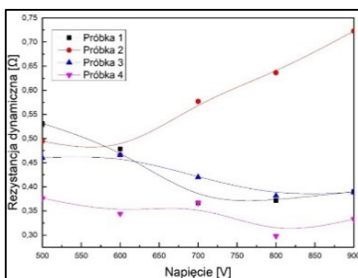


Rysunek 2.11. Charakterystyka pomiaru przepięć z podłączonym tłumikiem przepięć z umieszczonym rdzeniem ferromagnetycznym – wariant AC

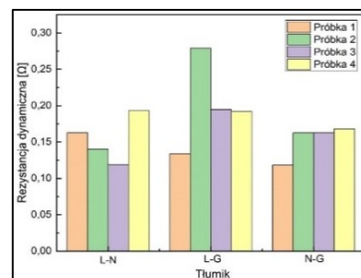
2.4.5. Pomiar poprawności pracy tłumika

Dla struktury oznaczonej przez DC zadawano impulsy napięć od 500 V do 900 V. Na rysunku 2.12 przedstawiono charakterystyki rezystancji dynamicznej od zadanego napięcia. Im mniejsza rezystancja, tym szybciej powinno nastąpić tłumienie przepięcia.

Na rysunku 2.13 przedstawiono diagram słupkowy wskazań rezystancji dynamicznej dla trzech tłumików i czterech próbek. W tym przypadku zdecydowano się na impuls napięcia o wartości 1000 V i takie zestawienie wyników, aby było je łatwiej ze sobą porównać.



Rysunek 2.12. Charakterystyka rezystancji dynamicznej od zadanego napięcia – DC



Rysunek 2.13. Diagram słupkowy rezystancji dynamicznej tłumików przepięć – AC

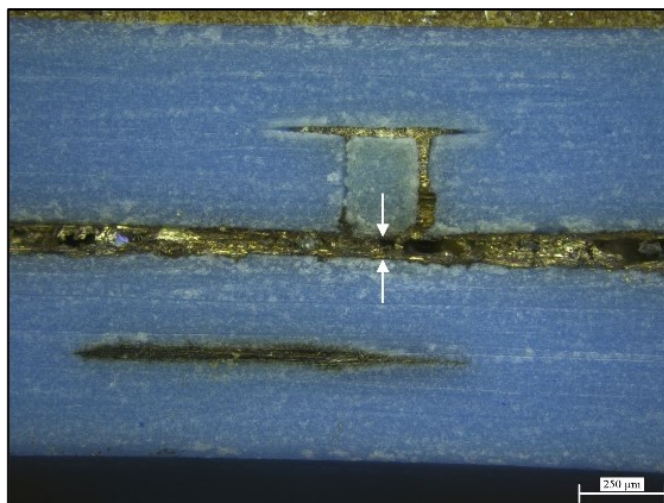
2.4.6. Pomiar wpływu zapalenia wyładowania i pomiar szczeliny między elektrodami

Zadawano impulsy z zakresu napięcia 400—800 V (tłumiki A1—A8, B1—B5). Dla każdej struktury tłumika podano 10 impulsów wykonywanych co 5 sekund. Badano, za pomocą oscyloskopu, czy i ile razy zapali się wyładowanie (tabela 2.5). Można zauważyć bardzo dużą rozbieżność w prezentowanych wynikach. Częściej i od niższych wartości napięcia wyładowanie zapalało się w nieszczelnych strukturach (B1—B5). W szczelnych strukturach wyładowania następowały rzadziej.

Tabela 2.5. Pomiar wpływu zapalenia wyładowania łukowego dla struktury DC

Tłumik	Szczelina [μm]	Napięcie przebicia przed wyładowaniem [V]	Liczba wyładowań dla napięcia			
			400 V	500 V	600 V	700 V
A ₁	101	738,58	0	0	10	10
A ₂	63	447,93	0	4	10	10
A ₃	109	–	–	–	–	–
A ₄	80	–	–	–	–	–
A ₅	66	418,7	2	10	10	10
A ₆	72	446,02	10	10	10	10
A ₇	61	476,95	10	10	10	10
A ₈	51	400,37	0	10	10	10
B ₁	53	446,65	10	10	10	10
B ₂	63	537,78	0	10	10	10
B ₃	54	692,09	8	10	10	10
B ₄	53	506,03	10	10	10	10
B ₅	50	537,35	10	10	10	10

Dodatkowo po wykonanych pomiarach przecięto struktury na pół i za pomocą mikroskopu optycznego zmierzono odległości szczelin pomiędzy elektrodami oraz zestawiono wyniki w tabeli 2.5. Sposób pomiaru został pokazany na rysunku 2.14.



Rysunek 2.14. Sposób pomiaru szczeliny

W tabeli 2.6 przedstawiono wyniki pomiarów wpływu zapalenia wyładowania dla struktury AC. W tym przypadku jedyny tłumik, który można uznać za sprawny, jest opisany jako T₁. Wynikiem tego jest trudność wykonania samych tłumików, a dokładniej procesu łączenia ze sobą poszczególnych połówek struktury. Podczas wypalania, poszczególne warstwy nie stanowią jednolitej płaszczyzny. Konsekwencją tego może być zmniejszenie powierzchni czynnej elektrod lub całkowite jej zakrycie.

Tabela 2.6. Pomiar wpływu zapalenia wyładowania łukowego dla struktury AC

Tłumik	Napięcie przebicia przed wyładowaniem [V]	Liczba wyładowań dla napięcia				
		800 V	900 V	1000 V	1100 V	1500 V
T ₁	869,92	9	10	10	10	10
T ₂	–	–	–	–	–	10
T ₃	–	–	–	–	–	10
T ₄	929,01	–	10	10	10	10
T ₅	889,89	3	7	10	10	10
T ₆	658,49	–	–	–	3	10

2.5. Podsumowanie

Analizując wyniki otrzymanych pomiarów, uzyskuje się odpowiedź na pytanie postawione podczas realizacji tego projektu. Z całą pewnością możliwe jest wykonanie kompatybilnego modułu o niewielkich rozmiarach, chroniącego układy elektroniczne przed zakłóceniami i przepięciami. Z powodzeniem urządzenie może stanowić komponent do montażu powierzchniowego i być stosowane w bardziej skomplikowanych układach, ze wcześniejszym uwzględnieniem warunków pracy, zdefiniowania, dla jakiego pasma ma nastąpić tłumienie sygnałów oraz z jakiego zakresu przepięcia są zagrożeniem dla chronionego układu. Struktury modułów przepięć charakteryzuje ochrona przed zakłóceniami. Z otrzymanych danych wynika, że najszerszy zakres tłumienia zapewnia tryb wspólny sprzężonych ze sobą cewek wraz z rdzeniem ferromagnetycznym. Urządzenie zapewnia również ochronę przeciwprzepięciową, lecz należałoby przeprowadzić więcej badań w tym zakresie. Konstrukcja samego tłumika przepięć jest bardzo prosta, jednakże w zastosowanej technologii napotyka się na problem zachowania jednolitej odległości pomiędzy jego elektrodami. Podczas konstruowania struktury oznaczonej jako AC zastosowano zmiany technologiczne i znacznie poprawiono powtarzalność uzyskiwanych wyników. Konieczne jest przeprowadzenie również pomiarów wpływu zapalenia wyładowania w urządzeniu. Należałoby wykonywać je na rzeczywistych modułach, ponieważ dodatkowo wykonane tłumiki przepięć znacznie odbiegają parametrami od tych osadzonych w strukturze. Projekt podjęty w tej pracy stanowi nowe ujęcie tematu i warto rozważyć jego rozwój w dalszych badaniach naukowych.

Bibliografia

- [1] Golonka L., *Zastosowanie ceramiki LTCC w mikroelektronice*, wydanie pierwsze, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001.
- [2] Bolkowski S., *Teoria obwodów elektrycznych*, wydanie dziesiąte, Wydawnictwa Naukowo-techniczne, Warszawa, 2017.

- [3] Krakowski M., *Elektrotechnika teoretyczna*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1991.
- [4] *Encyklopedia fizyki*, Wydawnictwo Naukowe, PWN, Warszawa, 1974.
- [5] Zdanowski J., *Wytadowania elektryczne w gazach*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1975.
- [6] Ozenbaugh R.L., Pullen T.M., *EMI Filter Design*, wydanie trzecie, CRC Press, Taylor & Francis Boca Raton, Stany Zjednoczone, 2012.
- [7] Xiang N., Gu H., Li K., Cheng L., Yang J., Zhang W., Han C., Yang C., Research on follow-current interruption characteristics of gas discharge tube and protective measures, *Energy Reports* **2022**, 8, s. 1224–1230.
- [8] Dziejczak A., Golonka L., Licznarski B., Morten B., Prudenziati M., *Technika grubowarstwowa i jej zastosowania*, Instytut Techniki Mikrosystemów, Wrocław, 1998.

Sterowanie dronem za pomocą gestów dłoni z wykorzystaniem przetwarzania obrazów

inż. Maciej Kaniewski
Automatyka i Robotyka

dr inż. Wojciech Dowski
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Praca dotyczy projektu aplikacji okienkowej umożliwiającej użytkownikowi sterowanie dronem DJI Ryze Tello za pomocą gestów dłoni. Rozpoznawanie gestów zostało zrealizowane poprzez przetwarzanie obrazu z wbudowanej kamery drona. Użytkownik ma również możliwość wyboru alternatywnego źródła obrazu, którym jest kamera komputera. Procedura rozpoznawania poszczególnych gestów dłoni została wykonana za pośrednictwem zastosowania rozwiązania MediaPipe Hands, które udostępnia interfejs do śledzenia dłoni i palców. Wykrycie wcześniej zdefiniowanych gestów skutkuje wykonaniem przez drona odpowiednich akcji ruchu. Dodatkowo aplikacja została wyposażona w interfejs umożliwiający sterowanie statkiem powietrznym za pomocą przycisków oraz w elementy wyświetlające wybrane parametry drona. Do projektu aplikacji wykorzystano język Python oraz wieloplatformowe oprogramowanie służące do tworzenia graficznych interfejsów użytkownika – Qt, które pozwoliło na integrację wyżej wymienionych funkcjonalności.

3.1. Cel i założenia

Celem pracy było stworzenie aplikacji, która umożliwiałaby sterowanie dronem za pomocą gestów dłoni. Rozpoznawanie gestów zostało zrealizowane poprzez przetwarzanie obrazu z wbudowanej kamery drona lub kamery komputera. Wykrycie poszczególnych gestów skutkuje wykonaniem przez drona odpowiednich akcji ruchu. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- projekt interfejsu graficznego aplikacji,
- implementacja rozpoznawania gestów dłoni,
- sterowanie dronem za pośrednictwem aplikacji,
- integracja funkcjonalności.

3.2. Wstęp teoretyczny

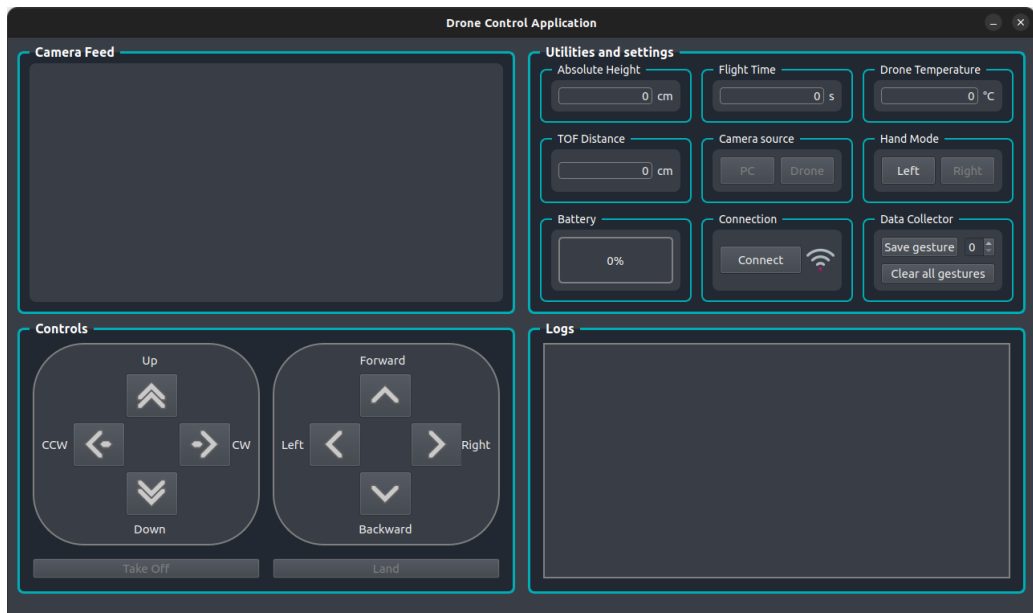
W projekcie wykorzystano drona czterowirnikowego DJI Ryze Tello. Robot ten jest niewielkim dronem czterowirnikowym, który jest przeznaczony do użytkowania w przestrzeniach zamkniętych i otwartych. Niemniej jednak lot w otwartej przestrzeni może być realizowany tylko przy odpowiednich warunkach pogodowych. Dron składa się z kontrolera lotu, systemu wizyjnego pozycjonowania, systemu nagrywania wideo, układu napędowego i zasilania w postaci baterii [1]. Wśród sensorów obecnych na pokładzie drona znajduje się czujnik optyczny, akcelerometr, żyroskop, barometr oraz dalmierz. Sensor optyczny znajduje się w podwoziu statku i oblicza zmianę współrzędnych położenia robota w osi X i Y . Jest to kamera o niskiej rozdzielczości, która wykonuje zdjęcia podłoża i na podstawie różnicy między poszczególnymi klatkami określa współrzędne urządzenia. Czujnik ten umożliwia zarówno obliczenie względnej prędkości drona, jak i realizację przez niego lotu stacjonarnego. Dalmierz również jest usytuowany w podwoziu czterowirnikowca i umożliwia określenie jego wysokości w stosunku do obiektów znajdujących się pod nim. Barometr dostarcza informację o absolutnej wysokości urządzenia. Żyroskop zapewnia stabilizację pojazdu latającego w powietrzu, a z kolei na podstawie odczytów akcelerometru można określić wartość przyspieszeń liniowych.

Podstawowym sposobem sterowania dronem DJI Ryze Tello jest wykorzystanie dedykowanej aplikacji TELLO dostępnej na platformach z systemem Android i iOS. Za pośrednictwem aplikacji można obsługiwać kamerę drona, dokonać konfiguracji samego robota i przysyłać materiały zarejestrowane za pomocą kamery do pamięci swojego urządzenia. W celu wystartowania drona należy uruchomić napędy, które wpychają powietrze w dół, generując tym samym siłę nośną. Jeżeli siła nośna będzie większa od siły grawitacji, dron uniesie się w powietrze. W przypadku, gdy te dwie siły będą się równoważyć, dron będzie utrzymywał stałą wysokość lotu. Aby zrealizować procedurę lądowania, należy odpowiednio zmniejszyć prędkości obrotowe napędów, tak aby zredukować siłę nośną. Wtedy siła grawitacji będzie większa od siły powodującej lot urządzenia. Dron zacznie tracić na wysokości i ostatecznie wyląduje. Pozostałe manewry są realizowane za pośrednictwem odpowiedniego wysterowywania napędów urządzenia.

Producent drona DJI Tello Ryze udostępnia zestaw narzędzi (z ang. *Software Development Kit*, SDK), który umożliwia użytkownikowi na interakcję ze statkiem powietrznym za pośrednictwem komend tekstowych. Połączenie z dronem jest realizowane poprzez port Wi-Fi UDP (z ang. *User Datagram Protocol*, UDP) [2]. Za pomocą biblioteki DJITelloPy stworzonej przez Damià Fuentes Escoté w języku Python na ramach licencji otwartego oprogramowania MIT zrealizowano połączenie i sterowanie dronem DJI Ryze Tello [3]. Biblioteka opiera się na wcześniej opisanym SDK i realizuje enkapsulację narzędzi udostępnianych przez producenta statku powietrznego w postaci zdefiniowanych metod związanych z instancją drona.

3.3. Projekt i wykonanie

Do projektu aplikacji wykorzystano język Python oraz wieloplatformowe oprogramowanie służące do tworzenia graficznych interfejsów użytkownika – Qt. Kod programu był tworzony przy użyciu dedykowanego IDE (z ang. *Integrated Development Environment*) – Qt Creator, które zawiera zintegrowane środowisko przeznaczone do edycji i rozmieszczania graficznych elementów aplikacji. W związku z tym, że to środowisko jest domyślnie stosowane do tworzenia programów w języku C++, konieczne było zastosowanie modułu PySide6, który umożliwił kompilację pliku zawierającego informacje o strukturze interfejsu do pliku w języku Python. Tego samego zabiegu trzeba było dokonać w przypadku pliku, w którym dokonywano definicji wykorzystywanych zasobów w postaci zdjęć. Takim sposobem stworzono aplikację okienkową, która została zaprezentowana na rys. 3.1.

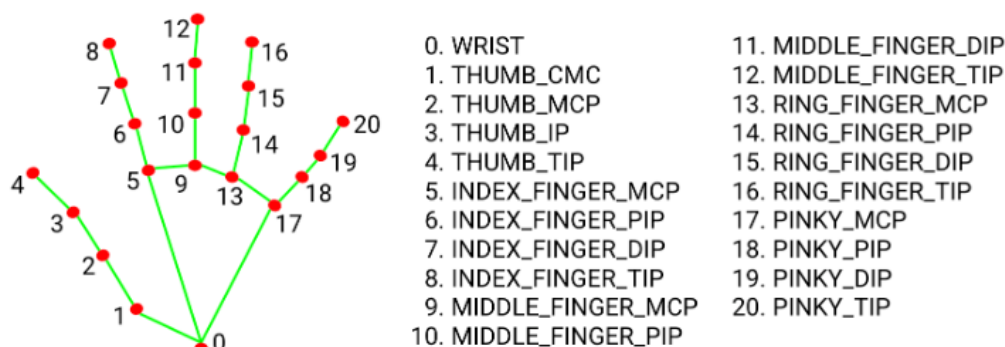


Rysunek 3.1. Interfejs graficzny użytkownika

Okno programu zostało podzielone na cztery części. W pierwszej części jest widoczny obraz z kamery komputera lub po przełączeniu z wbudowanej kamery drona. W następnej sekcji znajdują się odczyty wartości z czujników zainstalowanych na pokładzie drona. Są to odpowiednio wysokość absolutna zwracana przez barometr wyrażona w centymetrach, czas lotu w sekundach, aktualna temperatura statku powietrznego, odległość mierzona przez dalmierz oraz procentowy stan naładowania baterii. Poza tym znajdują się tu przyciski, które umożliwiają użytkownikowi wybór trybu dla osoby praworęcznej lub leworęcznej, połączenie się z dronem oraz zapis współrzędnych gestów. W części dotyczącej sterowania są ulokowane przyciski, które umożliwiają zarówno realizację procedury startu i lądowania drona, jak i wykonanie konkretnych akcji ruchu. Nazwy poszczególnych akcji ruchu zostały umieszczone obok przycisków, które je wywołują. Ostatnią częścią jest okno logów, gdzie wyświetlają się komunikaty o aktualnym statusie danej akcji.

3.3.1. Rozpoznawanie gestów dłoni

Do realizacji tego aspektu zastosowano framework MediaPipe, który oferuje wieloplatformowe rozwiązania wykorzystujące uczenie maszynowe (z ang. *machine learning*) do przetwarzania danych w postaci obrazu wideo [4]. Framework ten wyposażony jest w moduł dedykowany do śledzenia dłoni i palców – MediaPipe Hands [5]. Wspomniany moduł za pośrednictwem uczenia maszynowego znajduje 21 trójwymiarowych punktów orientacyjnych dłoni. Na rysunku 3.2 widnieją poszczególne punkty nanoszone na dłoń.

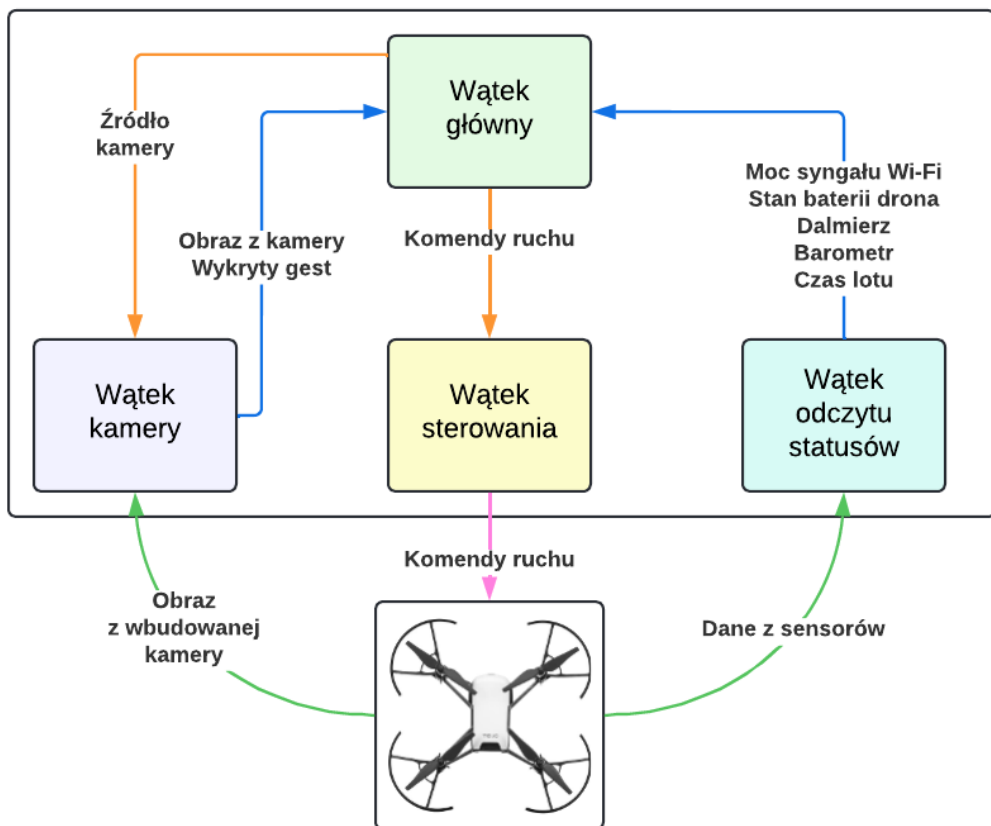


Rysunek 3.2. Punkty orientacyjne dłoni [5]

Pierwszym proponowanym rozwiązaniem w zakresie klasyfikacji gestów dłoni było stworzenie modelu uczenia maszynowego na podstawie dwuwymiarowych współrzędnych poszczególnych punktów orientacyjnych. Za punkt odniesienia przyjęto punkt usytuowany w nadgarstku, którego współrzędnymi X i Y przypisano zerowe wartości. Pozostałe pozycje punktów orientacyjnych były obliczane względem nadgarstka z uwzględnieniem usytuowania układu współrzędnych stowarzyszonego z obrazem z kamery. Budowa modelu była realizowana za pośrednictwem biblioteki TensorFlow, która udostępnia narzędzia do realizacji procesów związanych z uczeniem maszynowym. Niestety otrzymywane rezultaty nie były na tyle satysfakcjonujące, aby wykorzystać je w dalszej części projektu. W przypadku sterowania lotem drona wymagana była wysoka skuteczność rozpoznawania gestów. Finalne rozwiązanie rozpoznawania poszczególnych gestów zostało stworzone na podstawie zliczania aktualnie podniesionych palców dłoni użytkownika. Wykorzystując współrzędne punktów orientacyjnych ręki, zaimplementowano funkcję, która identyfikowała, który z palców jest wysunięty. Aplikacja jest przystosowana do rozpoznawania gestów użytkowników zarówno prawy, jak i leworęcznych. W ramach tego projektu wykorzystano pięć gestów, które następnie powiązano z wykonywaniem poszczególnych akcji ruchu przez drona. W celu identyfikacji gestów należy dokonać porównania wartości zwranych przez funkcję z zdefiniowaną wcześniej konfiguracją. Aplikacja na bieżąco jest w stanie rozpoznawać poszczególne gesty z kamery komputera lub drona, co umożliwia realizację głównego celu tego projektu, czyli sterowania lotem drona za pośrednictwem gestów dłoni.

3.3.2. Architektura systemu

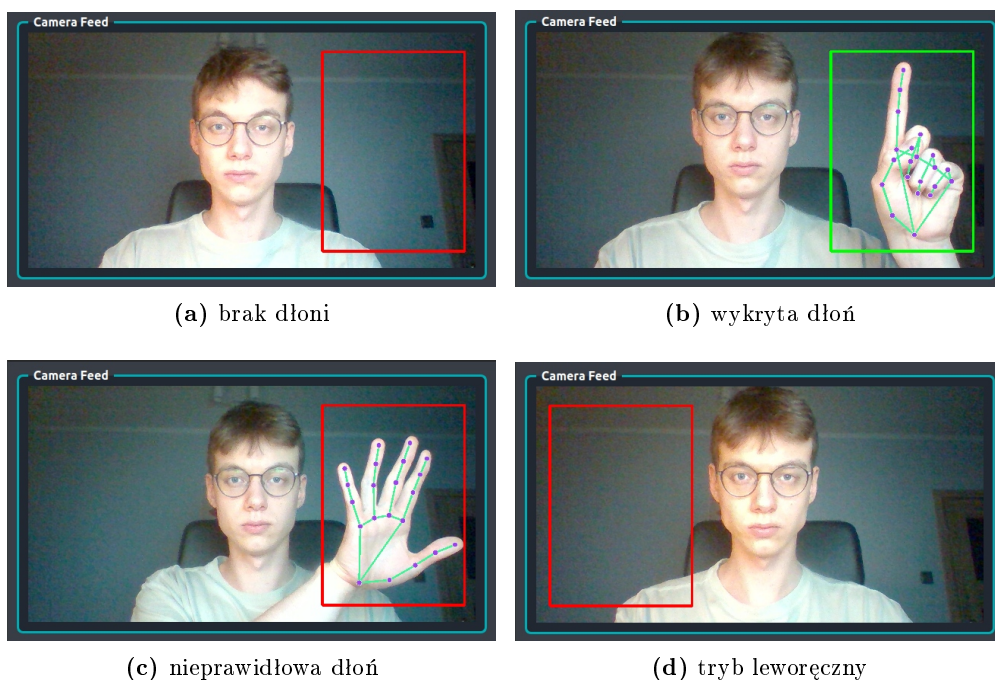
Aplikacja jest obsługiwana przez cztery wątki. Wątek główny odpowiada za aktualizowanie elementów znajdujących się w obrębie interfejsu i wykonywanie stowarzyszonych z nimi akcji. Dodatkowo odbiera dane z wątku obsługującego kamerę oraz odczytu statusów. Następnie, wykorzystując otrzymane informacje, aktualizuje związane z nimi elementy. Interfejs kamery jest uruchamiany wraz z włączeniem programu i odpowiada za wysyłanie obrazu oraz rozpoznanego gestu do głównego wątku aplikacji. W momencie otrzymania sygnału o zmianie źródła obrazu od głównego wątku następuje zakończenie pracy wątku kamery i jego ponowne uruchomienie z uwzględnieniem wybranego źródła wideo. Wątek sterowania startuje wraz z pomyślnym nawiązaniem połączenia z dronem. Następnie odbiera on komendy ruchu od wątku głównego i wysyła je bezpośrednio do statku powietrznego. Komendy ruchu są wysyłane z wątku głównego w momencie wykrycia gestu dłoni lub wciśnięcia przycisku związanego ze sterowaniem. Ostatnim wątkiem jest wątek odczytu statusów, który przekazuje do wątku głównego zestaw informacji. Wśród nich znajduje się moc sygnału Wi-Fi, procentowy stan naładowania baterii drona, wartości zwracane przez dalmierz i barometr oraz czas trwania lotu. Strukturę całego systemu i opisane powyżej funkcjonalności zobrazowano na rys. 3.3.



Rysunek 3.3. Diagram architektury systemu

3.4. Uzyskane wyniki

Wraz z uruchomieniem aplikacji w dedykowanej części pojawia się obraz z kamery komputera, co przedstawiono na rys. 3.4a. W przypadku, gdy taka kamera nie zostanie wykryta, pole to pozostanie puste. Prezentowany obraz bez względu na źródło jest poddawany operacji odwrócenia w poziomie. Już od początku działania programu na obrazie jest widoczny czerwony prostokąt, który sygnalizuje obszar, w którym należy umieścić dłoń w celu jej wykrycia. Domyślnie wyświetla się on po prawej stronie ekranu, co jest zaadaptowane dla praworęcznego użytkownika. Jednak aplikacja jest również dostosowana do potrzeb osób leworęcznych, gdyż w każdej chwili pozycja tego obszaru może zostać przeniesiona na lewą stronę obrazu, co zaprezentowano na rys. 3.4d. W przypadku, gdy użytkownik umieści swoją dłoń w przestrzeni wyznaczonej przez prostokąt, to podświetli się on na zielono, a na dłoni zostaną wyświetlone charakterystyczne punkty połączone linią, co jest widoczne na rys. 3.4b. Gdy w trybie dedykowanym dla osoby praworęcznej w wyznaczonym obszarze zostanie umieszczona lewa dłoń to nie nastąpi zmiana koloru prostokąta, a co za tym idzie, nie wystąpi dalsza analiza uformowanego gestu. Opisowaną sytuację przedstawiono na rys. 3.4c. Program zareaguje w analogiczny sposób, gdy w trybie dla osoby leworęcznej użytkownik umieści w prostokącie prawą dłoń.



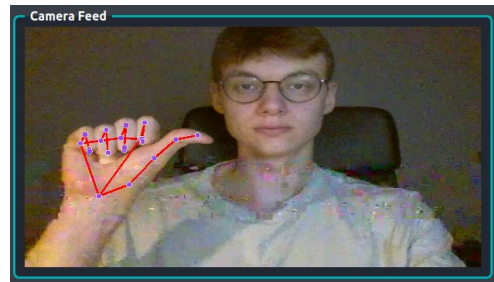
Rysunek 3.4. Kamera komputera jako źródło obrazu

Użytkownik może dokonać zmiany źródła obrazu na kamerę drona. Gdy źródłem obrazu jest wbudowana kamera drona, to gesty są rozpoznawane w całym obszarze obrazu, nie występuje wyznaczone pole, w którym trzeba umieścić dłoń. Wynika to z możliwości wystąpienia potencjalnych trudności z usytuowaniem dłoni w odpowiednim miejscu

podczas przemieszczania się statku powietrznego. W przypadku, gdy obraz jest transmitowany z kamery komputera, taki problem nie występuje, gdyż źródło obrazu nie zmienia swojego położenia. Gdy wideo jest odbierane z kamery drona, również jest obecna obsługa trybów dla użytkowników praworęcznych i leworęcznych. W obu tych trybach w celu wywołania ruchu drona konieczne jest użycie prawidłowej dłoni, to znaczy zgodnej z wybranym trybem. Gdy w obrębie obrazu użytkownik umieści poprawną dłoń, linie łączące charakterystyczne punkty przyjmują kolor zielony, co zostało przedstawione na rys. 3.5a i 3.5c. W momencie usytuowania dłoni niezgodnej z wybranym trybem linie łączące charakterystyczne punkty przyjmą kolor czerwony, co jest widoczne na rys. 3.5b i 3.5d i nie zostanie wykonana żadna akcja ruchu.



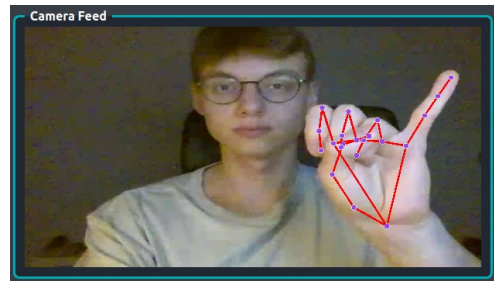
(a) prawidłowa dłoń
w trybie praworęcznym



(b) nieprawidłowa dłoń
w trybie praworęcznym



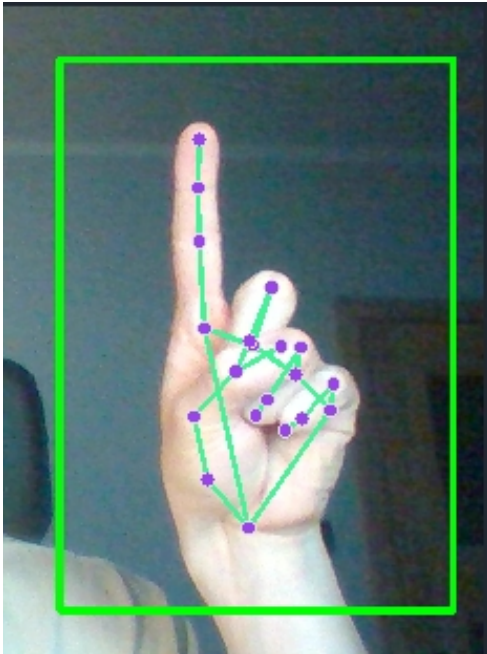
(c) prawidłowa dłoń
w trybie leworęcznym



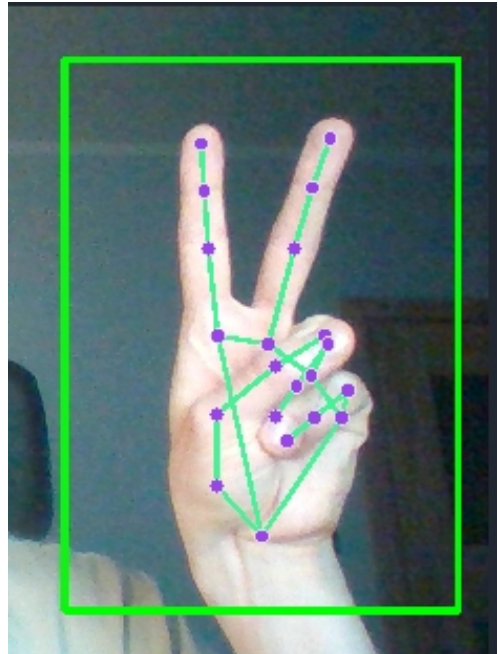
(d) nieprawidłowa dłoń
w trybie praworęcznym

Rysunek 3.5. Kamera drona jako źródło obrazu

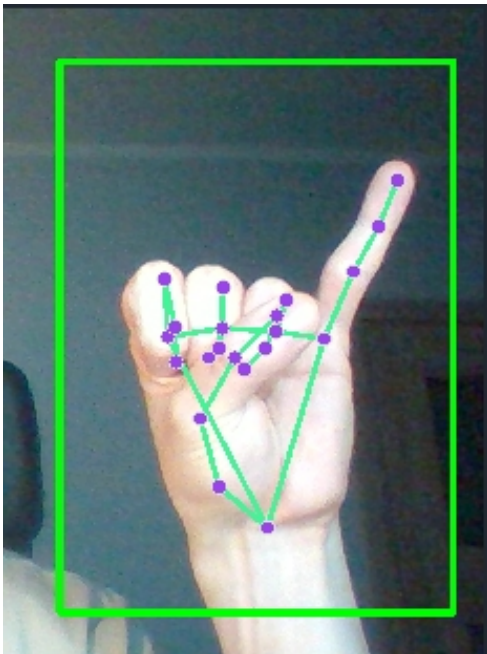
Po pomyślnym starcie robota użytkownik ma możliwość sterowania jego lotem za pośrednictwem przycisków umieszczonych w obrębie aplikacji. Umieszczając dłoń w obszarze wybranej kamery, użytkownik może sterować lotem drona przy użyciu wcześniej zdefiniowanych gestów dłoni. Obsługiwane gesty przedstawiono kolejno na rys. 3.6a–3.6d. Poza nimi rozpoznawany jest również gest otwartej dłoni, który powoduje zatrzymanie drona. Taka konfiguracja funkcjonalności zapewnia użytkownikowi możliwość swobodnego sterowania lotem urządzenia. W celu zakończenia lotu i wylądowania dronem należy wcisnąć przycisk w interfejsie aplikacji, który wywoła tę akcję. Podczas działania aplikacji na bieżąco są aktualizowane i wyświetlane wybrane parametry drona.



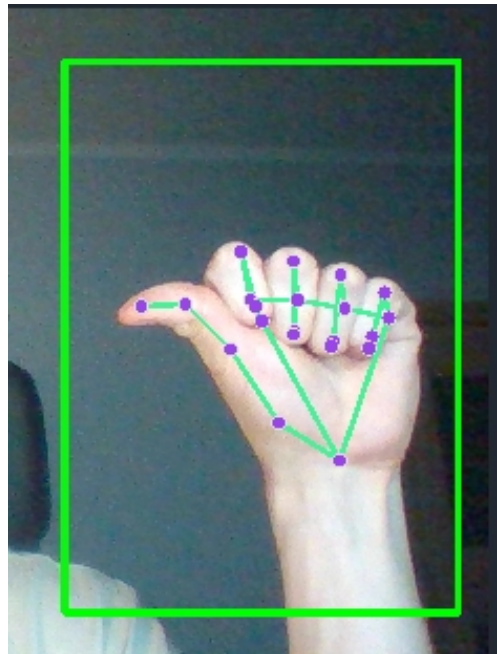
(a) lot w górę



(b) lot w dół



(c) lot w prawo



(d) lot w lewo

Rysunek 3.6. Obsługiwane gesty dłoni

3.5. Podsumowanie

Podczas realizacji aplikacji zmierzono się z problemami, jakie powstały w trakcie implementacji procedury rozpoznawania poszczególnych gestów dłoni. Finalnie pierwsze podejście polegające na stworzeniu własnego modelu uczenia maszynowego okazało się mniej efektywne niż przypuszczano. Gesty nie były jednoznacznie identyfikowane, co było niedopuszczalne w aspekcie sterowania robotem powietrznym. W związku z tym zdecydowano się na wykorzystanie zależności między charakterystycznymi punktami na dłoni i identyfikowanie poszczególnych gestów na podstawie aktualnie podniesionych palców dłoni. To rozwiązanie pozwoliło na płynne rozpoznawanie gestów, a co za tym idzie umożliwiło realizację głównego celu projektu, czyli sterowanie dronem za pomocą gestów dłoni. Podczas sterowania robotem występowały trudności z jego stabilizacją, lotem stacjonarnym w powietrzu. Trudności te wynikały z charakterystyki jednego z systemów obecnych w dronie DJI Ryze Tello. Mowa tu o systemie wizyjnego pozycjonowania, który jest niezwykle wrażliwy na brak odpowiednich warunków oświetleniowych. Zbyt małe natężenie światła zaburzało działanie tego systemu i powodowało brak stabilizacji w powietrzu. W związku z tym loty testowe musiały być wykonywane w sprzyjających warunkach oświetleniowych.

Mimo napotkanych trudności udało się osiągnąć zamierzony cel projektu. W ramach rozwoju aplikacji, która powstała podczas realizacji tej pracy, można zaproponować kilka usprawnień. Jednym z nich byłoby zdefiniowanie większej liczby rozpoznawanych gestów. Dodatkowo można zwiększyć poziom pewności wykrywanych gestów, a co za tym idzie – bezpieczeństwo aplikacji. Można to zrealizować poprzez dodanie specjalnego obszaru usytuowanego obok twarzy użytkownika w trybie, gdzie źródłem obrazu jest kamera drona. Podobna funkcjonalność jest dostępna w trybie kamery z komputera, jednak w przypadku dynamicznie zmieniającego się obrazu z kamery drona wymagałoby to implementacji rozpoznawania twarzy i wyrysowywania wydzielonego obszaru. Dodatkowo można rozszerzyć interfejs użytkownika o informacje o pozostałych parametrach drona. Aplikacja mogłaby zostać rozwinięta o możliwość wykonywania zdjęć i nagrywania filmów kamerą drona.

Bibliografia

- [1] Tello User Manual. Dostępny online: <https://dl-cdn.ryzerobotics.com/downloads/Tello/Tello%20User%20Manual%20v1.4.pdf> (dostęp: 31-03-2023).
- [2] Tello SDK 2.0 User Guide. Dostępny online: <https://dl-cdn.ryzerobotics.com/downloads/Tello/Tello%20SDK%202.0%20User%20Guide.pdf> (dostęp: 31-03-2023).
- [3] DJITelloPy. Dostępny online: <https://github.com/damiafuentes/DJITelloPy> (dostęp: 31-03-2023).
- [4] MediaPipe. Dostępny online: <https://google.github.io/mediapipe/> (dostęp: 31-03-2023).
- [5] MediaPipe Hands. Dostępny online: <https://google.github.io/mediapipe/solutions/hands> (dostęp: 31-03-2023).

Budowa małego mobilnego robota laboratoryjnego klasy (1,2)

inż. Tomasz Lubelski

Automatyka i Robotyka

dr inż. Robert Muszyński

Katedra Cybernetyki i Robotyki

W omawianej pracy przedstawiono proces budowy małego mobilnego robota laboratoryjnego klasy (1,2), pozwalającego na badanie algorytmów sterowania za pomocą dedykowanego interfejsu zdalnego sterowania. Opisywana konstrukcja składa się z dwóch dwukołowych modułów połączonych przegubami o nieograniczonym obrocie, co umożliwia wypróbowanie nietypowych sposobów jazdy. Zakres prac obejmuje projekt i wykonanie konstrukcji mechanicznej, projekt i wykonanie układów elektronicznych, opracowanie programu dla zastosowanych mikrokontrolerów oraz przygotowanie interfejsu sterowania robotem. Cel pracy został osiągnięty. Wykonany został robot klasy (1,2), spełniający założenia projektu. W przyszłości robot powinien posłużyć do przeprowadzania badań w obszarze algorytmów sterowania robotów mobilnych. Może także zostać wykorzystany jako stanowisko do przeprowadzania ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów.

4.1. Cel i założenia

Celem pracy jest skonstruowanie niedużej platformy mobilnej klasy (1,2) umożliwiającej badanie własności algorytmów sterowania. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- przegląd konstrukcji robotów mobilnych klasy (1,2),
- analiza możliwych konfiguracji pracy robota – zmiany klasy,
- dobór napędu robota uwzględniający zmiany klasy,
- projekt i wykonanie konstrukcji mechanicznej, układów elektronicznych oraz oprogramowania wbudowanego,
- opracowanie interfejsu sterowania robota,
- testy funkcjonalne,
- badanie własności konstrukcji.

4.2. Wstęp teoretyczny

Roboty mobilne można podzielić na klasy ze względu na liczbę niezależnie napędzanych i niezależnie sterowanych kół. Klasy te mają różny stopień trudności w sterowaniu. Najłatwiejsze do sterowania są roboty klasy (2,0), kolejno można ustawić roboty klasy (1,1), a za najtrudniejsze uznaje się roboty klasy (1,2).

4.2.1. Opis metodyki modelowania

Aby opisać kinematykę robota mobilnego, należy określić wektor współrzędnych uogólnionych $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T \in \mathbb{R}^n$, gdzie n jest wymiarem przestrzeni konfiguracyjnej oraz prędkości $\dot{\mathbf{q}} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)^T \in \mathbb{R}^n$. Na ruch robota nakładamy ograniczenia (więc-zy) wynikające zazwyczaj z założenia o braku poślizgu poprzecznego i wzdłużnego kół. Następnie formułujemy je w postaci Pfaffa (równanie (4.1)) z macierzą $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ o rozmiarze $l \times n$, gdzie l oznacza liczbę niezależnych ograniczeń.

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (4.1)$$

Kolejny etap to wyznaczenie modelu bezdryfowego układu sterowania w postaci równania (4.2) o wektorze sterowań $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$, $m = n - l$, gdzie macierz $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ wyznaczana jest z zależności (4.3), co oznacza, że tworzące macierz wektory $g_i \in \ker \mathbf{A}(\mathbf{q})$, $i = 1, \dots, m$. Opracowano na podstawie [1].

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{G}(\mathbf{q})\mathbf{u} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (4.3)$$

4.2.2. Sterowanie robotem klasy (1,2)

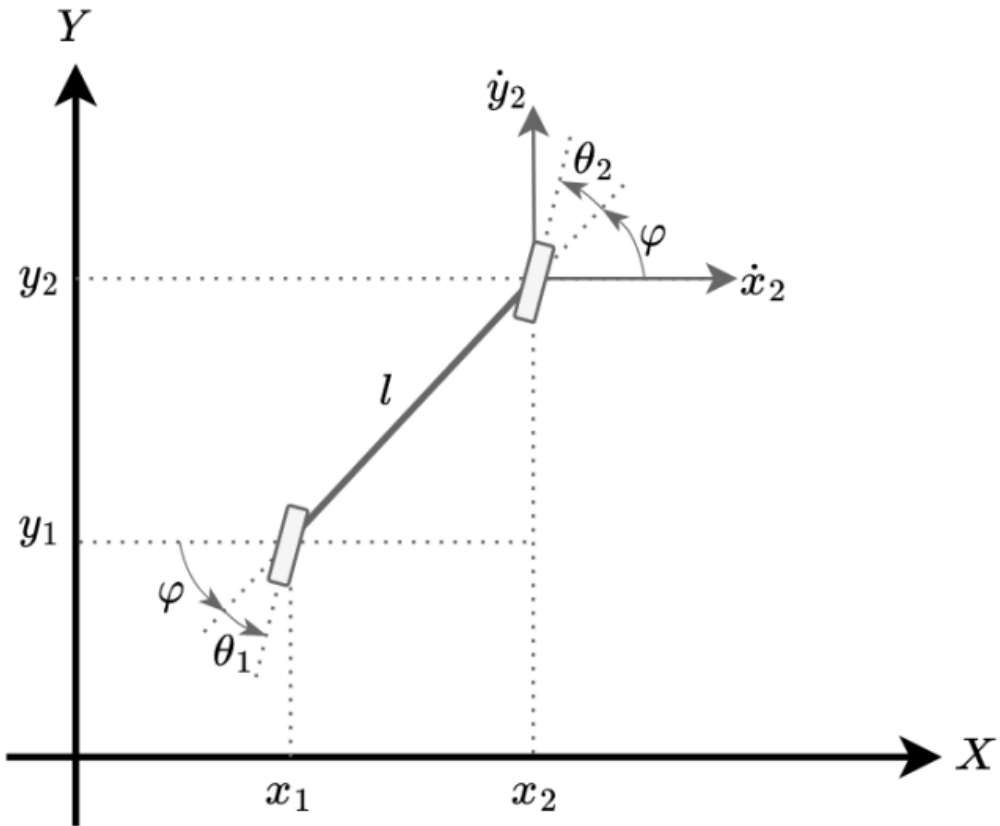
Robot klasy (1,2) (rysunek 4.1) jest wyposażony w dwa koła niezależnie sterowane i jedno koło niezależnie napędzane. Korzystając z oznaczeń na rysunku, można wyznaczyć ograniczenie na brak poślizgu poprzecznego koła pierwszego (równanie (4.4)) oraz na brak poślizgu koła drugiego (równanie (4.5)).

$$\dot{x}_1 \sin(\varphi + \theta_1) - \dot{y}_1 \cos(\varphi + \theta_1) = 0 \quad (4.4)$$

$$\dot{x}_2 \sin(\varphi + \theta_2) - \dot{y}_2 \cos(\varphi + \theta_2) = 0 \quad (4.5)$$

Przyjmując wektor konfiguracji robota w postaci $\mathbf{q} = (x, y, \varphi, \theta_1, \theta_2)^T$ z $x = x_1$ i $y = y_1$, możemy zapisać oba ograniczenia za pomocą następującej macierzy Pfaffa (równanie (4.6)):

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \sin(\varphi + \theta_1) & -\cos(\varphi + \theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi + \theta_2) & -\cos(\varphi + \theta_2) & -l \cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$



Rysunek 4.1. Robot klasy (1,2)

Wybierając trzy wektory $g_1(q), g_2(q), g_3(q) \in \ker \mathbf{A}(q)$ w postaci

$$g_1(q) = (l \cos(\varphi + \theta_1) \cos \theta_2, l \sin(\varphi + \theta_1) \cos \theta_2, \sin(\theta_2 - \theta_1), 0, 0)^T$$

$$g_2(q) = (0, 0, 0, 1, 0)^T$$

$$g_3(q) = (0, 0, 0, 0, 1)^T$$

otrzymujemy układ sterowania (4.2) w postaci (4.7).

$$\begin{cases} \dot{x} = u_1 l \cos(\varphi + \theta_1) \cos \theta_2 \\ \dot{y} = u_1 l \sin(\varphi + \theta_1) \cos \theta_2 \\ \dot{\varphi} = u_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ \dot{\theta}_1 = u_2 \\ \dot{\theta}_2 = u_3 \end{cases} \quad (4.7)$$

gdzie $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ – wektor sterowań układu bezdryfowego.

4.3. Projekt i wykonanie

W ramach prac na robotem zaprojektowano i wykonano plastikowe elementy konstrukcji mechanicznej, zaprojektowano i wykonano dedykowane płytki PCB, napisano oprogramowanie wsadowe dla zastosowanych mikrokontrolerów, a także opracowano interfejs zdalnego sterowania. Ukończona konstrukcja została zaprezentowana na rysunku 4.2.

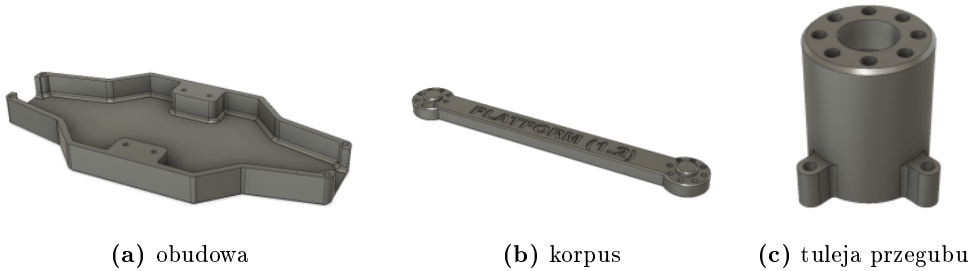


Rysunek 4.2. Ukończona konstrukcja robota

4.3.1. Konstrukcja mechaniczna

Robot mobilny klasy (1,2) może zostać zamodelowany jako połączone ze sobą dwa monocykle (klasy (2,0)). Opisywana konstrukcja została jednak zrealizowana poprzez połączenie ze sobą dwóch platform (2,0). Tym sposobem przy zastosowaniu napędu różnicowego można uzyskać ten sam sposób sterowania jak w pierwszym przypadku, lecz przy braku problemów ze stabilnością w czasie jazdy. Robot został podzielony na dwa moduły posiadające własny napęd oraz zasilanie. Połączone one zostały ogniwem zwanym dalej korpusem, zamocowanym na swobodnie obracających się przegubach. Napęd robota stanowią cztery zespolone z przekładniami szczotkowe silniki prądu stałego. W skład pojedynczego modułu robota wchodzi:

- płytka drukowana z elektroniką,
- para silników z zamontowanymi kołami,
- łożyskowana tuleja przegubu,
- kulki podporowe typu caster,
- pokrywa spodnia.



Rysunek 4.3. Trójwymiarowe modele zaprojektowanych części

Elementy takie jak korpus, tuleje przegubów oraz pokrywa (rysunek 4.3) wykonane zostały w technologii druku 3D typu FDM, a użyty materiał to poliaktyd (PLA) w kolorze czarnym.

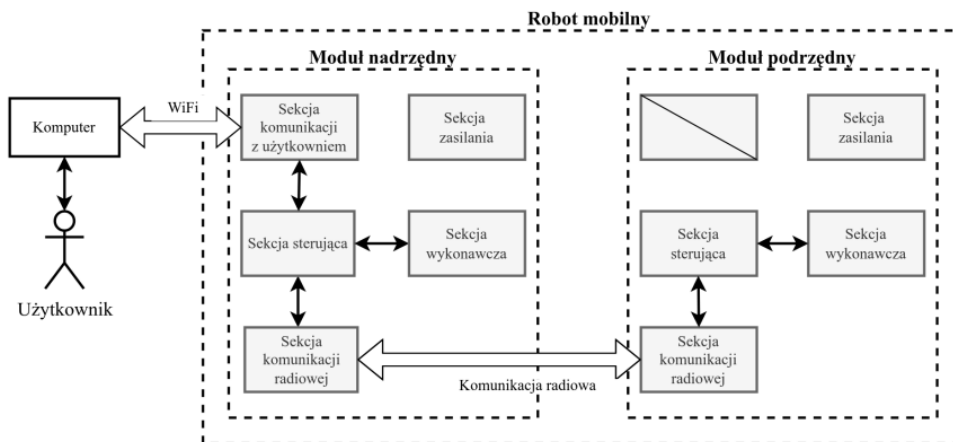
Aby umożliwić testowanie na robocie algorytmów sterowania dla różnych klas robotów mobilnych, przewidziano możliwość szybkiej zmiany klasy robota. Można wyróżnić następujące możliwe konfiguracje robota:

- żadna z osi nie jest zablokowana – klasa (1,2),
- zablokowany jest jeden moduł z osią obrotu kół prostopadle do korpusu – klasa (1,1) (*samochód kinematyczny*),
- zablokowane są oba moduły z osiami kół równoległymi do korpusu – klasa (2,0) (*monocykl*),
- zablokowane są oba moduły z osiami obrotu kół prostopadle do korpusu – platforma wielokołowo-ślizgowa typu *skid-steering*,
- zablokowany jeden lub oba moduły pod kątem $\pm 45^\circ$ względem korpusu.

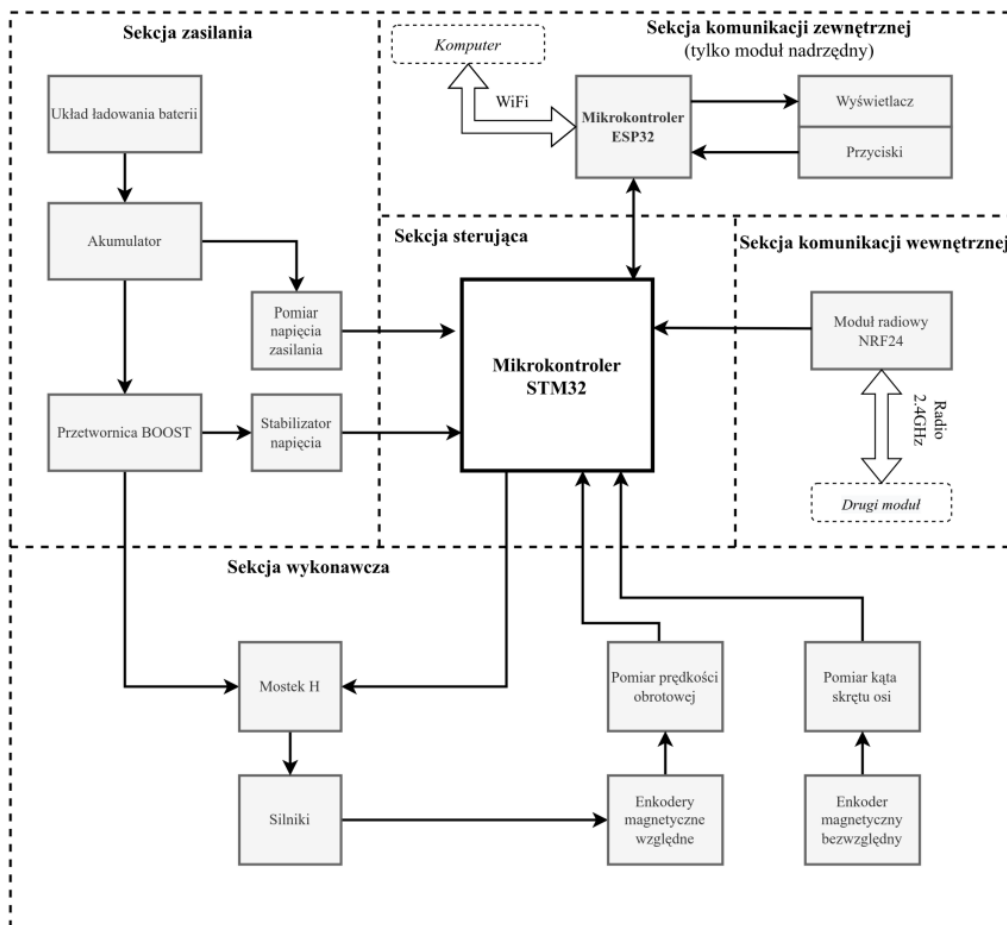
4.3.2. Układy elektroniczne

W związku z tym, że konstrukcja mechaniczna robota została podzielona na dwa niezależne, prawie identyczne moduły (rysunek 4.4), układy elektroniczne robota rozmieszczono na dwóch identycznych płytkach drukowanych. Każdy moduł poza kontrolowaniem własnych układów wykonawczych uczestniczy także w wymianie informacji zgodnie z ustaloną hierarchią. Pojedynczy moduł robota podzielony został na następujące sekcje (rysunek 4.5) powiązanych ze sobą układów elektronicznych:

- sterująca,
- komunikacji zewnętrznej (tylko moduł nadrzędny),
- komunikacji wewnętrznej,
- wykonawczą,
- zasilania.



Rysunek 4.4. Diagram podziału robota na moduły



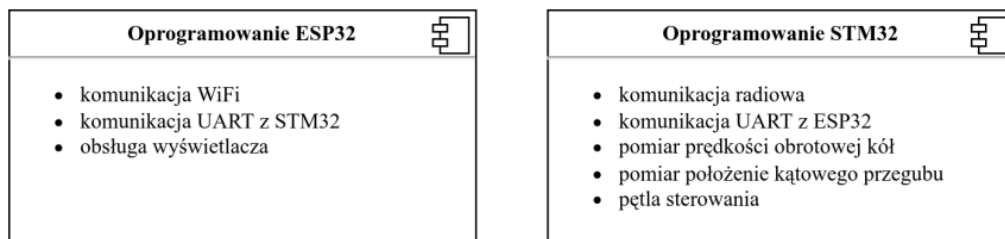
Rysunek 4.5. Diagram podziału modułu na sekcje

Sekcja sterująca realizuje zadanie sterowania sekcją wykonawczą oraz wymiany danych z sekcjami komunikacyjnymi. W skład zadania sterowania wchodzi przetwarzanie danych z czujników oraz regulacja prędkości obrotowej kół. Sekcja komunikacji zewnętrznej umożliwia zdalne zadawanie sterowania poprzez komunikację WiFi. Dodatkowo wyposażona została w wyświetlacz w celu informowania o stanie robota, w tym napotkanych błędach. Sekcja komunikacji wewnętrznej umożliwia dwukierunkową komunikację pomiędzy modułami robota. Zastosowanie łączności bezprzewodowej pozwala na nieograniczony obrót modułów robota wokół własnej osi. Sekcja wykonawcza modułu robota poprzez mostek H pozwala na sterowanie kierunkiem oraz prędkością obrotową kół. W celu przekazania do sekcji sterującej informacji zwrotnej o prędkości obrotowej kół oraz o aktualnej rotacji modułu względem korpusu zastosowano enkodery magnetyczne względne oraz absolutne. Sekcja zasilania jest zasadniczym elementem każdego układu elektronicznego. W opisywanym robocie zastosowano zasilanie akumulatorowe wraz z układem ładowania, zabezpieczeniem nadprądowym oraz układem monitorowania stanu naładowania. Zaprojektowana przetwornica oraz stabilizator liniowy dostarczają odpowiednich napięć do pozostałych sekcji układu elektronicznego robota.

4.3.3. Oprogramowanie wbudowane

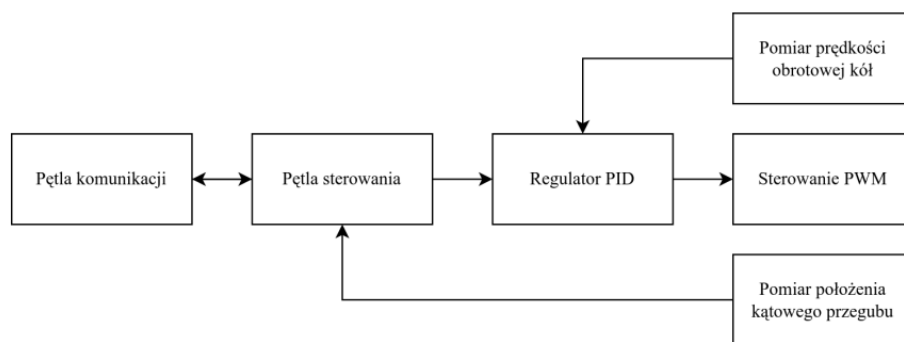
Oprogramowanie robota składa się z dwóch części (rysunek 4.6). Podział ten wynika z zastosowania dwóch współpracujących ze sobą platform programowalnych. Pierwszą z nich jest program mikrokontrolera STM32 [2] będącego centralnym elementem sekcji sterującej modułu robota, a druga to program mikrokontrolera ESP32 [3] realizującego zadanie komunikacji z użytkownikiem poprzez wyświetlacz oraz łączność WiFi.

Oprogramowanie mikrokontrolera STM32 zostało napisane w języku C++ przy użyciu oficjalnej sprzętowej warstwy abstrakcji (HAL) oraz dedykowanego konfiguratora graficznego STM32CubeMx [4]. W celu obsługi układów podłączonych do mikroprocesora napisano sterowniki umożliwiające nałożenie warstwy abstrakcji nad komunikacją sprzętową i innymi operacjami niskiego poziomu.



Rysunek 4.6. Diagram podziału oprogramowania

Pętla sterowania robotem została zaprezentowana na rysunku 4.7. Po odebraniu pakietu zawierającego zadane sterowanie wyzwalana jest zmiana stanu pętli sterującej na odpowiedni rodzaj sterowania. Kolejno w każdym obiegu pętli sterowania pomiary z enkoderów podawane są na wejścia regulatorów PID, za pomocą których wyliczane są wartości wypełnienia sygnału PWM silników.



Rysunek 4.7. Diagram pętli sterowania

Głównym zadaniem mikrokontrolera ESP32 jest wymiana danych między interfejsem programowania robota uruchomionym na komputerze osobistym przy użyciu łączności bezprzewodowej WiFi. Na mikrokontrolerze uruchomiony został serwer sieciowy udostępniający gniazdo sieciowe w protokole WebSocket. Poprzez gniazdo przesyłane są polecenia sterowania, zapytania o stan robota oraz informacje zwrotne w formie pliku JSON. Kolejno w pętli głównej odbierane struktury są wysyłane do mikrokontrolera STM32 za pomocą komunikacji szeregowej UART. W przypadku odbierania informacji zwrotnej z mikrokontrolera STM32 dane o stanie robota są wysyłane gniazdem z powrotem do interfejsu programowania robota.

4.3.4. Interfejs zdalnego sterowania

Interfejs sterowania robota został zrealizowany w formie biblioteki języka Python [5]. Język ten jest szeroko stosowany w różnego rodzaju badaniach ze względu na mnogość dostępnych bibliotek pozwalających na wykonywanie obliczeń numerycznych. Dzięki temu zarówno algorytmy planowania ruchu, jak i sterowania robotem mogą zostać zaimplementowane w postaci jednego skryptu w języku Python.

4.4. Uzyskane wyniki

Wykonany został robot klasy (1,2) składający się z dwóch modułów będących platformami mobilnymi klasy (2,0). Zaprojektowana konstrukcja mechaniczna zapewnia odpowiednią sztywność i umożliwia stabilną jazdę robota po płaskiej powierzchni. Uruchomienie układu elektronicznego robota przebiegło pomyślnie, nie były wymagane żadne poprawki. Oprogramowanie wbudowane robota oraz zastosowany sposób komunikacji bezprzewodowej umożliwia realizację zadanego sterowania z akceptowalnymi opóźnieniami. Dzięki opracowanemu interfejsowi sterowania użytkownik ma możliwość zadawania parametrów jazdy za pomocą skryptu w języku Python. Zaimplementowany mechanizm zmian klasy pozwala na badanie algorytmów sterowania nie tylko dla tytułowej klasy (1,2), lecz także dla konfiguracji samochodu kinematycznego czy dwukółki. Możliwości zdalnego planowania ruchu i sterowania robotem w czasie rzeczywistym zostały przetestowane poprzez program realizujący „ósemkę”.

4.5. Podsumowanie

Celem pracy było skonstruowanie małego robota laboratoryjnego klasy (1,2). Zaprojektowano i wykonano konstrukcję mechaniczną robota, zaprojektowano i wykonano dedykowane układy elektroniczne, napisano program dla zastosowanych mikrokontrolerów oraz opracowano interfejs sterowania robotem. Można stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty. Zbudowana konstrukcja i oprogramowanie sterujące spełniają założenia projektowe. W przyszłości robot powinien posłużyć do przeprowadzania badań w obszarze algorytmów sterowania robotów mobilnych. Może także zostać wykorzystany jako stanowisko do przeprowadzania ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów. Możliwy jest dalszy rozwój projektu np. przez dodanie do oprogramowania robota możliwości współpracy ze środowiskiem ROS2 [6] za pomocą interfejsu microROS.

Bibliografia

- [1] Tchoń K., Muszyński R., *Mechanika analityczna. Notatki do wykładów z dziedziny automatyki i robotyki*, Katedra Cybernetyki i Robotyki, Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska, 2018.
- [2] ST Microelectronics, Nota katalogowa mikrokontrolera STM32L151CBT6A. Dostępny online: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l151cb.html> (dostęp: 29-03-2023).
- [3] Espressif, Nota katalogowa mikrokontrolera ESP32. Dostępny online: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (dostęp: 29-03-2023).
- [4] ST Microelectronics, Strona internetowa oprogramowania STM32CubeMx. Dostępny online: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> (dostęp: 29-03-2023).
- [5] Van Rossum G., Drake F.L., Python 3 Reference Manual. CA CreateSpace: Scotts Valley, 2009.
- [6] Strona internetowa środowiska ROS2. Dostępna online: <https://www.ros.org/> (dostęp: 29-03-2023).

Analiza wpływu wygrzewania na właściwości powierzchni i gazochromowe cienkich warstw tlenku wolframu

mgr inż. Wiktoria Weichbrodt
Elektronika i Telekomunikacja

dr hab. inż. Michał Mazur, prof. uczelni
Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej

W nadchodzącej erze energii wodorowej opracowanie wysokowydajnych czujników wodoru ma ogromne znaczenie dla zdrowia ludzkiego i ochrony środowiska. Mimo wielu zalet wodoru jako źródła energii istnieje duże niebezpieczeństwo związane z użytkowaniem energii wodorowej, wynikające z bezbarwności, bezwonności oraz niskiej granicy wybuchowości wodoru. Potencjalne rozwiązanie problemu mogą stanowić tlenki metali o właściwościach chromowych, szczególnie trójtlenek wolframu (WO_3). Jest to bezbarwny półprzewodnik wykazujący właściwości gazochromowe w obecności wodoru, co jest istotne w zastosowaniach czujnikowych. W pracy przedstawiono wyniki analizy właściwości powierzchni strukturalnych i optycznych cienkich warstw tlenku wolframu wytworzonych metodą parowania wiązką elektronową i wygrzewanych w temperaturze od 200 °C do 800 °C. Proces wygrzewania spowodował zmianę morfologii badanych warstw WO_3 , co wpłynęło na parametry użytkowe warstw, m.in. czułość sensora. Stwierdzono, że najlepszymi właściwościami gazochromowymi charakteryzują się warstwy wygrzewane w temperaturze 400 °C ze względu na największą zmianę transmisji pod wpływem wodoru.

5.1. Cel i założenia

Celem pracy była analiza wpływu modyfikacji poprocesowej, tj. wygrzewania, na właściwości gazochromowe warstw WO_3 , które mogłyby służyć do zastosowań czujnikowych. Zjawisko gazochromowe wykorzystywane jest w czujnikach do pomiaru stężeń gazów, jednakże ciągle dąży się do poprawy parametrów takich czujników. Wygrzewanie warstw może korzystnie wpłynąć na pracę czujników gazu, co zapewni zwiększenie bezpieczeństwa ludzi narażonych na kontakt z wodorem. Główne założenia projektowe realizowane w pracy to:

- naniesienie warstw tlenku wolframu na podłoża oraz ich wygrzewanie,
- wykonanie pomiarów właściwości powierzchni, strukturalnych i optycznych otrzymanych warstw,
- naniesienie katalizatora na warstwy WO_3 ,
- wykonanie pomiarów właściwości gazochromowych otrzymanych warstw bez oraz z katalizatorem,
- porównanie wyników z danymi literaturowymi.

5.2. Wstęp teoretyczny

Wodór jest obiecującym, czystym i bardzo wydajnym źródłem energii. Jednakże, aby bezpiecznie używać łatwopalnego gazu H_2 , wymagane są wydajne i bezpieczne czujniki [1]. Wraz z postępem w dziedzinie czujników na bazie tlenków metali coraz większą wagę przywiązuje się do czujników optycznych [2]. Aktualne badania nad czujnikami wodoru opierają się na warstwach trójtlenku wolframu (WO_3). Jest to bezbarwny tlenek metalu zaliczany do grona półprzewodników typu n z szeroką przerwą energetyczną wynoszącą ok. 3 eV [3]. Charakteryzuje się nietoksycznością oraz wysoką stabilnością chemiczną [4]. WO_3 jest materiałem o właściwościach chromowych, co oznacza, że ulega on odwracalnym zmianom właściwości optycznych pod wpływem czynnika zewnętrznego [4]. Tlenek wolframu charakteryzuje się dobrymi właściwościami elektrochromowymi, fotochromowymi i gazochromowymi [5].

Gazochromizm WO_3 polega na wzroście lub spadku współczynnika transmisji światła zachodzącym w pewnym zakresie długości fal pod wpływem ekspozycji na gaz [6]. Mechanizm gazochromizmu WO_3 nie został jeszcze w pełni poznany, można wyróżnić dwa modele powszechnie akceptowane do wyjaśnienia tego mechanizmu [3]: podwójne wstrzykiwanie jonów oraz generowanie wakansów tlenowych. Właściwości gazochromowe WO_3 są głównie powiązane z wodorem, jednakże zmiana transmisji warstwy nastąpi tylko w obecności katalizatora, który promuje reakcje chemiczne przez zmniejszenie energii aktywacji między WO_3 a wodorem [7]. Pomiarów gazochromowe są często prowadzone poprzez monitorowanie właściwości optycznych, takich jak absorpcja czy transmisja światła w dogodnych zakresach długości fal [3, 7].

Potencjalne zastosowanie WO_3 opiera się na detekcji zmiany transmisji światła lub na kontroli tej zmiany. Kontrola transmisji światła cienkiej warstwy tlenku wolframu umożliwia oszczędzanie energii, co znajduje zastosowanie w inteligentnych oknach [8]. Natomiast możliwość optycznej detekcji stężenia wodoru w badanej atmosferze czyni tlenek odpowiednim materiałem do zastosowań czujnikowych [3]. Dąży się do poprawy parametrów czujników wodoru poprzez zwiększenie ich czułości oraz zmniejszenie czasu odpowiedzi. Wpływ na właściwości gazochromowe warstwy, a więc i na odpowiedź czujnika z warstwą aktywną WO_3 , ma morfologia oraz struktura krystaliczna warstwy. Dużą rolę odgrywa wybór metody wytwarzania cienkiej warstwy tlenku wolframu oraz odpowiednia modyfikacja struktury materiału m.in. poprzez obróbkę termiczną [3, 9].

5.3. Projekt i wykonanie

W celu określenia wpływu modyfikacji morfologii cienkich warstw tlenków wolframu początkowo naniesiono warstwy na podłoża, a następnie wygrzewano w odpowiedniej temperaturze. W dalszej kolejności przeprowadzono charakteryzację badanych powłok.

5.3.1. Materiały i metoda

Cienkie warstwy tlenków wolframu naniesiono metodą parowania wiązką elektronową. Jako materiału źródłowego użyto granulki WO_3 o czystości 99,99% at. Ciśnienie końcowe w komorze roboczej osiągnięte za pomocą pomp rotacyjnej i dyfuzyjnej wynosiło tuż przed procesem parowania około $1,5 \cdot 10^{-5}$ mbar. W celu zapewnienia pełnego utlenienia wytworzonych cienkich warstw w trakcie procesu osadzania wprowadzano do komory dodatkowy przepływ tlenu (100 ml/min). Cienkie warstwy tlenków wolframu osadzono na różnych podłożach – krzemionce amorficznej (SiO_2) oraz krzemie (Si). Umożliwiło to pomiar mikrostruktury, składu materiałowego, właściwości optycznych oraz morfologii powierzchni i przekroju naniesionych warstw. Podczas procesu osadzania nie stosowano dodatkowego dogrzewania podłoży ani działu jonowego.

Następnie wygrzewano próbki w piecu rurowym Nabetherm, a czas wygrzewania w temperaturze docelowej wynosił 4 h. Przygotowano 5 próbek przeznaczonych do badań: próbkę po naniesieniu oraz próbki wygrzewane w temperaturze 200, 400, 600 oraz 800 °C.

Po przeprowadzeniu analizy właściwości powierzchni oraz właściwości optycznych, również metodą parowania wiązką elektronów, naniesiono dodatkowo katalizator w postaci palladu o grubości 5 nm na warstwę tlenku wolframu.

5.3.2. Metody charakteryzacji

W ramach badań określono właściwości powierzchni, strukturalne i optyczne, cienkich warstw tlenku wolframu. Analizę właściwości powierzchni rozpoczęto od obrazowania mikroskopem optycznym Olympus BX51 wcześniej wytworzonych próbek. Wykonano również obrazowanie próbek za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) FE-SEM FEI Nova NanoSEM 230 z użyciem detektora TLD elektronów wtórnych. Strukturę krystaliczną wytworzonych warstw zmierzono metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) za pomocą dyfraktometru Empyrean PANalytical. Chropowatość powierzchni cienkich warstw, jej topografia oraz profil zostały wyznaczone na podstawie pomiarów za pomocą profilometru optycznego Taylor Hobson CCI Lite. Otrzymano obrazy 2D, 3D oraz profile przekrojów powierzchni próbek.

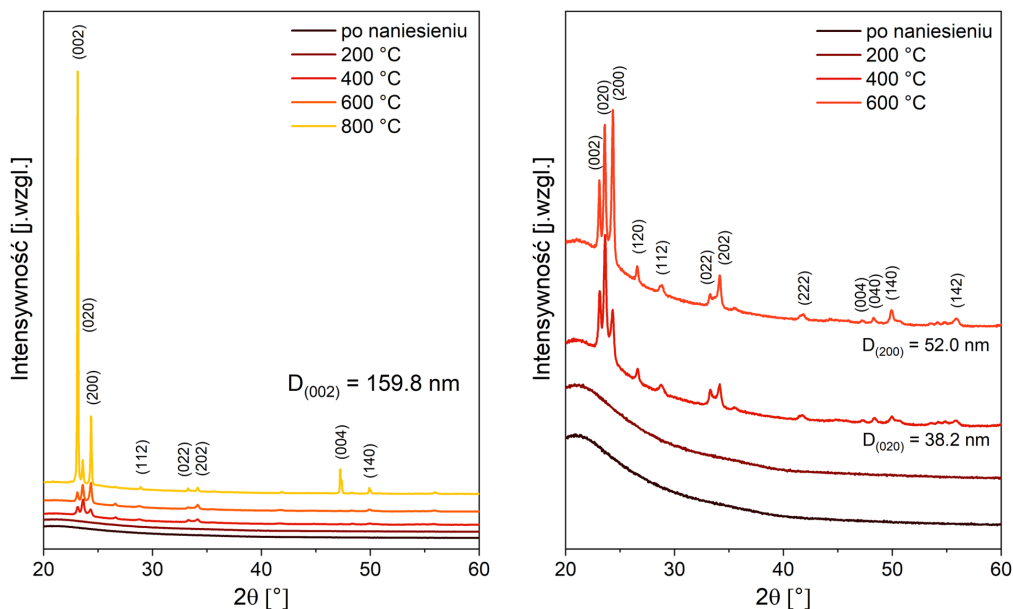
Właściwości optyczne i gazochromowe cienkich warstw tlenku wolframu zostały określone na podstawie widm transmisji światła z wykorzystaniem spektrofotometru Ocean Optics QE65000 i źródła DH-BAL 2000 z lampą halogenową i deuterową w zakresie spektralnym 300–1000 nm. Widma zmierzono podczas wprowadzania powietrza i mieszaniny H_2/Ar o stężeniu wodoru od 25 do 1000 ppm.

5.4. Uzyskane wyniki

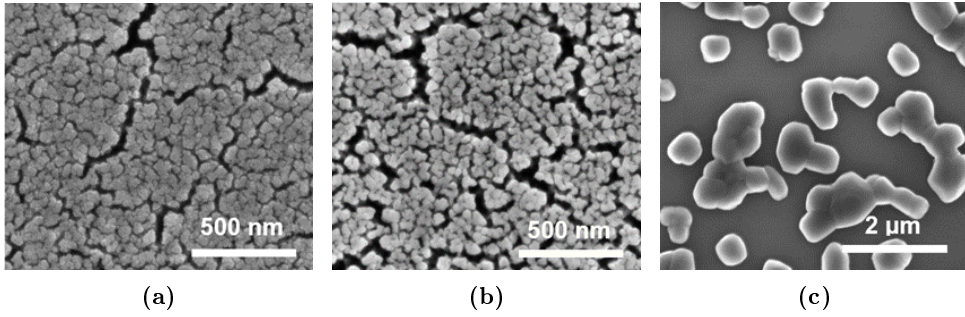
Na podstawie wykonanych charakteryzacji badanych cienkich warstw tlenków wolframu wykonano analizę właściwości powierzchni oraz gazochromowych badanych warstw tlenków wolframu.

5.4.1. Właściwości powierzchni

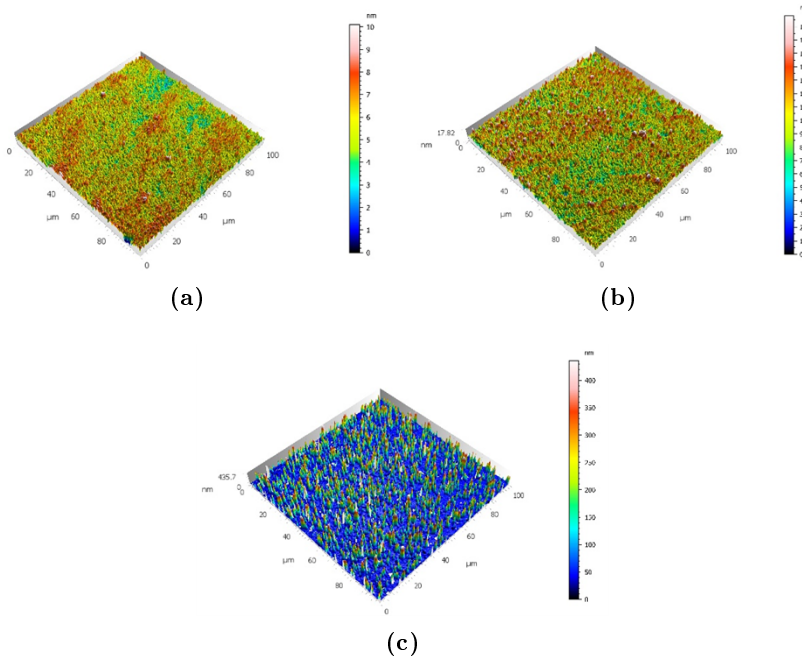
Na podstawie badań właściwości strukturalnych wykazano zmianę mikrostruktury cienkich warstw tlenku wolframu w wyniku wygrzewania powłok. Niewygrzewana warstwa WO_3 oraz warstwa wygrzewana w temperaturze $200\text{ }^\circ\text{C}$ charakteryzują się strukturą amorficzną. Warstwa tuż po naniesieniu była porowata, z pustymi przestrzeniami między włóknami (rysunek 5.2a). Dopiero dalsza modyfikacja próbek w temperaturze $400\text{ }^\circ\text{C}$ spowodowała krystalizację warstw do fazy jednoskośnej WO_3 , na co wskazuje wzrost intensywności pików na dyfraktogramie (rysunek 5.1). Wielkość krystalitów stopniowo wzrastała wraz z temperaturą wygrzewania. Dalsza modyfikacja poprocesowa w temperaturze $800\text{ }^\circ\text{C}$ spowodowała sublimację oraz utworzenie wysp ziaren o bardzo dużych rozmiarach (rysunki 5.1, 5.2c). Wielkość krystalitów powłok wygrzewanych w temperaturze $400\text{ }^\circ\text{C}$ obliczona dla płaszczyzny (002) wynosiła 38 nm , a dla powłok wygrzanych w $800\text{ }^\circ\text{C}$ aż ok. 160 nm (rysunek 5.1). Powierzchnia wytworzonych powłok wygrzewanych w temperaturze do $400\text{ }^\circ\text{C}$ jest gładka, jednorodna (rysunek 5.3). Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania i zajściem procesu krystalizacji wzrosła również chropowatość powierzchni. Po wygrzewaniu w temperaturze $800\text{ }^\circ\text{C}$ większość podłoża nie jest pokryta warstwą aktywną (rysunki 5.2c, 5.3c).



Rysunek 5.1. Wyniki badań XRD cienkich warstw tlenków wolframu wygrzewanych w różnych temperaturach



Rysunek 5.2. Obrazy z mikroskopu SEM cienkich warstw tlenków wolframu:
a) po naniesieniu, wygrzewanych w temperaturze b) 400 °C, c) 800 °C

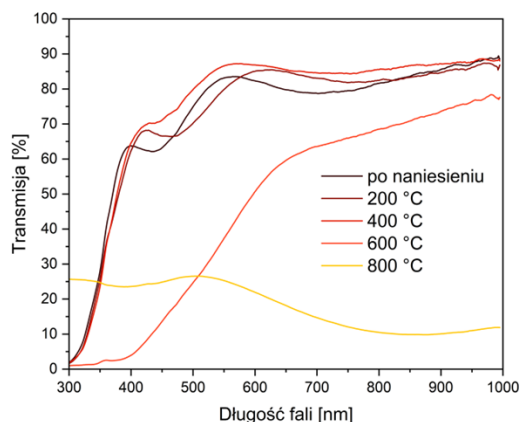


Rysunek 5.3. Obrazy 3D powierzchni cienkich warstw tlenków wolframu:
a) po naniesieniu, wygrzewanych w temperaturze b) 400 °C, c) 800 °C

5.4.2. Właściwości optyczne i gazochromowe

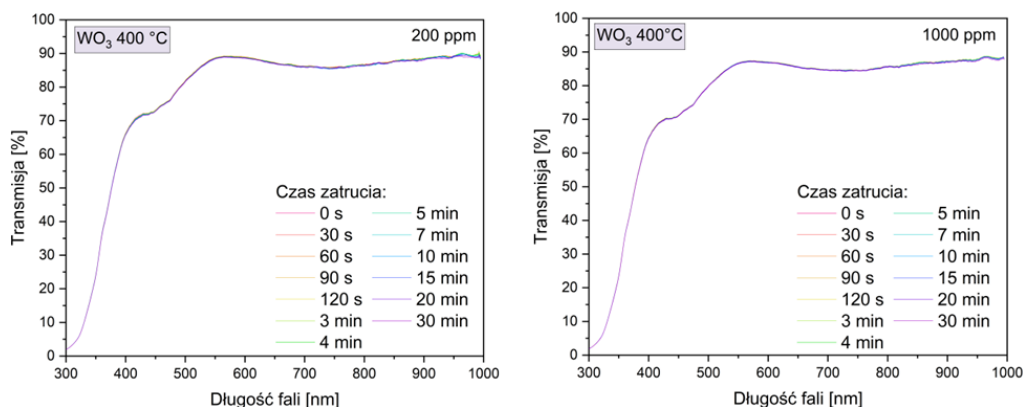
Charakterystyki transmisji światła naniesionych i wygrzanych powłok przedstawiono na rysunku 5.4. Współczynnik transmisji światła warstw WO_3 bezpośrednio po naniesieniu wynosił około 80% w zakresie widzialnych fal światła. Modyfikacja poprocesowa w temperaturze 400 °C skutkowałą zwiększeniem wartości transmisji w zakresie światła widzialnego, czego powodem mogło być zmniejszenie ilości defektów struktury krystalicznej oraz dotlenienie warstwy podczas procesu wygrzewania. Jednakże dalsze wygrzewanie w temperaturze 800 °C spowodowało znaczący spadek wartości transmisji. Wynika to z wy-

spowego charakteru tej powłoki, tj. występowania ziaren o wielkości 1–3 μm , które nie pokrywają całkowicie podłoża z krzemionki amorficznej. To z kolei powoduje znaczne rozpraszanie światła oraz jest odpowiedzialne za mleczny kolor tej próbki.

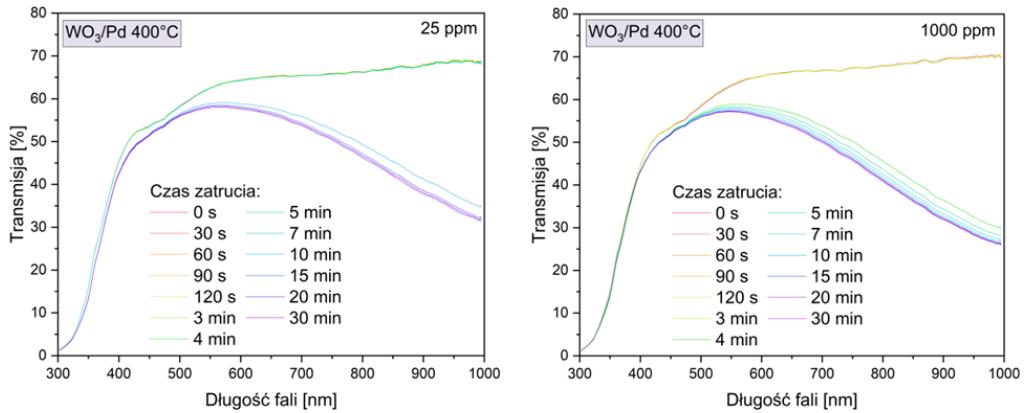


Rysunek 5.4. Widma transmisji cienkich warstw WO_3

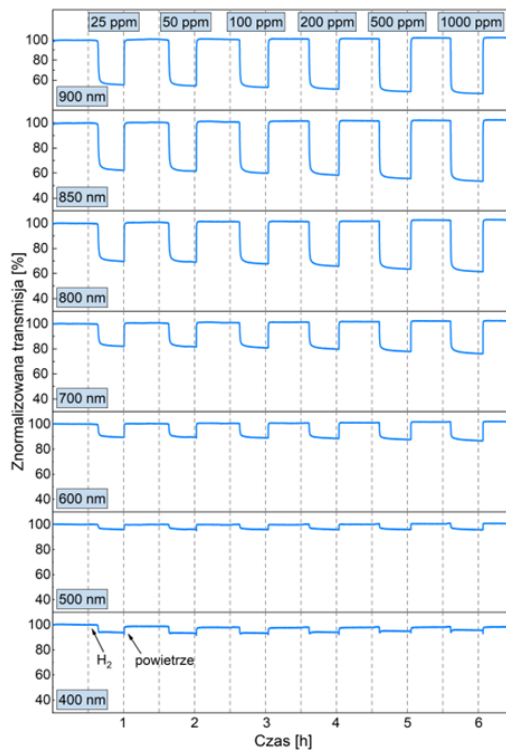
Właściwości gazochromowe warstw tlenku wolframu można wyznaczyć na podstawie zmian transmisji powłok pod wpływem wodoru. Początkowo zmierzono zmianę właściwości optycznych warstw bez katalizatora (rysunek 5.5), a następnie z naniesioną warstwą katalizatora w postaci palladu (rysunek 5.6). Zmiana współczynnika transmisji światła nastąpiła tylko dla próbek z naniesioną warstwą katalizatora po wprowadzeniu mieszaniny wodoru z argonem, co jest zgodne z literaturą [2, 5]. Zmiana właściwości optycznych pod wpływem badanego gazu wystąpiła również w warstwie wygrzewanej w temperaturze 800 $^{\circ}\text{C}$, jednakże w tym przypadku, ze względu na niską wartość transmisji w stanie początkowym, zmiana ta jest niewielka. Efekt gazochromowy zaszedł na powłokach już przy bardzo niskim stężeniu wodoru, czyli 25 ppm. Największy spadek transmisji dla wszystkich cienkich warstw zaobserwowano przy długości fali równej 900 nm (rysunek 5.7).



Rysunek 5.5. Widma transmisji światła cienkiej warstwy WO_3 wygrzewanej w temperaturze 400 $^{\circ}\text{C}$



Rysunek 5.6. Widma transmisji światła cienkiej warstwy WO_3 wygrzewanej w temperaturze $400\text{ }^\circ\text{C}$ z naniesioną warstwą katalizatora



Rysunek 5.7. Zmiany transmisji przy długościach fali z zakresu od 400 do 900 nm podczas cykli zatrucia i odtruwania cienkiej warstwy WO_3 wygrzewanej w temperaturze $400\text{ }^\circ\text{C}$

Na podstawie wykonanych pomiarów obliczono parametry użytkowe cienkich warstw WO_3 dla długości fali równej 900 nm, które przedstawiono w tabeli 5.1. Odpowiedź sensorową (SR) obliczono, znając początkową i końcową wartość transmisji światła podczas procesu zatrucia.

Stwierdzono, że najlepszymi właściwościami sensorowymi charakteryzuje się warstwa tlenku wolframu wygrzewania w temperaturze 400 °C ze względu na największą zmianę transmisji pod wpływem wodoru. Wygrzewanie powłok w temperaturze powyżej 400 °C skutkowało niemal dwukrotnym skróceniem czasu zarówno odpowiedzi, jak i powrotu; czas odpowiedzi wynosił ok. 10 minut, a powrotu poniżej 20 sekund.

Tabela 5.1. Parametry użytkowe cienkich warstw tlenku wolframu pokrytych palladem dla długości fali 900 nm

Temperatura wygrzewania [°C]	Koncentracja wodoru [ppm]	SR [-]	Czas odpowiedzi [min]	Czas powrotu [s]
–	25	1,36	23,5	54
–	1000	1,66	20	71
200	25	1,35	24	27
200	1000	1,70	19	44
400	25	1,80	9,5	16
400	1000	2,19	7	9
600	25	1,66	11,5	9
600	1000	2,03	4	3

5.5. Podsumowanie

Wykonane pomiary umożliwiły określenie właściwości gazochromowych naniesionych cienkich warstw tlenku wolframu oraz wygrzewanych w temperaturze 200 °C, 400 °C, 600 °C oraz 800 °C. Wszystkie cienkie warstwy z naniesionym katalizatorem w postaci palladu wykazywały właściwości gazochromowe, tj. zmianę współczynnika transmisji światła w obecności wodoru w zakresie koncentracji od 25 do 1000 ppm. Wygrzewanie powłok wpływa na właściwości gazochromowe próbek, a modyfikacja poprocesowa cienkiej warstwy tlenku wolframu w temperaturze 400 °C umożliwiła poprawę parametrów użytkowych powłoki. Dla tej próbki otrzymano najwyższą wartość odpowiedzi sensorowej oraz dwukrotne zmniejszenie czasów odpowiedzi i powrotu w porównaniu do warstwy niewygrzewanej. Warto jednak zwrócić uwagę, że zgodnie z literaturą mierzona jest przeważnie reakcja warstw na wodór w stężeniu 1% lub 4% [1, 7, 10], co jest związane z jego granicą wybuchowości. W niniejszej pracy zbadano odpowiedź cienkich warstw WO₃ na stężenie H₂ mieszczące się w granicach od 0,0025 % do 0,1 %, a są to wartości ponadkilkusetkrotnie mniejsze. Co więcej, uzyskana zmiana transmisji jest znacząca, biorąc pod uwagę, dla jak niskich koncentracji wodoru została uzyskana [1, 7, 10]. Warstwa wygrzewana w temperaturze 400 °C charakteryzowała się również najwyższą wartością transmisji w stanie rozjaśnienia. Powodem polepszenia właściwości optycznych i gazochromowych warstwy wygrzewanej w temperaturze 400 °C mogło być zmniejszenie liczby defektów struktury krystalicznej oraz dotlenienie warstwy podczas procesu wygrzewania.

Do tej pory udało się opracować czujnik na bazie tlenku wolframu, który działa na niskie stężenia wodoru, charakteryzujący się znacznymi odpowiedziami.

Bibliografia

- [1] Cho S.H., Suh J.M., Jeong B., Lee T.H., Soon Choi K., Eom T.H., Kim T., Jang H.W., Fast responding and highly reversible gasochromic H₂ sensor using Pd-decorated amorphous WO₃ thin films. *Chem. Eng. J.* **2022**, *446*, 1, 136862.
- [2] Lee Y.A., Kalanur S.S., Shim G., Park J., Seo H., Highly sensitive gasochromic H₂ sensing by nanocolumnar WO₃-Pd films with surface moisture. *Sens. Actuators B Chem.* **2017**, *238*, 111–119.
- [3] Gao C., Guo X., Nie L., Wu X., Peng L., Chen J., A review on WO₃ gasochromic film: Mechanism, preparation and properties. *International Journal of Hydrogen Energy* **2023**, *48*, 6, 2442–2465.
- [4] Novak T.G., Kim J., DeSario P.A., Jeon S., Synthesis and applications of WO₃ nanosheets: the importance of phase, stoichiometry, and aspect ratio. *Nanoscale Adv.* **2021**, *3*, 5166–5182.
- [5] Shakoury R., Arman A., Rezaee S., Korpi A.G., Kulesza S., Luna C., Bramowicz M., Mardani M. Optical properties and morphology analysis of hexagonal WO₃ thin films obtained by electron beam evaporation. *J Mater Sci: Mater Electron* **2021**, *32*, 798–805.
- [6] Çoban Ö., Tüzemen S., Gasochromic properties of thin film oxides in terms of surface physics. *Materials Today: Proceedings* **2021**, *46*, 16, 7021–7024.
- [7] Nishizawa K., Yamada Y., Yoshimura K., Low-temperature chemical fabrication of WO₃ gasochromic switchable films: a comparative study of Pd and Pt nanoparticles dispersed WO₃ films based on their structural and chemical properties. *Thin Solid Films* **2020**, *709*.
- [8] Zakirullin R., Grating optical filters for smart windows: Materials, calculations and prospects. *AIMS Materials Science* **2020**, *7*, 6, 720–771.
- [9] Burkhardt S., Elm M.T., Lani-Wayda B., Klar P.J., In Situ Monitoring of Lateral Hydrogen Diffusion in Amorphous and Polycrystalline WO₃ Thin Films. *Adv. Mater. Interfaces* **2018**, *5*.
- [10] Nishizawa K., Yamada Y., Yoshimura,] K., Low-temperature chemical fabrication of Pt-WO₃ gasochromic switchable films using UV irradiation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2017**, *170*, 21–26.

Zastosowanie metody bezczujnikowe w układzie monitorowania prędkości obrotowej wirnika silnika szczotkowego

mgr inż. Przemysław Wewiór
Elektronika

dr inż. Grzegorz Głomb
Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej

W ramach niniejszej pracy opracowano i zaimplementowano układ, korzystający z metody monitorowania prędkości obrotowej szczotkowego silnika elektrycznego bez stosowania czujników mechanicznych oraz przebadano działanie tego układu. Przedstawiono układ, który służy do bezczujnikowego wyznaczania prędkości obrotowej silnika. Omówiono rolę i właściwości jego elementów składowych. Przedstawiono algorytm zaimplementowany w układzie. Wykonano pomiary prądu przepływającego przez silnik elektryczny. Przeanalizowano uzyskane sygnały. Powiązano częstotliwość podstawową tych sygnałów z prędkością obrotową silnika oraz wytłumaczono obecność innych składowych. Zweryfikowano również funkcjonowanie układu do bezczujnikowego monitorowania prędkości obrotowej jako całości, porównując jego działanie z działaniem układu do wyznaczania prędkości obrotowej metodą optyczną. Przedstawiono problem wynikający ze stosowania opracowanej metody w przypadkach, kiedy silnik jest sterowany przy zastosowaniu techniki PWM oraz omówiono sposób, w jaki można wyeliminować ten problem.

6.1. Cel i założenia

Celem pracy jest opracowanie metody określenia prędkości obrotowej silnika szczotkowego prądu stałego bez stosowania czujników mechanicznych i przetworników elektromechanicznych oraz implementacja sprzętowa tej metody w układzie elektronicznym. Prędkość obrotowa silnika ma być określana wyłącznie przez przetwarzanie i analizę prądu przepływającego przez silnik. Główne założenia realizowanej pracy to:

- opracowany układ powinien mieć parę zacisków wejściowych, które mają być łączone szeregowo z silnikiem dołączonym do układu sterowania,
- opracowany układ powinien posiadać jedną linię wyjściową, na której ma być sygnał prostokątny o częstotliwości wprost proporcjonalnej do prędkości obrotowej silnika,

- skonstruowany układ powinien mieć doprowadzone oddzielne zasilanie. Układ ma być zasilany napięciem stałym o wartości 12 V,
- zaprojektowany układ powinien być oddzielony galwanicznie od układu zasilania silnika. W układach zasilania silnika mogą występować wysokie napięcia, które mogą spowodować niepoprawne działanie lub uszkodzenie dołączonych układów. Z tego powodu ważne jest zadbanie, aby do układu określania prędkości przedostawał się sygnał, ale nie składowa stała napięcia,
- opracowana metoda powinna pozwalać na zastosowanie w układzie zasilania silnika modulacji szerokości impulsu PWM. Metoda powinna być odporna na zakłócenia pochodzące od takiego sposobu sterowania silnika.

6.2. Wstęp teoretyczny

Istnieją dwa wytłumaczenia na okresową zmienność prądu pobieranego przez szczotkowy silnik elektryczny prądu stałego. Pierwszym z nich jest zjawisko komutacji [1, 2], natomiast drugim zmienność siły przeciwelektromotorycznej [3].

6.2.1. Komutacja

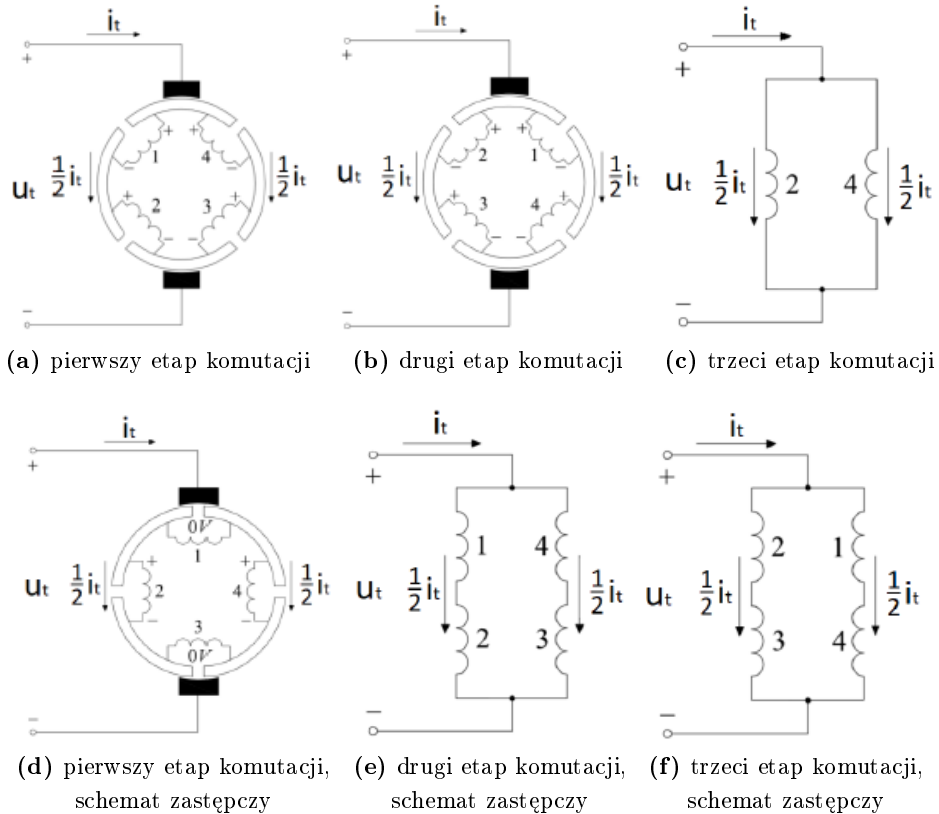
Komutacja w silnikach szczotkowych jest zjawiskiem polegającym na przełączaniu w układzie szczotek i komutatora. Komutator jest umieszczonym na wirującym wale silnika elementem, który pozwala na zmianę biegunowości napięcia zasilania doprowadzonego do uzwojeń wirnika uzwojeń. Komutator składa się z twardych, nieruchomych blaszek, nazywanych segmentami komutatora. Szczotki są sprężystymi elementami stykowymi, które przesuwają się po powierzchni komutatora. Szczotki są dołączone do zasilania silnika. Dzięki swojej sprężystości szczotki przylegają do segmentów komutatora. W trakcie ruchu obrotowego wału silnika szczotki przesuwają się po różnych segmentach komutatora, zmieniając w ten sposób polaryzację magnetyczną poszczególnych uzwojeń wirnika [4, 5].

Podczas przełączania występują chwilowe zwarcia. W chwilach, w których szczotka zsuwa się z jednego segmentu i dotyka sąsiedniego, przez krótki czas jest połączona równocześnie z dwoma segmentami [1, 2].

Proces komutacji został przedstawiony w uproszczony sposób na rysunku 6.1, który dotyczy przypadku, w którym występują cztery uzwojenia wirnika, cztery segmenty komutatora i dwie szczotki.

Początkowo każda szczotka ma kontakt z jednym segmentem komutatora, tak jak na rysunku 6.1a. Wtedy prąd wirnika przepływa przez wszystkie cztery uzwojenia, co jest przedstawione na rysunku 6.1d. Następnie, na skutek ruchu obrotowego, szczotki zaczynają mieć kontakt z kolejnymi segmentami komutatora, tak jak pokazano na rysunku 6.1b. W tej chwili zwarte są uzwojenia 1 i 3, a prąd przepływa tylko przez uzwojenia 2 i 4, co jest przedstawione w formie schematu zastępczego na rysunku 6.1e. Objawia się to przez nagłe zmniejszenie impedancji obwodu wirnika i skokowe zwiększenie pobieranego prądu. Następnie szczotki zsuwają się z segmentów komutatora, z którymi miały kontakt przed przełączeniem, co jest przedstawione na rysunku 6.1c. Prąd ponownie przepływa przez wszystkie uzwojenia wirnika, co jest w uproszczeniu przedstawione na rysunku 6.1f.

W rzeczywistych silnikach występuje wiele szczotek, uzwojeń i segmentów komutatora. Sprawia to, że podczas jednego obrotu komutacja następuje wiele razy. Każde przełączenie powoduje nagły impuls w przebiegu prądu silnika.



Rysunek 6.1. Wpływ procesu komutacji szczotek i komutatora na impedancję wirnika

6.2.2. Zmienność siły przeciwelektromotorycznej

Zgodnie z prawem indukcji Faradaya, zmiana strumienia magnetycznego, objętego zamkniętym obwodem elektrycznym, powoduje powstanie napięcia w tym obwodzie, co jest wyrażone równaniem (6.1) [3].

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \tag{6.1}$$

W przypadku silnika szczotkowego występuje sytuacja, w której wirnik porusza się w polu magnetycznym stojana. Pod wpływem ruchu w uzwojeniach wirnika powstaje napięcie, nazywane siłą przeciwelektromotoryczną. Napięcie zależy od szybkości zmian strumienia magnetycznego obejmowanego przez uzwojenia. Wirnik wykonuje ruch obrotowy, zatem szybkość zmian strumienia nie jest stała podczas całego obrotu, ale zależy od chwilowego położenia kąтового wirnika. Siła przeciwelektromotoryczna powstała w jednym uzwojeniu jest zatem napięciem zmiennym i okresowym, którego okres zależy od okresu obrotu wirnika [3].

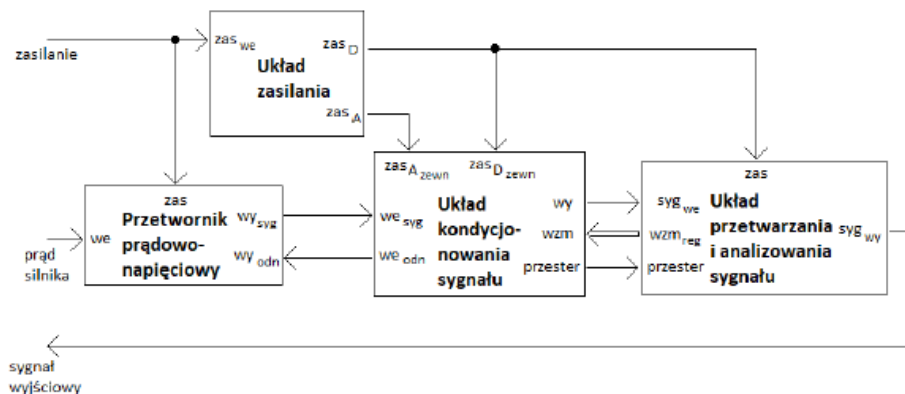
Siła przeciwelektromotoryczna jest w silniku napięciem, które jest przeciwne napięciu zasilania wirnika. Prąd pobierany przez wirnik jest wprost proporcjonalny do różnicy tych napięć [1, 4].

W silniku szczotkowym występuje układ komutatora i szczotek, który pełni rolę prostownika. Siła przeciwelektromotoryczna jest przetwarzana przez ten układ, co wpływa na przebieg obserwowany z zacisków zasilania silnika.

W rzeczywistych silnikach nie stosuje się jednego uzwojenia wirnika, ale cały zestaw. Poszczególne uzwojenia są obrócone względem siebie, w wyniku czego w każdym z nich siła przeciwelektromotoryczna ma inną fazę początkową. Ponadto, każde uzwojenie jest dołączone do innych sekcji komutatora, przez co przełączanie dla każdego uzwojenia następuje w innej chwili. Te właściwości sprawiają, że zmienność siły przeciwelektromotorycznej powoduje wiele zafalowań prądu silnika podczas jednego obrotu. Liczba zafalowań na jeden obrót zależy od budowy danego silnika, to jest od liczby uzwojeń wirnika i biegunów stojana [3].

6.3. Projekt i wykonanie

Wykonany układ w uproszczony sposób jest przedstawiony na schemacie blokowym na rysunku 6.2.



Rysunek 6.2. Schemat blokowy zaprojektowanego układu

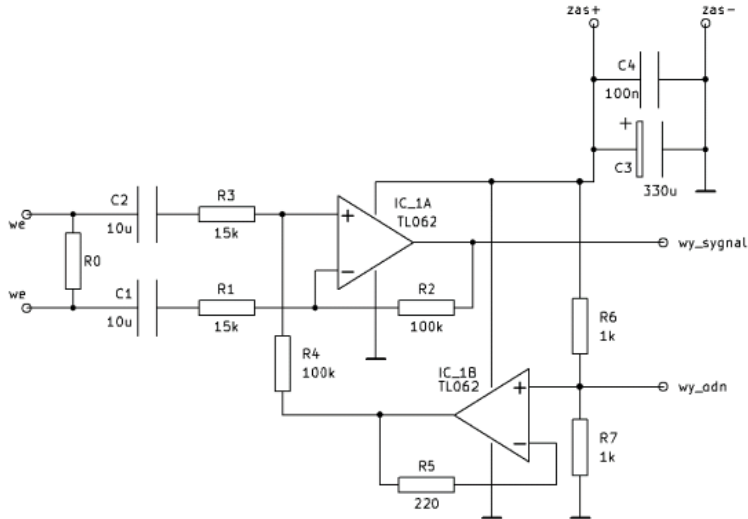
Na cały układ składają się cztery układy składowe: układ zasilania, przetwornik prądowo-napięciowy, układ kondycjonowania sygnału oraz układ przetwarzania i analizowania sygnału.

Rolą układu zasilania jest zapewnienie ciągłości i zmniejszenie zmienności napięcia zasilania dla innych układów. Jego zadaniem jest również zabezpieczenie przed zwarcie, nadmiernym poborem prądu oraz odwrotną polaryzacją wejściowego napięcia zasilania.

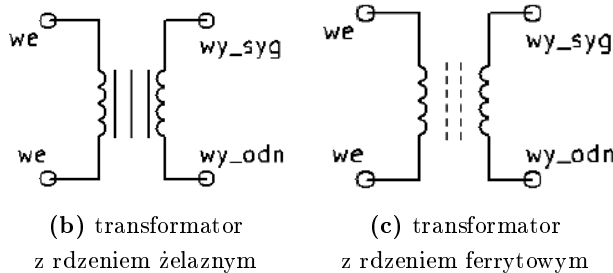
Przetwornik prądowo-napięciowy jest kluczowym elementem układu monitorowania prędkości. Jego zadaniem jest zamiana przepływającego przez silnik prądu na sygnał napięciowy.

Dodatkowo wzmacnia sygnał, eliminuje składową stałą i zapewnia izolację galwaniczną, chroniąc układ przed wysokim napięciem.

Podczas realizacji pracy wykonano trzy przetworniki prądowo-napięciowe. W pierwszym z nich wykorzystano spadek napięcia na rezystorze, drugi był oparty na transformatorze z rdzeniem żelaznym, a trzeci był oparty na transformatorze z rdzeniem ferrytowym. Poszczególne przetworniki są przedstawione na rysunku 6.3.



(a) przetwornik prądowo-napięciowy wykorzystujący spadek napięcia na stałej rezystancji

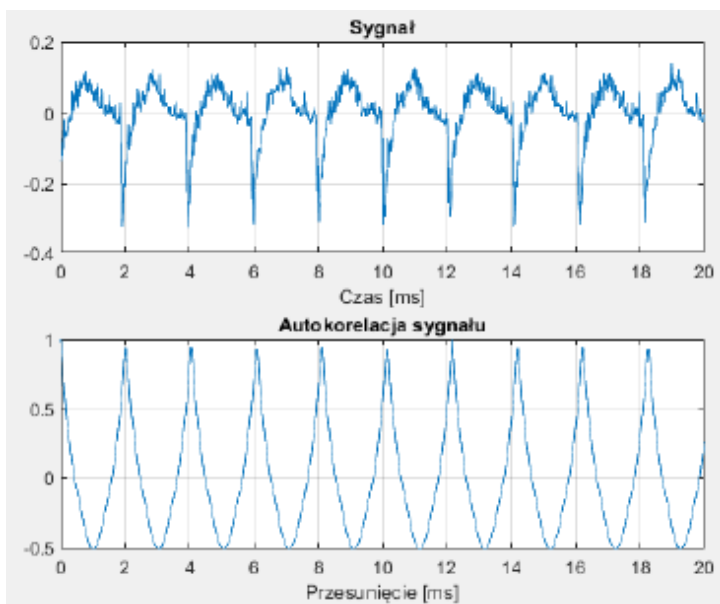


Rysunek 6.3. Opracowane przetworniki prądowo-napięciowe

Układ kondycjonowania sygnału zapewnia odpowiednie właściwości sygnałowi pochodzącemu z przetwornika prądowo-napięciowego. Jego rolami są filtracja dolnoprzepustowa, ograniczenie amplitudy sygnału oraz odpowiednie wzmocnienie. Ponieważ amplituda sygnału na wyjściu przetwornika prądowo-napięciowego może zależeć od modelu silnika oraz warunków, w jakich pracuje i od stosowanego przetwornika prądowo-napięciowego, wzmocnienie tego układu składowego może być regulowane.

Głównym zadaniem układu przetwarzania i analizowania sygnału jest określenie częstotliwości podstawowej sygnału prądu silnika. Dodatkowo ten układ pełni funkcje układu nadrzędnego, sterując przebiegiem pomiarów i wzmocnieniem w układzie kondycjonowania sygnału. Najważniejszym elementem składowym tego układu jest mikrokontroler STM32F446.

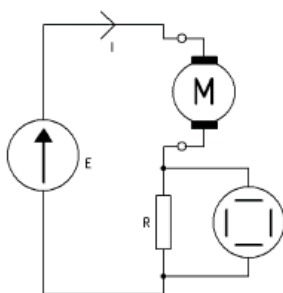
W celu określenia częstotliwości podstawowej obliczana jest autokorelacja sygnału. Kolejne maksima autokorelacji sygnału odpowiadają kolejnym pełnym okresom, wynikającym z częstotliwości podstawowej, co można zaobserwować na rysunku 6.4.



Rysunek 6.4. Sygnał i jego autokorelacja

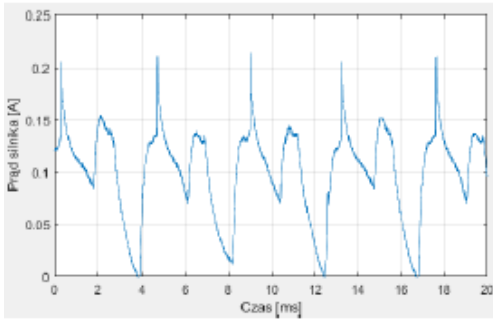
6.4. Uzyskane wyniki

Pomiary rozpoczęto od pomiaru prądu silnika szczotkowego i wykonano je w układzie przedstawionym na rysunku 6.5.

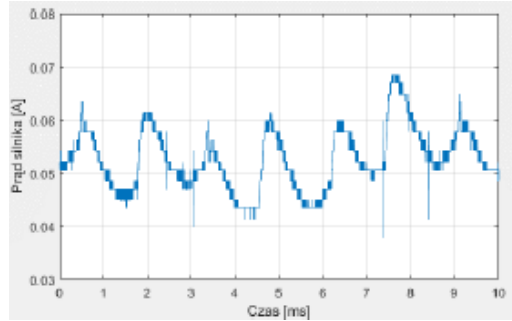


Rysunek 6.5. Układ pomiarowy do pomiaru prądu silnika

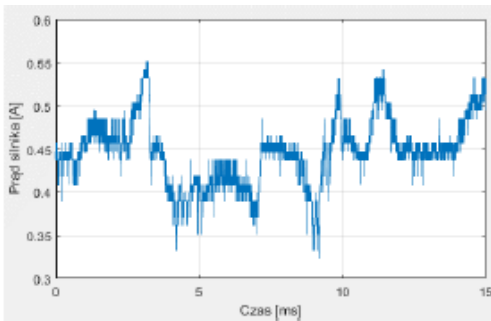
Pomiary te wykonano dla różnych silników, które były zasilane różnymi napięciami. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 6.6.



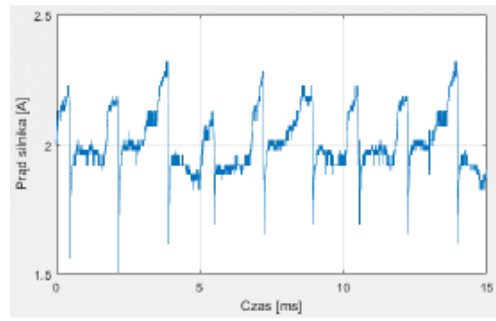
(a) prąd silnika 1



(b) prąd silnika 2



(c) prąd silnika 3 przy napięciu zasilania 2 V



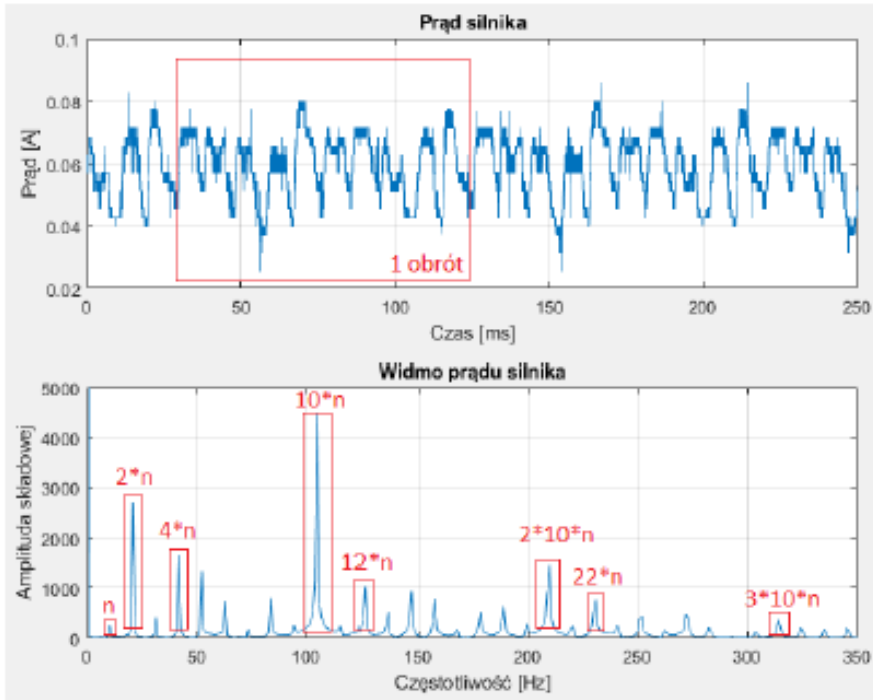
(d) prąd silnika 3 przy napięciu zasilania 6 V

Rysunek 6.6. Prąd przepływający przez silnik szczotkowy

Poza rejestracją prądu przepływającego przez silniki, zmierzona została prędkość obrotowa silników z zastosowaniem metody optycznej. Na rysunku 6.7 przedstawiono prąd silnika oraz jego widmo. Prąd został zarejestrowany przy prędkości silnika równej 10,48 obr/s. Na wykresie prądu został zaznaczony czas odpowiadający jednemu pełnemu obrotowi. Na wykresie widmowym zostały zaznaczone składowe odpowiadające wybranym wielokrotnościom prędkości obrotowej.

Następnie sprawdzono poprawność wykrywania częstotliwości podstawowej przez zaimplementowany w układzie algorytm. Przed wykonaniem pomiarów ustalono, że liczba okresów składowej zmiennej prądu przypadających na pełen obrót jest równa 6 dla silnika 1, 14 dla silnika 2 i 10 dla silnika 3. Dzięki temu można określić prędkość obrotową, dzieląc częstotliwość podstawową składowej zmiennej i liczbę okresów na obrót.

Pomiary przeprowadzono dla różnych silników zasilanych różnymi napięciami. W każdym pomiarze zmierzono metodą optyczną prędkość obrotową silnika n_{odn} i wyznaczoną przez algorytm częstotliwość podstawową f_x . Wiedząc, ile okresów prądu silnika przypada na jeden obrót dla poszczególnych silników, obliczono prędkość obrotową n_x . Wartość wyznaczona w taki sposób została następnie zestawiona z wartością wyznaczoną metodą odniesienia, to jest metodą optyczną, i obliczone zostały błąd bezwzględny Δ_n oraz błąd względny δ_n . Wyniki zostały zamieszczone w tabeli 6.1.



Rysunek 6.7. Prąd i widmo prądu silnika dla wybranego przypadku

Tabela 6.1. Porównanie działania opracowanej metody bezczujnikowej z metodą czujnikową

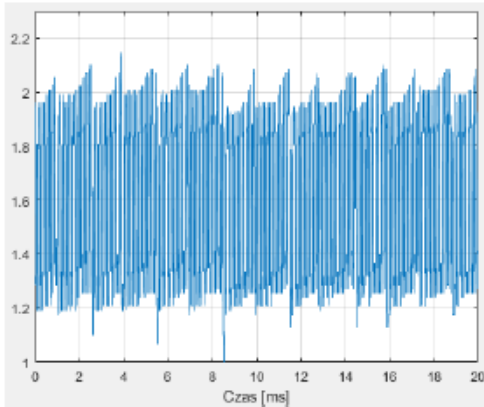
Silnik	Napięcie zasilania silnika [V]	n_{odn} [obr/s]	f_x [Hz]	n_x [obr/s]	Δ_n [obr/s]	δ_n [%]
1	3	49,68	294,96	49,16	0,52	1,05
	4	62,36	373,80	62,30	0,06	0,10
2	3	12,80	180,05	12,86	-0,06	-0,47
	6	25,31	354,74	25,34	-0,03	-0,11
	10	41,34	577,19	41,23	0,11	0,27
3	3	5,17	51,26	5,13	0,04	0,85
	5	10,44	103,93	10,39	0,05	0,45
	8	17,96	178,85	17,89	0,08	0,42

Opracowano również sposób na zastosowanie bezczujnikowej metody monitorowania prędkości obrotowej przy sterowaniu silnikiem przez technikę PWM. W tym sposobie zakłada się, że w celu eliminacji zakłóceń należy próbkować sygnał z częstotliwością m -krotnie większą niż częstotliwość modulacji PWM, wobec spróbkowanego sygnału stosować średnią ruchomą o oknie długości m próbek, a następnie zastosować m -krotną decymację sygnału. Liczba m powinna być liczbą naturalną, w przeprowadzonych pomiarach miała wartość 3. W takim przypadku równoważna częstotliwość sygnału po decymacji jest równa częstotliwości PWM.

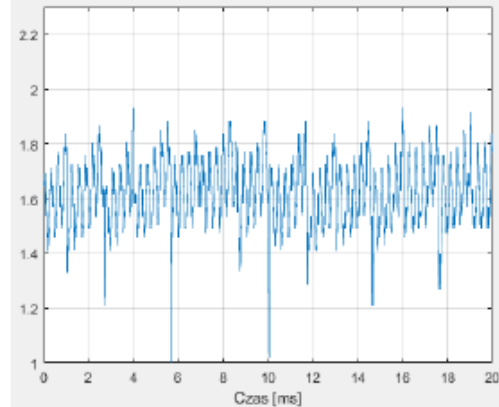
W celu weryfikacji skuteczności opracowanej metody przeprowadzono odpowiednie pomiary, polegające na wizualizacji kolejnych próbek sygnału po decymacji. Wykorzystano

znajdujący się w stosowanym mikrokontrolerze przetwornik cyfrowo-analogowy. Skonfigurowano go w taki sposób, aby trafiały do niego kolejne wartości spróbkowanego, uśrednionego i zdecydowanego sygnału. Napięcie wyjściowe przetwornika zostało zarejestrowane przez oscyloskop.

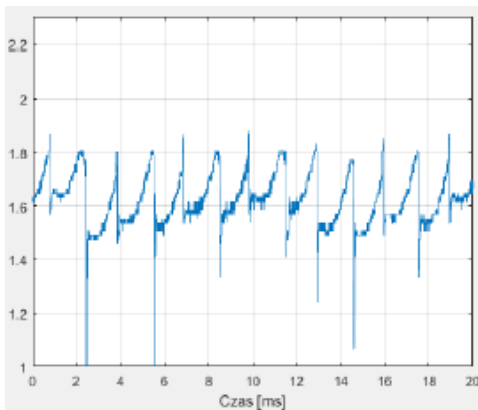
Wyniki pomiarów zostały przedstawione na rysunku 6.8. Pomiary zostały przeprowadzone przy częstotliwości próbkowania równej 100 kHz, trzykrotnej decymacji i współczynnika wypełnienia modulacji PWM równym 0,5. W kolejnych pomiarach zmieniano częstotliwość modulacji PWM.



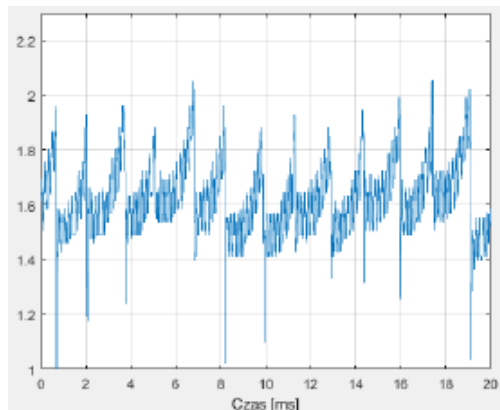
(a) częstotliwość PWM równa 25 kHz



(b) częstotliwość PWM równa 30 kHz



(c) częstotliwość PWM równa 30,33 kHz



(d) częstotliwość PWM równa 40 kHz

Rysunek 6.8. Sygnał po uśrednieniu i decymacji.
Równoważna częstotliwość próbkowania równa 33,33 kHz

6.5. Podsumowanie

Na skutek ruchu obrotowego przepływ prądu przez szczotkowy silnik prądu stałego nie jest jednostajny. Przebieg prądu jest przebiegiem zmiennym okresowym. Jak można zaobserwować na rysunku 6.6, ten przebieg składa się ze składowej stałej i składowej zmiennej.

Składowa stała jest zawsze większa niż amplituda składowej zmiennej, zatem w przebiegu nie występują wartości ujemne, a prąd przepływa tylko w jedną stronę. Amplituda składowej zmiennej jest do kilku razy mniejsza niż wartość składowej stałej.

W zależności od silnika przebieg przepływającego przez niego prądu może mieć różny kształt, co jest widoczne przy porównaniu rysunków 6.6a, 6.6b oraz 6.6c. Istnieje również różnica między kształtem przebiegu dla różnych napięć zasilania i różnych prędkości obrotowych, co jest widoczne na rysunkach 6.6c i 6.6d.

Liczba okresów przypadających na jeden obrót wirnika zależy od budowy silnika. W celu zapewnienia płynności działania rzeczywiste silniki są wykonywane w taki sposób, aby znajdowało się w nich wiele uzwojeń wirnika, szczotek, segmentów komutatora i biegunów stojana. Te elementy odpowiadają za powstawanie zdarzeń, w wyniku których dochodzi do prądu przepływającego przez silnik [1–3]. Wielokrotność elementów składowych silnika powoduje, że w trakcie jednego obrotu występuje wiele zdarzeń. Z tego powodu prąd przepływający przez silnik jest sygnałem okresowym.

Na rysunkach 6.6 i 6.7 można zaobserwować powtarzające się zdarzenia w przedstawionych przebiegach. Te zdarzenia są powiązane z kolejnymi obrotami wirników w silnikach. Na przykładzie rysunku 6.7 można zaobserwować, że w czasie odpowiadającym jednemu obrotowi zdarza się dziesięć okresów oscylacji prądu. Wykres widmowy wskazuje, że największą amplitudę ma składowa o częstotliwości około 100 Hz, będącej dziesięciokrotną wielokrotnością prędkości obrotowej równej 10,48 obr/s. Przebieg prądu silnika nie jest sinusoidalny, z tego powodu w widmie występują również harmoniczne tej składowej. Można zauważyć obecność składowych o częstotliwościach około 210 Hz i 310 Hz.

Powtarzalność sygnału w kolejnych okresach nie jest dokładna, co wynika z niedoskonałości konstrukcyjnych rzeczywistych silników [3]. Uzwojenia wirnika mogą nie być oddalone od siebie o taką samą odległość kątową. Poszczególne bieguny stojana mogą generować pole magnetyczne o różnym natężeniu. Różne szczotki mogą ulegać zużyciu w różnym stopniu, co może wpływać na ich rezystancję. Znacznie większą powtarzalność mają fragmenty sygnału odległe od siebie o czas jednego obrotu wirnika, co również jest do zauważenia na rysunku 6.7. Dzieje się tak, ponieważ po czasie jednego obrotu wirnik znajduje się w takiej samej pozycji. W widmie sygnału jest to widoczne w postaci składowych o częstotliwości będącej wielokrotnością prędkości obrotowej. Wyraźna jest składowa o częstotliwości około 20 Hz. Obecność tej składowej wynika z faktu, że w czasie jednego obrotu dwukrotnie powtarza się pewna tendencja. Na wykresie widmowym można również dostrzec drugą harmoniczną tej składowej o częstotliwości około 40 Hz.

Częstotliwość podstawowa wykrywana jest przez opracowany układ poprawnie. Wyznaczenie prędkości obrotowej na podstawie tej częstotliwości prowadzi do uzyskania wartości prędkości porównywalnej z wynikiem pomiaru metodą optyczną, która jest często stosowana w praktyce [5]. Wyniki są przedstawione w tabeli 6.1. Zakładając, że metoda optyczna zapewnia poprawne wyniki, ustalono, że błąd względny opracowanej metody bezczujnikowej nie przekracza 1,1%. W praktyce do sterowania silnikami najczęściej stosuje się napięcie prostokątne o zmienianym współczynniku wypełnienia [5]. Zmienność napięcia zasilania powoduje zaszumienie sygnału potrzebnego do zastosowania bezczujnikowej metody monitorowania prędkości obrotowej, co jest zauważalne na rysunkach 6.8a, 6.8b i 6.6d. Rozwiązaniem jest zapewnienie synchronizacji między przełączaniem napięcia za-

silania i próbkowaniem. W przypadku przedstawionym na rysunku 6.8c, gdzie zarówno równoważna częstotliwość próbkowania, jak i częstotliwość PWM jest równa 33,33 kHz zakłócenia nie występują.

Bibliografia

- [1] Vidlak M., Gorel L., Makys P., Stano M., Sensorless Speed Control of Brushed DC Motor Based at New Current Ripple Component Signal Processing. *Energies* **2021**, *14*(17).
- [2] Abacan A., Canada M. L., Gomez M., Sensorless position control of brushed DC motor using ripple counting technique. *Microchip Technology, Inc.* **2019**, s. 1–50.
- [3] Vazquez-Sanchez E., Sottile J., Gomez-Gil J., SA novel method for sensorless speed detection of brushed dc motors. *Applied Sciences* **2017**, *7*(14).
- [4] Maszyny elektryczne prądu stałego, W: *Zarys Elektrotechniki*, Dreszer, WSiP, Warszawa, 1976, s. 172–192.
- [5] Condit R., Brushed DC motor fundamentals. *Microchip Technology, Inc.* **2004**, s. 1–10.

Analiza systemów typu Bin picking dla optymalizacji zastosowań w robotach współpracujących

mgr inż. Dawid Grajoszek
Automatyka i Robotyka

dr inż. Andrzej Jabłoński
Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Podjęta praca dyplomowa polegała na zbadaniu efektywności wybranych systemów automatycznej detekcji oraz selekcji przedmiotów w warunkach przemysłowych z wykorzystaniem robotów współpracujących, tzw. cobotów, oraz najnowocześniejszych technik przetwarzania obrazów. Projekt traktuje o sposobie przeprowadzania procesu Bin pickingu wraz z użyciem aplikacji webowej bazującej na modelach 3D, co dokładnie wpisuje się w paradygmaty Przemysłu 4.0. W pracy opisano szeroki zakres badań, jakie podjęto w celu sprawdzenia wpływu właściwości obiektów w zależności od rodzaju używanego przez robota narzędzia. Na podstawie eksperymentów sporządzono odpowiednie tabele oraz wykresy, w których przedstawiono opisane wcześniej zależności. Wynika z nich, iż technologia Bin pickingu ma bardzo duży potencjał w kontekście optymalizacji procesów produkcyjnych oraz magazynowania towarów w przedsiębiorstwach. Może być ona traktowana jako wstęp do dalszego rozwoju badań w tej dziedzinie.

7.1. Cel i założenia

Celem niniejszej pracy dyplomowej jest przeprowadzenie analizy systemów typu Bin picking do optymalizacji zastosowań w robotach współpracujących. Praca nawiązuje do zagadnień zastosowań robotów współpracujących w procesach produkcyjnych w Przemysle 4.0. Temat pracy dyplomowej wiąże się z analizą istniejących już na rynku rozwiązań dla problemu Bin pickingu oraz próbą zaimplementowania ich we współpracy ze wspomnianym wcześniej robotem.

Praca ta ma na celu dostarczenie praktycznych wskazówek dla przedsiębiorstw zajmujących się magazynowaniem oraz dystrybucją produktów, które chcą zwiększyć efektywność swojego procesu Bin pickingu poprzez wykorzystanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych, takich jak roboty współpracujące.

7.2. Roboty współpracujące

Szybki rozwój rynku robotycznego skutkuje wdrażaniem w przedsiębiorstwach robotów współpracujących, tzw. cobotów. Są to roboty, które mogą współpracować z człowiekiem we wspólnej przestrzeni. Niestety w normach dotyczących robotów przemysłowych próżno szukać definicji robota współpracującego. Efektem tego jest przede wszystkim fakt, iż rynek tego rodzaju robotów jest dość młody. Według raportu Międzynarodowej Federacji Robotyki (IFR) ich liczba na rynku światowym wynosiła zaledwie 22 015 sztuk w 2020 roku (co przy liczbie 3,5 mln manipulatorów przemysłowych jest dość znikome) [1]. Wspólna praca cobota oraz człowieka możliwa jest dzięki zastosowaniu odpowiednich zasad bezpieczeństwa, gdyż życie i zdrowie pracownika zawsze mają najwyższą wagę [2].

Niewątpliwie ogromną zaletą na rzecz robotów współpracujących w stosunku do wykorzystywanych już od dawna robotów przemysłowych jest łatwość programowania oraz konfiguracji [3, 4]. Przebrojenie takiego cobota na inne stanowisko produkcyjne jest czynnością szybką i mało skomplikowaną [5]. Powoduje to, że może tego dokonać nawet osoba niebędąca specjalistą w dziedzinie robotyki. Programowanie robota współpracującego jest stosunkowo łatwe i intuicyjne. Polega ono na ręcznym ustawianiu tzw. kafelków, gdzie każdy z nich odpowiada za daną funkcję, na przykład zamknięcie chwytaka czy przemieszczenie TCP robota z jednego punktu w przestrzeni do drugiego [6]. Również inne funkcje, które są dobrze znane z wielu języków programowania komputerowego, są dostępne w tymże graficznym interfejsie (pętla *while*, instrukcje warunkowe *if ... else* i wiele innych). Dużym atutem robotów współpracujących jest możliwość programowania przez tzw. wodzenie za ramię. Zadanie operatora sprowadza się jedynie do pokazania robotowi kolejnych punktów na ścieżce jego ruchu bez konieczności ręcznego wpisywania współrzędnych, co jest zdecydowanie przyjemniejszym rozwiązaniem [7].

7.3. Bin picking

Bin picking to technologia, gdzie robot współpracujący wyposażony jest w kamerę 3D [8–10]. Skanuje ona scenę, a cobot przy pomocy odpowiednio zaprojektowanego chwytaka wyciąga obiekty z pojemnika, który jest nimi wypełniony często w chaotyczny, nieuporządkowany sposób. W kontenerze znajdują się detale jednego rodzaju o określonym przeznaczeniu. Są one bardzo zróżnicowane pod względem wielkości, koloru oraz materiału. Dzięki wdrożeniu takiej aplikacji koszty związane z przetwarzaniem zasobów w przedsiębiorstwie ulegają zmniejszeniu, gdyż uporządkowany załadunek kosztowałby zbyt wielkich nakładów pracy, czasu i pieniędzy. Procedurę Bin pickingu można podzielić na kilka głównych kroków:

- 1) Identyfikacja obiektów – bardzo ważnym elementem tutaj jest dobór odpowiedniej kamery 3D w zależności od rodzaju detalu oraz warunków otoczenia.
- 2) Wyjmowanie detali – odpowiednie algorytmy (mogą to być klasyczne metody przetwarzania obrazów lub też algorytmy sztucznej inteligencji) określają położenie obiektu w przestrzeni, a następnie program nadrzędny oblicza ścieżkę pracy robota w taki sposób, aby była ona bezkolizyjna.
- 3) Odkładanie obiektów – na sam koniec cyklu pracy ramię robota musi odłożyć za-

brany z pojemnika detal w zdefiniowane miejsce o zadanej orientacji w celu dalszej obróbki.

W procesie Bin pickingu dąży się do całkowitego opróżnienia pojemnika ze znajdujących się w nim detali.

Mimo znaczącego rozwoju technologicznego problem Bin pickingu nadal stanowi duże wyzwanie w robotyce. Problematiczne przedmioty mają zazwyczaj skomplikowane kształty, trudne do manipulowania, wzajemnie splątane ze sobą czy też silnie odbijające światło. Słabe wykrywanie obiektów może prowadzić do kolizji, uszkodzeń robota bądź innych części, zmniejszenia wydajności lub nawet złego planowania trajektorii ruchu ramienia robota. Stąd też, dobierając odpowiednie rozwiązanie dla problemu Bin pickingu, należy wziąć pod uwagę i dokładnie przeanalizować dużą liczbę czynników, aby zaprojektowany system działał zgodnie z oczekiwaniami.

7.4. Ogólny opis projektu

Do stworzenia odpowiedniego systemu posłużono się urządzeniami producenta Photoneo. Poniżej znajdują się wyszczególnione elementy wchodzące w skład systemu (rysunek 7.1):

- zasilacz 230VAC/20VDC, 60 W; przewody zasilające AC, DC, w tym przewód PoE,
- kontroler wizyjny – wersja przemysłowa,
- PhoXi 3D Scanner L,
- przyrządy służące do kalibracji – piłka oraz plansza.

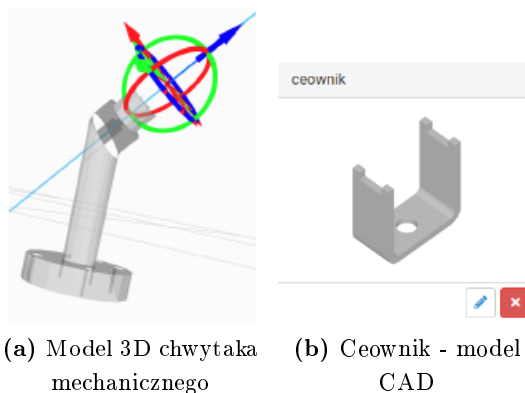


Rysunek 7.1. Urządzenia wchodzące w skład projektu [11]

7.5. Architektura projektu

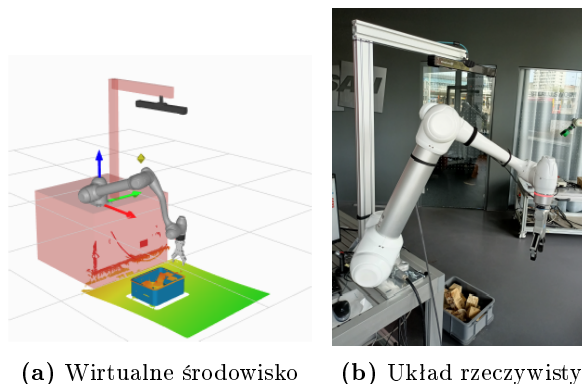
W celu zaimplementowania rozwiązania do zagadnienia Bin pickingu posłużono się aplikacją webową, dostarczaną przez producenta – Bin Picking Studio (BPS). Oprogramowanie to bazuje na modelach 3D, dzięki czemu jest bardzo uniwersalne. W procesie Bin pickingu możliwe jest wykorzystanie każdego rodzaju obiektów, wystarczy stworzyć jedynie odpowiedni model CAD. Główne kroki, jakie należy wykonać w celu uruchomienia procesu Bin pickingu to:

- 1) Wybór robota: cobot Doosan M1013 [11].
- 2) Dodanie chwytaków: mechanicznego oraz magnetycznego (wraz z ustaleniem punktów TCP), a także detali w postaci modeli 3D (rysunek 7.2).



Rysunek 7.2. Modele 3D

- 3) Określenie punktów, które mają zostać uwzględnione w planowaniu trajektorii ramienia robota.
- 4) Kalibracja oraz konfiguracja systemu wizyjnego z wykorzystaniem języka programowania Python.
- 5) Stworzenie wirtualnego środowiska niezbędnego podczas planowania ścieżki (rysunek 7.3).



Rysunek 7.3. Modele 3D

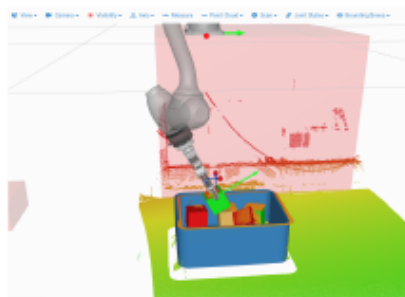
7.6. Testy projektu i przeprowadzenie badań

Sprawdzenie poprawności działania oraz efektywności zaimplementowanej aplikacji Bin pickingu polegało na wykonaniu szeregu badań z użyciem skanera producenta Photoneo, gdzie obserwowano wpływ rodzaju obiektu, a przede wszystkim jego kształtu i właściwości na efektywność procesu w zależności od wybranego rodzaju chwytaka dla robota współpracującego.

7.6.1. Chwytnik mechaniczny

W tabeli 7.1 przedstawiono rezultaty doświadczeń wraz z ich podstawowym opracowaniem. Niestety, jak wskazują powyższe dane, żaden z testów nie zakończył się w 100% poprawnie, kiedy to robot współpracujący dokonałby całkowitego opróżnienia pojemnika z obiektów. W głównej mierze przyczyną okazywała się kolizja chwytaka z innymi obiektami, które nie zostały rozpoznane przez kontroler wizyjny, więc dla wykonującego się programu była to wolna przestrzeń, gdzie chwytak może bezinwazyjnie operować. Pociągą to za sobą stwierdzenie, iż w przypadku wyboru tego rodzaju chwytaka bardzo ważnym elementem w procesie pobierania detali z pojemnika jest konieczność występowania choć niewielkich odstępów (rzędu szerokości palców chwytaka mechanicznego z pewną dodatkową tolerancją) pomiędzy obiektami. Będzie to pozwalało na prawidłowe pochwycenie detalu, a co za tym idzie – na zmniejszenie ryzyka kolizji. Niemniej jednak takie ograniczenie w warunkach przemysłowych nie jest możliwe do spełnienia. Ma ono zastosowanie w aplikacjach typu pick & place, natomiast zjawisko Bin pickingu polega na wybieraniu detali z kontenera, który jest wypełniony nimi w sposób chaotyczny, nieuporządkowany, co od razu neguje niestety powyższe stwierdzenie. Innym powodem zakończenia się programu był fakt, iż kontroler nie potrafił w pewnym momencie rozpoznać kolejnych detali, co najczęściej objawiało się w przypadku metalowych ceowników. W takim przypadku kontroler wizyjny dokonuje jeszcze kilka dodatkowych skanów, których liczbę może ustalić sam użytkownik. W przypadku spełnienia się tego warunku kontroler kończy proces Bin pickingu z odpowiednim kodem zakończenia. Przyczyny tego zjawiska można poszukiwać w działaniu wykorzystywanego sprzętu. Po dokładniejszej analizie dokumentacji technicznej skanera laserowego oraz porównaniu jej z pozostałymi modelami tego urządzenia dostępnymi u producenta wysunięty został wniosek, iż parametry techniczne wykorzystywanego sprzętu nie są odpowiednie dla obiektów o tak małych rozmiarach jak opisane wyżej. Stąd najlepszym rozwiązaniem jest dokonanie wymiany skanera laserowego i zastąpienie go innym, o mniejszych rozmiarach, co przekłada się na większą szczegółowość skanów. Przykładowa aplikacja z wykorzystaniem chwytaka mechanicznego zaprezentowana została na rysunku 7.4.

Obiekty oznaczone kolorem zielonym oznaczają, iż są gotowe do pochwycenia, kolor czerwony to brak obliczonej trajektorii, obiekty koloru brązowego z kolei to detale, które nie mogą być zabrane w danym momencie przede wszystkim przez zablokowanie ich przez inne detale z kontenera.



Rysunek 7.4. Pobieranie kostek – chwytnik mechaniczny

Tabela 7.1. Wyniki badań dla chwytaka mechanicznego

Rodzaj detalu	Nr testu	Liczba detali w kontenerze	Liczba poprawnie zabranych detali	Liczba detali pozostawionych	Skuteczność [%]	Średnia [%]	Powód zakończenia
Drewniana kostka	1	16	5	11	31.25	43.75	kolizja
	2	16	7	9	43.75		kolizja
	3	16	6	10	37.50		kolizja
	4	16	9	7	56.25		kolizja
	5	16	8	8	50.00		kolizja
Rolka	1	32	6	26	18.75	17.50	kolizja
	2	32	12	20	37.50		kolizja
	3	32	1	31	3.13		kolizja
	4	32	7	25	21.88		kolizja
	5	32	2	30	6.25		kolizja
Metalowy ceownik	1	45	1	44	2.22	7.11	brak rozpoznania
	2	45	3	42	6.67		brak rozpoznania
	3	45	5	40	11.11		brak rozpoznania
	4	45	3	42	6.67		brak rozpoznania
	5	45	4	41	8.89		brak rozpoznania

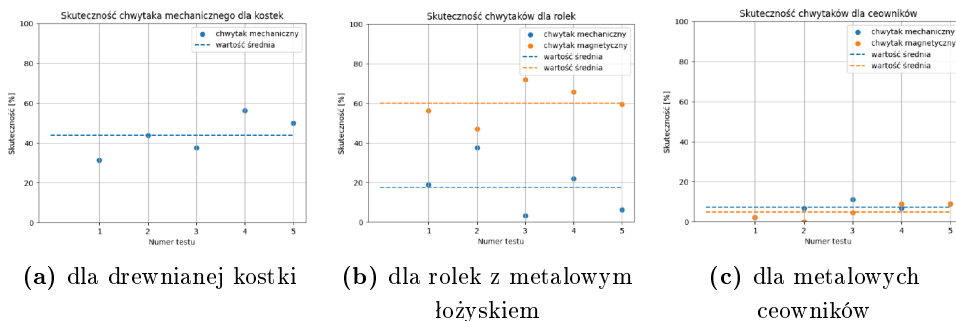
7.6.2. Chwytnak magnetyczny

Drugim rodzajem chwytaka, który był wykorzystany we współpracy z Bin Picking Studio jest chwytak magnetyczny. Przeprowadzone działania badawcze za jego pomocą są niemal identyczne jak w przypadku chwytaka mechanicznego.

W kolejnej tabeli (tabela 7.2), zestawione są rezultaty doświadczeń wraz z ich podstawowym opracowaniem.

Analizując dane zawarte w tabeli 7.2, można łatwo stwierdzić, iż w przypadku metalowych ceowników skuteczność procesu Bin pickingu nie uległa żadnej pozytywnej zmianie (nawet trochę zmalała). Jednak odnosząc się do rolek z metalowym łożyskiem, w oczu rzuca się od razu zdecydowanie lepszy wynik niż w stosunku do chwytaka mechanicznego, bo aż o nieco ponad 16 punktów procentowych. Wartość ta wynika bezpośrednio z mniejszej liczby kolizji, gdyż specyfika konstrukcji chwytaka magnetycznego pozwala na dość bezinwazyjny, w stosunku do pozostałych obiektów, kontakt z detalem w celu jego pobrania z pojemnika. W czasie testów nie zarejestrowano żadnych kolizji, a jedyną przyczyną zakończenia programu robota współpracującego był brak rozpoznania pozostałych w kontenerze obiektów. Niestety jego konstrukcja jest również jedną z wad. Okazuje się, że długość chwytaka jest zbyt mała, aby pochwycić detale w pewnych specyficznych miejscach, na przykład blisko ścian pojemnika. Wynika to z faktu, iż szóste ogniwo manipulatora musi znajdować się pod kątem 45° w stosunku do podłoża w celu pochwycenia obiektu, kiedy to elektromagnes jest ustawiony dokładnie poziomo. Implikuje to warunek, iż ścianki pojemnika nie mogą być zbyt wysokie, gdyż istnieje wówczas bardzo duże ryzyko kolizji narzędzia robota z kontenerem.

Sporządzono dodatkowo wykresy punktowe przedstawiające porównanie skuteczności obu chwytaków względem rozpatrywanych obiektów (rysunek 7.5).



Rysunek 7.5. Skuteczność chwytaka

Na powyższych wykresach (rysunek 7.5) w bardzo przyjazny dla oka sposób zaprezentowano wyniki testów zawarte w tabelach (tabela 7.1 oraz 7.2). Dzięki takiemu rozwiązaniu jeszcze lepiej widoczne jest, iż metalowe ceowniki są bardzo trudnymi do rozpoznania obiektami, co przekłada się na otrzymane wyniki. Z kolei w pozostałych przypadkach otrzymane dane oscylują wokół obliczonej wcześniej wartości średniej.

Tabela 7.2. Wyniki badań dla chwytaka magnetycznego

Rodzaj detalu	Nr testu	Liczba detali w kontenerze	Liczba poprawnie zabranych detali	Liczba detali pozostawionych	Skuteczność [%]	Średnia [%]	Powód zakończenia
Rollka	1	32	18	14	56.25	60.0	brak rozpoznania
	2	32	15	17	46.88		brak rozpoznania
	3	32	23	9	71.88		brak rozpoznania
	4	32	21	11	65.63		brak rozpoznania
	5	32	19	13	59.38		brak rozpoznania
Metalowy ceownik	1	45	1	44	2,22	4.89	brak rozpoznania
	2	45	0	45	0		brak rozpoznania
	3	45	2	43	4.44		brak rozpoznania
	4	45	4	41	8.89		brak rozpoznania
	5	45	4	41	8,89		brak rozpoznania

7.7. Optymalizacja procesu

Optymalizacja to wyznaczenie najlepszego rozwiązania pod względem wcześniej wybranego kryterium jakości. Jest to dość istotny etap rozwoju projektu. Pozwala on na ulepszenie działającego już systemu, aby poprawić pewne wskaźniki. W aplikacjach przemysłowych często skutkuje to redukcją kosztów czy też zwiększeniem mocy przerobowej procesu, a więc poprawą jego wydajności. W zaprezentowanej aplikacji Bin pickingu jako kryteria optymalizacyjne wybrano wskaźnik skuteczności procesu, a także jakość skanowania przez skaner laserowy. Przeprowadzone testy miały na celu określenie podstawowych własności dla ich różnych wariantów.

1) Optymalizacja doboru detali pod względem ich właściwości

Analizując tabele z wynikami testów oraz wnioski wyciągnięte na ich podstawie, łatwo stwierdzić, iż dobór obiektów do aplikacji Bin pickingu jest kluczowym zagadnieniem. W zależności przede wszystkim od ich kształtu wskazane będzie użycie innego narzędzia przez robot współpracujący, aby skuteczność procesu mogła zostać zmaksymalizowana. Oba rodzaje chwytaków najlepiej będą współpracowały z obiektami o relatywnie dużych rozmiarach w stosunku do pojemnika i w miarę regularnych kształtach.

2) Optymalizacja parametrów skanera laserowego

Dla każdego elementu, który chcemy wykorzystać w procesie Bin pickingu, powinniśmy ustawić indywidualne parametry skanowania. Są one zależne od materiału, z którego dany detal jest wykonany (tekstura odgrywa tutaj dużą rolę), w jaki sposób odbija on światło (a więc uwzględnia to również jego kształt), jego rozmiarów, a także od innych właściwości.

7.8. Podsumowanie

Praca polegała na stworzeniu projektu, którego istotą była integracja robota współpracującego Doosan M1013, charakteryzującego się wysokiej klasy umiejętnościami do rozwiązywania skomplikowanych zadań, wraz z dedykowanym rozwiązaniem dla rozpatrywanego problemu marki Photoneo – Bin Picking Studio. Projekt ten został stworzony w celu sprawdzenia, w jaki sposób technologia Bin pickingu wpisuje się w standardy przemysłu 4.0.

Część badawcza sprowadzała się do wykonania szeregu testów, które pozwoliły na dość solidny przegląd wybranego produktu.

Projekt pozwolił również na zgłębienie szerszej wiedzy z zakresu robotyki oraz sterowania robotami współpracującymi przy pomocy Teach Pendanta, ale także z wykorzystaniem przygotowanych uprzednio skryptów w języku Python.

System Bin picking zdecydowanie przyczyni się do zwiększenia efektywności procesów produkcyjnych oraz magazynowania i podkreśli również stwierdzenie, iż warto iść w kierunku cobotyzacji przedsiębiorstw. Zastosowanie tego typu manipulatorów pozwala pracownikom na zajmowanie się wygodniejszymi dla nich zadaniami, ale przede wszystkim bardziej ambitnymi. Wówczas powtarzalne i nużące prace są wykonywane przez robota. Pozwala to dodatkowo zredukować ryzyko wypadku, urazu, gdyż coboty mogą pracować

w sposób ciągły nawet w środowisku, które jest w dłuższej perspektywie niekorzystne dla zdrowia człowieka.

Bibliografia

- [1] Artykuł na temat rynku robotycznego w 2022 roku. Dostępny online: <https://zrobotyzowani.pl/informacje/newsy/4684/ifr-prezentuje-world-robotics-report-2022> (dostęp: 06.06.2023).
- [2] Coboty – czym są, jak działają? Typy cobotów Dostępny online: <https://www.automatyka.pl/artykuly/coboty-czym-sa-jak-dzialaja-typy-cobotow-194256-6> (dostęp: 06.06.2023).
- [3] Historia robotów współpracujących I. Dostępny online: <https://grzegorzczekala.pl/calmedu/artykuly/historia-robotow-cz-3-cobots/> (dostęp: 06.06.2023).
- [4] Historia robotów współpracujących II. Dostępny online: <https://grzegorzczekala.pl/calmedu/artykuly/historia-robotow-cz-3-cobots/> (dostęp: 06.06.2023).
- [5] Bezpieczeństwo systemów z robotami współpracującymi oraz metody współpracy z człowiekiem. Dostępny online: <https://fugai.pl/bezpieczenstwo-systemow-z-robotami-wspolpracujacych-cz-1/> (dostęp: 06.06.2023).
- [6] Wykłady dra inż. Roberta Muszyńskiego z kursu „Współpraca robotów”
- [7] Cobot – Co to jest i jak działa? Dostępny online: <https://botland.com.pl/blog/cobot-co-to-jest-i-jak-dziala/> (dostęp: 06.06.2023).
- [8] Bin Picking do zautomatyzowanego pobierania elementów. Dostępny online: <https://www.blumenbecker.com/pl/automatyka-przemyslowa/robotyka-przemyslowa/Binpicking/> (dostęp: 06.06.2023).
- [9] What is Bin picking. Dostępny online: <https://www.zivid.com/applications/Binpicking> (dostęp: 06.06.2023).
- [10] Aplikacja Bin picking. Dostępny online: <https://www.mech-mind.com/solution/Binpicking.html> (dostęp: 06.06.2023).
- [11] System marki Photoneo. Dostępny online: <https://www.photoneo.com/Binpicking-studio> (dostęp: 06.06.2023).
- [12] Roboty współpracujące Doosan. Dostępny online: <https://coboty-dooan.pl/> (dostęp: 06.06.2023).

Wydział Elektryczny

Przydomowa minielektrownia wodna

inż. Jakub Totczyk

Elektromechatronika

dr inż. Krystian Krawczyk

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Celem pracy było opracowanie minielektrowni wodnej, umożliwiającej ładowanie odbiorników korzystających ze złącza USB. Zakres obejmował przegląd literatury, opracowanie projektu wraz z układami sterowania i zasilania oraz wykonanie i testy. Pracę podzielono na kolejne etapy realizacji. Po wstępnych pomiarach, korzystając z dostępnej literatury, zaprojektowano i wykonano konstrukcję spiętrzającą wodę, koło wodne, montaż generatora, układ zasilania i układ sterowania. Wykonano pomiary gotowej instalacji i zaprezentowano jej funkcjonalność. Przedstawiono i uzasadniono celowość tworzenia takich konstrukcji przy małych, przydomowych ciekach wodnych. Uzyskana wydajność była mała, jednak wystarczająca do przewidzianego zastosowania.

8.1. Cel i założenia

Celem pracy było opracowanie minielektrowni wodnej, umożliwiającej ładowanie telefonów komórkowych. Zakres pracy objął przegląd literatury, opracowanie projektu minielektrowni wodnej wraz z układami sterowania i ładowania dla odbiorników korzystających ze złącza USB, wykonanie elektrowni i testy. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- umożliwienie bezpośredniego ładowania urządzeń poprzez port USB,
- badanie możliwości zastosowania w warunkach przydomowych,
- ładowanie ogniw akumulatorowych przy pomocy generatora napędzanego kołem wodnym,
- sterowanie układu realizowane poprzez mikrokontroler.

8.2. Wstęp teoretyczny

Elektrownie wodne przetwarzają energię mechaniczną wody w strumieniu w energię elektryczną. Zazwyczaj energia wody przekazywana jest na turbinę połączoną wałem z generatorem. Do generatora przyłączane są układy przekształtnikowe i stabilizujące napięcie,

które z kolei przyłączane są do sieci elektroenergetycznych. Rodzaj turbiny dobierany jest na podstawie wysokości spadu czy prędkości rzeki. W zależności od konstrukcji rozróżnia się koła wodne podsiębierne (wykorzystanie głównie energii kinetycznej), śródsiębierne (wykorzystanie energii kinetycznej oraz potencjalnej) oraz nasiębierne (wykorzystanie głównie energii potencjalnej).

Z racji, że w pracy opisywane jest zastosowanie na bardzo małym strumieniu, większość metod opisanych w literaturze wymagała odpowiedniego uproszczenia. Na przykład metoda pomiaru prędkości wody metodą pływakową [1], sugerowała umieszczenie pływaka na dnie, a następnie po puszczeniu go, zbadanie jak daleko przepłynął do wynurzenia, dzięki czemu możliwe było wyznaczenie średniej prędkości na całej głębokości. Przy głębokości badanego cieku, nieprzekraczającej 10 cm byłoby to bardzo problematyczne do zbadania, czy nawet zmierzenia czasu wypływania.

Moc dostępną na wale koła wodnego przedstawia się równaniem (8.1) o pięciu składowych [2]

$$P_k = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_k \quad (8.1)$$

gdzie:

- P_k – moc dostępna na wale koła,
- Q – natężenie przepływu wody,
- ρ – gęstość wody,
- g – wartość przyspieszenia ziemskiego,
- H – spadek wody,
- η_k – sprawność koła.

8.3. Projekt i wykonanie

Po pierwsze należało wykonać odpowiednie pomiary i zbudować konstrukcję spiętrzającą wodę. Następnie skonstruować wybraną turbinę i dobrać jednostkę generatora. Dalej zaprojektować układ sterowania i pomiarowy. Na końcu zbadać minielekrownię i przeprowadzić pomiary.

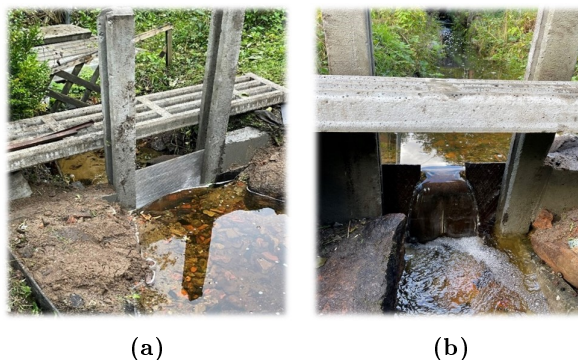
8.3.1. Pomiary wstępne

Według wzoru na moc dostępną na wale koła (8.1) aby wyznaczyć możliwą do osiągnięcia moc, należało najpierw obliczyć natężenie przepływu Q , czyli objętość wody przepływającej w jednostce czasu przez przekrój poprzeczny koryta. Metodą wykorzystaną w obliczeniach było wyznaczenie przepływu, obliczając uśrednione pole powierzchni przekroju poprzecznego poprzez pomiar głębokości w różnych punktach oraz pomnożenie go przez szerokość cieku wodnego. Prędkość wody obliczona została za pomocą pływaka styropianowego (określenie w jakim czasie przepłynie po powierzchni dany dystans). Spadek wody dobrano na podstawie maksymalnego możliwego spiętrzenia, ograniczonego głównie przybrzeżnym budynkiem, od którego zachowano 0,5 m wysokości do poziomu lustra wody. Tak więc od lustra wody za spiętrzeniem do osi szczeliny przepływowej wody założono 0,3 m. Obliczony przepływ to około 0,022 m³/s. Na podstawie interpretacji źródeł

literaturowych i dopasowaniu ich do danego zastosowania założona sprawność wyniosła 40%.

8.3.2. Wykonanie konstrukcji spiętrzającej wodę

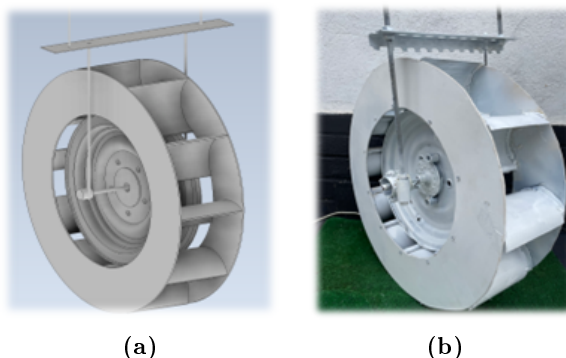
Do konstrukcji spiętrzającej wodę wykorzystano płytę betonową opartą na brzegach strumienia, dwa słupki betonowe wkopane w koryto i płytę stalową jako przesłonę (pierwotnie miały to być płyty z poliwęglanu komorowego). Według projektu boki zostały zalane betonem z uwzględnieniem kanału przelewowego w razie nadmiernych opadów. Konstrukcję wstępną i końcową przedstawiono na rysunku 8.1.



Rysunek 8.1. Konstrukcja spiętrzająca wodę

8.3.3. Wykonanie koła wodnego

Z racji, iż ciek wodny jest zarówno wolny, jak i z niskim spadem, zdecydowano się kontynuować pracę, bazując na kole śródsiębiernym. Koło wodne zbudowano na bazie felgi. Łopatki wykonano z materiału PVC z racji wytrzymałości na warunki środowiskowe. Dopasowano długość i kształt łopatek do kąta padania wody wynoszącego około 40° , dodano boczne ściany łopatek, tworząc kubelki, a całe koło pomalowano. Na rysunku 8.2 przedstawiono projekt wykonany w programie Inventor oraz zdjęcie modelu rzeczywistego.



Rysunek 8.2. Projekt i realizacja koła wodnego

8.3.4. Dobór generatora

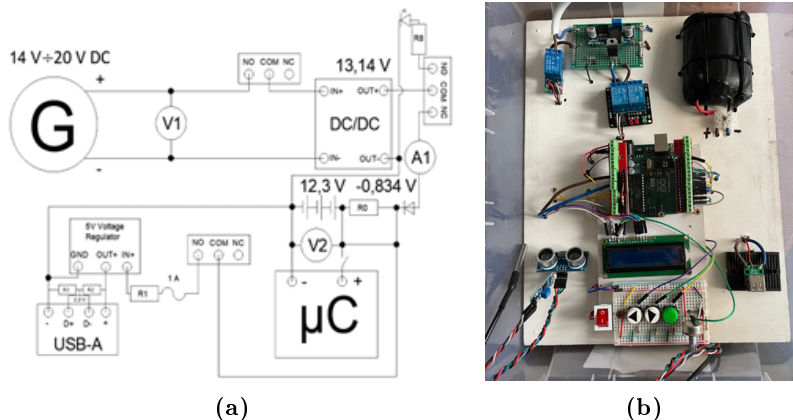
Znając szacunkową moc maksymalną możliwą do uzyskania na wale silnika, wynoszącą 25,9 W, można było przystąpić do wyboru silnika pracującego jako generator. Ze względu na nieduży koszt, brak konieczności stosowania prostownika oraz osobnej przekładni (wbudowana przekładnia 1:150) do roli generatora wybrano silnik DC, model Pololu 4687. Zastosowano połączenie za pomocą stałego sprzęgła aluminiowego. Wał napędowy w postaci śruby o średnicy 8 mm ścięto w miejscu połączenia, tworząc połączenie kształtowe zamiast ciernego. Z generatora wyprowadzono też przewody i zabezpieczono przed dostępem wody za pomocą gumy. Do tego celu wykorzystano dętkę rowerową oraz opaski zaciskowe, co widać na rysunku 8.3.



Rysunek 8.3. Montaż i połączenie silnika

8.3.5. Układ zasilania i sterowania

Na rysunku 8.4 przedstawiono poglądowy projekt instalacji wykonany w programie AutoCAD. Zaczynając od generatora (G), założono zakres napięć od 14 V do 20 V, z racji zmierzenia napięcia bez obciążenia na około 18 V. V1 oznacza pomiar napięcia na generatorze. Dalej, zastosowano przełącznik w celu sterowania załączeniem generatora. Następnie zastosowano przekształtnik prądu DC/DC oraz przetwornicę step-down w celu obniżenia napięcia. Napięcie wyjściowe przeprowadzane przez drugi przełącznik to 13,14 V, dobrane na podstawie sumy napięć ładowania trzech szeregowo połączonych ogniw litowo-jonowych 18650 (napięcie każdego z naładowanych ogniw przyjęto na 4,1 V) oraz zmierzonego spadku napięcia na diodzie zabezpieczającej zmierzonej na 0,834 V. Normalnie otwarte (NO) połączenie drugiego przełącznika wyprowadzono na wejście zewnętrznego oświetlenia. Normalnie zamknięte (NC) połączenie prowadzi przez wyżej wspomnianą diodę oraz rezystor ograniczający prąd R0 do ogniw. W tym miejscu oznaczono również miejsce pomiaru prądu ładowania ogniw A1. Równoległe do ogniw połączono pomiar napięcia ogniw V2 oraz mikrokontroler załączany przełącznikiem kołyskowym, a także układ do zasilania portu USB typu A. Port ten jest zasilany przez trzeci przełącznik oraz rezystor ograniczający R1 i bezpiecznik drutowy o prądzie maksymalnym 1 A, a odpowiednie napięcie uzyskano dzięki stabilizatorowi napięcia 5 V.



Rysunek 8.4. Projekt oraz realizacja układu

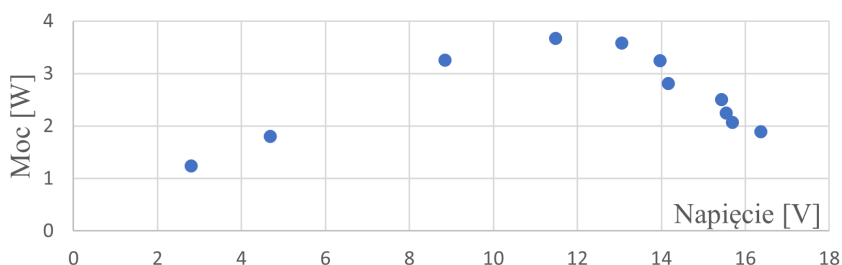
Do sterowania wybrano układ Arduino Uno zbudowany na podstawie mikrokontrolera Atmega328 ze względu na proste środowisko programowania ArduinoIDE oraz ogólną jego elastyczność w różnych zastosowaniach. Sterowanie obejmowało przekaźniki, wyświetlacz LCD z przyciskami, pomiary napięć i natężenia prądu, czujnik temperatury wody, ultradźwiękowy czujnik poziomu wody oraz czujnik natężenia światła do załączenia oświetlenia zewnętrznego.

8.4. Uzyskane wyniki

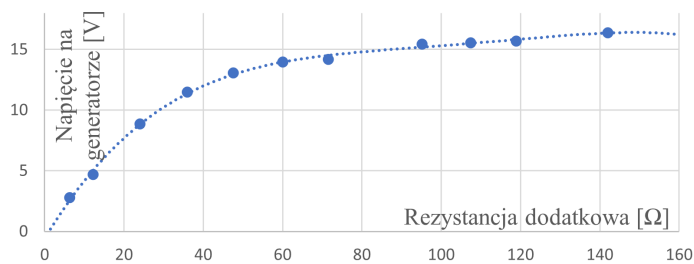
Wykonano pomiary, które następnie przedstawiono w formie charakterystyk. Wykorzystano dostępne rezystory o rezystancji 47Ω i mocy 1 W . W celu uzyskania różnych rezystancji oraz ograniczenia przegrzewania się elementów wykorzystano połączenia równoległe oraz szeregowe tych rezystorów. Przy dołączaniu do układu generatora każdego z pakietu rezystorów, wykonywano pomiar napięcia na generatorze. W celu pomiaru czasu, w jakim koło wykonuje jeden obrót wykorzystano nagranie wideo o częstotliwości nagrywania 240 klatek na sekundę. Na koło naklejono pasek taśmy, na podstawie którego wybierano pozycję początkową koła, a odpowiadający mu numer klatki nagrania zapisywano jako klatka początku pomiaru. Dalej klatka po klatce odtwarzano nagranie do momentu ponownego osiągnięcia pierwotnej pozycji koła. Zapisywano tę klatkę jako klatkę końca pomiaru. Odejmując klatkę końca od klatki początku pomiaru, otrzymujemy całkowitą liczbę klatek nagrania przypadających na jeden pełny obrót. Wartość tę dzielimy przez częstotliwość rejestracji klatek równą 240 . Otrzymałą wartość odwracamy i dzielimy przez 60 w celu uzyskania odpowiedniej jednostki prędkości obrotowej. Tabela 8.1 zawiera wyniki pomiarów końcowych. Rysunek 8.5 to wykres mocy obliczonej na podstawie znanej rezystancji układu i napięcia generatora. Rysunek 8.6 z kolei to zależność napięcia uzyskiwanego z generatora w zależności od rezystancji przyłączonej do układu. Ostatni z wykresów (rysunek 8.7) jest prezentacją rzeczywistych wyników działania układu ładowania ogniw. Na koniec (rysunek 8.8) umieszczono zdjęcia całego projektu w dzień oraz w nocy (wraz z dodatkowym źródłem światła zasilanym przez ogniwa), a także samego koła wodnego.

Tabela 8.1. Pomiary prędkości obrotowej koła wodnego oraz napięcia na generatorze przy zmiennej rezystancji dodatkowej szeregowo połączonej z generatorem

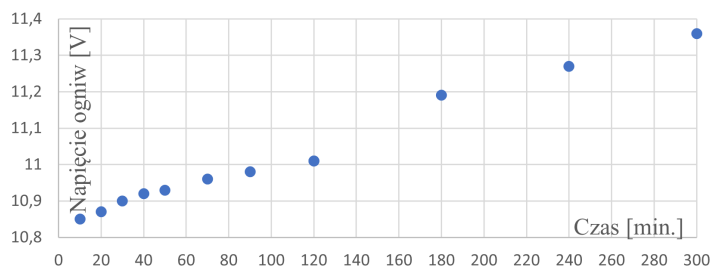
Klatka początku pomiaru	Klatka końca pomiaru	Ilość klatek na jeden obrót	Czas potrzebny na jeden pełny obrót [s/obr]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Rezystancja dodatkowa [Ω]	Napięcie na generatorze [V]
3561	3980		1,746	34,37	24,0	8,85
3426	4089	663	2,763	21,72	12,2	4,68
4538	4841	303	1,263	47,52	107,4	15,54
2173	2479	306	1,275	47,06	95,2	15,43
4052	4349	297	1,238	48,48	142,0	16,37
4005	4325	320	1,333	45,00	60,0	13,97
4721	5079	358	1,492	40,22	35,9	11,48
3066	3926	860	3,583	16,74	6,3	2,80
3559	3896	337	1,404	42,73	47,6	13,06
779	1084	305	1,271	47,21	118,9	15,69
3948	4266	318	1,325	45,28	71,5	14,17
631	902	283	1,179	53,14	0,0	18,45



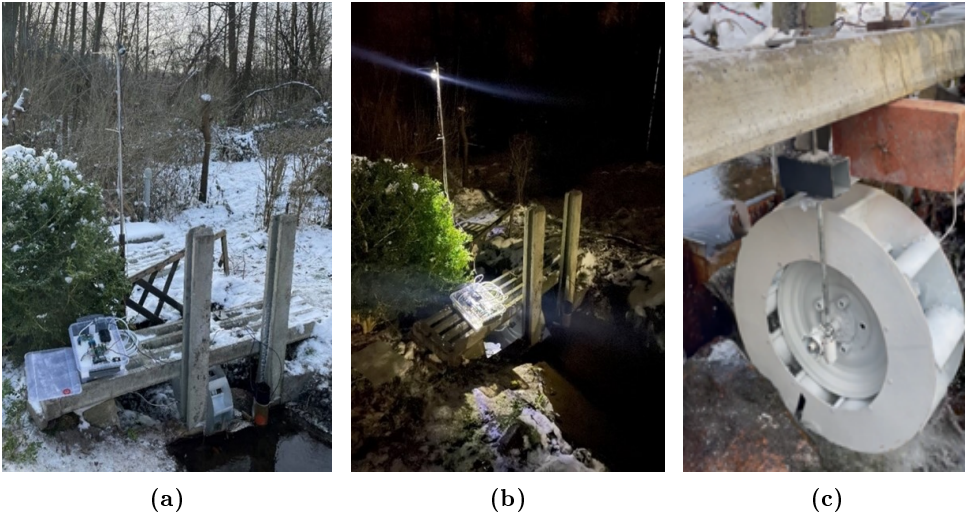
Rysunek 8.5. Wykres zależności generowanej mocy od napięcia na generatorze



Rysunek 8.6. Wykres zależności napięcia na generatorze od dodatkowej rezystancji



Rysunek 8.7. Wykres zależności napięcia pakietu ogniw od czasu



Rysunek 8.8. Prezentacja całości układu w dzień i w nocy oraz zamontowanego koła wodnego

8.4.1. Podsumowanie

Wykonano pomiary, projekty oraz fizyczne konstrukcje minielektroni wodnej. Udało się spełnić założenia projektowe i zrealizować przyjęty zakres pracy. Funkcjonalność układu pozwala na pomiary temperatury wody, poziomu wody, napięcia na generatorze, napięcia pakietu ogniw oraz prądu przez nie płynące. Dodatkowy czujnik natężenia światła umożliwia automatyczne załączenie oświetlenia w przypadku gdy nie są ładowane ogniwa.

Teoretyczna moc dostępna na wale (25,9 W) okazała się większa niż uzyskana w rzeczywistości (poniżej 4 W). Może to być związane z przyjętymi do obliczeń wartościami oraz zastosowanymi przybliżeniami z racji małej skali konstrukcji. Straty na silniku DC pracującym jako generator, niska sprawność i budowa zastosowanego koła wodnego, niepełne wykorzystanie nurtu cieku wodnego, są to czynniki wpływające na końcową sprawność całej instalacji. Przy obliczeniach nie wzięto też pod uwagę strat wynikających z zastosowanych przekształtników, takich jak przetwornica step-down czy stabilizator napięcia.

Nie przeprowadzono pomiarów pełnego ładowania pakietu ogniw, jednak analizując wykres napięcia od czasu ładowania z rysunku 8.7 i przyjmując napięcie rozładowania na 10,6 V, a napięcie naładowania na 12 V, można założyć, że naładowanie zajęłoby kilkanaście godzin. Sumaryczna pojemność pakietu ogniw z racji połączenia szeregowego jest równa pojedynczemu ogniwu (2600 mAh). Jednak ze względu na wykorzystanie przetwornicy step-down możliwość naładowania urządzeń powinno się rozpatrywać pod kątem energii wyrażanej w Wh (watogodziny). Mnożymy więc deklarowaną pojemność przez napięcie znamionowe (3,7 V) oraz liczbę ogniw, otrzymując 28,86 Wh. Typową pojemność baterii w telefonach przyjęto na 2000 mAh. Przy założonym napięciu baterii 3,8 V otrzymujemy 7,6 Wh. Pomijając straty związane z przetwarzaniem sygnału napięcia, pakiet ogniw pozwala na prawie czterokrotne naładowanie przykładowej baterii telefonu. Przyjmując ładowanie dwóch telefonów dziennie, wykonana minielektronia spełniałaby swoje zadanie.

Spiętrzenie nie wymaga okresowego zbierania wody, nawet w okresach suszy, zimą woda w cieku nie zamarza, a instalacja pozwala na pracę ciągłą. Nie zbadano układu pod względem działania w ujemnych temperaturach. Dłuższa ciągła praca mogłaby jednak wpływać negatywnie na żywotność układu ze względu na zużywalne szczotki komutacyjne zastosowanego silnika DC.

Dalszym rozwinięciem pracy mogłaby być próba zwiększenia sprawności, zmiana generatora (przykładowo na silnik prądu przemiennego) czy też zastosowanie innego rodzaju turbiny. Warta zbadania byłaby zmiana konstrukcji koła wodnego na koło nasiębierne. Możliwe byłoby też dodanie zdalnego sterowania przy pomocy odpowiednich modułów Wi-Fi, a także system akwizycji danych dotyczących temperatury czy poziomu wody w ciągu roku. Podczas okresów zwiększonych opadów przepływ wody rośnie, co pozwala na dalsze modyfikacje, takie jak zwiększenie kanału przepływowego czy poszerzenie łopatek w celu zwiększenia generowanej energii elektrycznej. Układ zasilania można by poszerzyć o regulację prądu ładowania ogniw.

Bibliografia

- [1] Steller J., Henke A., Kaniecki M., Przewodnik: „Jak zbudować małą elektrownię wodną? Przewodnik inwestora”, Instytut Maszyn Przepływowych PAN. Dostępny online: <http://trmew.pl/> (dostęp: 17-12-2022).
- [2] Wach J., Materiały laboratoryjne: „Dobór generatora do małej elektrowni wodnej”. Dostępny online: <http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~jwach> (dostęp: 17-12-2022).

Manipulator ramieniowy współpracujący z obrabiarką numeryczną CNC

inż. Michał Strapoć
Automatyka Przemysłowa

dr inż. Marcin Pawlak
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie stanowiska wyposażonego w model niewielkiego robota ramieniowego, który będzie współpracował z obrabiarką numeryczną CNC. Wykonany został projekt ramienia sześćoosiowego robota wraz z układem zasilania i sterowania. Podzespoły wykonane są przy wykorzystaniu technologii druku 3D, a układ napędowy stanowią silniki krokowe. Sterownik ramienia oparty jest na układzie mikroprocesorowym. Robot został zintegrowany z obrabiarką numeryczną CNC na stanowisku przeznaczonym do ich pracy. Manipulator poddany został testom związanym ze sterowaniem oraz obsługą. Na podstawie wykonanej konstrukcji ramienia pokazano, że możliwe jest przeprowadzenie procesu automatyzacji, stosując tanie i dostępne komponenty.

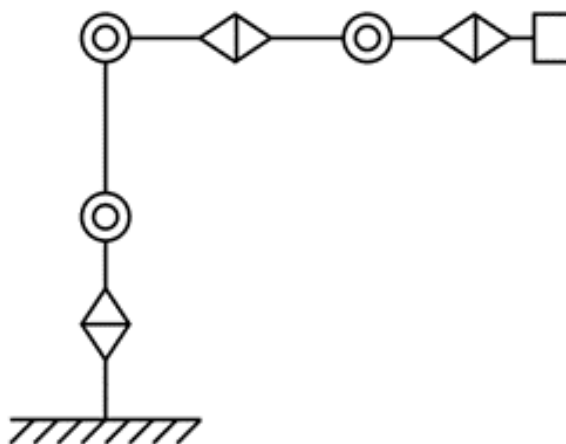
9.1. Cel i założenia

Układ sterujący robotem powinien umożliwiać wykonywanie powtarzalnych sekwencji ruchu uprzednio zaprogramowanych (nauczonych) przez operatora. Zakres pracy obejmował:

- przegląd istniejących rozwiązań technicznych w zakresie budowy i sterowania robotów,
- zaprojektowanie i wykonanie konstrukcji mechanicznej manipulatora ramieniowego (np. druk 3D),
- dobór podstawowych podzespołów elektronicznych i napędu robota,
- zaprojektowanie i zbudowanie elektronicznego sterownika robota,
- opracowanie programu dla mikrokontrolera sterującego pracą robota,
- wykonanie testów działania manipulatora w warunkach rzeczywistych na stanowisku z maszyną CNC.

9.2. Wstęp teoretyczny

Założeniem konstrukcji manipulatora ramieniowego była próba stworzenia urządzenia na kształt robota przemysłowego z zachowaniem części funkcjonalności oraz możliwości sterowania spotykanych w fabrycznych rozwiązaniach. Konstrukcja manipulatora oraz stosowane rozwiązania z założenia miały być dostępne dla każdej osoby, która posiada podstawowe zdolności manualne oraz minimalną wiedzę techniczną. Elementy wchodzące w skład konstrukcji miały być elementami możliwymi do wykonania bez ponoszenia wysokich kosztów związanych ze skomplikowaną obróbką, z tego względu technologia zastosowana do ich wykonania w głównej mierze opiera się na technologii druku 3D. Elektronika, jaka odpowiada za sterowanie oraz układ napędowy manipulatora wykorzystuje podzespoły dostępne w zakupie w większości sklepów modelarskich lub elektronicznych. Parametry charakterystyczne manipulatora są ściśle powiązane z obrabiarką oraz zrobotyzowanym stanowiskiem. Dobrane zostały tak, aby zapewnić możliwość umieszczania niewielkich detali przeznaczonych do obróbki w przestrzeni obrabiarki. Wykonany manipulator miał być urządzeniem kompaktowym, niewymagającym interwencji użytkownika w jego konstrukcję podczas wykorzystania rozwiązania na stanowisku zrobotyzowanym. Interfejs użytkownika miał pozwalać na prostotę sterowania, wprowadzanie podstawowych komend związanych z pracą maszyny oraz dostosowaniem manipulatora do współpracy z zewnętrzną obrabiarką numeryczną. Konstrukcja manipulatora jest konstrukcją szeregową przegubową, składającą się z sześciu przegubów. Przeguby te łączą się kolejno ze sobą w punktach wzajemnego obrotu. Dzięki temu przeguby manipulatora mogą pracować niezależnie od siebie i stanowić podstawę do składowych ruchu całego manipulatora. Manipulator w sposób schematyczny został przedstawiony na rysunku 9.1. Schemat przedstawia postać poszczególnych przegubów. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie liczby stopni swobody tego manipulatora zgodnie ze wzorem (9.1) przy założeniu, że każdy człon występujący w manipulatorze jest członem klasy piątej.



Rysunek 9.1. Schemat kinematyki manipulatora

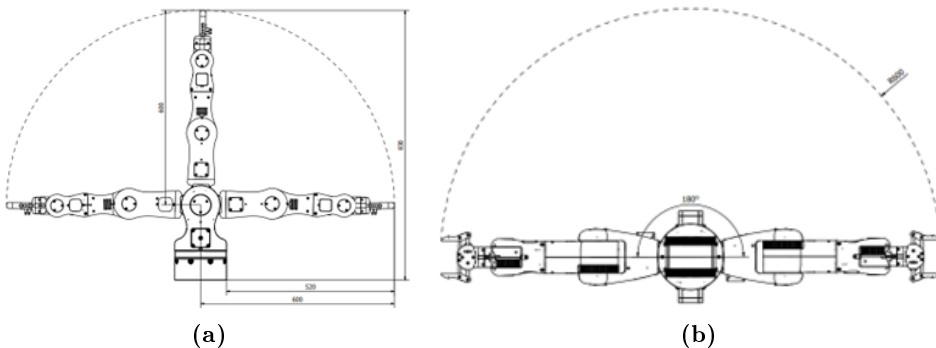
$$w = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 6 = 6 \quad (9.1)$$

gdzie:

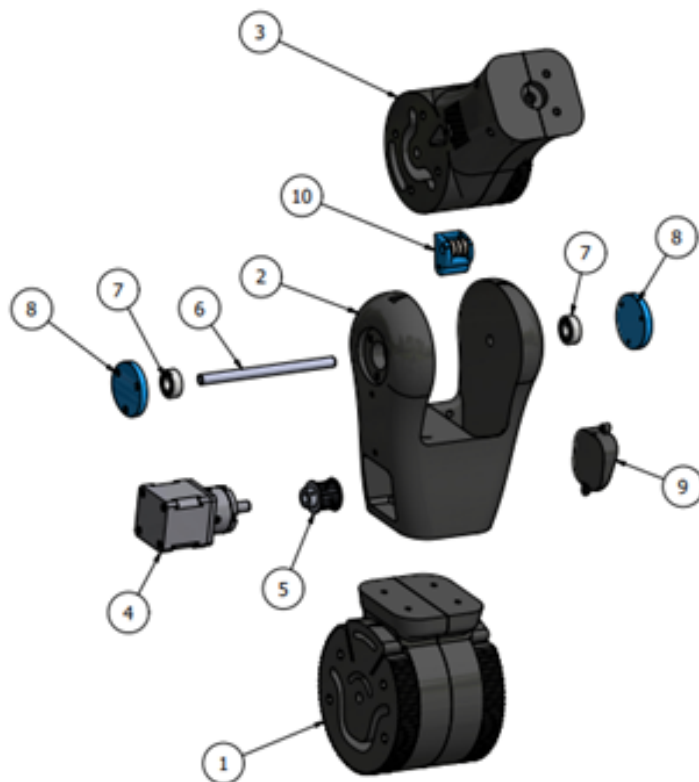
- n – liczba członów łańcucha kinematycznego,
- i – numer klasy dla danej liczby węzłów,
- p_i – liczba połączeń w danej klasie.

9.3. Projekt i wykonanie

Cała konstrukcja robota została zaprojektowana tak, aby wyglądem zbliżyć się do fabrycznych rozwiązań oraz aby zapewnić możliwie wysoką smukłość dla krawędzi. W związku z tym krawędzie zostały maksymalnie zaokrąglone. Wymiary oraz przewidywane zakresy ruchowe przedstawione są na rysunku 9.2a i 9.2b. Projekt przewidywał współpracę manipulatora z obrabiarką numeryczną, tak więc wymiary oraz zasięg roboczy był jednym z wymogów, jaki należało spełnić podczas przygotowywania konstrukcji. Aktualne wymiary pozwalają na zamontowanie manipulatora na stanowisku w pobliżu obrabiarki. Głównym elementem konstrukcji jest podstawa robota. To do niej mocowane będą kolejne elementy składowe ramienia. Podstawa montowana jest na wybranej powierzchni na stanowisku, gdzie robot będzie mógł pracować. Podstawa poza cechami montażowymi posiada również funkcję przekładni zębatej tworzącej pierwszy z przegubów robota. Kolejne przeguby konstrukcyjnie wykonane zostały w podobnej charakterystyce. Główne korpusy przegubów wyposażone zostały w silniki, aby te poprzez przekładnie pasowe mogły wprawiać w ruch całą konstrukcję. Na rysunku 9.3 przedstawione zostało złożenie przegubu trzeciego wraz z fragmentem przegubu czwartego.



Rysunek 9.2. Zarys przestrzeni roboczej manipulatora ramieniowego



Rysunek 9.3. Złożenie przegubu trzeciego, 1 – część ramienia trzeciego z nacięciem zębatym, 2 – ramię przegubu trzeciego, 3 – ramię przegubu czwartego, 4 – silnik krokowy NEMA17 z przekładnią planetarną, 5 – koło zębate, 6 – oś łącząca ramię trzecie z ramieniem czwartym, 7 – łożyska toczne kulowe zwykłe 608, 8 – osłona łożyska i osi, 9 – osłona koła zębatego, 10 – napinacz paska zębatego.

9.3.1. Dobór napędów i przekładni

Realizacja napędu w poszczególnych przegubach odbywa się przez wykorzystanie przekładni, które wprawiane są w ruch przez silnik krokowy. Zestawienie wszystkich danych dotyczących napędu przegubów przedstawiono w tabeli 9.1.

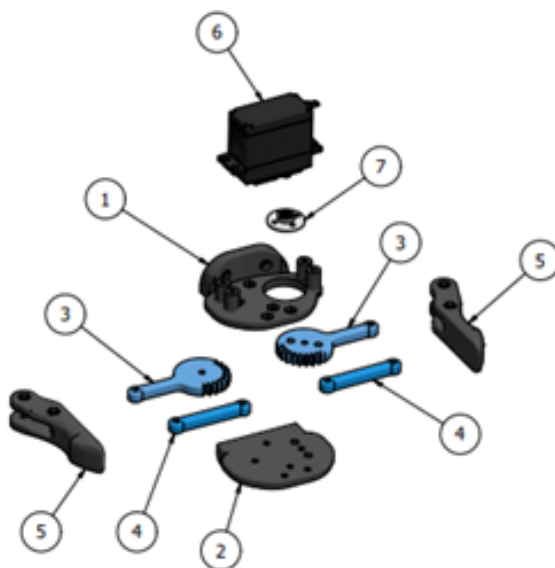
Tabela 9.1. Zestawienie silników krokowych oraz danych przekładni w poszczególnych przegubach

Przegub	Silnik krokowy	Koło zadawcze	Wieniec	Dodatkowa przekładnia	Całkowite przełożenie
1	17HS19-2004S1	19	122	BRAK	6.42 : 1
2	23HS33-400-8D	14	77	BRAK	5.5 : 1
3	17HS-13-0404S-PG5	14	61	1 : 5.18	22.57 : 1
4	42HB34F08AB-12	1	1	BRAK	1 : 1
5	14HS20-15045	10	45	BRAK	4.5 : 1
6	KS42STH34-1504A	1	1	BRAK	1

Przekładnie zostały zaprojektowane z myślą o stosowaniu w nich poliuretanowego pasa zębatego z podziałką T5 o szerokości 16 mm. Z tego względu zarys zębów na korpusach przegubów został wyznaczony zgodnie z wymogami podziałki i szerokości pasa. Wykorzystane koła zębate również zostały dobrane zgodnie z podziałką i szerokością pasa.

9.3.2. Chwytnak równoległy

Efektor końcowy montowany na obrotowej platformie przegubu szóstego został zaprojektowany jako chwytnak równoległy (rysunek 9.4). Wykorzystuje on serwo modelarskie jako napęd szczęk. Pozwala to na precyzyjne pozycjonowanie oraz uzyskanie odpowiedniej siły chwytu.



Rysunek 9.4. Złożenie chwytaka równoległego, 1 – korpus górny chwytaka, 2 – korpus dolny chwytaka, 3 – ramiona napędzane, 4 – ramiona wspomagające, 5 – szczęki chwytaka, 6 – serwo modelarskie MG-995

9.3.3. Wydruki 3D

Elementy nośne konstrukcji w postaci przegubów, ramion, wieńców, osłon oraz innych składowych całej konstrukcji projektowane były z zamiarem wykonania ich przy wykorzystaniu technologii druku 3D opierającej się na technice FDM. Wydruki zostały wykonane przy wykorzystaniu filamentu PLA. Pozostałe parametry:

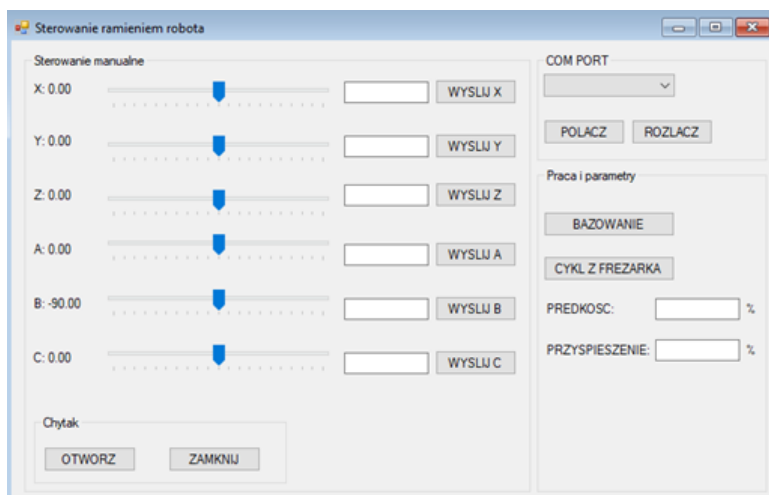
- wypełnienie: 45%,
- grubość ścian: 1,5 mm,
- wysokość pojedynczej warstwy: 1,5 mm,
- prędkość druku: 60 mm/s,
- temperatura dyszy: 210 °C,
- temperatura stołu: 55 °C,
- kształt wypełnienia: heksagonalny.

9.3.4. Elektronika oraz sterowanie

Sterowanie ramieniem odbywa się poprzez sterowanie silnikami krokowymi tak, aby połączone z nimi przeguby mogły wychylić się o zadany kąt. Kontroler stanowiący serce całego urządzenia to moduł z mikrokontrolerem AVR ATmega2560, popularnie nazywanym Arduino Mega. Mikrokontroler odpowiada za wszystkie funkcje logiczne, jakie są realizowane przy sterowaniu manipulatorem, w związku z czym musi charakteryzować się dobrymi parametrami, pozwalającymi na dokonywanie wszystkich obliczeń i przekształceń, a także do odbierania i wystawiania sygnałów cyfrowych. Wykorzystując wyjścia PWM mikrokontrolera, w prosty sposób można sterować działaniem silnika. Silniki krokowe w układzie obsługiwane są dzięki wykorzystaniu sterowników silników krokowych z układem TB6560.

9.3.5. Oprogramowanie

Przygotowany program sterujący robotem umożliwia ruch ramienia manipulatora z punktu A do punktu B. Zmiana pozycji robota wiąże się z ruchem obrotowym w jego przegubach o odpowiednie kąty. Spozycjonowanie każdego przegubu pozwala na uzyskanie zadanego punktu w przestrzeni. Określone współrzędne są więc przeliczane zgodnie z notacją Denavita–Hartenberga, która uwzględnia przesunięcia każdego przegubu składającego się na uzyskanie zadanej pozycji. Operacje obliczeniowe wykonywane są za pomocą macierzy, umożliwiają uzyskanie algorytmu przemieszczenia i wyznaczenia zależności między punktem początkowym a punktem końcowym. W programie sterującym algorytm wykorzystywany do tych obliczeń stanowi biblioteka realizująca zadanie kinematyki odwrotnej, w wyniku czego informacja zwrotna ma postać kątów dla każdego przegubu. Nowo obliczona wartość dla pozycji zadanej jest porównywana z wartością aktualną i w zależności od wyniku algorytm steruje silnikiem w odpowiednim kierunku. Do sterowania przygotowany został interfejs użytkownika w formie aplikacji uruchamianej na komputerze PC. Interfejs komunikuje się z mikrokontrolerem poprzez port szeregowy.



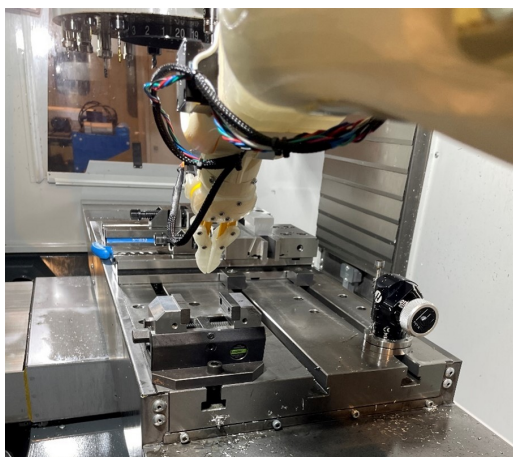
Rysunek 9.5. Interfejs sterowania manipulatorem

9.3.6. Współpraca manipulatora i obrabiarki

Realizacja stanowiska zrobotyzowanego opiera się na zestawieniu ramienia manipulatora wraz z obrabiarką oraz wykonania połączenia pozwalającego na komunikację sterownika obrabiarki ze sterownikiem manipulatora. Ramię zamocowane zostało przy bocznych drzwiach załadowniczych ze względu na stół roboczy, który w tym kierunku ma możliwość na maksymalne zbliżenie się do drzwi, co umożliwi podanie surowego materiału do obróbki przez manipulator. Przygotowany uprzednio cykl obróbkowy dla obrabiarki zawiera wywołanie sekwencji robota przekazywane do sterownika. Sterownik robota, który również ma już zaprogramowaną ścieżkę pracy, wykonuje odpowiednią sekwencję ruchów a następnie po zakończonej pracy przesyła potwierdzenie do obrabiarki. Obrabiarka po jego odebraniu może rozpocząć cykl obróbki nowo podanego surowego materiału.



Rysunek 9.6. Szczęki chwytaka zaciskające się na materiale przeznaczonym do obróbki



Rysunek 9.7. Szczęki chwytaka zaciskające się na materiale przeznaczonym do obróbki

9.4. Uzyskane wyniki

W pierwszej kolejności testom poddany był manipulator ramieniowy. Ramię przeszło wiele testów mających za zadanie ocenić poprawność montażu oraz wykonania poszczególnych elementów składowych. Sprawdzane były połączenia śrubowe, luzy w poszczególnych łączeniach oraz naciągi pasków zębatych. Ocena polegała na rozpoznaniu zarówno wizualnym, jak i fizycznym przez poddawanie elementów konstrukcji działaniu sił zewnętrznych i obserwowanie ich reakcji.

Drugim z testów było sprawdzenie zdolności chwytaka, co polegało na nakierowaniu ramienia w pozycję, w której materiał będzie chwytany, a następnie pochwycenie go i podniesienie. W kolejnym etapie sprawdzone zostało uchwycenie materiału w trakcie dynamicznego ruchu pomiędzy dwoma punktami na maksymalnym przyspieszeniu. Test przebiegł pomyślnie, materiał został przetransportowany.

Testy dynamiczne związane z osiągnięciem kolejnych punktów roboczych wykonywane były z ustawieniami minimalnych wartości prędkości oraz przyspieszenia. W pierwszej próbie manipulator wykonywał ruch bez materiału. Powolny ruch ramienia pozwalał na wydłużenie czasu ewentualnej reakcji na niepoprawnie wyznaczony punkt i kolizję robota z otoczeniem. Wprowadzone punkty do sekwencji okazały się być prawidłowo określone i robot był w stanie osiągnąć je bez kolizji oraz z dostatecznym zapasem miejsca pomiędzy osłonami obrabiarki. Przeprowadzenie ponowne tego testu, jednak z pobraniem materiału i odłożeniem go w obszarze szczęk, początkowo przebiegało zgodnie z założeniami. Materiał został poprawnie pobrany.

Ponieważ dokładność ustawienia materiału w szczękach w trakcie obróbki ma kluczowe znaczenie ze względu na późniejszą procedurę pomiarową sondy obrabiarki, z tego względu przeprowadzone zostały testy, w których mierzone było przesunięcie materiału już po odłożeniu w szczękach. Na szczękach imadła wytrasowany został punkt „zero”, czyli punkt przyjęty w idealnym przypadku, od którego mierzone były odległości do krawędzi materiału. Wykonanych zostało dziesięć takich prób. Wyniki testu przedstawiono w tabeli 9.2.

Tabela 9.2. Wyniki testu przesunięcia materiału w szczękach

Nr próby	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Odchyłka [mm]	5	7	6	-4	-2	2	3	2	1	6

Ostatni przeprowadzony test był podsumowaniem wszystkich wcześniejszych testów. Zakładano w nim pełny test zrobotyzowanego stanowiska. Sprawdzone wcześniej pozycje oraz poprawność ustawienia materiału pozwoliły na spokojne wykonanie operacji obróbki. Obróbka przeprowadzona została zgodnie z założeniami.

9.5. Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie stanowiska wyposażonego w niewielki model robota ramieniowego, który mógłby współpracować z obrabiarką numeryczną CNC. Układ sterujący robotem miał umożliwiać wykonywanie powtarzalnych sekwencji ruchu,

uprzednio zaprogramowanych przez operatora. Pierwszym etapem prac, przed rozpoczęciem projektowania manipulatora, było zebranie wszystkich informacji i parametrów, jakie konstrukcja musi spełniać, np. zasięg pracy. Te parametry były ściśle powiązane z obrabiarką numeryczną, którą manipulator miał obsługiwać. Na podstawie tych danych został przygotowany projekt, początkowo w postaci modelu 3D w środowisku Solidworks. Proces tworzenia wirtualnego modelu pozwolił na wyeliminowanie na wczesnym etapie wielu nietrafionych rozwiązań i pomysłów, które okazywały się nieoptymalne. Zamknięcie etapu projektu konstrukcji pozwoliło na rozpoczęcie wytwarzania części składowych.

Gotowa konstrukcja wymagała przygotowania układu sterowania. Dobranie i połączenie układu okazało się dość prostym zadaniem i odbyło się bez większych problemów. Natomiast etap prac programistycznych związanych z przygotowaniem algorytmów obsługujących silniki oraz mogących współpracować z interfejsem graficznym okazał się być etapem najtrudniejszym. Na działającym stanowisku przeprowadzane były testy, takie jak dokładność odkładania materiału w imadle. Wyniki tego eksperymentu są zadowalające, biorąc pod uwagę fakt, że konstrukcja manipulatora została wykonana w technologii druku 3D, a sterowanie nim opiera się na silnikach krokowych, sterowanych w pętli otwartej bez sprzężenia zwrotnego.

Na podstawie projektu stanowiska oraz manipulatora pokazano, że w wielu przypadkach możliwe jest wprowadzenie automatyzacji procesów bez konieczności inwestowania dużych sum pieniędzy oraz stosowania tylko gotowych rozwiązań dostępnych od producentów sprzętu. Mając pewne umiejętności techniczne oraz chęci, możliwe jest osiągnięcie podobnych wyników, które na mniejszą skalę mogą również usprawnić działanie danego procesu. Manipulator jest projektem, który będzie nadal rozwijany i przeznaczony do pracy na rzecz koła naukowego oraz do celów szkoleniowych.

Modyfikacja procesu produkcyjnego mechanizmu autoregulacji hamulca tylnego postojowego – Cartridge z wykorzystaniem systemu wizyjnego firmy Cognex

inż. Robert Puszyński

Automatyka Przemysłowa

dr inż. Krzysztof Dyrzcz

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Praca dyplomowa polegała na modyfikacji stanowiska kontroli wizyjnej. We wstępie pracy rozwinięto zagadnienie widzenia maszynowego, poruszono tematykę zastosowania oraz przyszłości systemów wizyjnych. W części teoretycznej pracy poruszane są też najważniejsze zagadnienia systemów wizyjnych, takie jak optyka czy oświetlenie. W części praktycznej pracy przedstawiono budowę modyfikowanego stanowiska oraz proces produkcyjny, którego częścią jest modernizowane stanowisko. Przedstawiono opis algorytmu programu In-Sight Explorer. Praca została zrealizowana we współpracy z firmą Hitachi Astemo zajmującą się produkcją hamulców samochodowych.

10.1. Cel i założenia

Celem pracy była modyfikacja procesu produkcyjnego na stacji roboczej UT201 poprzez odpowiedni dobór komponentów systemu wizyjnego firmy Cognex oraz wdrożenie systemu do pracy. Zakres pracy obejmował:

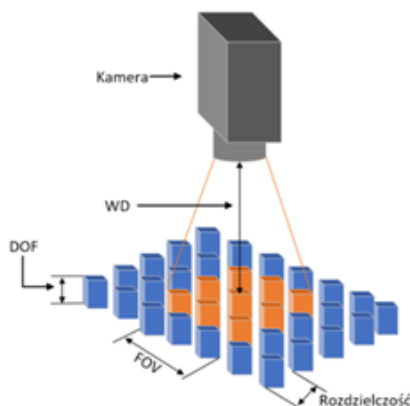
- zapoznanie się z zagadnieniem i przedstawienie procesu zachodzącego na stacji UT201,
- zapoznanie się z budową i zasadą działania systemów wizyjnych firmy Cognex,
- opracowanie algorytmu programu sterującego oraz jego implementacja,
- opracowanie metody wzorcowania algorytmu,
- opracowanie interfejsu użytkownika,
- wdrożenie systemu do pracy,
- przeprowadzenie testów eksploatacyjnych.

10.2. Wstęp teoretyczny

W zastosowaniach przemysłowych dąży się do zastąpienia narządu wzroku operatora przez systemy wizyjne. Dzieje się to najczęściej w miejscach, w których operator ma za zadanie oceniać jakość gotowego wyrobu. Ludzki wzrok jest narządem, który przy długotrwałych monotonicznych czynnościach może ulec zmęczeniu lub znużeniu. System wizyjny potrafi pracować bez utraty precyzji działania, jednocześnie nie ulegając zmęczeniu jak występuje to w narządzie wzroku. Szybkość i precyzja działania jest kolejnym argumentem decydującym o zastępowaniu ludzkiego oka kamerą wizyjną. Kamera jest w stanie zapewnić jednoczesne wydobywanie wielu cech z jednego obiektu przy zachowaniu dużej precyzji i prędkości działania.

10.2.1. Optyka w systemach wizyjnych

W celu umożliwienia systemowi wizyjnemu wydobywania odpowiednich cech z obrazu konieczne jest zastosowanie odpowiedniego obiektywu, który stworzy odpowiedniej jakości obraz badanego obiektu. Należy pamiętać, że nawet najlepszy algorytm nie jest w stanie odtworzyć informacji nie zawartych w zdjęciu. Z tego powodu dobór odpowiedniego obiektywu jest kluczowym zadaniem w doborze elementów składających się na system wizyjny.



Rysunek 10.1. Prezentacja podstawowych pojęć związanych z optyką

Obszar, na którym znajduje się badany obiekt widzialny przez obiektyw, jest zwany polem widzenia od angielskiego FOV – Field of view. Pole widzenia powinno obejmować wszystkie badane przez nas cechy danego obiektu. Cechy te powinny być odpowiednio duże, aby zapewnić aplikacji bezproblemową ich identyfikację.

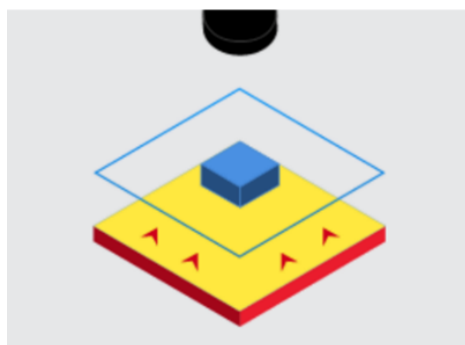
Dystans od obiektywu do badanego obiektu nazywany jest „odległością roboczą” od angielskiego WD – working distance.

Głębina ostrości od angielskiego DOF – depth of field jest parametrem określającym głębokość obiektu, która pozostaje w całości wyostrowiona. Parametr ten może również określać maksymalną zmianę odległości roboczej przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej ostrości obiektu.

10.2.2. Oświetlenie w systemach wizyjnych

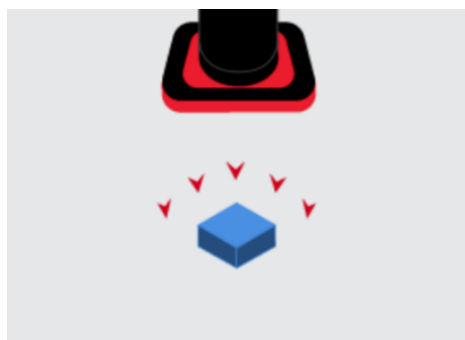
W celu zrozumienia, jak wielką rolę w systemach widzenia maszynowego odgrywa oświetlenie, musimy uświadomić sobie, że obraz jest tworzony na podstawie analizy światła odbitego od obiektu, a nie poprzez analizę samego obiektu. Bardzo ważne jest przeanalizowanie badanego obiektu, zrozumienie jego budowy, materiału, z którego jest zbudowany, wielkości, kształtu oraz wykończenia. Wykonanie dobrego jakościowo zdjęcia może stanowić duże wyzwanie w przypadku braku zrozumienia wyżej wymienionych kwestii. Dobór odpowiedniego oświetlenia może bardzo uprościć pozornie trudne zadania stawiane przed systemem wizyjnym.

Firma Cognex, rozumiejąc szerokie zapotrzebowanie rynku, oferuje dużą ilość dodatkowych oświetlaczy. Ma to na celu zapewnić jak najlepsze warunki do przechwytywania zdjęć. W celu dobrania odpowiedniego oświetlacza dla stanowiska UT201 została dokonana szeroka analiza produktów proponowanych przez firmę Cognex. Poniżej znajduje się graficzna reprezentacja oświetlaczy zastosowanych w projekcie.



Rysunek 10.2. Oświetlenie tylne

Oświetlenie tylne, pokazane na rysunku 10.2, jest to oświetlenie, które znajduje się za badanym obiektem i ma za zadanie równomiernie go podświetlić, co pozwoli podkreślić sylwetkę obiektu. Dzięki takiemu oświetleniu jesteśmy w stanie lepiej wykrywać obecność przewierceń dokonanych na obiekcie lub dokładnie zweryfikować kształt obrysu. Rozwiązanie to nie sprawdzi się, jeśli będzie zależało nam na kontroli szczegółów powierzchni.

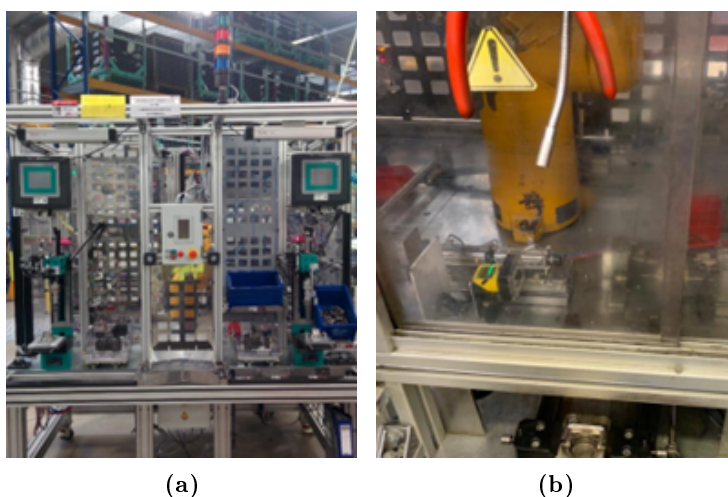


Rysunek 10.3. Zintegrowane oświetlenie

Na rysunku 10.3 pokazano oświetlenie zintegrowane, które jest rozproszonym światłem pierścieniowym. Stosując ten rodzaj naświetlania, zapewnia się jasne równomierne oświetlenie. Zaletą tego sposobu oświetlania jest również zmniejszenie cienia i gwarancja równomierności oświetlenia matowych obiektów.

10.3. Projekt i wykonanie

Stanowisko do montażu zespołu cartridge'a widoczne na rysunku 10.4a znajduje się w hali produkcyjnej Hitachi Astemo z siedzibą we Wrocławiu. Jest jednym z elementów linii produkcyjnej UT199 zajmującej się produkcją zacisków tylnych do samochodów osobowych. Na płycie głównej stanowiska znajduje się robot, szuflady, zespół zamykania sprężyny, układ montowania łożysk, system wizyjny oraz prasy TOX. Nad układem montowania łożysk zainstalowany jest system podawania kulek wraz z pojemnikiem na kulki. Pozostałe komponenty potrzebne do montażu zespołu cartridge'a znajdują się na froncie stanowiska, zapewniając łatwy dostęp operatorowi. Zadaniem robota jest zmontowanie łożyska, sprawdzenie poprawności jego montażu przy pomocy systemu wizyjnego i odłożenia na rampę, po której następnie łożysko zjeżdża do operatora. Zadaniem systemu wizyjnego jest sprawdzenie orientacji gwintu oraz poprawności złożonego łożyska. Na stanowisku znajduje się czujnik wizyjny firmy Cognex IS2000-130 z obiektywem typu S-Mount widoczny na rysunku 10.4b. Sensor ten ma możliwość instalacji zintegrowanego oświetlenia oraz polaryzatora.



Rysunek 10.4. Widok stacji montażu zespołu cartridge'a UT201

10.3.1. Dobór oświetlenia

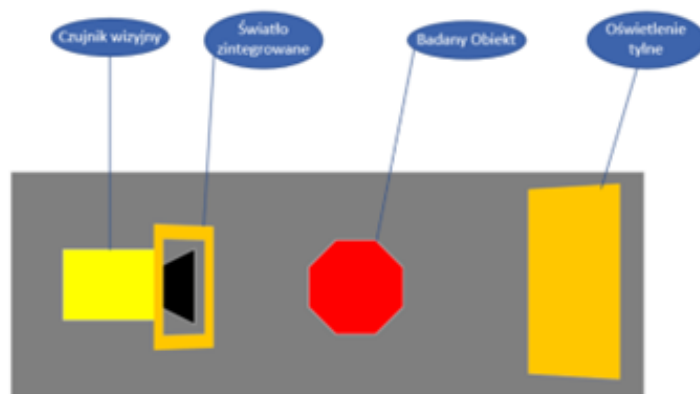
Przed modyfikacją dokonana została dokładna analiza dostępnych opcji oświetlenia oferowanych przez firmę Cognex. Na podstawie tabeli 1 na wstępie zostały odrzucone trzy metody oświetlania, które ze względu na proces montażu cartridge'a nie mogą zostać zainstalowane na stacji UT201.

Tabela 10.1. Porównanie dostępnego oświetlenia

Metody oświetlenia	Występowanie efektu odbłasku	Możliwość kontroli szczegółów badanej powierzchni	Możliwość montażu na UT201
Oświetlenie słupkowe	+/-	+	-
Oświetlenie tylne	-	-	+
Oświetlenie kopułowe	-	+	-
Oświetlenie pierścieniowe	+	+/-	+
Oświetlenie ciemnego pola	-	+	-
Zintegrowane oświetlenie	+/-	+	+

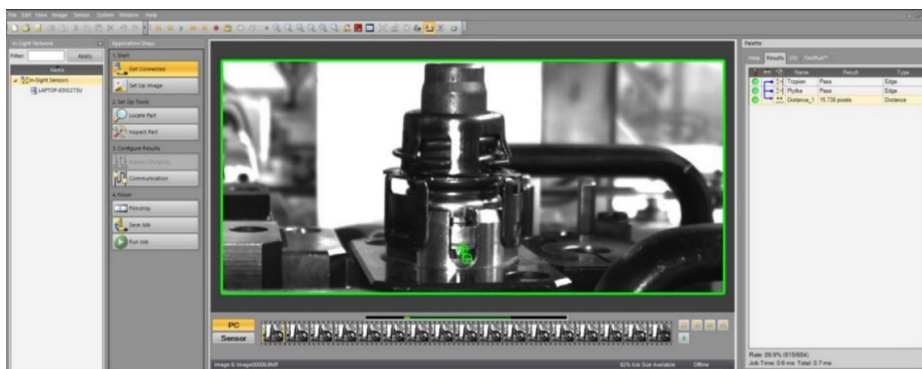
„+” – występuje, jest możliwe; „-” – nie występuje, nie jest możliwe.

Każda metoda oświetlania, która zapewniałaby idealne warunki oświetleniowe badanego przedmiotu, została odrzucona ze względu na brak możliwości zastosowania jej na stacji UT201. Niezbędne okazało się połączenie kilku technik oświetlania. Po głębszej analizie pracy stacji zdecydowano się na zastosowanie dwóch technik – światła zintegrowanego dostępnego w czujnikach wizyjnych IS2000 oraz oświetlenia tylnego. Oświetlenie tylne zostało zainstalowane w dużej odległości od badanego obiektu, tak aby nie zaciemniać obrazu, lecz pomóc w niwelacji efektu odbłasku, jaki mogłoby spowodować zastosowanie wyłącznie zintegrowanego oświetlenia. Na rysunku 10.5 zaprezentowano poglądowy schemat techniki oświetlania badanego obiektu na stacji UT201 po modyfikacji.

**Rysunek 10.5.** Oświetlenie na stacji UT201 po modyfikacji

10.3.2. Algorytm systemu wizyjnego zaimplementowany na UT201

Stosowany algorytm został napisany w oprogramowaniu przeznaczonym do obsługi systemów wizyjnych firmy COGNEX – In sight Explorer, którego widok został zaprezentowany na rysunku 10.6.



Rysunek 10.6. Widok EasyBuilderView programu Cognex In sight

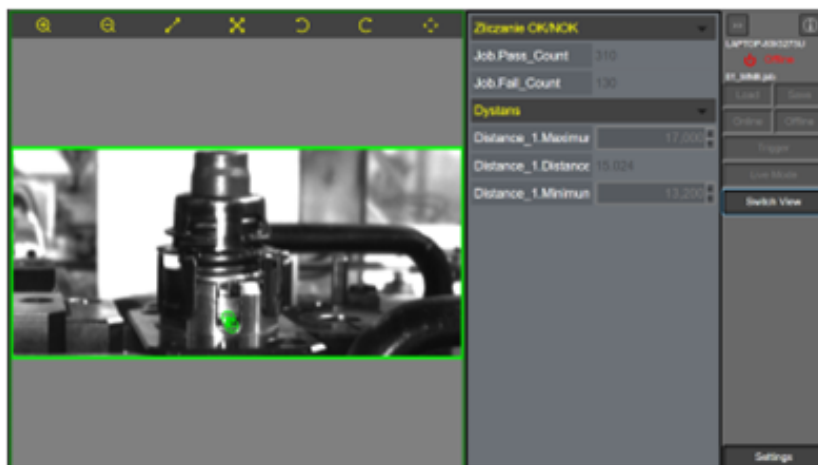


Rysunek 10.7. Schemat blokowy algorytmu

Algorytm wykorzystuje dwie funkcje, tj. funkcję wykrywania krawędzi oraz funkcję pomiaru odległości. Na rysunku 10.7 zaprezentowano schemat blokowy działania algorytmu. Pierwszy etap zakłada wykrycie obiektów, na których oparty jest pomiar odległości. W momencie, kiedy pomiar zgadza się z wytycznymi, badana sztuka traktowana jest jako dobra w przeciwnym wypadku jako niedobra.

10.3.3. Panel WebHMI

Aplikacja Cognex In-Sight Explorer daje możliwość stworzenia łatwo dostępnego internetowego HMI, umożliwiającego zdalny dostęp poprzez przeglądarkę internetową. Panel internetowy stworzony na stacji UT201, widoczny na rysunku 10.8, umożliwi zalogowanie się do niego w czasie pracy stacji. Został on wyposażony w funkcje zliczające liczbę sztuk spełniających wymagania – „Job.Pass_Count” oraz „Job.Fail_Count” zliczające liczbę sztuk niespełniających wymagania. Posiada on również panel, z którego istnieje możliwość dostosowania dystansu zdalnie bez konieczności podłączenia się do stacji w sposób fizyczny.



Rysunek 10.8. Panel WebHMI

10.4. Uzyskane wyniki

Wprowadzenie systemu do pracy odbyło się pod ośmiogodzinnym nadzorem. W trakcie nadzoru były zgrywane zdjęcia służące do przeprowadzania testów za pomocą emulatora. Po zgraniu zdjęć odbyło się przeprowadzenie TestRun'a, na podstawie którego została określona skuteczność stosowanego algorytmu. W celu poznania wartości False Reject Ratio do puli 863 zdjęć zostało wprowadzonych 8 zdjęć, pokazujących sztuki fałszywie niedobre. Algorytm wskazał tylko 4 z nich, co wskazuje na to, że wartość sztuk fałszywie odrzuconych wynosi 0,46%. Skuteczność algorytmu wynosi 99,54%.

10.5. Podsumowanie

Stacja została zmodyfikowana i pracuje w sposób stabilny, spełniając przy tym wysokie wymagania dotyczące kontroli jakości. Wysoka skuteczność algorytmu zwiększyła wydajność maszyny i obniżyła koszty produkcji.

W trakcie realizacji pracy największą trudnością okazało się odpowiednie dobranie metody oświetlenia badanego cartridge'a. Wynikało to z charakterystyki działania stacji, brak miejsca na montaż niektórych rozwiązań oferowanych przez firmę Cognex wymusił korzystanie ze światła zintegrowanego z kamerą. Ta metoda oświetlenia w połączeniu z metaliczną powierzchnią cartridge'a powodowała znaczny efekt odbijania światła utrudniający kontrolę wizyjną.

Zastosowanie panelu oświetleniowego w dość dużej odległości od obiektu w połączeniu ze światłem zintegrowanym dało poszukiwany efekt zrównoważonego oświetlenia.

Na podstawie uzyskanych w czasie realizacji pracy dyplomowej informacji można uznać zagadnienie systemów wizyjnych jako bardzo przyszłościowe, świadczyć może o tym coraz większe zainteresowanie przedsiębiorstw czwartą rewolucją przemysłową, która napędza systemy inteligentne i autonomiczne, do których widzenie maszynowe zdecydowanie należy.

Bibliografia

- [1] Panasiuk J., Kaczmarek W., Wykorzystanie systemu wizyjnego na stanowiskach zrobotyzowanych, *Mechanik* **2013**, 7, s. 581–590.
- [2] Lighting Advisor. Dostępny online: <https://www.cognex.com/en-pl/resources/interactive-tools/lightingadvisor> (dostęp: 06-06-2023).

Analiza wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję zaburzeń przewodzonych w zakresie częstotliwości do 150 kHz wprowadzanych przez odbiorniki energii elektrycznej

mgr inż. Wojciech Frydlewicz
Elektrotechnika

prof. dr hab. inż. Tomasz Sikorski
Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

W niniejszej publikacji zbadano wpływ zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję zaburzeń przewodzonych w zakresie częstotliwości do 150 kHz wprowadzanych przez odbiorniki energii elektrycznej. Testowane odbiorniki zasilano napięciem przemiennym z zawartością harmoniczną 0%, 2%, 4%, 6% lub 8%. Badaniu poddano zasilacze impulsowe małej mocy oraz odbiorniki oświetleniowe. Dla każdego urządzenia poddanego testom przeprowadzono analizę harmoniczną prądową w zakresie do 2,5 kHz i analizę harmoniczną napięciową w zakresie od 9 do 150 kHz. W przypadku harmoniczną prądową wykreślono przebiegi sygnałów napięciowych i prądowych, stworzono analizę widmową poszczególnych harmoniczną, a następnie porównano otrzymane wyniki z wymaganiami normatywnymi. W przypadku wyższych częstotliwości porównano widma sygnału z normą oraz przedstawiono całkowitą emisję zaburzeń opisaną parametrem TSHD. W badaniach dowiedziono, że wraz ze zmianą zawartości harmoniczną w sygnale napięciowym emisja zaburzeń przewodzonych zmienia się w sposób nieprzewidywalny i indywidualny dla każdego urządzenia.

11.1. Cel i założenia

Celem pracy jest zbadanie wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję zaburzeń przewodzonych w zakresie częstotliwości do 150 kHz, wprowadzanych przez odbiorniki energii elektrycznej. Badania zostaną przeprowadzone w warunkach laboratoryjnej symulacji sprzętowej. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- charakterystyka badań emisji przewodzonej w zakresie do 150 kHz,

- budowa stanowiska do badań emisji zaburzeń przewodzonych w prądzie odbiorników elektrycznych w zakresie do 2 kHz/2,5 kHz oraz emisji zaburzeń przewodzonych w zakresie 9–150 kHz z wykorzystaniem programowalnego zasilacza AC,
- wykonanie badań emisji zaburzeń przewodzonych w obu zakresach częstotliwości w zależności od stopnia zniekształcenia napięcia zasilającego dla wybranych odbiorników elektrycznych,
- analiza uzyskanych wyników i sformułowanie wniosków, edycja pracy.

11.2. Wstęp teoretyczny

Zniekształcenie krzywej napięcia i/lub prądu wynikającej z zawartości sygnału o częstotliwości będącej wielokrotnością składowej podstawowej związane jest z występowaniem wyższych harmonicznych [1]. Genezy ich należy doszukiwać się w nieliniowych odbiornikach energii elektrycznej takich jak prostowniki, falowniki, zasilacze impulsowe, lampy LED, kompaktowe lampy fluorescencyjne i inne. Niesinusoidalny prąd odbiorników nieliniowych, a zwłaszcza tych charakteryzujących się występowaniem pulsów, może mieć znaczny wpływ na kształt napięcia zasilającego. Impuls prądowy mimo jego krótkiego czasu trwania charakteryzuje się znaczną wartością skuteczną, co prowadzi do powstania strat w elementach rezystancyjnych [2]. W sytuacji, gdy w sieci jest wiele urządzeń pobierających prąd impulsowy, sinusoida napięciowa zostaje zniekształcona przez ścięcie jej szczytu w miejscu występowania impulsów. Takie warunki sieciowe mogą lawinowo powodować występowanie problemów z odbiorami energii elektrycznej. Chcąc przeciwdziałać niekorzystnym zjawiskom, sygnały prądowe i napięciowe w sieci i te pochodzące od odbiorników należy poddać analizie. Po jej dokonaniu można podjąć środki zapobiegawcze, takie jak zastosowanie różnego rodzaju filtrów i dławików [3, 4]. Dowolny sygnał spełniający warunki Dirichleta może zostać wyrażony za pomocą szeregu Fouriera [5]. Zabieg ten umożliwia analizę poszczególnych harmonicznych wraz z określeniem jej kąta i amplitudy. Warunki Dirichleta:

- krzywa $y = f(t)$ musi się składać ze skończonej liczby nieprzerwanych łuków występujących w przedziale jednego okresu T ,
- w przedziale okresu T musi mieć skończoną liczbę minimów i maksimów,
- funkcja $f(t)$ w przedziale okresu T jest ograniczona.

Do parametrycznego określenia zawartości wyższych harmonicznych w badanym sygnale używa się współczynnika THD (ang. *Total Harmonic Distortion*). Współczynnik ten jest geometryczną sumą pierwszych 40 lub 50 harmonicznych odniesionych do harmonicznej podstawowej (równanie (11.1)).

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (11.1)$$

Ilećroć chcemy dokonać pomiaru zakłóceń przewodzonych i/lub promieniowych, musimy wykorzystać dedykowane, specjalistyczne detektory pomiarowe. Większość dokumentów i norm zaleca stosowanie wymagań CISPR (fr. *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*, pol. Specjalny Międzynarodowy Komitet do spraw Zakłóceń Ra-

dielektrycznych), w których rekomenduje się użycie detektorów quasi-szczytowych (ang. *Quasi-Peak*, QPk) i uśredniających (ang. *Average*, AV). Działanie detektorów CISPR jest podobne w swym działaniu do detektorów sygnałów z modulacją amplitudy czy też detektorów obwiedni. Dwa rezystory – rezystor ładowania R_c i rezystor rozładowania R_d oraz kondensator C tworzą ze sobą stałe czasowe, które następnie poddawane są analizie. Różnica między poszczególnymi czujnikami Pk, QPk i AV wynika z różnych stałych czasowych co prowadzi do odmiennych wartości wyjściowych.

11.3. Wykaz badanych obiektów



- Typ urządzenia: Lampa
- Nazwa urządzenia: CFL 18 W
- Klasa: C



- Typ urządzenia: Lampa
- Nazwa urządzenia: LED 7 W
- Klasa: C



- Typ urządzenia: Lampa
- Nazwa urządzenia: LED 8 W
- Klasa: C



- Typ urządzenia: Lampa
- Nazwa urządzenia: Żarowo-rtęciowa (ZR)
- Klasa: C



- **Typ urządzenia:** Zasilacz
- **Nazwa urządzenia:** Ładowarka indukcyjna (ŁI)
- **Klasa:** D



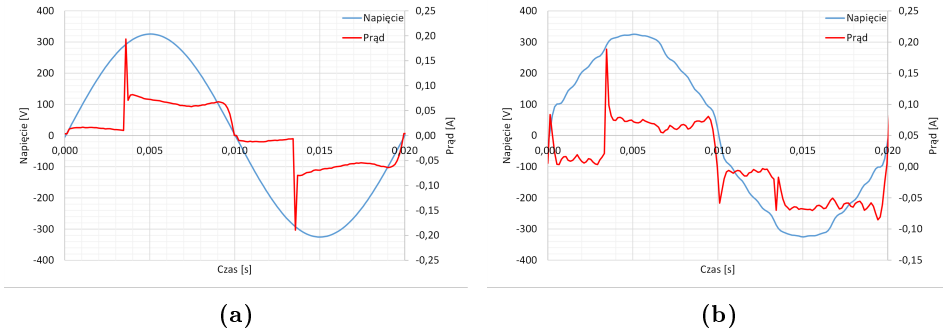
- **Typ urządzenia:** Zasilacz
- **Nazwa urządzenia:** Zasilacz impulsowy (ZI)
- **Klasa:** D

11.4. Badania wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję harmoniczných w prądzie odbiorników w zakresie do 2,5 kHz

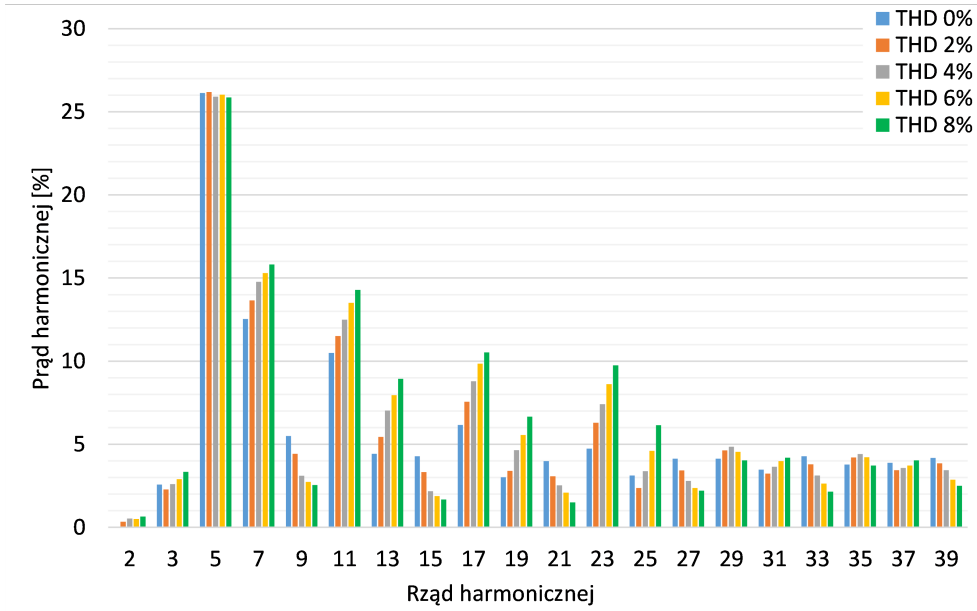
Badania wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję harmoniczných wykonano na dedykowanym stanowisku pomiarowym, a następnie dokonano analizy otrzymanych wyników.

11.4.1. Metodyka badań emisji harmoniczných prądu w zakresie do 2,5 kHz

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50160:2010 dopuszczalna całkowita zawartość harmoniczných w krzywej napięcia dla niskiego napięcia nie może przekraczać 8%. Sumaryczna dopuszczalna wartość poszczególných harmoniczných znacznie przekracza tę wartość, dlatego zdecydowano się na liniowe zmniejszenie wszystkich harmoniczných z zakresu 2–25 tak by całkowita wartość wszystkich harmoniczných osiągnęła cztery progi: 2%, 4%, 6% i 8%. Dodatkowo dla każdego przypadku wyznaczano całkowity współczynnik zawartości harmoniczných w prądzie THDI dla pierwszych 40 harmoniczných. Na podstawie relacji między THDU oraz THDI wnioskowano o ogólnym wpływie zawartości harmoniczných w napięciu na zawartość harmoniczných w prądzie.



Rysunek 11.1. Zmiana kształtu sinusoidy napięciowej i prądowej przy zasilaniu napięciem o zawartości 0% i 8% THD dla lampy CFL 18 W



Rysunek 11.2. Analiza widm harmonicznnych dla różnych poziomów zawartości harmonicznnych napięcia zasilającego dla lampy CFL 18 W

Analizując charakterystyki odpowiedzi prądowej (rysunek 11.1) i widm harmonicznnych (rysunek 11.2) badanych obiektów, można zauważyć, że ogólny poziom emisji harmonicznnych prądowych reprezentowanych przez współczynnik zwany THDI jest indywidualną cechą odbiornika. Należy zauważyć, że udział grup parzystych może mieć znaczący wpływ na całościową zawartość harmonicznnych. Dla lampy CFL udział ten wyniósł 19,7% całościowego THDI. Uogólniając, z analizy otrzymanych wyników możemy wysnuć wniosek, że zmiana zawartości harmonicznnych w zasilającym sygnale napięciowym ma wpływ na emisję zaburzeń. Wpływ ten niekoniecznie musi być negatywny, ponieważ w przypadku kompaktowej lampy fluorescencyjnej niektóre z wartości harmonicznnych uległy poprawie.

Tabela 11.1.1. Pomiary prędkości obrotowej koła wodnego oraz napięcia na generatorze przy zmiennej rezystancji dodatkowej szeregowo połączonej z generatorem

Rząd harmonicznej	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznej wyrażony w procentach składowej podstawowej prądu wejściowego	Zmierzony prąd harmonicznej wyrażony w procentach składowej podstawowej prądu wejściowego									
		THD 0%	THD 2%	THD 4%	THD 6%	THD 8%	THD 8%	THD 8%	THD 8%		
2	2	0,04	✓	0,35	✓	0,54	✓	0,51	✓	0,65	✓
3	27,6	2,57	✓	2,29	✓	2,61	✓	2,90	✓	3,34	✓
5	10	26,13	X	26,19	X	25,91	X	26,03	X	25,86	X
7	7	12,54	X	13,66	X	14,78	X	15,30	X	15,81	X
9	5	5,50	X	4,43		3,10	✓	2,73	✓	2,55	✓
11	3	10,49	X	11,50	X	12,50	X	13,51	X	14,29	X
13	3	4,42	X	5,44	X	7,04	X	7,96	X	8,93	X
15	3	4,28	X	3,32	X	2,18	✓	1,89	✓	1,68	✓
17	3	6,17	X	7,56	X	8,79	X	9,85	X	10,53	X
19	3	3,01	X	3,40	X	4,65	X	5,56	X	6,66	X
21	3	3,98	X	3,08	X	2,53	✓	2,09	✓	1,51	✓
23	3	4,73	X	6,29	X	7,41	X	8,62	X	9,75	X
25	3	3,12	X	2,37	X	3,39	X	4,61	X	6,15	X
27	3	4,13	X	3,43	X	2,80	✓	2,37	✓	2,21	✓
29	3	4,13	X	4,63	X	4,85	X	4,54	X	4,04	X
31	3	3,47	X	3,23	X	3,65	X	3,98	X	4,20	X
33	3	4,28	X	3,79	X	3,12	X	2,64	✓	2,15	✓
35	3	3,78	X	4,21	X	4,41	X	4,22	X	3,72	X
37	3	3,89	X	3,44	X	3,58	X	3,73	X	4,04	X
39	3	4,18	X	3,85	X	3,44	X	2,87	✓	2,50	✓

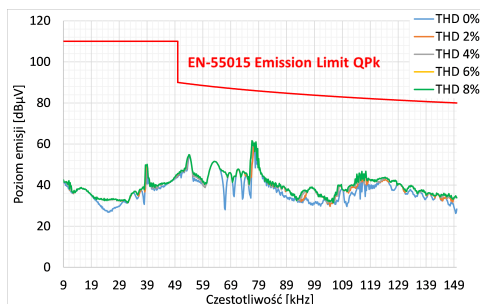
11.5. Badania wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję zaburzeń przewodzonych w zakresie 9–150 kHz wprowadzanych przez odbiorniki elektryczne

Badania wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję harmonicznych wykonano na dedykowanym stanowisku pomiarowym, a następnie dokonano analizy otrzymanych wyników.

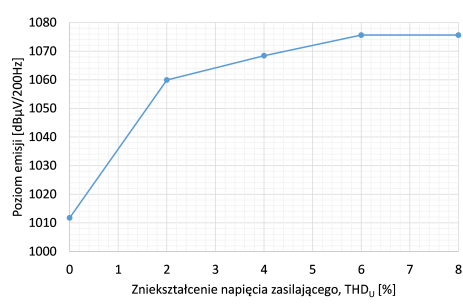
11.5.1. Metodyka badań emisji przewodzonej w zakresie 9–150 kHz

Do badań zaburzeń przewodzonych stosuje się układy pomiarowe z wykorzystaniem sieci sztucznych (ang. *LISN line impedance stabilization network*). Sieci sztuczne są rodzajem filtra dolnoprzepustowego konstruowanego w taki sposób, by sygnały o częstotliwości sieciowej zostały przepuszczone, a te o wyższych częstotliwościach były blokowane w wyniku działania impedancji filtra. Dzięki takim właściwościom sieci sztucznej wyższe częstotliwości od strony napięcia zostają odfiltrowane, a także prądy o wyższych częstotliwościach pochodzących od odbiornika zamykają się w sieci sztucznej i mogą być poddane analizie w postaci sygnałów napięciowych na wyjściu sieci sztucznej [6].

11.6. Wyniki badań i analiza pomiarów



Rysunek 11.3. Analiza wpływu zawartości harmonicznych napięcia zasilającego na widmo sygnału w zakresie 9–150 kHz dla lampy CFL 18 W



Rysunek 11.4. Zmiana całkowitej zawartości supraharmonicznych (TSHD) w zależności od zawartości harmonicznych (THD) w zasilającym sygnale napięciowym dla lampy CFL 18 W

Poddając analizie całość badań z omawianego zakresu częstotliwości, możemy zauważyć, że wraz ze wzrostem THDU rośnie całkowity poziom emisji TSHD odbiornika (rysunki 11.3 i 11.4). Trend ten jest indywidualny dla każdego badanego obiektu i nie da się wyznaczyć jednoznacznej zależności. Widmo lampy żarowo-rtęciowej okazało się stabilne

w całym badanym zakresie, a poziom emisji zaburzeń pozostał niezmienny. Biorąc pod uwagę wyżej wymienione aspekty, możemy skłonić się ku tezie, iż ten typ badań powinien być wykonywany niezależnie dla każdego indywidualnego urządzenia w celu potwierdzenia zgodności wyrobu z normami. Zasilacze impulsowe charakteryzowały się małą wartością emisji TSHD, lecz wzrost THDU prowadził do znacznego wzrostu widma otoczenia pasm dominujących.

Bibliografia

- [1] Hanzelka Z., *Jakość energii elektrycznej część 4 – Wyższe harmoniczne napięć i prądów*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2009.
- [2] Baranecki A., Niewiadomski M., Płatek T., Odbiorniki nieliniowe – problemy i zagrożenia, *Wiadomości Elektrotechniczne*, Akademia Górniczo-Hutnicza, **2004**.
- [3] Łukasik Z., Kozyra J., Kuśmińska-Fiałkowska A., Emisja zaburzeń kompatybilności elektromagnetycznej EMC w obszarach zrobotyzowanych linii technologicznych, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, **2017**, s. 1061–1065.
- [4] Metody ograniczania wpływu wyższych harmonicznych. Dostępny online: <http://handel.e-nvirotech.com.pl/wp-content/uploads/2015/01/LHD.pdf> (dostęp: 09-06-2023).
- [5] Konorski B., *Podstawy elektrotechniki, Tom III Prądy niesinusoidalne*, Trzaska, Evert i Michalski, Warszawa, 1952.
- [6] Sieci LISN i CDN. Dostępny online: <https://astat-emc.pl/produkty/urządzenia-pomiarowe/sieci-lisn-i-cdn/> (dostęp: 09-06-2023).

Rozmyte sterowanie modelem systemu kolejowego

mgr inż. Tomasz Hojeński

Automatyka Przemysłowa

dr hab. inż. Marcin Kamiński, prof. uczelni

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

W niniejszej pracy dyplomowej zaprojektowano rozmyte sterowanie modelem systemu kolejowego. Wykonano model symulacyjny regulatora rozmytego w środowisku Matlab/Simulink i poddano go testom. Użyto do tego regulatora typu Takagi–Sugeno ze względu na opis konkluzji przy użyciu wzorów matematycznych. Zastosowanie teorii stabilności Lyapunova potwierdziło stabilność bazy reguł w projektowanym układzie regulacji. Układ ten poddano badaniom analizującym wpływ zmian wzmocnień regulatora na dokładność śledzonej trajektorii oraz sporządzono symulacje uwzględniające wpływy zakłóceń parametrycznych. Zaobserwowano w nich ścisłą zależność dynamiki układu od modyfikacji wartości nastaw regulatora oraz od zmiany parametrów obiektu. Dodatkowo skonstruowano skrzynię sterującą umożliwiającą operatorowi sterowanie całym modelem systemu kolejowego makiety z poziomu interfejsu graficznego. Interfejs został wykonany w języku Python i zrealizowany na mikrokomputerze Raspberry Pi 4B, który był urządzeniem nadrzędnym. Skomunikowana z mikrokomputerem płytka STM Nucleo F413ZH realizowała jego polecenia, sterując napędami zwrotnic i wyświetlając sygnały na semaforach. Zaimplementowany regulator rozmyty w modelu pojazdu trakcyjnego na płytce Nucleo G431KB wykazywał się dobrą dynamiką regulacji prędkości. Na podstawie zrealizowanego projektu można wywnioskować, że sterowanie modelem infrastruktury kolejowej, opartej na aplikacji graficznej jest intuicyjne i daje szerokie możliwości rozbudowy, natomiast model lokomotywy wykazuje się dobrymi właściwościami jezdnyimi i prawidłowo reaguje na zadane obciążenie.

12.1. Cel i założenia

Niniejsza praca dyplomowa stanowi przykład praktycznej aplikacji algorytmów bazujących na teorii sztucznej inteligencji. Podstawowym celem jest zastosowanie regulatora rozmytego w sterowaniu silnikiem prądu stałego. Wspomniana część działań dotyczy również testów symulacyjnych (wpływ zmian parametrów obiektu, analiza problemów projektowych regulatora itd.). Ostateczna implementacja napędu będzie związana z modelem

pojazdu trakcyjnego. W ramach pracy dyplomowej wykonany zostanie zautomatyzowany system kolejowy (makieta z rozbudowaną infrastrukturą kolejową oraz z mechanizmami sterującymi zwrotnicami). W pracy dyplomowej założono także wykonanie aplikacji (np. w języku Python) sterującej działaniem całego układu. Etapy pracy były następujące:

- przegląd literatury związanej z logiką rozmytą oraz strukturami sterowania silnikami prądu stałego,
- analiza teoretyczna rozmytego regulatora prędkości napędu elektrycznego,
- realizacja modelu obliczeniowego,
- testy symulacyjne,
- implementacja regulatora rozmytego w układzie programowalnym,
- zaprojektowanie oraz wykonanie modelu infrastruktury kolejowej,
- opracowanie pulpitu sterowniczego,
- badania zrealizowanego układu rzeczywistego.

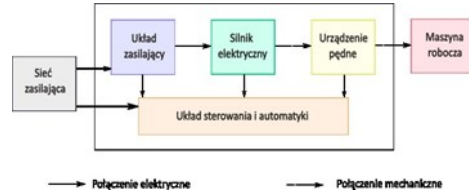
12.2. Wstęp teoretyczny

Silniki prądu stałego były kluczowymi wynalazkami rewolucji przemysłowej oraz wywołały gwałtowny postęp różnych gałęzi przemysłu. Wraz z upływem lat modernizowano ich konstrukcje, lecz zasada działania i podstawowe elementy nie uległy zmianie. Maszyny tego typu cechują się wystarczającą niezawodnością oraz przystępnymi metodami sterowania. Niestety, silniki prądu stałego wymagają okresowego przeglądu, a w szczególności konserwacji lub wymiany szczotek w celu zachowania przewidywanych przez producenta właściwości dynamicznych oraz norm. Ich negatywną cechą jest również mniejsza wydajność niż w przypadku silników zasilanych prądem przemiennym. Zarówno silniki prądu przemiennego, jak i silniki prądu stałego z powodzeniem wykorzystywane są po dziś dzień w produkcji wielkoseryjnej oraz do zastosowań jednostkowych.

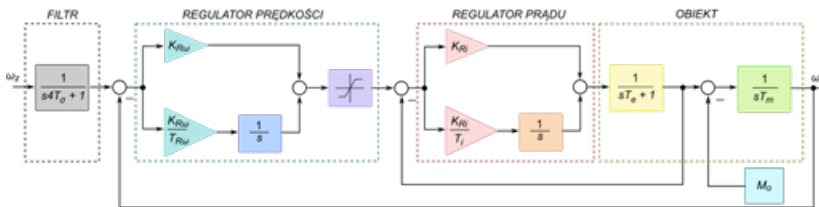
Do uruchomienia i rozpoczęcia pracy silnika elektrycznego niezbędny jest układ zasilający, dostarczający i przekształcający energię elektryczną z sieci. Dodatkowo układ ten może zostać wyposażony w filtr, który ma za zadanie niwelowanie zakłóceń z sieci. Do przeniesienia momentu obrotowego na odbiornik wykorzystuje się urządzenie pędne, które przyjmuje rolę np. sprzęgła i w zależności od zadania potrafi zmieniać parametry przekazywanej energii mechanicznej. Z kolei do opisanego odbiornika stosuje się pojęcie maszyny roboczej, która często jest również obciążeniem. Do nadzorowania pracą zespołu w sposób automatyczny, zgodnie z założonymi wymaganiami, służy układ sterowania i automatyki. Wymienione wcześniej podzespoły wchodzi w skład napędu elektrycznego, który jest zbiorem elementów współpracujących ze sobą oraz wzajemnie oddziałujących na siebie, jednocześnie mających za zadanie przekształcić energię elektromechaniczną w procesie technologicznym. Schemat napędu elektrycznego przedstawiono na rysunku 12.1 [1, 2].

W omawianej pracy dyplomowej należało wykorzystać silnik prądu stałego do napędu modelu pojazdu trakcyjnego. Do zapewnienia odpowiednich właściwości dynamicznych w zależności od zadanego obciążenia oraz podczas zakłóceń należało zaprojektować układ regulacji, który dostosowywałby się do wspomnianych zmian. Najprostszym tego typu układem jest kaskadowy układ regulacji. Regulatory są wówczas połączone w szereg, jeden za drugim, a każdy z nich działa z odpowiednim sprzężeniem zwrotnym od stero-

wanej zmiennej stanu. Omawiany układ regulacji charakteryzuje się nieskomplikowanym sposobem strojenia regulatorów, a dobór nastaw rozpoczyna się od pętli wewnętrznej, kolejno przechodząc do pętli nadrzędnej. Istotną zaletą jest łatwe wprowadzenie ograniczeń wartości w układzie regulacji. Dokonuje się tego przez ograniczenie sygnału wyjściowego z regulatora nadrzędnego. Schemat blokowy napędu z silnikiem prądu stałego o regulacji kaskadowej przedstawiono na rysunku 12.2 [3, 4].



Rysunek 12.1. Ogólny schemat napędu elektrycznego



Rysunek 12.2. Schemat blokowy kaskadowej struktury sterowania prędkością silnika prądu stałego

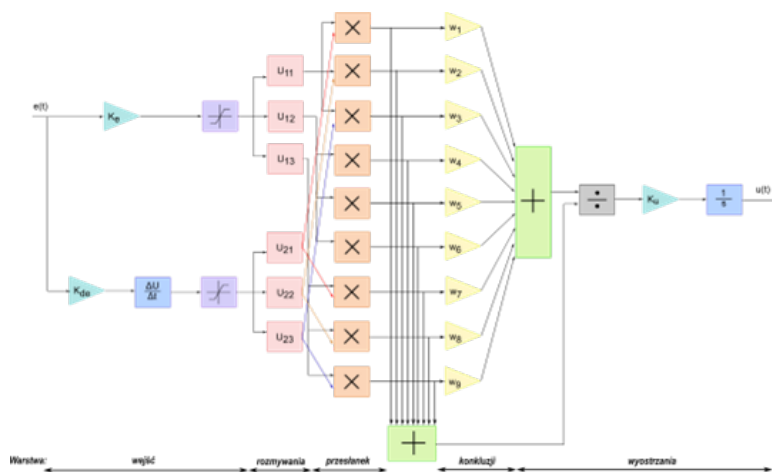
W układach regulacji bardzo ważne jest prawidłowe odczytywanie wartości pomiarowych oraz ich interpretacja przez moduł obliczeniowy. Wraz ze zwiększoną precyzją odczytu uzyskuje się szybszą reakcję na zmiany oraz dokładniejsze dostosowanie układu regulacji. W tym celu konieczne jest zastosowanie wartości pośrednich, które występują w logice wielowartościowej i pozwalają na jasną interpretację przez język maszynowy.

Logika rozmyta jest działem matematyki pozwalającym na opisanie procesu nie tylko jako prawda „1”, fałsz „0”, lecz także wartościami ułamkowymi. Logika „rozmywa” granice między zbiorami ostrymi (prawda, fałsz), osiągając wartości pośrednie i pomaga we wnioskowaniu w sposób podobny do ludzkiego. Już w latach dwudziestych XX wieku Jan Łukasiewicz badał logikę rozmytą, lecz za twórcę uważa się Lotfi Zadeha, który w 1965 roku opublikował artykuł „Fuzzy sets” o zbiorach rozmytych oraz przedstawił, w późniejszym czasie, założenia teorii logiki rozmytej [5, 6].

Logika rozmyta świetnie sprawdza się do opisanie zjawisk nieliniowych i często stosuje się ją do sterowania procesami w postaci regulatorów rozmytych. Regulator rozmyty umożliwia uzyskanie zwiększonej odporności na zakłócenia zewnętrzne, np. zakłócenia pomiarowe wynikające z przełączeń obciążenia lub zakłócenia parametryczne, tj. zmiana stałych czasowych sterowanego silnika. Ponadto regulatory rozmyte cechują się dużo większą odpornością niż klasyczne regulatory PI. Ich dodatkową zaletą jest brak konieczności znajomości parametrów obiektu w procesie projektowania. Dobór nastaw regulatorów rozmytych jest procesem skomplikowanym, często wymagającym dużego doświadczenia bądź zastosowania zaawansowanych metod optymalizacji np. algorytmów genetycznych. Zde-

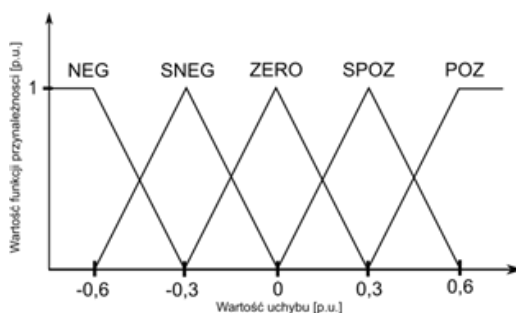
finiowanie odpowiedniego typu oraz parametrów funkcji przynależności, które określają stopień przynależności do danego zbioru, najczęściej jest wykonywane doświadczalnie.

W pracy zdecydowano się na zastosowanie regulatora rozmytego o strukturze Takagi–Sugeno, którego schemat został przedstawiony na rysunku 12.3. Sygnałem wyjściowym jest zadana prędkość silnika, natomiast parametrami wejściowymi regulatora rozmytego są dwa sygnały – uchyb regulacji oraz jego zmiana. W warstwie wejść regulatora rozmytego następuje odpowiednie skalowanie przez wykonanie określonych działań przedstawionych na rysunku 12.3.



Rysunek 12.3. Struktura regulatora rozmytego TSK

W drugiej warstwie następuje proces rozmywania, czyli dokonania konwersji z ostrych wartości wejściowych na wartości rozmyte. Na tym etapie obliczane są stopnie przynależności ostrych wartości wejściowych do zbiorów rozmytych poszczególnych wejść oraz definiowanie funkcji przynależności dla każdego wejścia. Najczęściej funkcje te mają przebieg trójkątny, trapezoidalny lub o kształcie funkcji Gaussowskiej. Przykład takiej funkcji zaprezentowano na rysunku 12.4.



Rysunek 12.4. Przykład obszarów utworzonych przez trójkątne funkcje przynależności

Następna warstwa wyznacza poziomy aktywacji przesłonek poszczególnych reguł. W warstwie czwartej poziomy aktywacji mnożone są przez współczynniki wagowe. W ten sposób następuje sprawdzanie stopnia spełnienia konkluzji. Konkluzje poszczególnych re-

guł opisane są wzorami, a ich wartość jest bezpośrednio zależna od sygnałów wejściowych modelu. Zmiany konkluzji mają lokalny wpływ na powierzchnię sterowania, natomiast zmiany przesłanek mają globalny wpływ na powierzchnię sterowania. W regulatorze TSK nie występuje agregacja reguł. Ostatnim etapem jest proces defuzyfikacji, który wypracowuje sygnał sterujący na wyjściu z regulatora. W tym bloku następuje przejście z wartości rozmytych na postać ostrą, czyli konkretną wartość liczbową. W przypadku omawianego regulatora zastosowano metodę środka ciężkości (singlentonów). Zapewnia ciągłość wyniku i wrażliwość na zmianę parametrów wejściowych oraz cechuje się nieskomplikowanymi obliczeniami. Wspomniane zalety wynikają z zastąpienia wyjściowych zbiorów rozmytych jednoelementowymi zbiorami, które są umieszczane w punktach, w których zbiory rozmyte przyjmują wartości maksymalne. W obliczeniach stosowana jest zależność opisana równaniem (12.1).

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \mu_{Ai}}{\sum_{i=1}^m \mu_{Ai}} \quad (12.1)$$

W celu przeprowadzenia weryfikacji stabilności układów nieliniowych często wykorzystywana jest teoria zaproponowana przez rosyjskiego uczonego Lyapunova. Twierdzenie to przedstawia dwie podstawowe metody nazwane pośrednią i bezpośrednią, wspólnie tworzące teorie stabilności Lyapunova. Metoda pośrednia analizuje lokalną stabilność układów nieliniowych. Opisuje zachowanie układu dynamicznego możliwie jego najbardziej podobnym odpowiednikiem układu liniowego. Obecność i charakter położenia równowagi wynika z działania układu liniowego. Na podstawie przybliżenia opisywany jest układ fizyczny będący obiektem badań. Druga metoda Lyapunova nie wymaga przybliżonego odpowiednika liniowego, skutkując weryfikacją stabilności danego układu. Układ jest stabilny, jeśli istnieje tzw. funkcja Lyapunova, która przyjmuje wartości nieujemne i zmniejsza się w czasie. Trudność tej metody polega na znalezieniu prawidłowej funkcji Lyapunova [7–9].

Infrastruktura kolejowa wraz z ruchem pociągów jest skomplikowanym procederem wymagającego bezbłędnej integracji na poziomie człowiek–maszyna. W przeciwieństwie do ruchu kołowo-drogowego, gdzie o poszczególnych ruchach decyduje kierowca pojazdu, przemieszenie składu pociągu z punktu A do punktu B wymaga pracy wysoko wykwalifikowanej kadry pracowniczej o różnym stopniu obowiązków wraz ze wsparciem urządzeń automatyki przemysłowej. Do zrealizowania tych zadań niezbędna jest dokładnie zaprojektowana i odpowiednio zarządzana infrastruktura kolejowa, w skład której wchodzi sieć trakcyjna, droga torowa oraz urządzenia sterowania ruchem kolejowym.

Sieć trakcyjna dostarcza energię elektryczną do pojazdów zasilanych prądem elektrycznym, której częścią jest sieć jezdna (napowietrzna) dostarczająca biegun dodatni i sieć powrotna (tory kolejowe) będąca biegunem ujemnym. Pojazd trakcyjny jest odbiornikiem energii i powoduje przepływ prądu między dwoma biegunami, w konsekwencji zasilając silniki trakcyjne. Urządzenia sterowania ruchem kolejowym (urządzenia srk) służą do prowadzenia ruchu pociągów, sprawują kontrolę nad urządzeniami wykonawczymi oraz zapewniają bezpieczeństwo i wysoką sprawność ruchu kolejowego. Urządzeniami srk są zarówno zwrotnice, jak i wykolejnice lub semafony, które bezpośrednio kierują ruchem

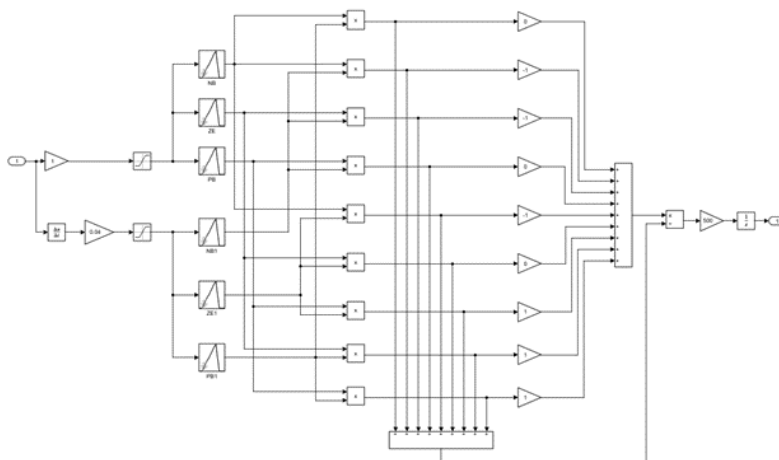
kolejowym i sygnalizują odpowiednie komunikaty, a także panele operatorskie, łąwy nastawcze i systemy zależnościowe pełniące rolę nadrzędną nad zewnętrznymi urządzeniami srk i wdrażające współpracę między nimi. Urządzenia stacyjne służą do układania drogi przebiegów pociągowych i manewrowych tak, aby wzajemnie uzależnić sygnały podawane dla maszynistów względem ustawienia zwrotnic. Ponadto urządzenia te muszą mieć zabezpieczenie, które blokuje ustawienie sprzecznych przebiegów. Najnowsze urządzenia sterowania ruchem kolejowym opierają się na technologii cyfrowej i znacząco poprawiają bezpieczeństwo na kolei, dominując nad stosowanymi wcześniej mechanicznymi rozwiązaniami. Ich głównymi zaletami są zwiększone okęgi nastawcze, elektroniczna kontrola zajętości toru, utwierdzenie drogi przebiegi z pulpitu, ostrzeganie o awarii lub zagrożeniu, czy zwiększona liczba wyświetlanych sygnałów (semafony kształtowe zastąpiono semaforami świetlnymi).

12.3. Projekt i wykonanie

Realizacja części praktycznej rozpoczęła się od przeprowadzenia badań symulacyjnych w środowisku MATLAB/Simulink zgodnie z przyjętymi wcześniej założeniami. Następnie zaimplementowano strukturę do układu mikroprocesorowego w języku C oraz sporządzono aplikację w języku Python wraz z jednostką sterującą modelem infrastruktury kolejowej.

12.3.1. Badania symulacyjne

W celu dokonania analizy struktury zaprojektowano i zamodelowano regulator rozmyty Takagi–Sugeno do sterowania silnikiem DC. Model opiera się na trzech funkcjach przynależności sygnałów wejściowych dla uchybu i jego pochodnej oraz dla sygnału wyjściowego. Proces interferencji składa się z 9 reguł, natomiast konkluzje uzyskano przez przemnożenie wartości wynikowej przesłanek przez blozki „Gain” o dobranych wagach. Zamodelowaną strukturę przedstawiono na rysunku 12.5.



Rysunek 12.5. Struktura regulatora rozmytego TSK

Przed doбором nastaw regulatora zweryfikowano stabilność bazy reguł. Aby tego dokonać musiał zostać spełniony warunek równania (12.2). Funkcję Lyapunova można wyrazić równaniem (12.3).

$$V \leq 0 \quad (12.2)$$

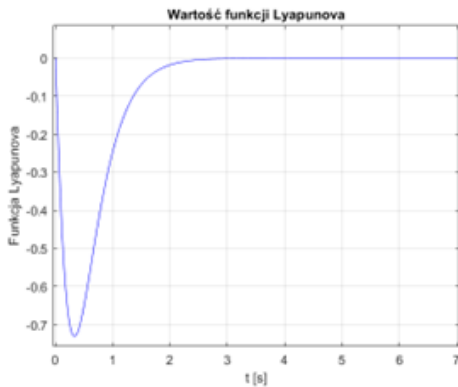
$$e \cdot \dot{e} + \dot{e} \cdot u \leq 0 \quad (12.3)$$

gdzie:

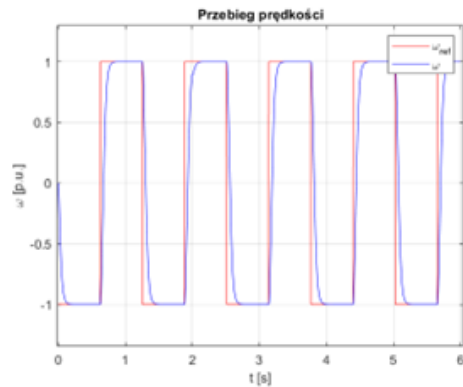
- V – proponowana funkcja Lyapunova,
- e – błąd,
- \dot{e} – pochodna błędu,
- u – sygnał sterujący.

Po potwierdzeniu stabilności bazy reguł (rysunek 6) przystąpiono do strojenia regulatora. Zadano prostokątny sygnał sterujący oraz przyjęto następujące parametry:

- $k_e = 1$,
- $k_{de} = 0,04$,
- $k_u = 500$.



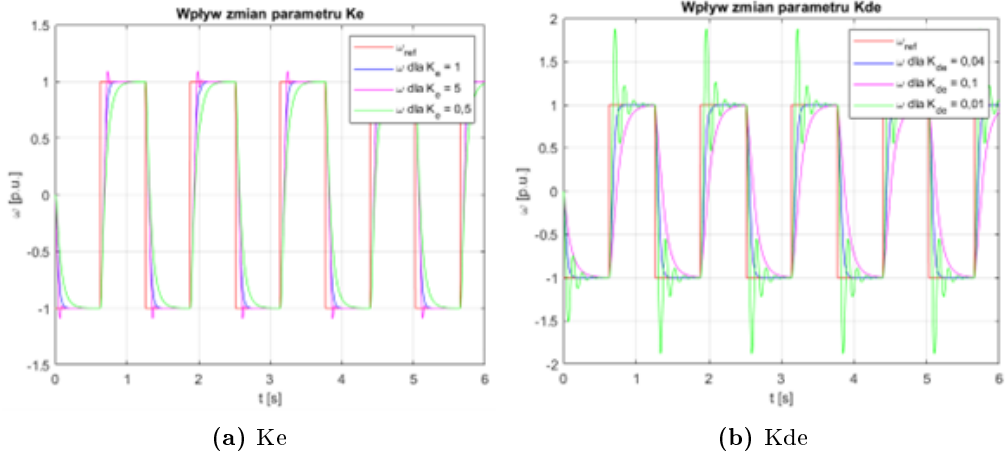
Rysunek 12.6. Wykres funkcji Lyapunova



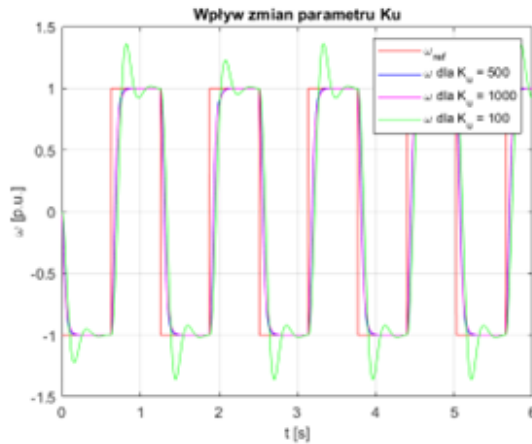
Rysunek 12.7. Prędkość silnika prądu stałego w strukturze sterowania z regulatorem rozmytym

Przedstawiony przebieg na rysunku 12.7 potwierdza prawidłowe działanie regulatora rozmytego. Realizowane nawroty oraz załączone obciążenie w czasie $t = 2$ s nie wpływają na pogorszenie dynamiki układu. W momencie przejścia do stanu ustalonego nie występują przeregulowania, uchyb ustalony ani oscylacje.

Dalszym etapem analizy było przeprowadzenie symulacji, w której poddawano testom wzmocnienia regulatora rozmytego. Testowanie struktury podczas zmiany wzmocnienia uchybu przedstawiono na rysunku 12.8a, zmiana wzmocnienia pochodnej uchybu widoczna jest na rysunku 12.8b, natomiast na rysunku 12.9 zaprezentowano manipulacje wzmocnieniem sygnału sterującego.



Rysunek 12.8. Przebieg prędkości podczas zmiany członu proporcjonalnego



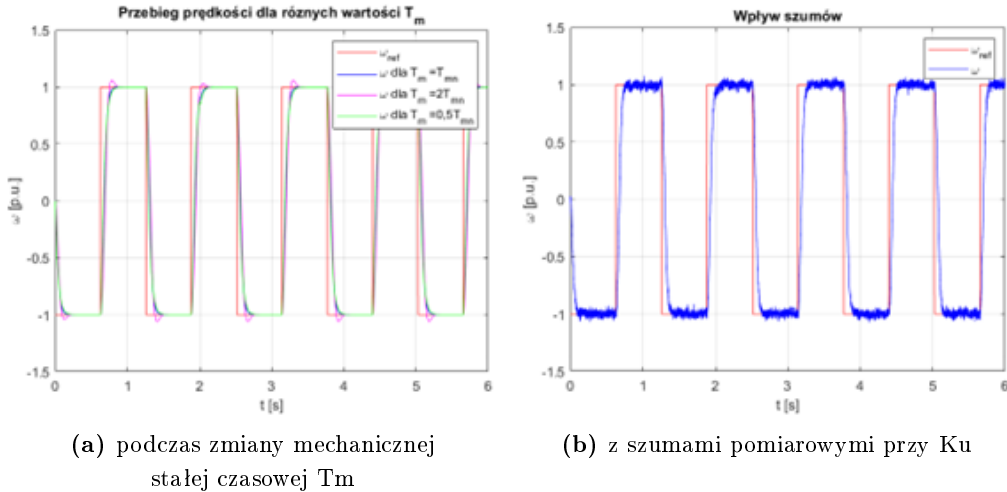
Rysunek 12.9. Przebieg prędkości podczas zmiany wzmocnienia sygnału sterującego

Uzyskane rezultaty wskazują, że zamiana wartości nastaw ma znaczny wpływ na kształtowanie dynamiki układu. Występują niepożądane oscylacje, istotne przeregulowania podczas przejść do stanów ustalonych lub czas dążenia do stanu ustalonego jest znacznie wydłużony.

Kolejnym krokiem było przystąpienie do analizy wpływu zakłóceń parametrycznych obiektu na precyzję sterowania prędkością. Dokonano analizy dla różnych wartości stałej mechanicznej (rysunek 12.10a) oraz załączono szumy pomiarowe (rysunek 12.10b).

Dla zwiększanej mechanicznej stałej czasowej układ regulacji sprowadza prędkość do jej zadanej wartości, jednak widoczne jest jej istotne przeregulowanie podczas przejścia do stanu ustalonego. Czas stabilizacji prędkości jest zbliżony do wartości otrzymywanych dla nominalnych nastaw regulatora. Dwukrotne zmniejszenie mechanicznej stałej czasowej wywołało łagodniejsze przejście do stanu ustalonego w porównaniu do znamionowych parametrów, przy jednoczesnym wyeliminowaniu przeregulowania. Wprowadzone szumy

pomiarowe zostały zrealizowane przy użyciu bloczka random number i umieszczone w pętli sprzężenia zwrotnego. Układ cechuje się krótkim czasem ustalania. Mimo dobrej dynamiki w stanie ustalonym zaobserwowano oscylacje prędkości, z którymi układ regulacji radzi sobie w sposób poprawny.



Rysunek 12.10. Przebieg prędkości

12.3.2. Realizacja części praktycznej

Realizacja projektu rozmytego sterowania modelem kolejowym wymagała wieloetapowych prac, które polegały na stworzeniu makiety oraz elementów kompletujących ją i pozwalających na sterowanie modelem infrastruktury kolejowej. Główne etapy prac można podzielić na stworzenie torowiska i zamontowanie urządzeń srk, wykonanie skrzyni sterującej ogółem procesów i jej podłączenie z makieta oraz wykonanie modelu lokomotywy elektrycznej z zaimplementowanym regulatorem rozmytym. Na początku przygotowano torowisko przedstawione na rysunku 12.11 z użyciem torów firmy Piko, które zostały umieszczone na stole o wymiarach około 2,7 m na 3,5 m, aby umożliwić montaż komponentów napędowych i przewodów elektrycznych pod jego powierzchnią.

Kolejnym etapem był montaż semaforów świetlnych na makiecie w obrębie wjazdu i wyjazdu z torów stacyjnych oraz serwomechanizmów, które pełnią rolę napędu zwrotnic. Wykonany model makiety kolejowej ze zautomatyzowaną infrastrukturą kolejową przedstawiono na rysunku 12.12.

Następnie przystąpiono do zbudowania skrzyni sterującej, w której należało umieścić wszystkie układy programowalne wraz z całą instalacją elektryczną. Zdecydowano się na metalową obudowę o wymiarach $30 \times 25 \times 15$ cm. Podzespoły umieszczono na szynie DIN ze względu na szybką wymianę komponentów bądź rozbudowę systemu. W celach bezpieczeństwa umieszczono przyciski ON/OFF w prawej części obudowy. Z zewnątrz przymocowano dotykowy ekran o przekątnej 10,1" oraz antenę modułu bluetooth. Wygląd zewnętrzny zaprezentowano na rysunku 12.13, natomiast wewnątrz pokazano na rysunku 12.14.



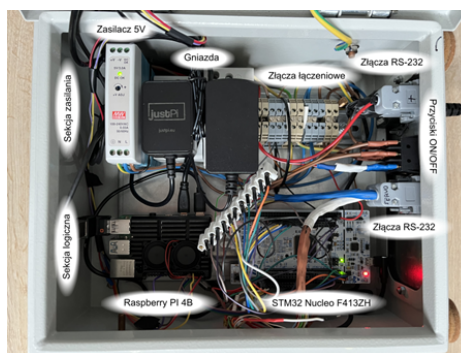
Rysunek 12.11. Prezentacja wykonanej makiety – widok ogólny



Rysunek 12.12. Końcowy wygląd makiety z zamontowanymi urządzeniami srk



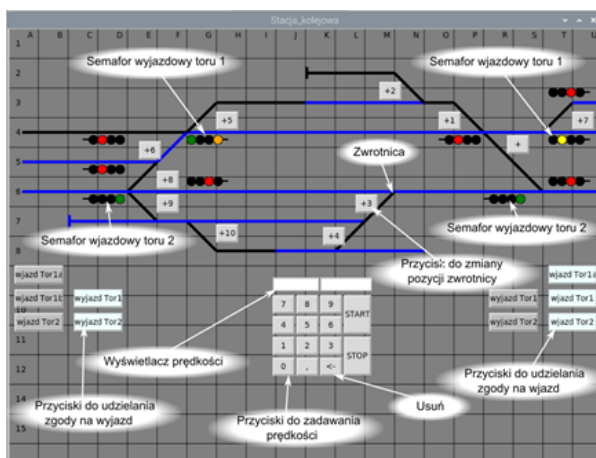
Rysunek 12.13. Rzut na zewnętrzną pokrywę skrzynki sterowniczej



Rysunek 12.14. Zawartość centrali sterującej

Zastosowanie dwóch układów programowalnych pozwala wykorzystać ich największe zalety. Raspberry Pi 4B pozwala zaprojektować przejrzysty interfejs graficzny do sterowania wszystkimi procesami związanymi z obsługą infrastruktury kolejowej i urządzeń srk w modelu stacji kolejowej. Ograniczenia sprzętowe, takie jak mała liczba portów GPIO oraz brak przerw od UART wymagają wprowadzenia STM32 Nucleo F413ZH. Ten układ odpowiada za generowanie sygnałów PWM służących do wysterowania serwo-mechanizmów oraz zapalanie diod na semaforach świetlnych. Oba te układy skomunikowane są ze sobą przy pomocy interfejsu komunikacyjnego UART. Sporządzony interfejs GUI pokazano na rysunku 12.15. Przedstawia on układ torów na modelu stacji kolejowej. Sterowanie odbywa się następująco. Należy operować przyciskami zwrotnic tak, aby dokonać bezpiecznego przejazdu pociągu bez ryzyka kolizji. Utwierdzony przebieg jest koloru niebieskiego po całej swojej drodze przejazdu pociągu przez stację. Przyciski opisane jako wjazd/ wyjazd służą do wyemitowania odpowiedniego sygnału dla „maszynisty”. Uwzględniają one aktualną pozycję rozjazdu znajdującego się na wjeździe oraz wyjeździe ze stacji. Przyciski numeryczne umieszczone pod etykietami służą do zadawania prędkości dla modelu pojazdu trakcyjnego oraz jej wyświetlaniu.

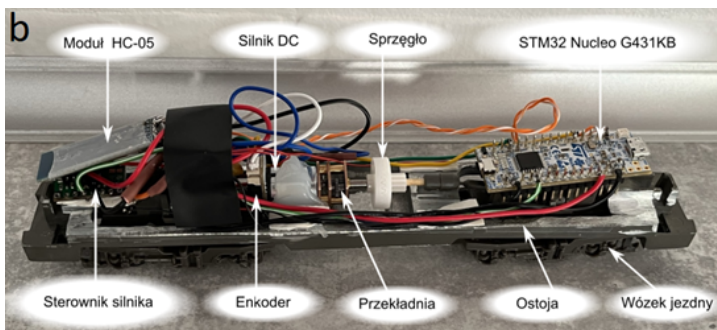
W celu zrealizowania rozmytego sterowania modelem kolejowym należało skonstruować model pojazdu trakcyjnego poruszającego się po wcześniej przygotowanej infrastrukturze. Początkowo zebrano wszystkie elementy w całość, odpowiednio je podłączając ze sobą tak, aby zapewnić możliwość uruchomienia silnika i odczytania prędkości. Następnie podjęto się zaprojektowania regulatora rozmytego i zaimplementowania do struktury sterowania danym silnikiem. Po pomyślnych testach części napędowej zwrócono uwagę na podłączenie modułu HC-05 oraz skomunikowaniu z mikrokomputerem. Ostatnim elementem tego procesu było zamontowanie podzespołów w specjalnie tym celu zakupionej bazie modelu. Ostoja modelu wymagała przeróbek mających na celu umieszczenie wszystkich komponentów i układów elektronicznych. Czynność ta umożliwiła przeprowadzenie testów jezdnych oraz nadała element realizmu. Prezentacja modelu została pokazana na rysunku 12.16.



Rysunek 12.15. Docelowy interfejs obsługi systemu infrastruktury kolejowej z opisem poszczególnych elementów



(a) widok ogólny

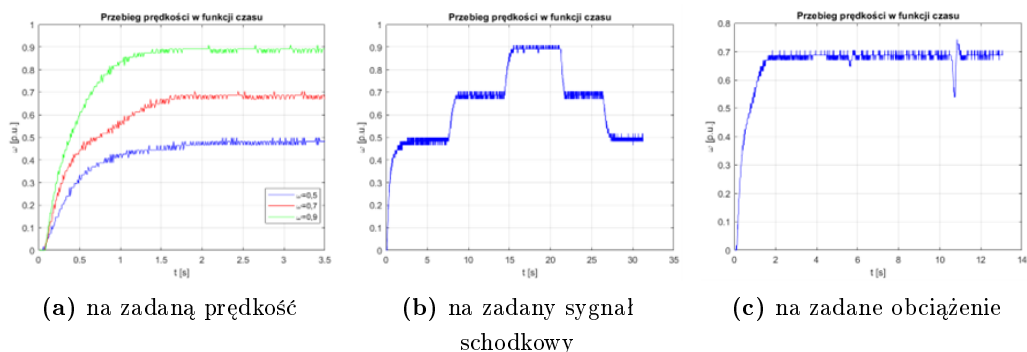


(b) wnętrze modelu

Rysunek 12.16. Wykonany model lokomotywy

12.4. Uzyskane wyniki

Do zobrazowania właściwości dynamicznych sporządzono stosowne wykresy, zadając określone wartości prędkości. Dane pochodzące z układu pomiaru prędkości były przesyłane do komputera użytkownika za pośrednictwem interfejsu UART. Konieczne było zastosowanie przerwania od odpowiednio skonfigurowanego timera, podczas którego przesyłana była zwrotna informacja o mierzonej prędkości. Testy przeprowadzono dla trzech wartości prędkości zadanej: 0,5, 0,7 oraz 0,9 wartości prędkości znamionowej. Otrzymane rezultaty przedstawiono na rysunku 12.17.



Rysunek 12.17. Odpowiedź układu

Uzyskany przebieg prędkości podąża za jej trajektorią zadaną, a dynamika działania regulatora nie ulega zmianie dla różnych prędkości znamionowych. Jest taka sama dla każdej z badanych wartości prędkości zadanej. Dla wartości referencyjnej równej 0,9 układ stabilizuje prędkość silnika nieznacznie szybciej niż dla pozostałych przypadków. Zauważalne oscylacje prędkości zarówno w stanach przejściowych, jak i podczas pracy w stanie ustalonym mogą wynikać z niedostatecznej dokładności urządzenia pomiarowego oraz działania na rzeczywistym układzie. Również dla sygnału schodkowego (rysunek 12.17a) trajektoria zadanego sygnału i mierzonej prędkości są zbieżne oraz świadczą o poprawnej pracy układu regulacji automatycznej. Przeprowadzenie testu pod wpływem obciążenia polegało na ręcznym obciążeniu wału silnika. Próba zatrzymania wału silnika nastąpiła w dwóch chwilach czasowych: $t_1 = 5,7$ s oraz $t_2 = 11,5$ s. W obu przypadkach układ zareagował poprawnie, zwiększając wartość sygnału sterującego i sprowadzając powstały uchyb regulacji do zera.

12.5. Podsumowanie

System infrastruktury kolejowej jest zaawansowanym układem składającym się z wielu elementów, które są zaawansowane technicznie oraz wykazują precyzję działania. Projekt i realizacja rozmytego sterowania modelem miały na celu zautomatyzowanie makiety infrastruktury kolejowej obsługiwanej z poziomu interfejsu użytkownika, a także zaimplementowanie regulatora logiki rozmytej do modelu lokomotywy wykonanej w skali H0.

Regulator typu Takagi–Sugeno o trójkątnych funkcjach przynależności i defuzyfikacji realizowanej metodą singletonów prawidłowo odtwarzał trajektorię zadaną. Zastosowanie kryterium stabilności Lyapunova pozwoliło na potwierdzenie, że zaprojektowana baza reguł w zaimplementowanym układzie regulacji spełnia warunek stabilności. Badania symulacyjne potwierdziły istotność doboru zewnętrznych parametrów regulatora rozmytego.

Integracja płytki Nucleo wraz z mikrokomputerem Raspberry były doskonałą koncepcją, w pełni wykorzystującą potencjał obliczeniowy urządzeń. Nieskomplikowane programowanie w języku Python dało możliwość zaprojektowania prostej aplikacji spełniającej założenia użytkownika. W przypadku niniejszej pracy operator ma możliwość dowolnego kontrolowania ruchu pociągów, a także prędkości modelu. Intuicyjna obsługa środowiska CUBEIDE umożliwia szybką konfigurację portów układu programowalnego STM. Przeprowadzono także skuteczną implementację regulatora typu TSK w środowisku STM. Model cechuje się dobrymi właściwościami dynamicznymi dzięki zastosowaniu dostatecznie dokładnego dekodera i dobraniu odpowiednich wzmocnień zewnętrznych regulatora.

Wykorzystanie układów programowalnych do obsługi makiet kolejowych umożliwia stworzenie zaawansowanych układów sterujących urządzeniami srk o dużej liczbie zdarzeń i elementów. Natomiast zastosowanie regulatora logiki rozmytej potwierdza wszechstronność w działaniu w różnych układach regulacji automatycznej. Ostatecznym wynikiem pracy jest system rozmytego sterowania modelem kolejowego, który może zostać wykorzystany jako innowacyjne rozwiązanie nie tylko w modelarstwie kolejowym, ale również (jako prototyp) w rzeczywistych układach napędowych lokomotyw.

Bibliografia

- [1] Podstawowe pojęcia i zależności w napędzie elektrycznym. Dostępny online: <https://kmni.pe.pwr.edu.pl> (dostęp: 08-06-2023).
- [2] Napęd elektryczny – podstawowe informacje. Dostępny online: <https://controlengineering.pl/napedelektryczny-podstawowe-informacje/1> (dostęp: 20-05-2023).
- [3] Brzózka J., *Regulatory i układy automatyki*, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 2004.
- [4] Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T., *Automatyka napędu elektrycznego*, wydanie pierwsze, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [5] Jan Łukasiewicz. Dostępny online: <https://www.britannica.com/biography/Jan-Lukasiewicz> (dostęp: 08-06-2023).
- [6] Zadeh L., *Fuzzy sets*, Information and Control, **1965**, 8(3), s. 338–353.
- [7] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania*, wydanie trzecie, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2020.
- [8] Luft M., Łukasik Z., *Podstawy teorii sterowania*, wydanie szóste poprawione, Wydawnictwo UTH, 2018.
- [9] Szeptyński P., *Mechanika teoretyczna, kryteria stateczności Lapunowa*, 2020.

Wydział
Informatyki i Telekomunikacji

Wykrywanie żywotności twarzy w przestrzeni 3D uzyskanej z mapy głębi z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego

inż. Adrian Skrobas

Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo

Katedra Podstaw Informatyki

W pracy przedstawiono rozwiązanie dotyczące rosnącego zagrożenia związanego z kradzieżami tożsamości i podatnościami współczesnych systemów biometrycznych twarzy. W tym celu wykorzystano dedykowaną aplikację mobilną i system kamer TrueDepth w iPhone do uzyskania danych RGB i głębi obrazu. Na potrzeby pracy przygotowano pierwszy tego typu zbiór danych, składający się z ponad 2 000 plików prezentacji osób autentycznych i adwersarzy zebranych podczas czterech sesji w dziewięciu rodzajach interakcji. Na ich podstawie stworzono modele do wykrywania ataków prezentacyjnych, charakteryzujące się różnym wykorzystaniem danych i złożonością implementacji, w tym z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego. Przedstawione warianty algorytmu osiągnęły skuteczność do 99%. Protokoły oparte na wykorzystaniu konwolucyjnych sieci neuronowych wykazały znaczące korzyści z połączenia światła widzialnego i danych przestrzennych do wykrywania ataków prezentacyjnych. W mierzonych według standardu ISO 30107-3 najlepiej działających protokołach osiągnięto zerowe stopy błędów APCER i BPCER. Proponowane rozwiązanie jest pierwszym tego typu znanym w literaturze i stanowi podwaliny do stworzenia systemu łączącego w sobie wygodę, bezpieczeństwo i skalowalność niespotykaną w innych systemach weryfikacji biometrycznej. Adresuje wady współczesnych systemów biometrycznych twarzy, które są podatne na ataki prezentacyjne, przez wykorzystanie wielu kanałów danych, zapewniając większą skuteczność. Ma duży potencjał zastosowania w takich obszarach, jak bankowość, bezpieczeństwo publiczne i ochrona tożsamości.

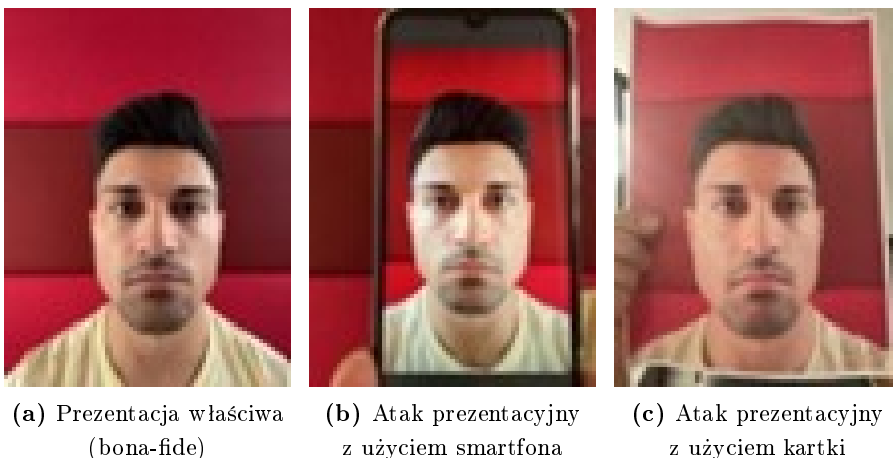
13.1. Cel i założenia

Pracę poświęcono stworzeniu modelu służącego wykrywaniu prób kradzieży tożsamości z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego, popartego analizą współczesnych rozwiązań wykrywania żywotności związanych z identyfikacją tożsamości, w szczególności biometrii twarzy. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- stworzenie modelu detekcji ataków prezentacyjnych z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego z wykorzystaniem trójwymiarowej mapy głębi,
- uwzględnienie najpopularniejszych wektorów ataku prezentacyjnego,
- przeprowadzenie eksperymentów i porównania różnych wariantów modelu detekcji ataków prezentacyjnych,
- ocena skuteczności protokołów według wybranych metryk, w tym standardu ISO 30107-3.

13.2. Wstęp teoretyczny

Dynamiczny rozwój technologiczny przyczynia się do popularyzacji rozwiązań cyfrowych, w tym związanych z sektorem finansowym. To prowadzi do nasilenia się przestępstw polegających m.in. na kradzieży tożsamości. Celem ich zapobiegania stosowane jest uwierzytelnianie biometryczne, czyli proces potwierdzenia deklarowanej tożsamości. Weryfikacja twarzy jest jedną z metod uwierzytelniania biometrycznego, wśród których istnieją również rozwiązania oparte na tęczęwce oka [1], uchu [2] lub przepływie krwi w żyłach [3]. System biometryczny może zostać oszukany przez podstawienie wydrukowanej na kartce twarzy lub nagrania z jej wizerunkiem. Taka próba oszustwa znana jest w literaturze jako atak prezentacyjny (PA), który zgodnie ze standardem ISO/IEC 30107-3, rozumiany jest jako prezentacja przed systemem biometrycznym, celem ingerencji w jego działanie [4]. Przykłady prawidłowej prezentacji oraz ataków przedstawiono na rysunku 13.1. Wiele współczesnych systemów biometrycznych, w tym stosowanych komercyjnie [5], wykazuje dużą podatność na ataki prezentacyjne. Niektóre rozwiązania mogą wymagać specjalnego sprzętu bądź surowych procedur pomiarowych [6], trudnych do zastosowania na szeroką skalę. W świetle aktualnego stanu techniki istnieją przesłanki do wykorzystania wielu kanałów danych (w szczególności danych przestrzennych [7]), dzięki którym systemy detekcji ataków prezentacyjnych (PAD) mogą być trudniejsze do obejścia.



Rysunek 13.1. Różne rodzaje prezentacji przed systemem biometrycznym w świetle widzialnym

13.3. Projekt i wykonanie

Stworzenie rozwiązania adresującego wady współczesnych metod biometrycznych, zarówno pod kątem ich odporności na ataki prezentacyjne, jak i możliwości zastosowania na skalę masową, jest stosunkowo skomplikowane i wymagające rozwiązań technicznych i badawczych na wielu płaszczyznach jednocześnie. Ze względu na specyfikę i złożoność realizacji celu pracy dyplomowej wyróżniono 5 etapów oznaczonych literami A–E, których ogólną strukturę przedstawiono na rysunku 13.2. Stworzenie modelu detekcji ataków prezentacyjnych (E) poprzedza wykorzystanie aplikacji mobilnej (A) do stworzenia zbioru danych (B), który zostaje poddany wstępnej obróbce (C), a następnie wykorzystany do wizualizacji (D) i do uczenia modelu. Każdemu z etapów poświęcono osobny podrozdział na krótkie omówienie.

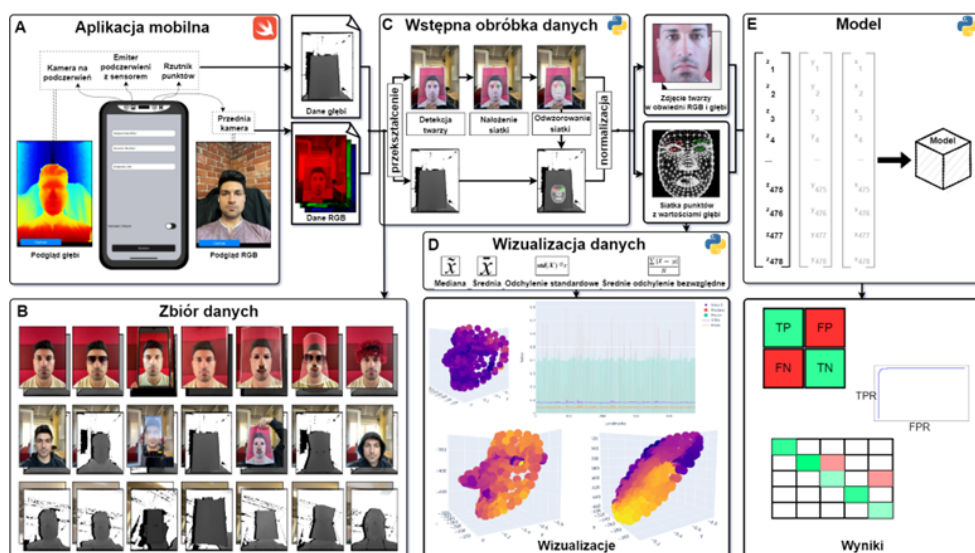
13.3.1. Aplikacja mobilna

System kamer TrueDepth, używany w celu rozpoznawania twarzy użytkownika m.in. w smartfonach iPhone, może zostać wykorzystany również do innych celów dzięki platformie deweloperskiej firmy Apple. Wykorzystywana do stworzenia modelu detekcji ataków prezentacyjnych aplikacja jest prototypem o ograniczonej funkcjonalności, skupiającej się na zbieraniu i rejestrowaniu danych do dalszej analizy. Została wykonana z użyciem języka Swift i wykorzystuje systemowe biblioteki AVFoundation oraz UIKit, odpowiedzialne za zbieranie danych i interfejs. Kamery pozyskują dane twarzy na podstawie kilkanastu tysięcy niewidocznych, rzutowanych na twarzy wraz z podczerwienią punktów, z których 60 razy na sekundę tworzona jest mapa głębi, co pozwala określić odległość obiektów od przedniego zestawu czujników z dokładnością do piksela. Kanały przetwarzane przez system kamer obejmują światło widzialne oraz głębię obrazu. Interfejs aplikacji umożliwia wprowadzenie unikalnego identyfikatora osoby przeprowadzającej interakcję, numeru sesji oraz adresu URL, pod którym znajduje się stworzony na potrzeby rozwiązania prosty serwer gromadzący przesyłane pliki w kontenerze S3 napisany w języku Python. Aplikacja umożliwia wykonanie zdjęcia, które następnie wraz z podanymi danymi zostaje wysłane na ten serwer w formie dwóch plików w formacie .raw – danych światła widzialnego oraz głębi obrazu.

13.3.2. Zbiór danych

Zbiór danych zgromadzony na potrzeby stworzonego rozwiązania składa się z ponad 2000 obrazów zawierających dane o świetle widzialnym i głębi, po 1050 na każdy kanał danych. W kontrolowanym procesie zbierania danych udział wzięło 40 różnych osób. W zbiorze uwzględniono różne warianty interakcji prawdziwych oraz fałszywych, zwanych klasami. Dobór interakcji miał na celu zebranie różnych sposobów prawidłowej interakcji (w tym z wykorzystaniem rozmaitych rekwizytów mogących wpłynąć na ocenę interakcji) i celowej ingerencji w działanie systemu biometrycznego (w tym z użyciem instrumentów ataku prezentacyjnego (PAI), wybranych na drodze kompromisu między możliwością ich pozyskania a popularnością użycia). Heterogeniczność zbioru służy zapobiegnięciu zjawisku nadmiernego dopasowania modelu i uwzględnieniu najczęściej wykorzystywanych PAI.

Celem dalszego zwiększenia różnorodności w zbiorze danych zbieranie danych podzielono na sesje, charakteryzujące się konkretnymi i odmiennymi założeniami przeprowadzanych interakcji.



Rysunek 13.2. Schemat blokowy rozwiązania

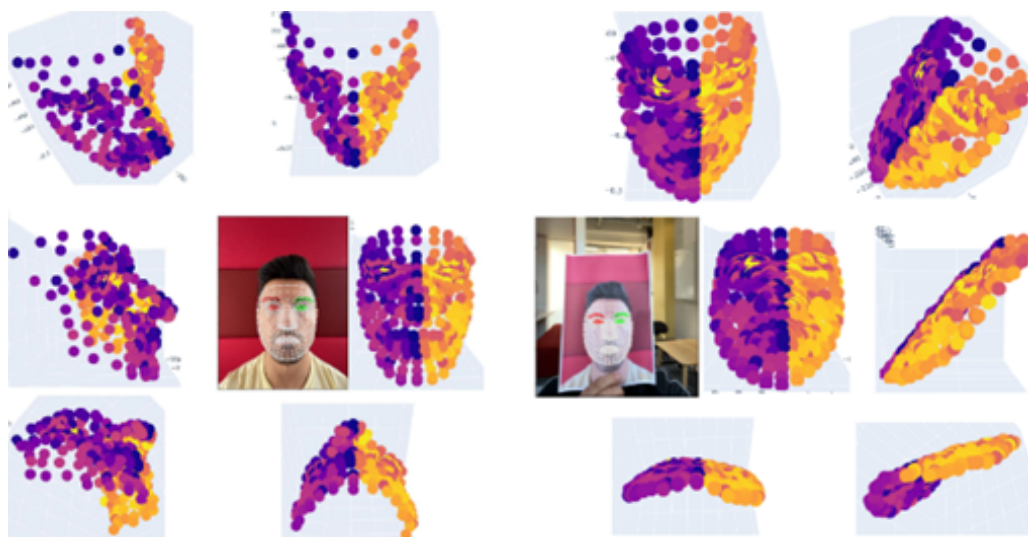
Pod uwagę zostały wzięte takie czynniki, jak jakość oświetlenia, cechy tła, odległość pomiaru twarzy i jej położenie względem kamery oraz miara wskazówek dawanych subiektem podczas wykonywania zdjęć, np. na czym polega bieżąca interakcja, jak można ją wykonać itp. Sesje były realizowane w odstępach czasowych tak, by osoby biorące udział mogły stosunkowo zapomnieć o sposobie przeprowadzanych interakcji i wykonać je raz jeszcze, niekoniecznie w ten sam sposób. Zrealizowano łącznie 4 sesje, w których osoby przeprowadzały interakcje we wszystkich siedmiu klasach.

13.3.3. Wstępna obróbka danych

Surowe strumienie danych uzyskanych jako pliki .raw z aplikacji mobilnej zostały poddane procesowi parsowania i przekształcenia do formy nadającej się do dalszego przetwarzania, m.in. do wyświetlenia ich jako zdjęcia. W dalszej kolejności na zdjęciu z kanału światła widzialnego następuje detekcja twarzy (z wykorzystaniem modelu BlazeFace [8] z publicznie dostępnej biblioteki MediaPipe) oraz nałożenie na niej siatki (z użyciem zmodyfikowanego na potrzeby pracy komponentu FaceMesh z tej samej biblioteki) składającej się z ponad 470 punktów charakterystycznych twarzy. Ta siatka zostaje również odwzorowana w kanale głębi. Na koniec dane ulegają procesowi normalizacji (polegającej na przycinaniu cech [9] i detekcji lokalnych wartości odstających w oparciu o algorytm K -Nearest Neighbor), w wyniku której dane mogą już zostać wykorzystane w etapie wizualizacji lub do uczenia maszynowego zarówno w postaci siatki punktów z wartościami głębi obrazu, jak i zdjęcia twarzy w obwiedni RGB i głębi. Proces wstępnej obróbki danych został przeprowadzony w całości z użyciem języka Python.

13.3.4. Wizualizacja danych

Do kontroli integralności danych oraz identyfikacji trendów i możliwych pozostałych wartości odstających, które mogłyby wpłynąć na stworzenie modelu uczenia maszynowego, posłużył etap wizualizacji, wykorzystującej dane w postaci siatki punktów. Szczególną uwagę poświęcono wizualnemu wyrażeniu danych w ujęciu indywidualnym i zbiorowym. Wszystkie próbki interakcji zawierają dane o współrzędnych, głębi oraz indeksie każdego punktu w siatkach twarzy. Dane te następnie zostały zagregowane do postaci wspieranej przez pomocnicze biblioteki w języku Python i w połączeniu z wybranymi operacjami arytmetycznymi umożliwiło to analizę z podziałem na klasy, sesje oraz poszczególne osoby. Wizualizacje indywidualne pozwoliły na zauważenie charakterystyki konkretnych rodzajów interakcji. Wśród klas bona-fide dostrzec można kształt prawdziwej twarzy, w przypadku klas ataku – płaską powierzchnię telefonu, lekkie przegięcia kartki lub zauważalne uwypuklenia w miejscu otworu na nos oraz wgłębienia na oczy i usta. Wizualizacje zbiorowe umożliwiły dostrzeżenie ogólnych trendów w zbiorze danych, między innymi miary zmienności poszczególnych punktów charakterystycznych twarzy, która mogłaby potencjalnie wpływać na skuteczność algorytmu. Na rysunku 13.3 przedstawiono przykładowe wizualizacje indywidualne, pozwalające dostrzec znamienne różnice między interakcją prawdziwą a próbą przeprowadzenia ataku prezentacyjnego przez podstawienie kartki z wizerunkiem twarzy.



Rysunek 13.3. Wizualizacje indywidualne dla interakcji BF-D i ATK-T

13.3.5. Model uczenia maszynowego

W ramach opracowania modelu detekcji ataków prezentacyjnych przygotowano trzy różne podejścia, charakteryzujące się odmiennym wykorzystaniem danych i złożonością implementacji, aby pokazać pełne spektrum możliwości stworzenia takiego systemu wraz z ich zaletami oraz wadami – od prymitywnych rozwiązań po złożone, zaawansowane technologie. Wśród tych podejść wyróżnić można koncepcję trywialną, czyli próbę najprostsze-

go przedstawienia aspektu technicznego detekcji ataków prezentacyjnych na podstawie nieskomplikowanych reguł. Model ten z założenia nie jest w stanie uczyć się z danych i adaptować się do różnych sytuacji. Podstawą do stworzenia modelu trywialnego (MT) była obserwacja rozkładu zbioru danych i postawienie hipotezy badawczej, że do rozróżnienia ataków prezentacyjnych od prawdziwych twarzy może posłużyć porównanie wartości głębi pomiędzy najdalej wysuniętym i najbliższym położonym względem urządzenia punktem siatki twarzy dla każdej próbki. Twarze bona-fide są trójwymiarowe i mają zmienne wartości głębi obrazu na różnych regionach twarzy, natomiast PAI charakteryzują się prezentacją wizerunków twarzy na bardziej płaskiej powierzchni, dlatego ich głębia na poszczególnych obszarach siatki jest bardziej jednolita i skupiona. Pozostałe dwie koncepcje opierają się na wykorzystaniu uczenia maszynowego. W przypadku ujęcia danych w sposób numeryczny jako siatki punktów głębokości model wzmacniania gradientowego (GB) został wybrany jako narzędzie skuteczne w klasyfikacji interakcji na podstawie tych danych. Zbiór składa się z klas, z których każda charakteryzuje się pewnymi cechami i trendami. Algorytm jest w stanie automatycznie wybrać najważniejsze cechy i wykorzystać je do tworzenia skutecznych reguł decyzyjnych zamiast polegać na jednej ustalonej odgórnie wartości, jak w przypadku modelu trywialnego. Do tego wariantu wykorzystano komponent LightGBM, charakteryzujący się większą efektywnością i szybkością niż metody używane przez inne komponenty wzmacniania gradientowego. Z kolei wariant konwolucyjnych sieci neuronowych (CNN) wykorzystuje więcej informacji z przetwarzanych danych, ponieważ operuje na obrazach, a nie tylko na wartościach kilkuset punktów, co może przyczynić się do większej skuteczności modelu. Ponadto w przypadku zbioru składającego się zarówno z danych RGB, jak i głębi obrazu, CNN może wykorzystać te dwa rodzaje informacji do wykrywania ataków prezentacyjnych. Do realizacji tego wariantu została wykorzystana architektura EfficientNetB0, charakteryzująca się dużą wydajnością i dobrym wskaźnikiem jakości, dzięki zastosowaniu zaawansowanych technik projektowania sieci neuronowych, takich jak skalowanie całej sieci, optymalizacja budowy warstw i użycie warstw normalizacyjnych. Wszystkie implementacje stworzono z użyciem języka Python.

13.4. Uzyskane wyniki

Każdy z wariantów poddano sprawdzeniu skuteczności na podstawie eksperymentów o różnych założeniach, wśród których można wymienić manipulacje punktami odniesienia siatki punktów, rodzajami klasyfikacji, wykorzystywanymi kanałami danych oraz technikę walidacji krzyżowej zostaw jedną (ang. *leave-one-out*, LOO). Wszystkie eksperymenty przeprowadzono na tym samym zestawie testowym, składającym się z 210 próbek i dobranym z użyciem ustalonego ziarna generatora pseudolosowego. Celem eksperymentów było również zbadanie wpływu kanału głębokości na skuteczność wykrywania ataków prezentacyjnych. Ocenę wyników przeprowadzono na podstawie wybranych metryk ewaluacyjnych, w tym metryk standardu ISO/IEC 30107-3. Przeprowadzono łącznie 14 eksperymentów zwanych protokołami. Ich wyniki wskazują, że dane głębi mogą być wykorzystywane do wykrywania ataków prezentacyjnych z wysoką skutecznością. Model CNN w protokole wykorzystującym jednocześnie dane przestrzenne i światła widzialnego

(CNN_RGBDEPTH) okazał się skuteczniejszy niż te wykorzystujące tylko jeden z tych kanałów danych (CNN_RGB, CNN_DETPH). Jest to zgodne z obserwacjami aktualnego stanu techniki dotyczącymi wykorzystywania wielu kanałów danych w detekcji ataków prezentacyjnych. Model GB również okazał się wydajnym podejściem, zwłaszcza w protokołach uwzględniających odniesienie punktów siatki względem czubka nosa (GB_N). Model został użyty do klasyfikacji wieloklasowej (GB_NK) i z dobrą skutecznością potrafił zidentyfikować poszczególne klasy ataków. Oznacza to, że algorytm uzyskał wiedzę o konkretnych cechach każdej z klas i na ich podstawie predykował, z jaką interakcją ma do czynienia. Model MT okazał się skuteczny w klasyfikowaniu interakcji na podstawie stałego progu klasyfikacji (MT_D), ale nie potrafił adaptować się do danych ani uczyć się na ich podstawie. Odniesienie punktów względem czubka nosa (MT_N) spowodowało spadek wydajności, co potwierdza istotną wadę tego rozwiązania. Niektóre protokoły modeli GB i CNN uzyskały zerowe stopy błędów APCER i BPCER, co oznacza, że są to najlepsze rozwiązania według standardu ISO 30107-3. Q tabeli 13.1 przedstawiono zbiorcze porównanie protokołów według metryk tego standardu. Metryki te służą do ilościowego określenia dokładności klasyfikacji prezentacji oraz pomagają określić kompromis między bezpieczeństwem (security) a udogodnieniem interakcji (convenience).

Tabela 13.1. Wyniki pomiarów (wersja DC)

Model	Protokół	APCER (%)	BPCER (%)
MT	MT_D	5	6,67
	MT_N	14,17	18,89
GB	GB_D	1,67	2,22
	GB_N	0,83	1,11
	GB_NK	13,33	1,11
	GB_N_ATK_T	0	0
	GB_N_ATK_KWO	2,5	3,33
	GB_N_BF_R	0	0
CNN	CNN_RGB	3,33	4,44
	CNN_DETPH	2,5	3,33
	CNN_RGBDEPTH	1,67	2,22
	CNN_RGBDEPTH_ATK_T	4,17	5,56
	CNN_RGBDEPTH_ATK_KWO	7,5	10
	CNN_RGBDEPTH_BF_R	0	0

13.5. Podsumowanie

W dobie dynamicznego rozwoju cyfryzacji zagrożenia związane z kradzieżą tożsamości stale rosną. Wraz z polepszającymi się metodami oszustw detekcja ataków prezentacyjnych opartych na spektrum światła widzialnego staje się coraz trudniejsza. Potrzebne jest zapewnienie większego poziomu bezpieczeństwa oferowanego przez współczesne systemy biometryczne. Wykorzystanie wielu kanałów danych do wykrywania ataków prezentacyjnych sprawia, że systemy te są bardziej odporne na próby oszustwa. W niniejszej pracy przedstawiono nowatorskie podejście, wykorzystujące kanały światła widzialnego i głębi,

uzyskane przez aplikację na smartfonie. Cel niniejszej pracy, jakim jest model uczenia maszynowego na podstawie tych danych, jest pierwszym takim znanym rozwiązaniem. Na potrzeby przygotowania algorytmu stworzono również pierwszy tego typu zestaw danych, charakteryzujący się heterogenicznością i szerokim doбором ponad 1000 skategoryzowanych interakcji, uzyskanych jednocześnie w świetle widzialnym i głębi obrazu. Przeprowadzone eksperymenty wykazały jednoznaczną korzyść z wykorzystywania uczenia maszynowego oraz danych przestrzennych w kontekście detekcji ataków prezentacyjnych. Wnioski dotyczące zastosowania danych przestrzennych w kontekście skuteczności modelu detekcji ataków prezentacyjnych pokrywają się z obserwacjami aktualnego stanu techniki, a protokół oparty na wykorzystaniu jednocześnie kanałów światła widzialnego i głębi okazał się skuteczniejszy niż eksperymenty przeprowadzone na pojedynczych kanałach. Rezultaty eksperymentów zostały dodatkowo ocenione pod kątem metryk standardu ISO 30107-3, a najlepiej działające protokoły osiągnęły zerowe stopy błędów APCER i BPCER. Dodatkowo wyniki protokołów GB_N_ATK_T, GB_N_BF_R i CNN_RGBDETPH_BF_R, opierających się na wykluczaniu wybranych klas z zestawów treningowych (LOO) wskazują na duży potencjał zastosowania algorytmów w rzeczywistych warunkach, w których może dojść do użycia nieznanymi wcześniej instrumentów ataku prezentacyjnego.

Bibliografia

- [1] Adjabi I., Ouahabi A., Benzaoui A., Jacques S., Multi-block color-binarized statistical images for single-sample face recognition. *Sensors* **2021**, 21(3).
- [2] Khaldi Y., Benzaoui A., Ouahabi A., Jacques S., Taleb-Ahmed A., Ear recognition based on deep unsupervised active learning. *IEEE Sensors* **2021**, 21(18).
- [3] Lee J., Moon S., Lim J., Gwak M., Kim J., Chung E., Lee J., Imaging of the finger vein and blood flow for anti-spoofing authentication using a laser and a MEMS scanner. *Sensors* **2017**, 17(4).
- [4] International Organization for Standardization. Information technology biometric presentation attack detection part 3: Testing and reporting. Standard, International Organization for Standardization, 2017.
- [5] Bhattacharjee S., Mohammadi A., Marcel S., Spoofing deep face recognition with custom silicone masks. In 2018 IEEE 9th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS). IEEE, 2018.
- [6] Raghavendra R., Raja K., Venkatesh S., Busch C., Extended multispectral face presentation attack detection: An approach based on fusing information from individual spectral bands. In 2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion). IEEE, 2017.
- [7] Erdogmus N., Marcel S., Spoofing face recognition with 3d masks. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* **2014**, 9(7).
- [8] Bazarevsky V., Kartynnik Y., Vakunov A., Raveendran K., Grundmann M., BlazeFace: Sub-millisecond neural face detection on mobile gpus, **2019**.
- [9] Google. Normalization. Dostępny online: developers.google.com/machine-learning/data-rep/transform/normalization#feature-clipping (dostęp: 01-07-2022).

Projekt bezpiecznej sieci w dużej firmie/organizacji

inż. Michał Józków
Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Marcin Jaroszewski
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki

Celem pracy inżynierskiej było opracowanie projektu bezpiecznej sieci dla dużej organizacji. Stworzenie takiego projektu pozwoliło na wykorzystanie zdobytej wiedzy i przetestowanie jej w praktyce, poprzez ocenę wprowadzonego rozwiązania pod kątem bezpieczeństwa oraz potencjalnych niedoskonałości urządzeń, które ktoś mógłby wykorzystać. W pierwszej kolejności konieczne było zdefiniowanie organizacji oraz jej wymagań, które wyznaczyły kierunek całego projektu, uwzględniając różnorodne założenia początkowe. Choć zakres pracy był precyzyjnie określony, był on stosunkowo subiektywny, z uwagi na indywidualne cele, wymagania i zasoby każdej firmy. Dlatego podczas redagowania tej pracy skoncentrowano się na omówieniu zastosowanych zabezpieczeń oraz próbie ich przełamania, zarówno poprzez identyfikację potencjalnych błędów konfiguracyjnych, jak i nieprawidłowe wykorzystanie zabezpieczeń. W ten sposób autor miał na celu podniesienie świadomości nie tylko swojej, ale także przyszłych administratorów, którzy mieliby dostęp do tego opracowania. Założenie, że projekt dotyczy dużej firmy, umożliwiło analizę wielu różnych aspektów sieci, co byłoby trudniejsze w przypadku mniejszych przedsiębiorstw.

14.1. Cel i przebieg pracy

Celem pracy inżynierskiej było stworzenie projektu bezpiecznej sieci dla dużej organizacji zgodnie z najlepszymi praktykami oraz przeanalizowanie jej pod kątem bezpieczeństwa. Przebieg pisania pracy dyplomowej wyglądał następująco:

- przygotowanie oraz analiza literatury i zestawienie jej z posiadaną wiedzą,
- zdefiniowanie cech bezpiecznej oraz nowoczesnej sieci,
- określenie wymagań projektowych, innymi słowy stworzenie firmy,
- przetestowanie oraz wybranie odpowiednich narzędzi,
- stworzenie szkicu projektu i jego podział na warstwy,
- analiza zarówno użytych technologii, jak i urządzeń w każdej z warstw wraz z testami bezpieczeństwa, między innymi atakami sieciowymi,
- podsumowanie oraz wyciągnięcie wniosków.

14.2. Opis pracy

Zgodnie z ustalonymi założeniami, w jednym z wczesnych etapów zostały omówione cechy, które powinna posiadać bezpieczna sieć, aby spełniać swoje zadania przez długi okres. Wśród tych cech wyróżniają się skalowalność, nadmiarowość oraz modułowość. Brak tych cech nie musi oznaczać złego projektowania, o ile uwzględnione są wszystkie możliwe konsekwencje. Takie podejście, czyli przedstawianie zarówno zalet, jak i wad konkretnych rozwiązań sieciowych, było stosowane przy omawianiu każdej technologii. Celem było unikanie promowania jednostronnego podejścia "ochrony za wszelką cenę", ponieważ zarówno w biznesie, jak i w dziedzinie bezpieczeństwa, idealna ochrona jest niemożliwa. Im bliżej doskonałości, tym większe są nakłady, dlatego znalezienie odpowiedniego kompromisu między potrzebami a możliwościami stanowi jedno z zadań administratora. W kolejnym etapie pracy została utworzona fikcyjna firma, która teoretycznie zleciła wykonanie projektu. Wybór padł na sektor finansowy ze względu na specyficzne wymagania bezpieczeństwa określone przez przepisy prawa oraz potrzebę obsługi dużej infrastruktury. Z uwagi na rozmiar projektu konieczne było wykorzystanie odpowiednich narzędzi. Ze względu na niemożność fizycznej implementacji tak obszernej sieci, zdecydowano się na jej symulację. Po wielu testach wybór padł ostatecznie na GSN3, wspomagane w analizach innymi programami, takimi jak PT czy Wireshark. Wybrany symulator oferował różnorodne urządzenia od różnych dostawców, umożliwiając zdobycie doświadczenia w obszarze pracy z urządzeniami innych niż CISCO. Niestety, mimo korzyści związanych z ceną, pojawiły się problemy z kompatybilnością, brakiem zasobów do symulacji oraz częstymi resetami systemu. Ostateczna praca dyplomowa została przedstawiona w niestandardowy sposób, gdzie „projekt całej sieci” stanowi jeden z pierwszych elementów. Taki zabieg pozwala czytelnikowi najpierw zapoznać się z osiągniętym rezultatem, a następnie, rozpoczynając od najniższej warstwy i analizując zastosowane rozwiązania, śledzić tok rozumowania autora. Sieć została podzielona na trzy warstwy:

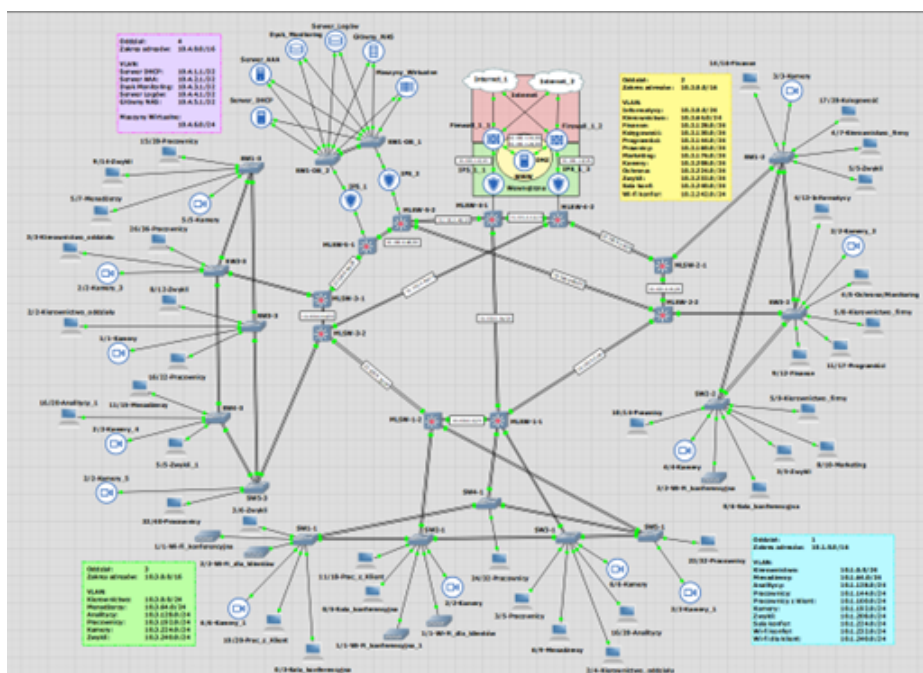
- **Stacje końcowe** – niestety najmniej rozbudowane i omówione, ze względu na fakt iż głównym tematem jest sieć, a o samych stacjach roboczych powstają niezliczone rozprawy, wykłady czy prace, skupiono się na najważniejszych aspektach.
- **Warstwa dostępu** – łącząca wcześniej wspomniane hosty. Jest to w pewnym sensie granica oddzielająca użytkowników i generowany przez nich ruch od sieci wewnętrznej. Dlatego w pierwszej kolejności omówiona została weryfikacja komputerów, które starałyby się podłączyć do sieci, a dopiero w dalszej części na kontroli ruchu w jej wnętrzu. Pod lupę zostały wzięte takie protokoły i rozwiązania, jak port-security, 802.1X, VLAN-y czy FHRP.
- **Warstwa sieciowa** – jest połączeniem wcześniej wspomnianej warstwy dostępowej, tak jak ona łączyła stacje końcowe, tak warstwa sieciowa łączy pojedyncze podsieci w jeden wielki ruch. Zostały tu omówione technologie zarówno weryfikujące ruch pomiędzy poszczególnymi sieciami za pomocą na przykład ACL lub bardziej rozbudowanych firewalli, lub jeszcze bardziej zaawansowanych NGFW, jak i stojące na granicy sieci jak na przykład DMZ czy Honeypoty.

Mimo że struktura warstw w projekcie przypomina pewne elementy modelu ruchu sieciowego, została zdefiniowana przez autora i może nieznacznie różnić się, ponieważ

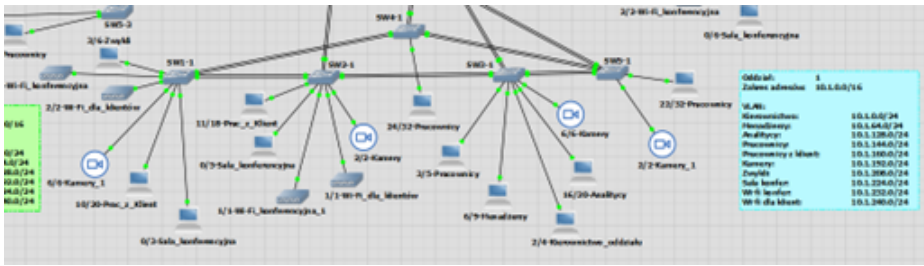
większy nacisk położony został na urządzenia i ich role. W trakcie redagowania pracy zauważono, że omawiane kwestie stanowią jedynie fragment dostępnych możliwości dla administratora dbającego o zabezpieczenia sieci. Niemniej jednak, starano się przedstawić w każdej z warstw możliwie najwięcej rozwiązań, praktyk, niezbędnych urządzeń czy technologii, mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa projektowanej sieci oraz innych podobnych infrastruktur. W każdym aspekcie projektu podjęto próbę ukazania zarówno mocnych, jak i słabych stron obecności poszczególnych elementów w sieci, podobnie jak to miało miejsce w przypadku omawiania routingu VLAN, z inspiracją do rozważania nietypowych ścieżek projektowych. Dodatkowo, argumentację wzbogacono przykładami ataków, które ilustrują, jak nieprawidłowa konfiguracja (Firewall), niedoskonałości zabezpieczeń (port-security) czy brak wsparcia i ochrony protokołu (DHCP) mogą prowadzić do istotnych konsekwencji. Większość zaprezentowanych ataków miała potencjał na wywołanie znacznych zakłóceń, chociaż niekoniecznie prowadziły bezpośrednio do uzyskania dostępu do systemu, lecz mogły być krokiem w kierunku zdobycia dostępu do wrażliwych danych. Nawet nietypowe zachowanie przełącznika w obliczu wielokrotnie oznaczonej ramki zostało zidentyfikowane, co sugeruje możliwą podatność danego urządzenia. Niemniej jednak, z uwagi na brak dostępu do fizycznego urządzenia i niemożność przetestowania go w realnym środowisku, kwestię tę pozostawiono nierozstrzygniętą.

14.3. Projekt sieci

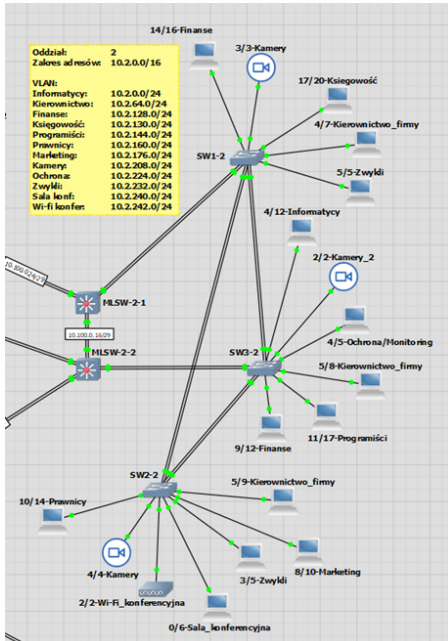
Wynikiem połączenia wszystkich analiz i rozważań jest przedstawiony na rysunkach 14.2–14.5 ostateczny projekt.



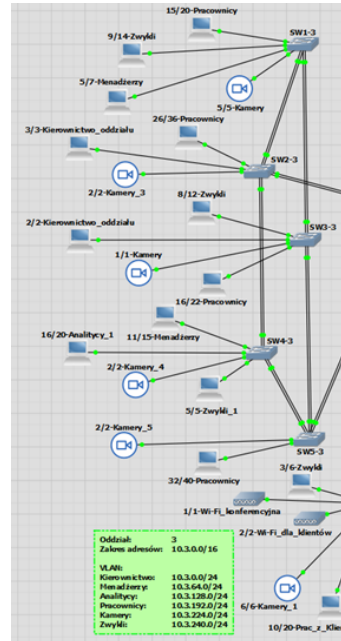
Rysunek 14.1. Końcowy projekt sieci dla firmy



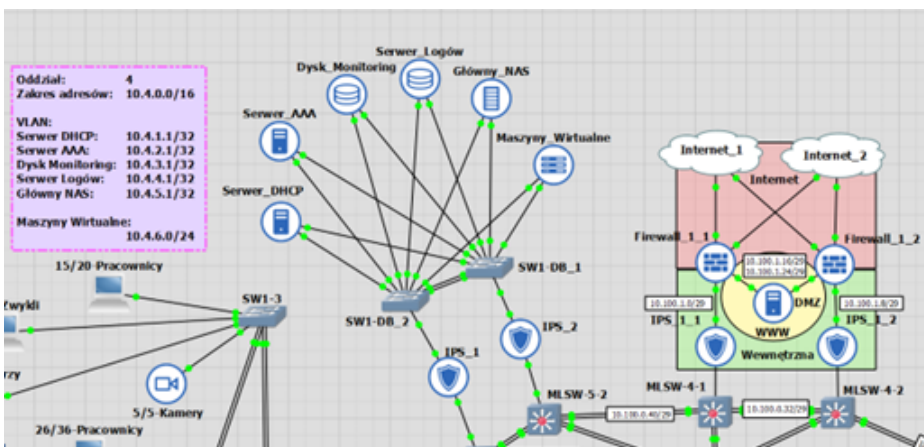
Rysunek 14.2. Widok oddziału 1



Rysunek 14.3. Widok oddziału 2



Rysunek 14.4. Widok oddziału 3



Rysunek 14.5. Widok oddziału 4 oraz głównej bramy sieciowej

Przedstawiony projekt bezpiecznej sieci dla konkretnej firmy ukazuje się w formie topologii logicznej, co pozwala lepiej zobrazować sieć pod kątem bezpieczeństwa w porównaniu do topologii fizycznej. Jednocześnie ułatwia to odczytanie informacji. Niestety, w konsekwencji, nie dostarcza konkretnych nazw urządzeń ani ich modeli, jednak szczegółowe dane na temat zastosowanych urządzeń są podane w późniejszych etapach pracy, podczas szczegółowego omawiania konkretnych rozwiązań. Chociaż sam projekt może wydawać się prosty, to jego główne atuty są ukryte w konfiguracji urządzeń oraz zastosowanych protokołach. Z tego powodu istotne jest przeprowadzenie dogłębnej analizy struktury projektu, a nie tylko skupienie się na efekcie końcowym.

14.4. Podsumowanie

Podsumowując, w trakcie tworzenia pracy starano się ukazać rolę administratora sieciowego w różnych aspektach cyberbezpieczeństwa. Administracja siecią nie może polegać jedynie na bezmyślnym wprowadzaniu standardów i norm. Analiza przeprowadzona w pracy dowodzi, że nawet jedno wprowadzone rozwiązanie mające na celu zabezpieczenie sieci może stworzyć potencjalną lukę zagrożenia. Każde proponowane rozwiązanie powinno być poddane wieloetapowym testom w odpowiednich środowiskach. Projektowanie sieci miało swoje wyzwania, ale także przewagi, pozwalając na budowę infrastruktury zgodnie z najnowszymi zaleceniami.

Należy podkreślić, że projekt sieci nie jest statycznym tworem – bezpieczeństwo systemu dziś nie zapewnia go na przyszłość. Rozwijanie projektu jest procesem ciągłym. W trakcie pracy przedstawiono różnorodne rozwiązania, technologie i praktyki. Jednakże, pełna analiza wszystkich elementów projektu była niemożliwa do zawarcia w pracy. Obrany sposób prezentacji miał na celu umożliwienie administratorom podjęcia własnych decyzji w kontekście zastosowanych rozwiązań.

Przeprowadzone ataki miały inspirować do elastycznego myślenia i ciągłego poszukiwania potencjalnych zagrożeń, uwzględniając zmienną naturę cyberbezpieczeństwa. Ostateczna ocena bezpieczeństwa projektu nie jest jednoznaczna, a administracja siecią to proces ciągły, wymagający stałego doskonalenia.

Bibliografia

- [1] Czubak A., Metodologia projektowania sieci komputerowych W: *Strategiczne modelowanie i animowanie rozwoju oraz technologii: dobre praktyki*, Instytut Trwałego Rozwoju, 2014.
- [2] Farooq M., Khairi A., Waseem M., Kamal T., Mazhar S., A Review on Internet of Things (IoT), *International Journal of Computer Applications* **2015**, 113(1).
- [3] Gorgon L., Loeb M., The Economics of Information Security Investment, *ACM Transactions on Information and System Security* **2002**, 5(4), s. 438–457.
- [4] Bohme R., Security Metrics and Security Investment Models, International Computer Science In: IWSEC 2010: Advances in Information and Computer Security, 2010.
- [5] Newman M., Modularity and community structure in networks, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **2006**, 103.
- [6] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 651, 17 czerwca 2014.
- [7] Zaawansowana ochrona przed zagrożeniami z sieci. Dostępny online: https://in.eset.pl/rozwiwania-eset-b?gclid=EAIaIQobChMI2tCkk-7p-QIVgwqiAx0yuQ_4EAAAYASAAEgKVffD_BwE (dostęp: 06-06-2022).

- [8] Ausanka-Crues A., Methods for Access Control: Advances and Limitations, *Computer Science*, 2006.
- [9] Pham D., Syed A., Mohammad A., Halgamuge M., Threat Analysis of Portable Hack Tools from USB Storage Devices and Protection Solutions, Conference: Information and Emerging Technologies (ICIET), 2010.
- [10] Ostapenko A., Kulikov S., Tolstykh N., Pasternak Y., Popova L., Denial of Service in Components of Information Telecommunication Systems Through the Example of “Network Storm” Attacks.
- [11] Brown E.L., *802.1X Port-Based Authentication*, wydanie pierwsze, Auerbach Publications, 2006.
- [12] R. 2284, PPP Extensible Authentication Protocol (EAP), 3.4. MD5-Challenge. Dostępny online: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2284> (dostęp: 06-06-2022).
- [13] R. 1994, PPP Challenge Handshake Authentication Protocol (CHAP), 4.1. Challenge and Response. Dostępny online: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1994.txt> (dostęp: 06-06-2022).
- [14] Cisco, CCNAv7: Switching, Routing, and Wireless Essentials – 3.1.3 Types of Vlans.
- [15] Cisco, Podstawy przełączania, routingu i łączności bezprzewodowej v7.0 3.5.3. Rezultaty konfiguracji DTP.
- [16] Santos M., Marcillo P., Security in the data link layer of the OSI model on LANs wired Cisco.
- [17] Rouiller S., Virtual LAN Security: weaknesses and countermeasures GIAC Security Essentials Practical Assignment.
- [18] Exploiting VLAN Double Tagging. Dostępny online: <https://notsosecure.com/exploiting-vlan-double-tagging> (dostęp: 06-06-2022).
- [19] Kasu S., Hash-Adviser L., Marsh-Reviewer J., Bull-Reviewer R., Spanning Tree Protocol.
- [20] Cisco. Dostępny online: https://www.cisco.com/en/US/docs/switches/metro/me3600x_3800x/trash/swethchl.html (dostęp: 06-06-2022).
- [21] Lemeshko O., Mersni A., Yeremenko O., Omowumi S., Volotka V., Al-Dulaimi A., Application Prospects of First Hop Redundancy Protocols for Fault-Tolerant SDN Controllers: A Survey.

System uwierzytelniania i identyfikacji użytkownika na podstawie biometrii behawioralnej błędów popełnianych w trakcie pisania

inż. Bartłomiej Marek
Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo
Katedra Podstaw Informatyki

W pracy zaproponowano koncepcję i implementację systemu uwierzytelniania i identyfikacji użytkownika na podstawie biometrii behawioralnej błędów popełnianych w trakcie pisania w języku angielskim. Umożliwia on zarówno zbieranie danych pochodzących z pliku tekstowego, jak i w trybie online, zbierając naciśnięte znaki drukowalne i sprawdzając poprawność wprowadzonego czasu w czasie bliskim rzeczywistego. Błędy popełniane w trakcie pisania są określane na podstawie wyniku działania narzędzia `language_tool_python`¹, które zostało wybrane po przeprowadzonych badaniach porównujących dostępne rozwiązania w języku Python. Każde z narzędzi poprawiających błędy zostało przetestowane przez około 10 000 zróżnicowanych zdań pod kątem struktury i konstrukcji gramatycznej zdania, które były generowane przez zaimplementowany moduł wykorzystujący gramatykę bezkontekstową. W przypadku wystąpienia błędów obliczane są metryki porównywania napisów, które stanowią podstawę reprezentacji błędnego słowa wykorzystywanego do budowy modelu użytkownika. Skuteczność narzędzia została przetestowana dla ośmioosobowej grupy użytkowników, którzy byli w podobnym wieku i na podobnym poziomie zaawansowania znajomości języka angielskiego. W pracy opisano proces wyboru najlepszego modelu dla danej bazy, który został wybrany na podstawie przeprowadzonych badań diagnostycznych dla ponad 100 modeli, na podstawie których wybrano najlepiej rokujące, które zostały sprawdzone w badaniach weryfikacyjnych, z którego na podstawie analizy, m.in. krzywej ROC (ang. Receiver operating characteristic), dla każdej z klas został wybrany najlepszy model. Błąd FAR (ang. False Acceptance Rate) systemu identyfikacji dla tego modelu dla danej bazy wyniósł 0.216%, a FRR (ang. False Rejection Rate) 2.745% [2]. Zaproponowany system w przypadku potwierdzenia skuteczności na większej liczbie bardziej zróżnicowanych użytkowników mógłby stanowić dodatkowy faktor uwierzytelniania będąc przezroczystym dla użytkownika lub na podstawie błędów identyfikować autora tekstu, np. w procesach informatyki śledczej.

¹Jack Morris, moduł `language_tool_python` (<https://pypi.org/project/language-tool-python/>)

15.1. Cel i założenia

Celem pracy jest utworzenie koncepcji, implementacja oraz przetestowanie systemu uwierzytelniania i identyfikacji użytkownika na podstawie biometrii behawioralnej błędów popełnionych w trakcie pisania w języku angielskim. Głównymi założeniami projektowymi realizowanej pracy to:

- stworzenie systemu biometrycznego na poziomie koncepcyjnym opartego o generyczny model biometrii behawioralnej [3],
- implementacja systemu biometrycznego, który będzie realizował zbieranie danych zarówno w trybie offline – z pliku tekstowego, jak i w trybie online, rejestrując naciśnięcia użytkowników oraz wybranie odpowiedniego zbioru cech, które mogą stanowić modalność biometryczną,
- przeprowadzenie wielokontekstowych badań, które umożliwią wybór narzędzia poprawiającego błędy spośród dostępnych w języku programowania, w którym zaimplementowano system biometryczny. Narzędzie to jest potencjalnym wąskim gardłem systemu, ponieważ na podstawie wyników jego działania oceniana jest poprawność wprowadzanego tekstu przez użytkownika oraz obliczane metryki pozwalające na porównanie napisów,
- zebranie danych od kilkusobowej grupy użytkowników i przeprowadzenie eksperymentów, na podstawie których następuje wybór najlepszego zestawu cech dla tej bazy.

15.2. Wstęp teoretyczny

Pojęcie biometrii behawioralnej łączy w sobie pojęcie biometrii oraz behawioryzmu, czyli sposobu zachowania lub działania, które nie mają podłoża biologicznego. Każda z wykorzystywanych cech powinna być mierzalna i możliwa do przekształcenia przy wykorzystaniu różnych metod do formy wzorca. Ponadto dąży się do tego, aby modalność biometryczna była uniwersalna, unikalna dla każdego człowieka, niezmienna w czasie, bezpieczna zdrowotnie, nieuciążliwa w ściąganiu i testowaniu, akceptowana kulturowo, obyczajowo i religijnie [4].

Identyfikacja jest procesem umożliwiającym dopasowanie jeden do wielu bez konieczności deklarowania tożsamości przez użytkownika – system odpowiada na pytanie kim jest użytkownik. Wynikiem działania takiego systemu może być lista pierwszych N kandydatów, lista osób powyżej określonego progu, informacja o braku zarejestrowanej jednostki w systemie (identyfikacja negatywna) lub odpowiedź na pytanie, czy podmiot jest w bazie danych bez identyfikacji tożsamości (ślepa identyfikacja).

Uwierzytelnianie polega na porównaniu 1:1, ponieważ użytkownik podaje swoją tożsamość, poświadczając to następnie, wykorzystując co najmniej jedną z metod weryfikacji opartą na czymś, co wiesz (ang. something you know), np. hasło, kod PIN, czymś, co masz (ang. something you have), np. smart card, token, czymś, czym jesteś (ang. something you are), np. metody biometryczne [2].

Decyzją weryfikacji biometrycznej jest ustalenie, czy próbka biometryczna i wzorzec odniesienia mają to samo źródło na podstawie punktacji porównania.

Przetwarzanie języka naturalnego (ang. *Natural Language Processing* (NLP)) jest zbiorem metod umożliwiającymi dostosowanie mowy ludzkiej do komputerów w celu jej zrozumienia, analizy, manipulacji i generowania [5]. Ze względu na złożony charakter ludzkiego języka, kontekst danej informacji, proces ten jest niezwykle skomplikowany i złożony przez brak jednoznaczności i precyzji. Wymaga on, aby możliwe było rozpoznanie składni wyrazów ze względu na ich wieloznaczność, np. angielskie słowo *cook* może być traktowany jako czasownik (gotować) lub rzeczownik (kucharz). W procesie przetwarzania języka naturalnego często wykorzystuje się tokenizację, czyli proces podzielenia tekstu na tzw. tokeny, czyli mniejsze jednostki, takie jak zdania, słowa, czy pod-słowa. Fundamentalną potrzebą przetwarzania języka naturalnego jest określenie części mowy, co jest wykonywane przy pomocy przypisania do słów określonych etykiet (ang. *part-of-speech tags* (POS-tags)) w korpusie tekstowym [6]. Zestaw wszystkich POS-tagów jest charakterystyczny dla języka, ponieważ mogą być one całkowicie inne dla niepowiązanych ze sobą języków. Dla języka angielskiego zbiór tagów jest szczegółowy, wyróżniając m.in. odpowiednie koniugacje czy stopniowanie przymiotników.

W celu porównania napisów, np. w celu korekty jednego z nich, stosuje się algorytmy obliczające podobieństwo, dla którego większa wartość jest równoznaczna z większym podobieństwem między ciągami znaków lub odległość (podobieństwo odwrotne), gdzie mniejsza wartość oznacza większe podobieństwo między nimi [7]. Obliczanie miar podobieństw ciągów pozwala na rozwiązywanie problemów w aplikacjach umożliwiających poprawę czy rozpoznawanie napisów. Same techniki obliczania miar odległości można podzielić na następujące podgrupy:

- **odległości edycji** (ang. *edit distance*), oparte na liczbie operacji edycyjnych wykonywanych na przekazanych napisach, np. odległość Damerau–Levenshteina;
- **metody tokenów** (ang. *token methods*), przypominające algorytmy podobieństwa zbiorów, które w tym przypadku składają się z tokenów napisów), np. podobieństwo cosinusowe;
- **oparte na sekwencji** (ang. *sequence based*), w których funkcje są oparte na wspólnej długości, np. najdłuższy wspólny podciąg (ang. *Longest Common Substring*);
- **bazujące na fonetyce** (ang. *phonetic based*), opierające się na ocenie wymowy słów, np. ocena dopasowania (ang. *Match rating approach*).

15.3. Projekt i wykonanie

Chcąc zrealizować założenia wstępne oraz postawione cele, ze względu na brak podjęcia tematyki w publikacjach naukowych – w trakcie zbierania materiałów do pracy znaleziono jedynie artykuł [1], w którym zawarto koncepcję klasyfikacji błędów oraz teoretycznego algorytmu, które nie mogły zostać wykorzystane w trakcie opracowywania systemu biometrycznego ze względu na brak możliwości pełnej automatyzacji procesów zaproponowanych przez autorów artykułu [1]. Część praktyczna zawarta w pracy inżynierskiej zawiera opis opracowanej koncepcji systemu biometrycznego wraz z jej implementacją oraz koncepcji i implementacji narzędzia generującego zdania poprawne i błędne na podstawie gramatyki bezkontekstowej, które pozwoliły na przetestowanie dostępnych rozwiązań w kontrolowanych warunkach i dokonanie najlepszego wyboru spośród nich.

15.3.1. Koncepcja systemu biometrycznego

Koncepcja, którą przedstawiono na rysunku 15.2, została oparta na generycznym modelu systemu biometrycznego, zapewniając klarowny podział zadań każdego procesu [8]. Wyróżnia on następujące fazy:

- zbierania danych,
- przetwarzania sygnałów,
- zapisu do bazy (w trybie rejestracji),
- dopasowania,
- podjęcia decyzji [3].

Zbierane dane są realizowane: w trybie *Offline* przez przesłanie pliku w formacie tekstowego lub w trybie *Online*, który łączy w sobie funkcjonalności keyloggera oraz edytora tekstowego. Na podstawie monitorowanych naciśnień klawiszy, na pozycję zdefiniowaną przez zmienną *cursor* dodawane są znaki drukowalne, a w przypadku naciśnięcia klawisza *Backspace* usuwane są znaki przed lub *Delete* za nią. Faza ta kończy się w momencie naciśnięcia znaku zdefiniowanego jako koniec kontekstu, np. kropka, czy *Enter*. Po etapie zbierania danych następuje faza przetwarzania sygnałów podzielona na trzy etapy:

- 1) **Przetwarzanie wstępne**, w którym następuje oczyszczenie zdania oryginalnego z niepotrzebnych znaków, np. interpunkcyjnych oraz jego poprawa przez narzędzie, które zostało wybrane po wielokontekstowych badaniach, stanowiących element pracy dyplomowej, dostępnych rozwiązań w języku Python. Potem następuje tokenizacja zdania oryginalnego i poprawionego oraz porównanie wyrazów (tokenów). W przypadku wykrycia różnic następują dalsze etapy.
- 2) **Ekstrakcja cech**, w której obliczane są wybrane metryki porównywania napisów (m.in. dystanse edycyjne) między oryginalnymi błędnymi a poprawionymi słowami.
- 3) **Kontrola jakości**, podczas której błędne słowo może zostać odrzucone w przypadku zbyt dużych różnic między słowem oryginalnym a poprawionym.

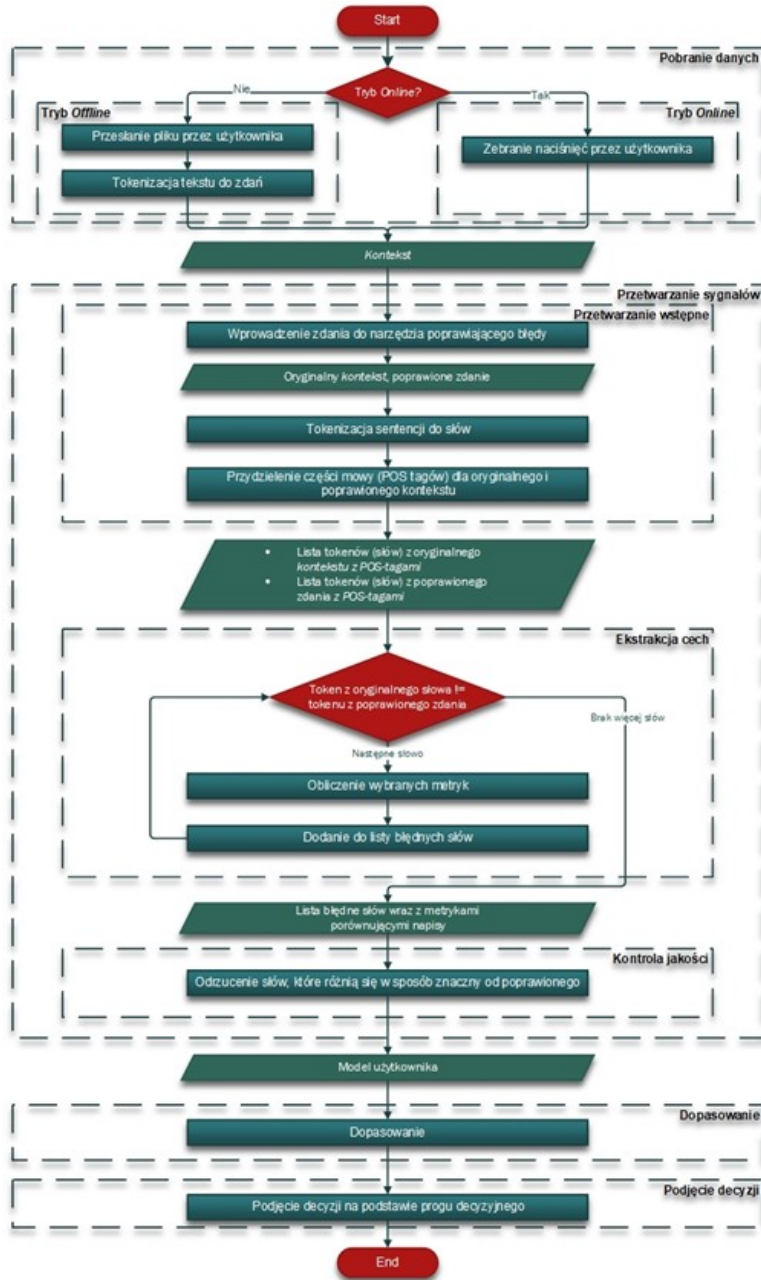
Wszystkie dane zarejestrowane w procesie zbierania danych zostają zapisane do pliku *.json*. W przypadku zbierania danych w trybie online dodanie informacji do pliku następuje w przypadku zakończenia przez użytkownika zapisu danego kontekstu. Pozwala to na zapis bliski czasowi rzeczywistemu, przy jednoczesnej optymalizacji użycia pamięci ze względu na nieprzechowywanie zbyt dużej ilości danych, co potencjalnie mogłoby negatywnie wpłynąć na komfort użytkownika.

Proces tworzenia modelu użytkownika został oparty o n -gramy, składające się z n k -cechowych reprezentacji błędnych słów.



Rysunek 15.1. Model n -gramu k -cechowych reprezentacji błędnych słów

Utworzone n -gramy k -cechowych reprezentacji błędnych słów służą jako dane wejściowe do uczenia nadzorowanego, do którego wykorzystano sieci neuronowe pracujące w trybie wieloklasowego klasyfikatora jeden do wielu (ang. *One-vs-Rest for Multi-Class Classification*), pozwalającego na predykcję przynależności do każdej z klas.



Rysunek 15.2. Koncepcja systemu biometrycznego

15.3.2. Implementacja systemu biometrycznego

Rozwiązanie biometryczne zostało napisane w Python w wersji 3.9, wykorzystując podejście obiektowe oraz wiele dostępnych bibliotek. Proces zbierania danych jest zarządzany z poziomu użytkownika przez graficzny interfejs użytkownika, na poziomie którego może:

- włączyć, zatrzymać i zakończyć proces zbierania danych w trybie online,
- przekazać plik tekstowy dla trybu offline,
- wybrać miejsce do zapisu pliku,
- zamknąć aplikację.

W tej fazie, w trybie *offline*, wykorzystano głównie bibliotekę *pynput*² pozwalającą na monitorowanie oraz kontrolę urządzeń peryferyjnych – klawiatury i myszy. Zaimplementowano wszystkie funkcjonalności opisane na poziomie koncepcyjnym, np. zmianę pozycji *kursora*, dodawanie znaków drukowalnych czy usuwanie ich z pozycji uzależnionej przez *cursor*.

Proces przetwarzania danych został oparty głównie na metodach przetwarzania języka naturalnego, do którego wykorzystano m.in. zestaw bibliotek³. W tej fazie wdrożono oczyszczenie zdania wprowadzonego przez użytkownika, np. ze znaków interpunkcyjnych, po którym dochodzi do korekty zdania przez rozwiązanie wybrane na podstawie przeprowadzonej analizy – *language_tool_python*. Zdanie oryginalne wraz z poprawionym są tokenizowane, przypisywane są im znaczniki części mowy (ang. *Part-of-Speech Tags*) [5]. Następnie tokeny są porównywane i w przypadku wystąpienia różnic następuje ekstrakcja cech błędnych słów, wśród których znajdują się m.in. miary porównywania napisów oparte na: odległości edycji, np. dystans Damerau–Levenshteina, metody tokenów (ang. *token methods*), np. podobieństwo cosinusowe, oparte na sekwencji (ang. *sequence based*), np. dopasowanie wzorca Gestalt czy bazujące na fonetyce (ang. *phonetic based*) – algorytm oceny dopasowania (ang. *Match rating approach*) [6]. Ponadto utworzono własne klasy błędów, które rozszerzają kontekst błędów zaproponowanych w algorytmie Damerau–Levenshteina (transpozycja, zamiana, usunięcie, dodanie znaku) o dodatkowe informacje, takie jak znak poprzedzający i następujący po błędzie, litery, w jakich popełniono błąd oraz miejsce, w jakim go popełniono (początek, środek lub koniec napisu) [6]. Wszystkie te metryki stanowią podstawę utworzenia wektora cech reprezentującego błędne słowo.

Reprezentacja błędnego słowa jest odrzucana w przypadku wystąpienia zbyt dużych różnic między słowem oryginalnym a poprawionym przez narzędzie korygujące błędy ze względu na potencjalny błąd korekty.

Model użytkownika zgodnie z założeniami koncepcyjnymi zakłada strukturę *n*-gramu składającego się z *n* *k*-cechowych reprezentacji błędnych słów. Wybór *k*-cech jest wykonywany przez funkcję przy wykorzystaniu metody *score_func* klasy *sklearn.feature_selection.SelectKBest*, wybierającej *k* najbardziej zróżnicowanych cech z danego zbioru dla przekazanej do konstruktora liczby *k*. Umożliwiło to uzależnienie całego modelu od dwóch zmiennych *k* i *n* czyli liczby cech każdej reprezentacji błędnych słów oraz ich liczby w *n*-gramie. Utworzone *n*-gramy służą jako dane wejściowe dla sieci neuronowej zaimplementowanej przy wykorzystaniu biblioteki *Tensorflow.Keras* [9]. Sieć neuronowa ma budowę wielowarstwową zawierającą warstwę wejściową, cztery warstwy ukryte oraz

²Moses Palmér, Biblioteka *pynput* v.1.7.6 [https://pypi.org/project/pynput/]

³Team NLTK, Natural Language Toolkit v.3.7 [https://www.nltk.org/index.html]

warstwę wyjściową, w których liczba neuronów została dobrana zgodnie z metodą piramidy geometrycznej, zakładającą utworzenie kształtu piramidy przez liczbę neuronów w kolejnych warstwach.

15.3.3. Wybór narzędzia poprawiającego błędy

W pracy zawarto wielokontekstowe badania uzasadniające wybór narzędzia poprawiającego błędy. W celu odpowiedniego wyboru, tego istotnego z punktu widzenia poprawności działania systemu biometrycznego elementu, przeanalizowano skuteczność działania pięciu dostępnych rozwiązań w języku Python: *LanguageTool*, *TextBlob*⁴, *SpellChecker*⁵, *Speller*⁶, *GingerIt*⁷ oraz ich kombinacje – zdanie poprawione przez jedno narzędzie stanowiło wejściowe dla drugiego, którego wynik był uznawany za końcowy rezultat takiej kombinacji. Aby badanie zostało zrealizowane w kontrolowanych warunkach, utworzono moduł generujący zdania przy wykorzystaniu gramatyki bezkontekstowej.

Sentencje były zróżnicowane pod kątem konstrukcji gramatycznej oraz wykorzystanych struktur – użyto większość czasów języka angielskiego, strony biernej czy czasowników modalnych. Zaimplementowany moduł umożliwiał, poza zdaniami poprawnymi syntaktycznie, które stanowiły zdania wzorcowe, z którymi porównywane były wyniki działania testowanych narzędzi, generowanie zdań błędnych gramatycznie oraz z losowymi błędami typu literówka. Błędy gramatyczne były predefiniowane na poziomie gramatyki bezkontekstowej, np. błędna koniugacja *He play... zamiast He plays...* lub przez zamianę przedimka na przeciwny niż ten, który zwracała *referenced* z modułu *pattern*⁸ – z *a* na *an* i odwrotnie lub błędne zastosowanie połączeń charakterystycznych dla czasowników policzalnych i niepoliczalnych – *How many* + czasownik niepoliczalny (zamiast *How much*) oraz *How much* + czasownik policzalny (zamiast *How many*). Samą weryfikację policzalności i niepoliczalności danego rzeczownika oparto na *Google Books Ngram Viewer*⁹, czyli narzędziu zwracającym trendy występowania wyrazów kluczowych, którymi w tym przypadku były połączenia słów *much*, *many* z rzeczownikami. Następną kategorią błędów były błędy typu literówka, w których dodawano i usuwano losowe znaki, czy zamieniano je na inne lub zamieniano kolejnością. Tę grupę podzielono na cztery podgrupy w zależności od liczby popełnionych błędów (kolejno od jednego do czterech błędów tego typu). Dodatkowo osobną kategorią zdań przekazywanych do narzędzi były zdania poprawne syntaktycznie, które miały sprawdzać generowanie przez te narzędzia błędów typu false-positive. Łącznie każde z pięciu narzędzi zostało przetestowane przez ponad 10 000 zdań, które były pogrupowane:

- zdania błędne gramatycznie,
- zdania poprawne syntaktycznie,
- zdania z 1 literówką,
- zdania z 2 literówkami,
- zdania z 3 literówkami,
- zdania z 4 literówkami.

⁴Steven Loria, Moduł TextBlob v.0.9.0 [https://pypi.org/project/textblob/0.9.0/]

⁵Tyler Barrus, Pakiet SpellChecker v.0.7.0 [https://pyspellchecker.readthedocs.io/en/latest/]

⁶Jonas McCallum, Filip Sondej, Pakiet autocorrect v. 2.6.1, [https://pypi.org/project/autocorrect/]

⁷Tim Kleinschmidt, Moduł GingerIt [https://pypi.org/project/gingerit/]

⁸Tom De Smedt, Walter Daelemans, pattern [https://pypi.org/project/pattern3/]

⁹https://books.google.com/ngrams/

Na etapie oceny wyników wzięto pod uwagę miary statystyczne metryk porównywania ciągów znaków oraz dystanse edycyjne między zdaniami oryginalnymi i poprawionymi. W tych dwóch kategoriach utworzono osobne klasyfikacje, które stanowiły podstawę końcowego wyboru narzędzia, które miało zostać wykorzystane w systemie biometrycznym. Dodatkowym elementem wziętym pod uwagę przy końcowej decyzji była także niezawodność narzędzia, w szczególności pod kątem czasowym, ponieważ niestabilność tego parametru mogłaby wpłynąć negatywnie na płynność działania całego systemu. Po uwzględnieniu wyników obu klasyfikacji, niezawodności czasowej (średni i maksymalny czas wykonywania korekty) oraz obserwacji dodatkowych wybrane zostało rozwiązanie *language_tool_python*, które poza zadowalającymi wynikami poprawy wprowadzonych zdań:

- jako jedyne oferuje poprawę błędów gramatycznych na zadowalającym poziomie,
- zapewnia niezawodność pod kątem czasu przetwarzania zdania – niektóre rozwiązania w skrajnych przypadkach poprawiały zdanie przez ponad 10 sekund, co jest niedopuszczalne do planowanego zastosowania,
- jest rozwiązaniem zachowującym się stabilnie. Na przykład *SpellChecker*, które ma dobre wyniki ze względu na niepodejmowanie prób korekty (np. dla popełnionego jednego błędu typu literówka, przy braku podjęcia korekty, dystans edycyjny Damerau–Levenshteina wyniesie 1).

15.4. Uzyskane wyniki

W celu weryfikacji działania systemu biometrycznego sprawdzono skuteczność jego działania na ośmioosobowej grupie użytkowników. Niewielka liczba wynikała z trudności zbierania danych – aplikacja jest zaimplementowana w Pythonie, czyli języku interpretowalnym, przez co niemożliwe jest zapisanie jej do pliku wykonywalnego i udostępnienia w takiej postaci, a sam proces pisania wymagał poświęcenia czasu od użytkowników. Badana grupa była w podobnym wieku i na podobnym poziomie zaawansowania znajomości języka angielskiego (B2-C1). Reprezentacje zebranych błędnych słów każdego z użytkowników zostały podzielone na dwie grupy zawierające elementy, z których tworzono dwa niezależne zbiory n -gramów – treningowy oraz testowy (w rozmiarze ok. 20–30% grupy uczącej). Ze zbioru treningowego podczas procesu nauczania oddzielana była grupa walidacyjna. Przeprowadzone badania miały na celu znalezienie parametrów modelu (uwzględnianych cech oraz liczby reprezentacji błędnych słów w n -gramie), dla których zbudowany system dla danej bazy użytkowników będzie najskuteczniejszy. Ze względu na uzależnienie samego modelu od dwóch zmiennych k i n możliwe było podzielenie badań na dwa etapy:

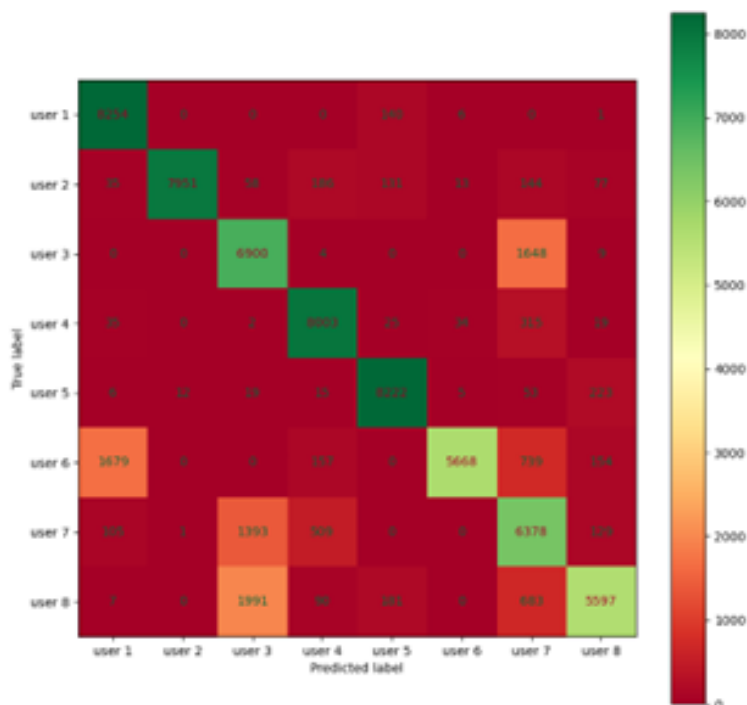
- badania diagnostyczne, które zostały wykonane na prostszej sieci neuronowej dla mniejszej liczby danych, wykorzystując wszystkie modele kombinacji liczb k i n dla wszystkich kombinacji k -cech w n -gramach, gdzie $k \in [3, 14]$ oraz $n \in [4, 10]$,
- badania weryfikacyjne, do których wykorzystano bardziej skomplikowaną sieć neuronową oraz większą liczbę danych, które zostały wykonane dla najlepszych modeli z poprzedniej części badań, pozwalające na wybór najlepszego modelu dla danej bazy.

Na podstawie badań diagnostycznych, w których przetestowano łącznie 102 modele,

zaobserwowano poprawę skuteczności działania systemu biometrycznego wraz ze wzrostem liczby reprezentacji niepoprawnych słów w n -gramie do pewnego momentu, po którym następuje ich pogorszenie. Podobną charakterystykę można zaobserwować dla zmiany liczb cech w reprezentacji błędnego słowa – do pewnego momentu widoczna poprawa wyników skuteczności działania systemu, po czym wyniki zaczynają się pogarszać. Pozwoliło to na wyciągnięcie wniosku, że potencjalnie najlepsze modele dla danej bazy są dla średnich wartości liczb k i n , które zostały sprawdzone w trakcie badań weryfikacyjnych.

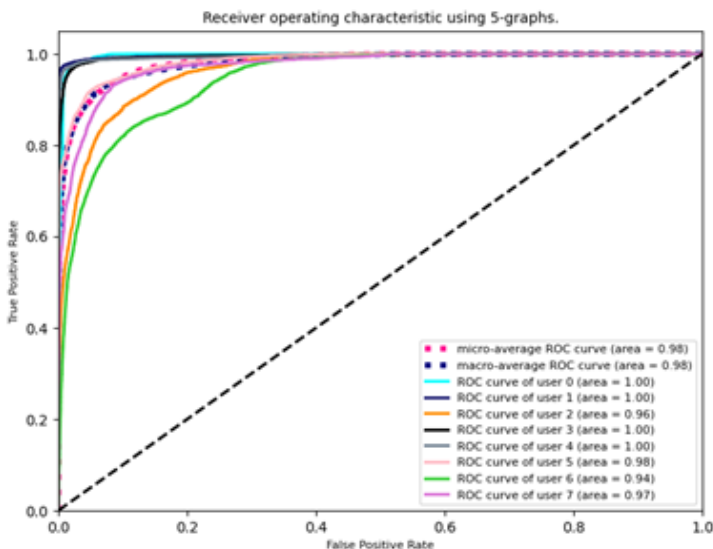
Analiza wpływu liczby cech dla reprezentacji słowa w większości przypadków (dla wartości zmiennej $k \in [4,8]$) wykazała do pewnego stopnia charakterystykę podobną do zaobserwowanej w badaniach diagnostycznych – poprawę skuteczności modelu wraz ze wzrostem liczby cech do $k = 5$, od którego zaczyna ona spadać oraz poprawę skuteczności modelu wraz ze wzrostem liczby reprezentacji błędnych słów w n -gramie (dla większości przypadków wzrost do $n = 5$), po której zaczyna ona spadać. Jedynym wyjątkiem jest model dla stałego $k = 5$, w którym znaczny spadek następuje dla 6-gramu, który jest mniej skuteczny od 5- i 7-gramu.

Przeprowadzone badania umożliwiły wytypowanie najlepszego dla danej bazy modelu z 5 cechami dla reprezentacji błędnego słowa w 5-gramie, którego pole pod wykresem krzywej ROC wyniosło 0.98. Błąd FAR (ang. *False Acceptance Rate*) całego systemu dla tego modelu wyniósł 0.216%, natomiast błąd FRR (ang. *False Rejection Rate*): 2.745% [2]. Błędy te są zbliżone do rozwiązania zaproponowanego przez CESG, opartego na geometrii dłoni (który został jednak przetestowany na większej liczbie użytkowników – 200).



Rysunek 15.3. Tablica pomyłek (ang. *Confusion matrix*) modelu 5-gramu z 5-cechami na każdą reprezentację błędnego słowa

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że potwierdzono skuteczność systemu biometrii behawioralnej opartej na błędach popełnianych w trakcie pisania w języku angielskim dla niewielkiej grupy użytkowników, dla których język angielski nie jest językiem ojczystym.



Rysunek 15.4. Krzywa ROC (ang. *Receiver operating characteristic*) modelu 5-gramu z 5-cechami na każdą reprezentację błędnego słowa

15.5. Podsumowanie

Przetwarzanie języka naturalnego oraz biometria behawioralna stanowią bardzo szerokie zagadnienia. W tej pracy postarano się połączyć te dwa obszary, budując od poziomu koncepcji, przez implementację do przeprowadzenia badań skuteczności działania, system biometryczny oparty na błędach popełnianych w trakcie pisania w języku angielskim na grupie użytkowników. Rozwiązanie umożliwia zbieranie danych w trybie *online* oraz *offline*, przez co może być użyteczny zarówno w przypadku weryfikacji lub identyfikacji autora napisanego już tekstu, jak i użytkownika aktualnie piszącego. Dane pochodzące z obu źródeł są unifikowane do tej samej struktury przy pomocy technik przetwarzania języka naturalnego, takich jak tokenizacja. Kluczowa z punktu widzenia poprawności działania systemu biometrycznego poprawa błędów jest realizowana przez *language_tool_python*, czyli narzędzie wybrane po wielokontekstowych badaniach rozwiązań dostępnych w języku Python [10]. Badania te były realizowane w kontrolowanych warunkach pozwalających, dzięki zastosowaniu m.in. gramatyki bezkontekstowej, na wygenerowanie zdań o zdefiniowanych rodzajach błędów, np. gramatycznych oraz losowych – błędy typu literówka.

Przeprowadzone badania systemu biometrycznego na danych zebranych od ośmiu osób pozwoliły na wytypowanie najlepszego modelu dla danej bazy. Wybór ten został dokonany po wstępnym przeanalizowaniu charakterystyki danych dla 102 różnych modeli, z których wytypowano grupę najlepiej rokujących. Zbiór ten został przetrenowany i przetestowany

na większej liczbie danych i na podstawie otrzymanych wyników wybrano najlepszy model dla tej bazy, którym był 5-gram z 5 cechami na każdą reprezentację słowa, którego poziomy błędów FAR i FRR są zbliżone do systemu opartego na modalności geometrii dłoni. Pokazuje to, że system biometrii behawioralnej opartej na błędach popełnianych w trakcie pisania, dla tej bazy może stanowić dodatkowy faktor uwierzytelniania czy skutecznie identyfikować użytkownika. Niemniej jednak wymaga on przetestowania skuteczności działania na większej bazie bardziej zróżnicowanych użytkowników.

Bibliografia

- [1] Parappuram A., Nidhin T.R., Greeshm N., Continuous User Identity Verification Using Typing Error Classification. *2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, **2016**.
- [2] Introduction to Biometric Systems. Dostępny online: http://www.biometrika.it/eng/wp_biointro.html (dostęp: 01-10-2022).
- [3] Shoewu O.O., Idowu O., Development of Attendance Management System using Biometrics, *The Pacific Journal of Science and Technology*, **2012**, *13(1)*, s. 300–307.
- [4] Saeed K., *New directions in behavioral biometrics*, wydanie pierwsze, CRC Press, Boca Raton, Stany Zjednoczone, 2016.
- [5] Eisenstein J., *Introduction to Natural language processing*, wydanie pierwsze, Jacob Eisenstein, 2018.
- [6] Liddy E.D., Natural language processing. W *Encyclopedia of Library and Information Science*; wydanie drugie, Marcel Decker, 2001.
- [7] Cohen W., Ravikumar P., Fienberg S., A comparison of string metrics for matching names and records, W *Kdd workshop on data cleaning and object consolidation*, **2003**.
- [8] El-Abed M., Lacharme P., Rosenberger C., Privacy and Security Assessment of Biometric Systems. *Cambridge scholar publishing. Advances in Security and Privacy of Biometric Systems*, 2015.
- [9] Chollet F., Keras. Dostępny online: <https://github.com/fchollet/keras> (dostęp: 01-10-2022).
- [10] Morris J., Moduł language-tool-python. Dostępny online: <https://pypi.org/project/language-tool-python/> (dostęp: 01-10-2022).

Projekt i implementacja skanera portów TCP

inż. Jakub Derda
Informatyka Techniczna

dr inż. Michał Kucharzak
Katedra Systemów i Sieci Komputerowych

W świecie cyfrowym bezpieczeństwo sieci jest kluczowe. Artykuł ten koncentruje się na stworzeniu oprogramowania do skanowania portów protokołu TCP – jednego z najważniejszych mechanizmów komunikacji w sieci. Nowatorska aplikacja pozwala na szybkie wykrywanie niespodziewanych zdarzeń, które mogą zagrozić funkcjonowaniu sieci. Umożliwia monitorowanie stanu różnych urządzeń i pozyskiwanie wiedzy o portach TCP. Projekt składa się z przeglądu technologii sieciowych, zaprojektowania i stworzenia interfejsu użytkownika oraz skanera portów TCP. Przetestowany został w realnych warunkach i może być nieocenionym narzędziem dla administratorów sieci, inżynierów i testerów penetracyjnych. Bezpieczne sieci to bezpieczny cyfrowy świat, a ta aplikacja przyczynia się do jego tworzenia.

16.1. Cel i założenia

Jednym z najtrudniejszych wyzwań branży IT jest utrzymanie bezpieczeństwa świadczonych usług w lokalnych sieciach komputerowych. W infrastrukturze krytycznej szczególną rolę musi odgrywać **monitorowanie** oraz szybkie wykrywanie nieplanowanych **zdarzeń**, które mogą mieć destrukcyjny wpływ na funkcjonowanie sieci.

W odpowiedzi na te potrzeby celem pracy jest **projekt i implementacja oprogramowania wspomagającego skanowanie portów protokołu TCP w sieci komputerowej** ze szczególnym uwzględnieniem aspektu monitorowania stanu poszczególnych urządzeń i wykrywania nieplanowanych zdarzeń.

Spełnienie założonego celu wymagało przygotowania:

- przeglądu literatury sieciowej z naciskiem na dokumentację protokołu TCP,
- wymagań funkcjonalnych, architektury systemu oraz założeń projektowych,
- **wydajnego skanera portów TCP**, który wykorzystuje jedną ze znanych metod skanowania portów protokołu TCP oraz w zależności od jakości i obciążenia sieci pozwala na dostosowanie szybkości skanowania,

- **aplikacji z graficznym interfejsem użytkownika**, która ułatwia korzystanie ze skanera i pozwala spełnić założenia związane z monitorowaniem stanu uruchomionych usług,
- dokumentacji technicznej stworzonego rozwiązania.

16.2. Przegląd technologii

Współczesne sieci komputerowe umożliwiają współpracę sprzętu komputerowego i oprogramowania różnych dostawców. Koniecznością było opracowanie architektur sieciowych opartych na strukturze warstwowej.

16.2.1. Warstwowe modele sieci oraz kluczowe protokoły

W obecnych czasach najbardziej popularne są modele, które dokonują w punktach styku między warstwami tzw. **enkapsulacji**, czyli zmian formatu danych do postaci zrozumiałej przez warstwę sąsiadującą, co pokazano na rysunku 16.1.



Rysunek 16.1. Porównanie modeli warstwowych

Model referencyjny ISO/OSI [1] jest najważniejszym modelem warstwowym, który miał ogromny wpływ na ewolucję protokołów sieciowych, urządzeń i oprogramowania – jest traktowany jako **wzorzec dla dużej części rodzin protokołów komunikacyjnych**.

Model TCP/IP [2] jest teoretyczną reprezentacją warstwowej struktury sieciowych protokołów komunikacyjnych. Opracowany został w ramach projektu grupy ARPANET i obecnie jest **najpopularniejszym zestawem protokołów**, szczególnie przez wzgląd na rozwój Internetu. Standaryzacją i rozwojem architektury zajmuje się organizacja IETF (Internet Engineering Task Force), która wszystkie informacje umieszcza w dokumentach RFC (ang. *Request For Comments*). Założenia modelu TCP/IP są pod względem organizacji warstw zbliżone do modelu ISO/OSI, jednak liczba warstw jest **mniejsza i bardziej odwzorowuje prawdziwą strukturę Internetu**.

IPv4 (ang. Internet Protocol version 4) [3] – czwarta wersja protokołu internetowego IP, która w modelu TCP/IP reprezentuje warstwę Internetu. Obecnie większość ruchu w Internecie **kierowana jest za jego pomocą**. Jest protokołem bezpołączeniowym, zatem informacje wymieniane między stacjami wymieniane są bez potrzeby nawiązywania sesji. IPv4 zapewnia **prostotę działania**, jednak nie kontroluje przepływu pakietów, czyli nie ma pewności, czy dane zostaną dostarczone do odbiorcy.

TCP (ang. Transmission Control Protocol) [4] – protokół **połączeniowy** działający w warstwie transportowej modelu TCP/IP, który został zaprojektowany, aby zapewnić **niezawodny system transmisji** i umożliwić sterowanie przepływem, potwierdzenie odbioru, zachowanie kolejności danych oraz zadbać o kontrolę błędów i przeprowadzenie retransmisji. Powstał w początkowej implementacji Internetu, aby wspierać protokół IP i do dzisiaj główne aplikacje internetowe opierają się na jego funkcjonowaniu. Protokół dokonuje fragmentacji danych do przesłania i nadaje im numery sekwencyjne.

16.2.2. Metody skanowania portów TCP

Jak pokazano w artykule [5], istnieje wiele mechanizmów, które pozwalają wykryć otwarte porty skanowanego hosta. Protokół TCP pozwala to wykonać przynajmniej na 3 sposoby:

- **Skanowanie metodą SYN** – Skanowanie opiera się na wymianie 3 pakietów z segmentami protokołu TCP, czyniąc tzw. **połowiczne nawiązanie połączenia TCP**, ponieważ w połowie procedury *three-way handshake* połączenie jest przerywane.
- **Skanowanie poprzez pełne połączenie TCP** – Skanowanie opiera się na **pełnym połączeniu TCP** z wykorzystaniem procedury *three-way handshake*, jednak bez jakiegokolwiek przesyłania danych. Po nawiązaniu połączenia jest ono od razu zamykane przez hosta skanującego.
- **Skanowanie metodą Christmas Tree Scan** – Skanowanie metodą Christmas Tree Scan polega na wysłaniu z hosta skanującego segmentu z ustawionymi flagami FIN, PSH i URG na wartość 1. Zaletą tego skanowania jest fakt, że może przechodzić przez niestanowe zapory sieciowe i routery filtrujące pakiety.

16.2.3. Potencjalne zagrożenia związane z otwartymi portami TCP

Wszystkie zagrożenia związane z portami protokołu TCP dotyczą **procesów/usług nasłuchujących**. Zwyczajowo przyjęło się określać atakiem na porty protokołu TCP zwykle skanowanie portów, które jest jedynie pozyskiwaniem informacji, na których potencjalny cyberprzestępca mógłby oprzeć swój wektor ataku.

Mając nieoczekiwanie otwarty port protokołu TCP, cyberprzestępca nie zrobi zbyt wiele, ale tylko wtedy, gdy za nim nie ma żadnej uruchomionej usługi. W momencie, gdy jest uruchomiony proces na otwartym porcie możliwości jest więcej. Cyberprzestępcy mogą przede wszystkim:

- Wykonać atak siłowy, aby uzyskać dostęp do usługi wymagającej uwierzytelniania,
- Wykonać atak „Denial of service”, który uniemożliwi prawidłowe jej funkcjonowanie lub całkowicie zablokuje jej działanie,

- Wykorzystać luki w zabezpieczeniach usługi i uzyskać nielegalny dostęp do zasobów serwera lub nawet wejść do systemu,
- Jeśli uda się wejść do systemu, cyberprzestępcy bardzo szybko mogą podnieść uprawnienia i przejąć całkowitą kontrolę nad serwerem,
- Wykonać atak SQL injection, jeśli za otwartym portem znajduje się usługa bazodanowa.

Wszystkie zagrożenia z tym związane podkreślają **konieczność monitorowania stanu i odpowiedniego zabezpieczania uruchomionych usług**.

16.3. Projekt i wykonanie

Przygotowanie projektu skanera sieciowego wymagało przeprowadzenia analiz i prac o charakterze badawczo-rozwojowym, jak wykrywać zdarzenia i zmiany stanu portów, a samo wdrożenie przeprowadzone zostało na ich podstawie.

16.3.1. Specyfikacja techniczno-funkcjonalna

Analiza wymagań projektowych przeprowadzona została w sposób uporządkowany – wymagania zostały pogrupowane ze względu na ich naturę.

Wizerunek potencjalnych użytkowników

Docelowymi użytkownikami produktu powinni być **administratorzy sieci lokalnych** oraz **uprawnieni inżynierowie** do skanowania hostów w sieci, a także **testerzy penetracyjni**, którzy będą mogli wykorzystać skaner na etapie rekonesansu. Przez charakter narzędzia nie zakłada się, że będą z niego korzystać osoby bez minimalnego wykształcenia technicznego.

Dodatkowe założenia

W wyniku przeprowadzonej analizy zostały określone dodatkowe założenia, które muszą definiować pracę produktu:

- 1) Szybkość skanowania – definiuje **liczbę wykonanych procesów skanowania sekwencyjnego jednocześnie**. W zagadnieniu chodzi przede wszystkim o pozornie równoległe wykonywanie prób skanowania.
- 2) Wykorzystanie **metody pełnego połączenia TCP** jako docelowej metody skanowania portów protokołu TCP.
- 3) **Wzorzec stanu sieci** – wzorcowy stan sieci lokalnej w chwili jego utworzenia rozumiany jako otwarte porty protokołu TCP z perspektywy poszczególnych hostów.

Wymagania funkcjonalne

Analiza wymagań funkcjonalnych przeprowadzona została z perspektywy dwóch osobnych aplikacji – konsolowego skanera portów oraz aplikacji z interfejsem użytkownika. **Konsolowy skaner portów** powinien umożliwiać:

- skanowanie konkretnych hostów i ich portów protokołu TCP wraz z określeniem parametrów pracy,
- weryfikację aktywności hostów w sieci,
- wyświetlenie informacji o dostępnych na urządzeniu skanującym interfejsach sieciowych,
- wyświetlenie pomocy kontekstowej,
- pełną walidację wprowadzanych przez użytkownika parametrów.

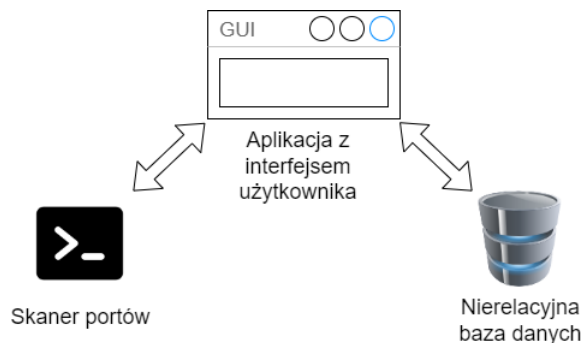
Aplikacja z interfejsem użytkownika i logiką biznesową powinna umożliwiać:

- podgląd utworzonych wzorców stanu sieci oraz powinna sugerować jaka usługa może kryć się za danym portem,
- tworzenie nowego wzorca z automatycznym wykrywaniem hostów i ustalenie parametrów skanowania,
- tworzenie nowego wzorca z manualnym wskazaniem hostów do skanowania,
- wykonanie porównawczego skanowania sieci w odniesieniu do stworzonego wzorca stanu sieci,
- usunięcie istniejącego wzorca stanu sieci z bazy danych,
- całkowicie dowolne skanowanie hostów niezależnie od przynależności do podsieci czy wzorca.

16.3.2. Architektura systemu i technologie programistyczne

W projekcie zakładano stworzenie **dwóch instancji programów**. Pierwszy z nich powinien umożliwiać komunikację z użytkownikiem, bazą danych oraz odpowiadać za spełnienie wszystkich wymagań funkcjonalnych przy pomocy interfejsu użytkownika. Przeznaczeniem drugiego programu jest wykonywanie skanowania portów protokołu TCP.

Architektura systemu składa się z 3 głównych komponentów: ze **Skanera portów**, **Aplikacji z interfejsem użytkownika** oraz z **Nierelacyjnej bazy danych**, która została pokazana na rysunku 16.2.



Rysunek 16.2. Architektura systemu

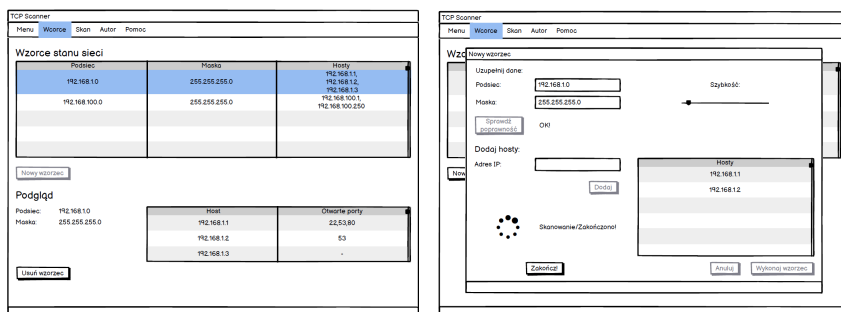
Po przeprowadzeniu analizy dostępnych technologii i narzędzi określono, że:

- skaner portów zostanie napisany z wykorzystaniem **języka C++ w standardzie ISO C++ 14**, ponieważ powinien być efektywny i wydajny,

- aplikacja z interfejsem użytkownika przygotowana zostanie przy pomocy języka Java w wersji 11 i biblioteki JavaFX,
- skaner portów powinien rezultaty skanowania wyświetlać na standardowym wyjściu w postaci obiektu w formacie JSON.

16.3.3. Projekt graficznego interfejsu użytkownika

Podjęto decyzję o przygotowaniu szczegółowego projektu interfejsu użytkownika, aby spełnić wszystkie wymagania funkcjonalne oraz нефункционаłne (w tym estetyczne oraz dotyczące bezpieczeństwa). Wszystkie grafiki pogrupowane zostały wokół wymagań funkcjonalnych wynikających ze specyfikacji tak, jak powinno to wyglądać w docelowym produkcie, zachowując kolejność i wszystkie mechanizmy ułatwiające pracę użytkownika. W przypadku tego opracowania skupiono się jedynie na głównych widokach zakładki oraz na zgrubnym opisie, co umożliwiają. Pierwsze dwa widoki pokazują główną zakładkę programu, która przede wszystkim spełnia założenie mówiące o możliwości wyświetlania i modyfikowania bazy stworzonych wzorców stanu sieci oraz zostały pokazane na rysunku 16.3.

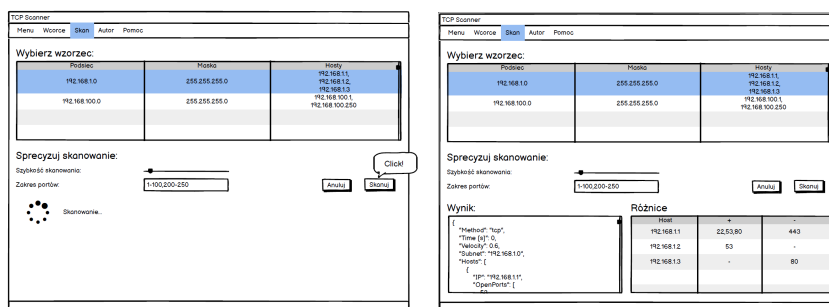


(a) Podgląd wzorca

(b) Tworzenie nowego wzorca

Rysunek 16.3. Widok zakładki „wzorce”

Postać zakładki „Aktualny skan” pozwala dokonać ponownego skanowania i porównać wyniki, co pokazano na rysunku 16.4.

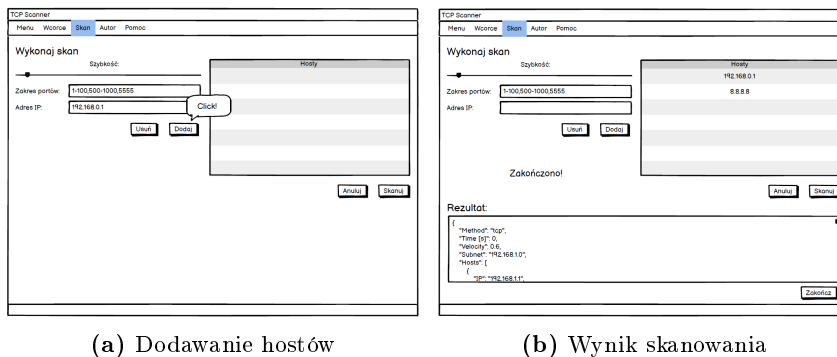


(a) Wybór wzorca

(b) Wyniki skanowania

Rysunek 16.4. Widok zakładki „Aktualny Skan”

Zakładka „Skan” pozwala w dowolny sposób dokonywać skanowania – niezależnie od przynależności do wzorca i przedstawiona została na rysunku 16.5.



Rysunek 16.5. Widok zakładki „Skan”

16.3.4. Implementacja rozwiązania

Podrozdział ten zawiera wszystkie niezbędne szczegóły techniczne z perspektywy konsolowego skanera portów oraz aplikacji z interfejsem użytkownika.

Konsolowy skaner portów

W trakcie prac badawczo-rozwojowych ustalono **interfejs komunikacji z programem** oraz **konieczne i opcjonalne parametry pracy**. Parametry przekazywane są jako standardowe wejście przy uruchomieniu programu.

W związku z tym napisano **procedurę obsługi parametrów**, która je identyfikuje, waliduje oraz komunikuje użytkownikowi potencjalne błędy. Pomoc kontekstowa zostanie pokazana w rozdziale z uzyskanymi wynikami.

Szybkość skanowania w najprostszym rozumieniu ustala **liczbę wątków skanowania sekwencyjnego**, wprowadzając przetwarzanie współbieżne do programu. Istnieje wiele możliwości implementacji współbieżności, jednak na potrzeby tej implementacji podjęto decyzję o całkowicie **równomiernym rozkładaniu prób** do wykonania. Warto podkreślić rolę parametru „-v”, który powinien być liczbą z zakresu (0, 1) i który pozwala w ten sposób ustawić **szybkość skanowania**.

Format rezultatu skanowania pokazuje listing 16.1.

Listing 16.1: Format danych wyjściowych po przykładowym skanowaniu portów

```
{
  "method": "tcp",
  "time": 0,
  "velocity": 0.6,
  "subnet": "192.168.0.0",
  "netmask": "255.255.255.0",
  "hosts": "192.168.0.1\n192.168.0.2",
}
```

```

"result": [
  {
    "ip": "192.168.0.1",
    "openPorts": [
      53,
      80
    ]
  },
  {
    "ip": "192.168.0.2",
    "openPorts": []
  }
]
}

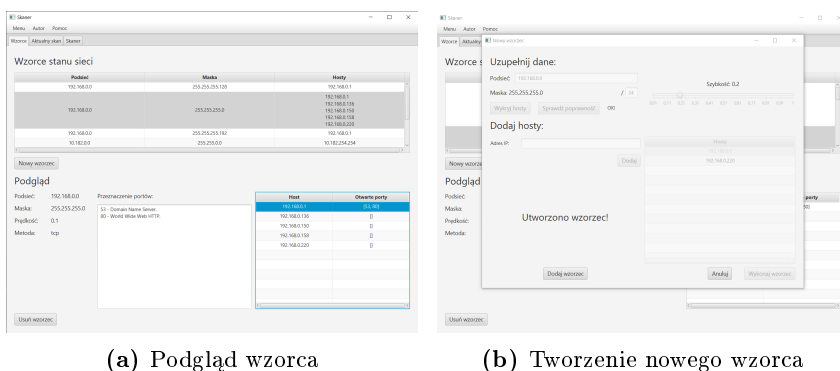
```

Aplikacja z interfejsem użytkownika

Implementację interfejsu użytkownika wykonano zgodnie z projektem w formie aplikacji desktopowej. Wykorzystano język Java oraz platformę JavaFX. Do tego aplikacja korzysta z nierelacyjnej bazy danych MongoDB i sama dokonuje skanowania z wykorzystaniem protokołu ARP. Aplikacja w swojej pracy wykorzystuje również zaimplementowany skaner portów i uruchamia go jako **subproces**, podając konieczne parametry w komendzie uruchomienia.

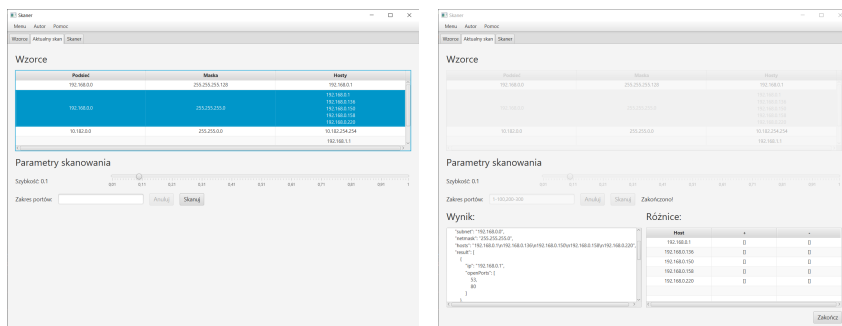
16.4. Uzyskane wyniki – instrukcja użycia

W testowym scenariuszu prezentującym uruchomienie aplikacji z interfejsem użytkownika odbyło się to na tym samym systemie operacyjnym co nierelacyjna baza danych MongoDB. Typowe wybranie wzorca oraz proces tworzenia nowego wzorca pokazano na rysunku 16.6.



Rysunek 16.6. Widok zakładki „wzorce”

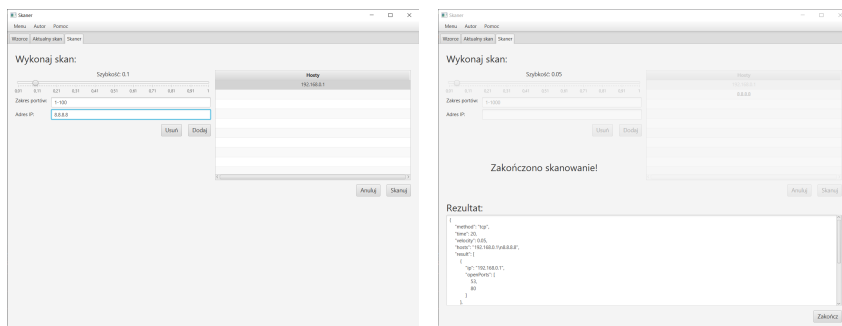
Zakładka „Aktualny skan” oferuje możliwość wykonania skanu porównawczego na podstawie jednego z wzorców przechowywanych w bazie. Po wykonaniu ponownego skanowania wyświetla rezultaty, a sam proces pokazany został na rysunku 16.7.



(a) Wzorce (b) Rezultaty

Rysunek 16.7. Widok zakładki „Aktualny skan”

Zakładka „Skaner” pozwala użytkownikom dokonywać zupełnie dowolnego skanowania zbioru hostów niezależnie od przynależności do podsieci czy wzorca, co pokazano na rysunku 16.8. Po uzyskaniu rezultatu jest on wyświetlany w polu tekstowym w formie przekazywanej bezpośrednio z konsolowego skanera portów.



(a) Dodawanie hostów (b) Rezultat

Rysunek 16.8. Widok zakładki „Skaner”

16.5. Podsumowanie

Podsumowując, jako cel pracy przyjęto **projekt i implementację oprogramowania wspomagającego skanowanie portów protokołu TCP w sieci komputerowej** ze szczególnym uwzględnieniem aspektu monitorowania stanu poszczególnych urządzeń i wykrywania nieplanowanych zdarzeń i **udało się go w każdym z aspektów zrealizować**.

Przechodząc przez proces specyfikacji wymagań, weryfikacji potrzebnej wiedzy i kreowania sposobu wykonania, uzyskano **unikalny** i przede wszystkim **potrzebny projekt**,

który sprawił, że zaimplementowane narzędzia są niezwykle użyteczne w codziennej pracy administratorów sieci lokalnych, testerów penetracyjnych czy wszystkich inżynierów uprawnionych do skanowania portów protokołu TCP w przedsiębiorstwach. **Wydatnie zwiększa to poziom świadczonych usług z zakresu cyberbezpieczeństwa**, a także może **ustrzec podmioty przed kosztownymi incydentami**.

Połączenie konsolowego skanera portów i aplikacji z interfejsem użytkownika sprawiło, że sam **skaner portów** może zostać wykorzystany **w wielu innych projektach**, a nakładka graficzna **pomysłem i wykonaniem** wprowadza **wartość biznesową i merytoryczną**, której **nie ma na rynku**.

Projekt z powodzeniem może być rozwijany w bardzo wielu obszarach. Przede wszystkim zacząć należy od aspektu badawczego w postaci **algorytmu skanowania wielowątkowego i samego pojęcia szybkości skanowania**, które to pozostawiają bardzo duże pole do zgłębiania i poszukiwania zależności czasowych oraz związanych ze skutecznością skanowania. W tym zakresie może się także znaleźć **implementacja innych, wskazanych przez literaturę metod skanowania portów protokołu TCP**. Narzędzie może także zostać rozszerzone o **skanowanie portów protokołu UDP**, co też wprowadziłoby bardzo dużo nowych możliwości.

W przypadku aplikacji z interfejsem użytkownika w przyszłości warto byłoby **zastosować i zarządzać wieloma bazami danych z wzorcami**. Prawdopodobnie użytkownicy będą chcieli korzystać z jednej instancji programu w wielu środowiskach z tymi samymi schematami adresacji. Przy zwiększaniu zakresu działania aplikacji warto byłoby dodać **uwierzytelnianie użytkowników** oraz ich **autoryzację**.

Bibliografia

- [1] International Organization for Standardization, Open systems interconnection (osi). Dostępny online: <https://www.iso.org/ics/35.100/x/> (dostęp: 23.07.2023).
- [2] Internet Engineering Task Force, Requirements for internet hosts – communication layers. Dostępny online: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1122> (dostęp: 23.07.2023).
- [3] Internet Engineering Task Force, Internet protocol. Dostępny online: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc791> (dostęp: 23.07.2023).
- [4] Internet Engineering Task Force, Transmission control protocol. Dostępny online: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc793> (dostęp: 23.07.2023).
- [5] de Vivo M., Carrasco E., Isern G., de Vivo G.O., A review of port scanning techniques. *Comput. Commun. Rev.* **1999**, tom 29, 2, s. 41–48.

Implementacja oraz analiza protokołów FIDO\FIDO2 z użyciem kluczy fizycznych

mgr inż. Patryk Mróz
Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo
Katedra Podstaw Informatyki

W pracy magisterskiej skupiono się na implementacji i analizie protokołu FIDO2 oraz kluczy fizycznych w kontekście bezpiecznego uwierzytelniania użytkowników. Poprzez stworzenie demonstratora w postaci aplikacji webowej, która została podzielona na klienta oraz serwer FIDO2, oraz przeprowadzenie szczegółowej analizy poszczególnych opcji, możliwe jest ocenienie skuteczności i wydajności FIDO2 w kontekście uwierzytelniania. W obliczu rosnących zagrożeń i zapotrzebowania na bezpieczne metody uwierzytelniania online praca ma istotne znaczenie. Protokół FIDO2 i klucze fizyczne tworzą skuteczną ochronę przed phishingiem i atakami typu brute force. Analiza opiera się na oficjalnych specyfikacjach FIDO Alliance i W3C oraz na bibliotece SimpleWebAuth do implementacji. Praca skupia się na procesach rejestracji, uwierzytelniania i obsłudze operacji związanych z nimi. Obejmuje analizę opcji rejestracyjnych i uwierzytelnienia, zbadanie atestacji autentykatora oraz zaproponowanie bezpiecznej implementacji. Projekt uwzględnia klucze fizyczne YubiKey BIO i SoloKey hacker edition, łącząc w sobie dokumentacje tych firm w celu przeprowadzenia wszechstronnej i solidnej analizy.

17.1. Cel i założenia

Celem pracy jest opracowanie implementacji oraz analiza protokołu FIDO2 z wykorzystaniem kluczy fizycznych. Poprzez stworzenie demonstratora w postaci aplikacji webowej, która zostanie podzielona na klienta oraz serwer FIDO2, oraz przeprowadzenie szczegółowej analizy poszczególnych opcji będzie możliwe ocenienie skuteczności i wydajności FIDO2 w kontekście uwierzytelniania. W rezultacie uzyskane wyniki będą miały praktyczne zastosowanie dla organizacji i użytkowników, którzy dążą do zapewnienia bezpiecznego i wygodnego procesu uwierzytelniania. Główne założenia projektowe realizowanej pracy:

- omówienie protokołu FIDO/FIDO2,
- implementacja klienta oraz serwera FIDO zgodnie ze standardami wytyczonymi przez FIDO Alliance oraz W3C,

- stworzenie demonstratora w postaci aplikacji webowej zawierającej możliwość uwierzytelnienia za pomocą klucza fizycznego, używając Webauth API,
- analiza funkcji wraz z opcjami dostępnymi w protokole oraz omówienie ich zastosowań,
- przedstawienie przykładowych zastosowań FIDO2,
- przedstawienie bezpiecznego sposobu implementacji FIDO2.

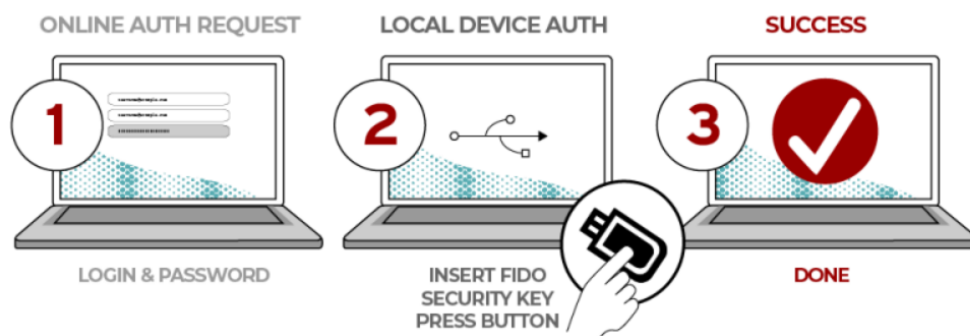
17.2. Czym jest FIDO

FIDO (ang. *Fast Identity Online*) to zestaw protokołów i specyfikacji opracowanych przez organizację FIDO Alliance. FIDO Alliance opublikowała trzy zestawy specyfikacji, które mają na celu zapewnienie prostszej i bardziej bezpiecznej autentykacji użytkowników. Są to: FIDO Universal Second Factor, FIDO Universal Authentication Framework oraz Protokoły Klienta do Autentykatora. CTAP stanowi uzupełnienie specyfikacji Web Authentication opracowanej przez W3C. Wszystkie protokoły FIDO oparte są na kryptografii klucza publicznego i zapewniają silną ochronę przed phishingiem [1]. Zapewniają również szeroki zakres zastosowań i możliwości wdrożeń. Zamiast polegać wyłącznie na hasłach, użytkownicy używają autentykatorów, takich jak klucze fizyczne, smartfony lub urządzenia biometryczne do potwierdzenia swojej tożsamości. Autentykatory te generują unikalne klucze publiczne, które są zarejestrowane i powiązane z kontem użytkownika. Podczas procesu uwierzytelniania autentykator wykonuje operacje kryptograficzne, weryfikując tożsamość użytkownika na podstawie klucza prywatnego, który jest przechowywany bezpiecznie na urządzeniu autentykującym. Dzięki temu nawet jeśli klucz publiczny zostanie skradziony, atakujący nie będą w stanie uzyskać dostępu bez posiadania odpowiedniego klucza prywatnego. FIDO zapewnia ochronę przed atakami phishingowymi, między innymi ponieważ proces uwierzytelniania odbywa się tylko na prawidłowych stronach internetowych, które są weryfikowane za pomocą klucza publicznego. To minimalizuje ryzyko podszywania się pod fałszywe strony i wyludzania poufnych informacji od użytkowników.

17.3. Różnice między FIDO a FIDO2

Protokoły FIDO i FIDO2 są protokołami, które wprowadzają nowe metody uwierzytelniania użytkowników w systemach komputerowych. W tej sekcji przedstawione zostaną różnice między protokołami FIDO a FIDO2, w tym wady i zalety każdego z nich, przyczyny zmian oraz opisane będą główne zmiany, jakie miały miejsce przy wprowadzaniu FIDO2. Zaczynając od FIDO U2F (ang. *Universal Second Factor*) którego wady oraz zalety są przedstawione w tabeli 17.1. Poniższy tekst jest stworzony na podstawie przeglądu specyfikacji uwierzytelniania użytkownika [1]. FIDO U2F umożliwia wzmocnienie bezpieczeństwa infrastruktury haseł w usługach internetowych przez dodanie silnego drugiego czynnika do procesu logowania użytkownika. Proces logowania odbywa się nadal przy użyciu nazwy użytkownika i hasła, jednak usługa ma także możliwość żądania od użytkownika użycia urządzenia drugiego czynnika, takiego jak klucz bezpieczeństwa FIDO. Na rysunku 17.1 przedstawiono doświadczenie użytkownika związane z FIDO U2F.

SECOND FACTOR EXPERIENCE (U2F standards)



Rysunek 17.1. Doświadczenie użytkownika związane z FIDO U2F, źródło: [1]

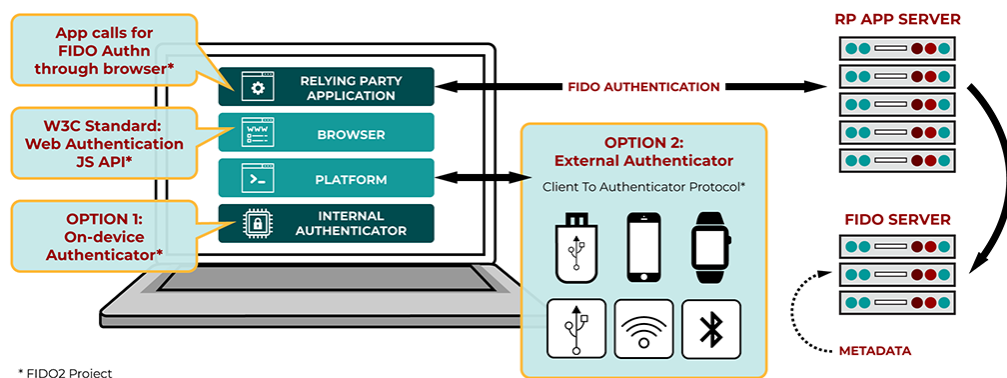
W trakcie procesu rejestracji i uwierzytelniania, użytkownik ma możliwość przedstawienia drugiego czynnika przez naciśnięcie przycisku na urządzeniu USB lub poprzez wykorzystanie technologii NFC lub BLE. Urządzenie FIDO U2F może być używane przez użytkownika do uwierzytelniania w różnych usługach internetowych, które obsługują ten protokół, z uwzględnieniem wbudowanego wsparcia w popularnych przeglądarkach internetowych. Wraz z pojawieniem się FIDO2 protokół U2F otrzymał nową nazwę CTAP1.

Tabela 17.1. Zalety oraz wady FIDO U2F

Wady	Zalety
Ograniczona funkcjonalność: Protokół FIDO oferował głównie możliwość uwierzytelniania dwuskładnikowego poprzez użycie klucza fizycznego.	Wysoki poziom bezpieczeństwa: U2F zapewniał silne uwierzytelnianie oparte na kluczach publicznych i kryptografii asymetrycznej.
Brak wsparcia dla biometrii: U2F nie obsługiwał bezpośrednio uwierzytelniania za pomocą urządzeń biometrycznych, takich jak czytniki linii papilarnych czy skanery twarzy.	Wygoda i łatwość użycia: Użytkownicy mogli skorzystać z klucza fizycznego do szybkiego i bezproblemowego uwierzytelniania.
Brak integracji z systemami operacyjnymi: Protokół U2F nie był szeroko zintegrowany z systemami operacyjnymi, co utrudniało użycie go w różnych kontekstach.	Odporność na phishing: Protokół U2F zapobiegał atakom phishingowym, ponieważ uwierzytelnienie odbywało się tylko na poprawnych stronach internetowych.

Następnie mamy FIDO2 czyli najnowszą wersję protokołu FIDO, która wprowadza udoskonalenia w bezpieczeństwie, obsługę urządzeń wbudowanych, wieloczynnikowe uwierzytelnianie oraz współpracę z istniejącymi standardami, co sprawia, że jest coraz bardziej popularny i wszechstronny w implementacjach uwierzytelniania. Na rysunku 17.2 przedstawiono elementy zawarte w protokole FIDO2.

Poniższy tekst został stworzony na podstawie przeglądu specyfikacji uwierzytelniania użytkownika [1]. Specyfikacje Web Authentication W3C oraz protokoły klienta do autentykatora zostały opracowane przez FIDO Alliance i wchodzą w skład FIDO2. Przez wykorzystanie autentykatorów wbudowanych lub zewnętrznych możliwa jest realizacja



* FIDO2 Project

Rysunek 17.2. Elementy zawarte w protokole FIDO2, źródło: [1]

uwierzytelnienia bez użycia hasła, uwierzytelniania drugiego czynnika oraz uwierzytelniania wieloczynnikowego, oferowanych przez specyfikacje. Specyfikacje FIDO2 obejmują:

- W3C WebAuthn definiuje standardowe API webowe, które jest wbudowywane w przeglądarki i platformy, umożliwiając obsługę uwierzytelnienia FIDO.
- CTAP2 umożliwia wykorzystanie zewnętrznych autentykatorów (np. klucze bezpieczeństwa FIDO, urządzenia mobilne) do uwierzytelniania w przeglądarkach i systemach operacyjnych obsługujących FIDO2 przez połączenie USB, NFC lub BLE, zapewniając uwierzytelnienie bez użycia hasła, uwierzytelnianie drugiego czynnika lub uwierzytelnianie wieloczynnikowe.
- CTAP1, znane również jako FIDO U2F, umożliwia wykorzystanie istniejących urządzeń FIDO U2F do uwierzytelniania w przeglądarkach i systemach operacyjnych obsługujących FIDO2 poprzez połączenie USB, NFC lub BLE, umożliwiając uwierzytelnienie drugiego czynnika.

Wadami FIDO2 jest wymagane wsparcie przeglądarek oraz konieczność aktualizacji infrastruktury. FIDO2 wymaga odpowiedniego wsparcia ze strony przeglądarek internetowych, co może wprowadzać ograniczenia w przypadku nieaktualnych wersji przeglądarek. Implementacja FIDO2 może wymagać dostosowania infrastruktury serwerowej i aplikacji w zależności od używanych technologii, aby możliwe było obsłużenie nowych funkcji i protokołów.

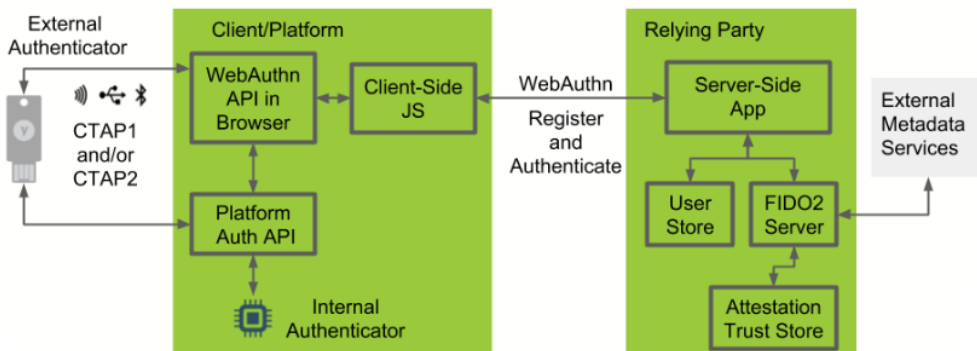
Zalety FIDO2:

- Wielofunkcyjność: Protokół FIDO2 oferuje zarówno uwierzytelnianie przy użyciu kluczy fizycznych, jak i urządzeń biometrycznych, takich jak czytniki linii papilarnych czy skanery twarzy. Dzięki temu użytkownicy mogą wybrać preferowaną metodę uwierzytelniania, dostosowaną do swoich potrzeb i możliwości technologicznych.
- Wyższy poziom bezpieczeństwa: FIDO2 wprowadza silne uwierzytelnianie oparte na kluczach publicznych i kryptografii asymetrycznej. Klucze prywatne są przechowywane bezpiecznie na urządzeniu autentykującym, co znacznie utrudnia ich kradzież lub przechwycenie.
- Odporność na phishing: Ryzyko ataków phishingowych jest eliminowane przez protokół FIDO2, ponieważ uwierzytelnianie odbywa się tylko na prawidłowych stronach

internetowych. Klucz publiczny jest wykorzystywany do weryfikacji autentyczności witryny, co minimalizuje ryzyko podszywania się pod fałszywe strony.

- Wsparcie dla platform mobilnych: FIDO2 jest zaprojektowany tak, aby wspierać zarówno komputery stacjonarne, jak i urządzenia mobilne. Dzięki temu użytkownicy mogą korzystać z jednego autentykatora dla różnych platform, co zapewnia spójne i wygodne doświadczenie.
- Standaryzacja i interoperacyjność: FIDO2 jest oparty na otwartych standardach, które są wspierane przez wiele firm i organizacji. To zapewnia interoperacyjność między różnymi systemami i usługami, umożliwiając użytkownikom korzystanie z jednego autentykatora na wielu platformach.
- Minimalne zależności od oprogramowania: Dzięki protokołowi FIDO2 autentykator nie musi polegać na specyficznym oprogramowaniu zainstalowanym na urządzeniu użytkownika. Wszystkie niezbędne protokoły i funkcje są obsługiwane przez przeglądarki internetowe, co ułatwia implementację i korzystanie z autentykacji FIDO2.
- Wprowadzenie protokołu FIDO2 przynosi wiele korzyści i ulepszeń w porównaniu do poprzedniego protokołu FIDO, co sprawia, że jest to atrakcyjne rozwiązanie dla bezpiecznego i wygodnego uwierzytelniania użytkowników.

Na rysunku 17.3 przedstawiono przykładową architekturę aplikacji FIDO2.



Rysunek 17.3. Przykładowa architektura aplikacji FIDO2,
źródło: <https://developers.yubico.com/WebAuthn/>

17.3.1. Baza danych

W projekcie została wykorzystana baza danych MySQL. Jest ona kluczowym elementem infrastruktury obsługującej standard FIDO2. Baza danych odgrywa istotną rolę w przechowywaniu i zarządzaniu informacjami dotyczącymi użytkowników, autentykatorów oraz danych autentykacyjnych. Przy implementacji standardu FIDO2 baza danych MySQL jest wykorzystywana do przechowywania informacji o użytkownikach, takich jak ich identyfikatory, nazwy użytkowników oraz zaszyfrowane hasła. Dodatkowo baza danych przechowuje informacje dotyczące autentykatorów, takie jak identyfikatory, publiczne klucze, liczniki i inne metadane. Baza danych MySQL jest istotna dla FIDO2 z kilku powodów. Po pierwsze umożliwia bezpieczne przechowywanie poufnych danych użytkowników, takich jak ha-

sła. Dzięki temu dane autentykacyjne są chronione przed nieuprawnionym dostępem. Po drugie baza danych jest wykorzystywana do składowania danych autentykatorów, które są niezbędne do uwierzytelniania użytkowników. Przechowywanie informacji o autentykatorach, w tym publicznych kluczy, liczników i innych metadanych, umożliwia weryfikację i uwierzytelnianie autentykatorów podczas procesu uwierzytelniania FIDO2. Dodatkowo baza danych MySQL umożliwia skuteczne zarządzanie użytkownikami, autentykatorami i powiązаныmi danymi autentykacyjnymi. Zapewnia strukturę i organizację danych, umożliwiając ich szybkie wyszukiwanie, modyfikację i analizę. Wprowadzenie bazy danych MySQL jako integralnej części aplikacji FIDO2 ma kluczowe znaczenie do zapewnienia bezpiecznego i wydajnego mechanizmu uwierzytelniania opartego na kluczach fizycznych. Przez składowanie i zarządzanie danymi użytkowników, autentykatorów i danych autentykacyjnych baza danych MySQL wspiera implementację standardu FIDO2 i umożliwia wydajne i bezpieczne procesy autentykacji.

17.3.2. Proces rejestracji

Ceremonia rejestracji jest to ceremonia, w której użytkownik, RP oraz klient użytkownika (zawierający przynajmniej jeden autentykator) współpracują, aby utworzyć poświadczenie klucza publicznego i powiązać je z kontem użytkownika w RP. Należy zauważyć, że obejmuje to przeprowadzenie testu obecności użytkownika lub weryfikacji użytkownika. Po pomyślnej ceremonii rejestracji użytkownik może zostać uwierzytelniony w ramach ceremonii uwierzytelniania. Ceremonia rejestracji WebAuthn rozpoczyna się, gdy RP wywoła `navigator.credentials.create()` z argumentem `publicKey` [2].

17.3.3. Proces rejestracji – Klient

Przy tworzeniu konta przeprowadzany jest proces rejestracji autentykatora. Do osiągnięcia tego, interfejs użytkownika korzysta z pakietu `@simplewebauthn/browser` z biblioteki *Simple Web Auth*. Główne zadania po stronie klienta FIDO podczas rejestracji [3]:

- 1) Opcje rejestracji są pobierane od Relying Party.
 - Wysyłane jest żądanie do funkcji serwera `generateRegistrationOptions()` w celu uzyskania opcji rejestracyjnych. Funkcja ta przygotowuje wartość do przekazania do `navigator.credentials.create()` dla autentykatora w procesie rejestracji.
- 2) Opcje rejestracji są przesyłane do autentykatora.
- 3) Odpowiedź autentykatora jest przesyłana do Relying Party w celu weryfikacji.
 - Funkcja `verifyRegistrationResponse()` z pakietu `@simplewebauthn/server` jest używana do tego celu.

Po stronie klienta dane z formularza są przekazywane do serwera, gdzie następuje przesyłanie nazwy użytkownika oraz hasła, a następnie oczekuje się na odpowiedź w postaci wygenerowanych opcji. Dane te są wykorzystywane do dodawania nowego użytkownika do bazy MySQL po stronie serwera, a na ich podstawie opcje mogą być tworzone dla tego konkretnego użytkownika.

17.3.4. Proces uwierzytelniania

Ceremonia uwierzytelniania jest to ceremonia, w której użytkownik oraz klient użytkownika (zawierający co najmniej jeden autentykator) współpracują, aby kryptograficznie udowodnić RP, że użytkownik kontroluje klucz prywatny poświadczenia klucza publicznego wcześniej zarejestrowanego. Należy zauważyć, że obejmuje to test obecności użytkownika lub weryfikacji użytkownika.

Ceremonia uwierzytelniania WebAuthn jest inicjowana przez RP przez wywołanie `navigator.credentials.get()` z argumentem `publicKey` [2]. Uwierzytelnianie to jest analogiczne do logowania 2FA do istniejącego konta w opisywanym przypadku.

17.3.5. Proces uwierzytelniania – Klient

Zostanie przedstawiony przypadek, w którym po utworzeniu konta użytkownik loguje się i zostaje poproszony o rozpoczęcie procesu uwierzytelniania związanego z FIDO. Gdy użytkownik naciska przycisk **Start Authentication**, autentykator przeprowadza proces uwierzytelniania. Do tego celu po stronie klienta wykorzystuje się pakiet `@simplewebauthn/browser` z biblioteki `SimpleWebAuth`. Główne zadania autentykatora po stronie klienta podczas uwierzytelniania to [3]:

- 1) Opcje uwierzytelniania są pobierane od RP.
 - Wysyłane jest żądanie do funkcji serwera `generateAuthenticationOptions()` w celu uzyskania opcji uwierzytelnienia. Funkcja ta przygotowuje wartość do przekazania do `navigator.credentials.get()` dla autentykatora w procesie uwierzytelnienia.
- 2) Opcje uwierzytelniania są przesyłane do autentykatora.
- 3) Odpowiedź autentykatora jest przesyłana do RP w celu weryfikacji.
 - Funkcja `verifyAuthenticationResponse()` z pakietu `@simplewebauthn/server` jest używana do tego celu.

17.4. Przykłady zastosowań

Zaleca się, aby nie polegać wyłącznie na jednym rodzaju uwierzytelniania, takim jak FIDO2, ale także uwzględnić inne metody uwierzytelniania, takie jak tradycyjne logowanie i hasło. Używanie różnych rodzajów uwierzytelniania umożliwia zwiększenie elastyczności i dostosowanie do indywidualnych potrzeb i preferencji użytkowników. Dodatkowo, kombinowanie różnych metod uwierzytelniania może zwiększyć bezpieczeństwo systemu, ponieważ atakujący będą musieli przewyciężyć więcej niż jedno zabezpieczenie, aby uzyskać nieautoryzowany dostęp. Dlatego zamiast polegać wyłącznie na FIDO2, zaleca się uwzględnienie wielu rodzajów uwierzytelniania, aby zapewnić kompleksowe zabezpieczenie systemu.

17.4.1. Bezpieczne ustawienia FIDO2

W celu zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa zaleca się dokonanie poniższych czynności:

- Aby zapewnić wysoki poziom bezpieczeństwa, zaleca się ustawić element `userVerification` na `required` w opcjach rejestracji i uwierzytelnienia oraz element `requireUserVerification` na wartość `true` dla wszystkich weryfikacji. Przy tym zawsze należy wymagać flagi UP.
- Podczas generowania opcji rejestracyjnych ważne jest uwzględnienie funkcji `excludeCredentials`, która zapobiega zarejestrowaniu tego samego autentykatora. Podczas generowania opcji uwierzytelnienia należy użyć funkcji `allowCredentials`, która powinna zawierać autentykatory wcześniej zarejestrowane przez użytkownika.
- Podczas rejestracji wymagana jest atestacja typu `attestationType: direct`, co pozwala na filtrowanie autentykatorów nieobsługujących tej funkcji. Następnie na podstawie otrzymanych danych atestacji należy sprawdzić AAGUID oraz posiadanie certyfikatu przez dany klucz, co podniesie poziom bezpieczeństwa.
- Dotychczas wykorzystano wbudowane opcje wspierające bezpieczeństwo protokołu FIDO2, ale istnieje również możliwość pełnego potencjału wykorzystania danych pochodzących z atestacji przy użyciu metadanych.

FIDO Alliance MDS (ang. *Metadata Service*) to scentralizowane repozytorium deklaracji metadanych, które jest wykorzystywane przez RP do weryfikacji atestacji autentykatora i udowodnienia autentyczności modelu urządzenia. MDS dostarcza również informacji na temat statusu certyfikacji autentykatorów oraz wykrytych problemów związanych z bezpieczeństwem. Organizacje wdrażające FIDO mogą wykorzystać te informacje do wyboru odpowiednich poziomów certyfikacji wymaganych do spełnienia przepisów oraz reagowania na powiadomienia dotyczące bezpieczeństwa w celu zapewnienia skutecznej odpowiedzi na incydenty [4]. Na czas tego opracowania wszystkie najnowsze deklaracje metadanych autentykatorów są dostępne w jednym pliku `blow.jwt` pod tym adresem URL: <https://mds3.fidoalliance.org/>

Oto pseudokod przedstawiający implementację MDS.

Listing 17.1: Pseudokod inicjalizujący MDS. Źródło: [3]

```
MetadataService.initialize({
  mdsServers: ['https://mds3.fidoalliance.org/'],
  verificationMode: 'strict',
}).then(() => {
  console.log('MetadataService initialized');
});
```

Deklaracje są sprawdzane w trakcie funkcji `verifyRegistrationResponse()` podczas otrzymywania odpowiedzi od autentykatora w procesie rejestracji. Autentykatory są sprawdzane na podstawie przesłanego AAGUID autentykatora w formie atestacji `packed`. Na Listingu 17.2 przedstawiono fragment odkodowanego do postaci JSON deklaracji metadanych dotyczących kluczy YubiKey BIO (FIDO Edition) z pliku otrzymanego od MDS.

Listing 17.2: Fragment deklaracji metadanych YubiKey BIO (FIDO Edition)

```
{
  "aaguid": "d8522d9f-575b-4866-88a9-ba99fa02f35b",
  "metadataStatement": {
```

```

"legalHeader": "Submission of this statement ...",
"aaguid": "d8522d9f-575b-4866-88a9-ba99fa02f35b",
"description": "YubiKey Bio Series",
"authenticatorVersion": 328965,
"protocolFamily": "fido2",
"schema": 3,
"upv": [
  {
    ...
  }
  "attestationRootCertificates": [
    "MIIDHjCCAgagAwIBAgIEG0BT9zANBgkqhkiG9wQs..." }

```

Możliwe jest wprowadzenie lokalnych deklaracji, które zawierają jedynie klucze, z których chcemy skorzystać. Jest to istotny aspekt nie tylko podczas używania MDS do weryfikacji autentykatorów, lecz także do zapobiegania rejestracji dowolnego klucza.

17.5. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy magisterskiej było zaimplementowanie i analizowanie protokołu FIDO2 z wykorzystaniem kluczy fizycznych. Podwójne uwierzytelnianie jest szczególnie ważne, ponieważ same hasła nie są wystarczającym zabezpieczeniem naszych kont w dzisiejszych czasach i należy podnieść poziom ich ochrony. Stworzono demonstrator w postaci aplikacji webowej, która korzysta z technologii protokołu FIDO2 i fizycznych kluczy do uwierzytelniania. Aplikacja demonstracyjna składa się z serwera i klienta FIDO, wykorzystując implementację biblioteki `SimpleWebAuth`. Wprowadzono MFA, gdzie pierwszym etapem jest logowanie i hasło, a następnie uwierzytelnianie za pomocą FIDO. Mimo możliwości wykorzystania wykrywalnych poświadczeń w autentykatorach nie warto pomijać haseł. Opcje zostały wysłane do kluczy i otrzymano odpowiedzi, które bazują na naszych opcjach. Dzięki temu możliwe było dokładne przeanalizowanie zależności opcji oraz sposobów, w jakie autentykator zwraca dane. W procesie weryfikacji odpowiedzi autentykatora wraz z atestacją otrzymano dane, które zostały odkodowane oraz przeanalizowane i porównane z informacjami od producentów, na przykład AAGUID.

Udało się zaimplementować wszystkie procesy oraz przeprowadzono analizę wszystkich etapów protokołu, na przykład możliwości opcji rejestracyjnych, w ramach czego sprawdzano stopień dostosowania odpowiedzi autentykatora do wspierania możliwości RP oraz zachowanie kluczy w odpowiedzi na te opcje. Wstępnie została przeprowadzona weryfikacja, aby sprawdzić, czy użytkownik poprawnie ukończył proces rejestracji. W przypadku pomyślnego zakończenia weryfikacji dane rejestracyjne autentykatora zostały otrzymane i przetwarzane zgodnie z potrzebami implementacji RP. Odpowiedzi autentykatorów muszą być odkodowane i zakodowane w formie zgodnej z typami w bazie danych oraz w taki sposób, aby można było ponownie przeprowadzić ich weryfikację w procesie uwierzytelniania. Analogicznie postępowało się w procesie uwierzytelniania, w tym sprawdzano opcje oraz ich warianty, a także weryfikowano dane autentykatora, aby umożliwić poprawną analizę.

Na podstawie analizy protokołu FIDO przedstawiono metody zabezpieczeń, które zapewniają wysoki poziom ochrony i wykorzystują potencjał tego protokołu. Omówiono również metodykę i logikę w serwerach i klientach, aby opcje rejestracyjne oraz uwierzytelniania wysyłane do autentykatorów przez RP były spójne i zaplanowane. Warto zaznaczyć, że FIDO2 można wprowadzić na wiele sposobów i stosować bardziej lub mniej rygorystycznie, dlatego należy zaplanować, jakie autentykatory chcemy wspierać i jak wiele flag lub weryfikacji definiować. Bezpieczeństwo protokołu FIDO zależy od jego implementacji oraz zastosowania się do specyfikacji i dobrych praktyk.

Podczas testów nie wystąpiły żadne anomalie ani nieprawidłowości związane z opcjami czy też odpowiedziami autentykatorów związanymi z protokołem FIDO2. Każdy klucz był powiązany z użytkownikiem i nie było sytuacji, w której można było uwierzytelić się na konto użytkownika przy użyciu innego klucza fizycznego. Szukając kolejnych obszarów obszarów zwiększających poziom bezpieczeństwa, można by przeprowadzić pełną implementację MDS od FIDO Alliance oraz poddanie RP testom w celu sprawdzenia poprawności procesów. FIDO Alliance udostępnia narzędzia do przeprowadzania testów. Po takich testach FIDO przyznaje danemu RP certyfikat, że dana implementacja FIDO2 jest zgodna ze standardami.

Bibliografia

- [1] User Authentication Specifications Overview. Dostępny online: <https://fidoalliance.org/specifications/> (dostęp: 16.06.2023).
- [2] Web Authentication: An API for accessing Public Key Credentials Level 2. Dostępny online: <https://www.w3.org/TR/webauthn/> (dostęp: 16.06.2023).
- [3] SimpleWebAuthn Docs. Dostępny online: <https://simplewebauthn.dev/docs/packages/browser> (dostęp: 16.06.2023).
- [4] FIDO Alliance Metadata Service. Dostępny online: <https://fidoalliance.org/metadata/> (dostęp: 16.06.2023).

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Projekt i realizacja modułowego manipulatora dla laboratorium biomedycznego

inż. Piotr Karaś

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Tomasz Grysiński, prof. uczelni

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Praca w laboratorium biomedycznym bardzo często związana jest z powtarzaniem określonych procesów oraz czynności. Wysoko wykwalifikowany personel niejednokrotnie odczuwa niechęć do wykonywania żmudnych i czasochłonnych zadań, dlatego postawiono pytanie, czy da się niskim kosztem zbudować robota, który byłby w stanie pomóc w pracach laboratoryjnych bez użycia specjalistycznych narzędzi? Okazuje się, że jest to możliwe i łatwiejsze niż się wydaje. Za pomocą płytki prototypowej Arduino, druku 3D, silników krokowych, garści komponentów elektronicznych oraz kilku innych elementów wykonano konstrukcję umożliwiającą automatyzację wielu różnych zadań. W pracy przedstawiono przemieszczanie próbek w obrębie stołu roboczego za pomocą manipulatora oraz pozycjonowanie głowicy lasera małej mocy. Konstrukcja pozwala na montaż szeregu dodatkowych głowic wykonawczych, potrzebujących do działania maksymalnie 8 elektrod. Podłączenie modułu jest niezwykle proste, gdyż odbywa się ono przez znane i lubiane złącze RJ45. Obsługa głowicy leży po stronie użytkownika, co umożliwia podpięcie specjalistycznej aparatury do manipulatora, co z kolei daje kontrolę nad precyzją zadań.

18.1. Cel i założenia

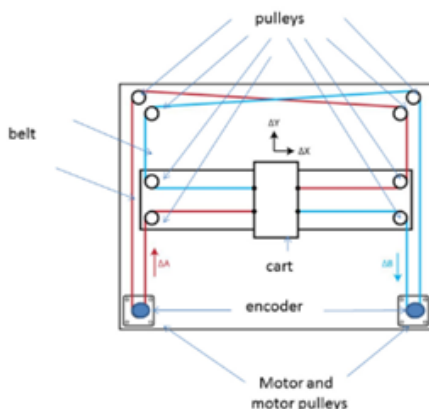
Praca miała na celu stworzenie ekonomicznego urządzenia do automatyzacji zadań wykonywanych w laboratorium. Zadaniem konstrukcji jest odciążenie laborantów od żmudnych, powtarzalnych czynności oraz wyeliminowanie konieczności kontaktu fizycznego z niebezpiecznymi próbkami i odczynnikami. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- manipulator z możliwością pracy z różnymi głowicami sterowanymi za pomocą złącza RJ45,
- sterowanie oraz programowanie przez port szeregowy i interfejs graficzny,
- tworzenie list poleceń do automatyzacji działań,
- prostota konstrukcji oraz łatwość modyfikacji i rozbudowy,

- duży obszar pola roboczego,
- wykorzystanie szeroko dostępnych elementów o niskim koszcie oraz elementów drukowanych.

18.2. Wstęp teoretyczny

Podstawą funkcjonowania konstrukcji jest realizacja zmian położenia manipulatora. Dokonuje się ona przez przemieszczanie się pasków zębatych rozmieszczonych na elementach ramy, które są wprawiane w ruch przez silniki krokowe. Są to urządzenia pozwalające na precyzyjny obrót wirnika o tak zwany krok, czyli pewien kąt obrotu zależny od konstrukcji silnika. Wykonanie obrotu o ustalonej liczbie kroków jest możliwe przez podanie odpowiedniej liczby impulsów elektrycznych na uzwojenia silnika. W projekcie został wykorzystany układ elektroniczny A4988 [1], pozwalający na zmniejszenie kąta obrotu wykonywanego w jednym kroku do $1/32$ wartości podanej przez producenta, co przyczyniło się do znacznego zwiększenia precyzji ruchu. Ruch w osiach X i Y został zrealizowany przez implementację dynamiki CoreXY [2], jej działanie przedstawiono na rysunku 18.1.



Rysunek 18.1. Przedstawienie schematu działania kinematyki CoreXY [2].

Linia niebieska i czerwona – paski zębate, czarne okręgi – rolki łożyskowane, niebieskie koła – zębatki silników krokowych. Jednoczesny obrót zębatek silników krokowych we wspólnym kierunku powoduje ruch wózka w osi X , natomiast jednoczesny obrót zębatek w przeciwnych kierunkach skutkuje ruchem w osi Y

Ruch w osi Z był realizowany poprzez obrót śruby trapezowej, skierowanej prostopadle do płaszczyzny pola roboczego. Obrót śruby powodował jej wkręcanie się lub wykręcanie z nakrętki zamontowanej na wózku liniowym. Do końca śruby przytwierdzony był moduł dołączania głowic wykonawczych, który przemieszczał się w osi Z wraz ze śrubą.

Ruch wózka liniowego w osi Y powodowany był przez naprężenia pasków zębatych. Wózek umieszczony był na 4 kołach dopasowanych do rowka profilu aluminiowego V-slot, przez co bezproblemowo poruszał wzdłuż wcześniej wymienionego profilu. Sam profil był doczepiony do ramy na kolejnych dwóch wózkach liniowych, a ruch w osi X funkcjonował na takiej samej zasadzie jak ruch w osi Y .

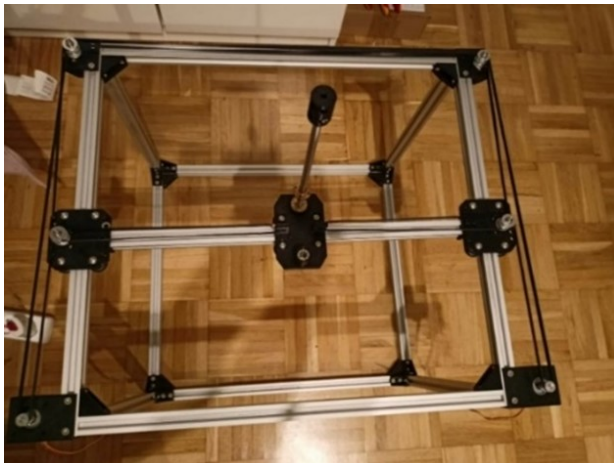
Pracą silników krokowych sterował układ elektroniczny, komunikujący się z PC poprzez protokół UART. Za pomocą portu szeregowego można było wysyłać komendy interpretowane przez układ, przekładane na rozkład napięć na poszczególnych wyprowadzeniach silników krokowych. Komendy mogły być wysyłane przez interfejs graficzny, umożliwiając użytkownikowi bardziej naturalną kontrolę nad maszyną lub przez wgranie pliku CSV z zadaną kolejnością komend, co pozwalało na automatyzację ruchów.

18.3. Projekt i wykonanie

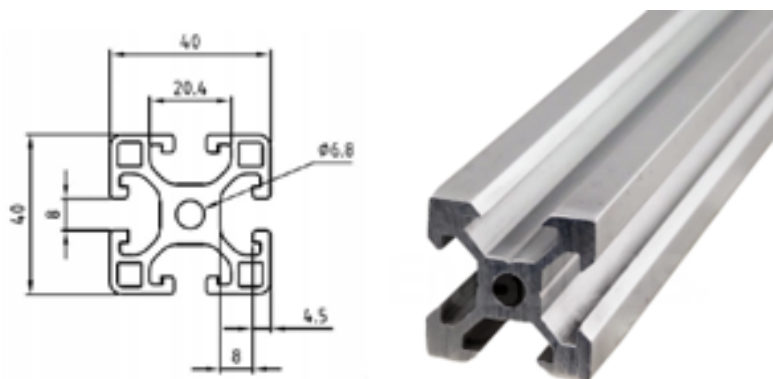
Działania podjęte w realizowanej pracy dyplomowej dotyczyły wielu dziedzin technologicznych, takich jak mechatronika, elektronika, programowanie oraz inżynieria CAD. Praca obejmowała projektowanie modeli trójwymiarowych, ich samodzielną produkcję oraz dopasowanie do istniejących elementów. W projekcie skoordynowano pracę trzech silników krokowych, sterowanych za pomocą skonstruowanego układu elektronicznego. Dodatkowo stworzono oprogramowanie do płytki sterującej oraz napisano skrypt umożliwiający kontrolowanie maszyny przez interfejs graficzny. Wybrane aspekty pracy zostały przedstawione w kolejnych podrozdziałach.

18.3.1. Konstrukcja mechaniczna

Konstrukcja końcowa (przedstawiona na rysunku 18.2) była w stanie swobodnie przemieszczać manipulator w obrębie obszaru roboczego o wymiarach $400 \times 450 \times 400$ mm. Rama urządzenia została wykonana z 12 profili aluminiowych V-slot (rysunek 18.3), które zostały połączone ze sobą za pomocą nakrętek młoteczkowych oraz drukowanych łączników kątowych. Wzdłuż górnej części ramy widoczne są paski zębate zaczepte na rolkach łożyskowanych, rozmieszczonych na elementach drukowanych oraz na zębatkach umieszczonych na wirnikach silników krokowych.



Rysunek 18.2. Przedstawienie konstrukcji z profili oraz elementów drukowanych [3]



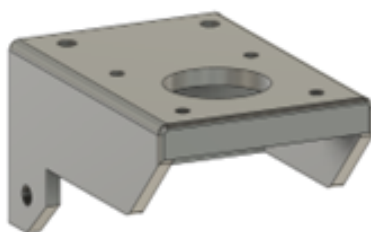
(a) rysunek wykonawczy

(b) rzeczywisty wygląd

Rysunek 18.3. Profil typu V-slot

18.3.2. Elementy konstrukcyjne

Aby obniżyć koszty i zwiększyć uniwersalność konstrukcji, skorzystano z elementów wytworzonych przy użyciu technologii addytywnej za pomocą drukarki Ender 3 Pro [5]. Większość komponentów konstrukcyjnych została zaprojektowana przy użyciu oprogramowania Fusion 360 od firmy Autodesk. Obejmują one mocowania silników krokowych (rysunek 18.4), mocowania rolek (rysunek 18.5), wózki liniowe (rysunki 18.6 i 18.7) oraz mocowanie głowicy. Do połączenia szkieletu ramy manipulatora wykorzystano łączniki kątowe, których projekt został pobrany z platformy Thingiverse [10]. Materiałem używanym do produkcji wszystkich elementów drukowanych był filament poliaktydowy od firmy 3D POWER [6].



(a) rysunek wykonawczy

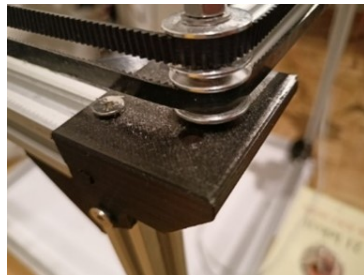


(b) rzeczywisty wygląd

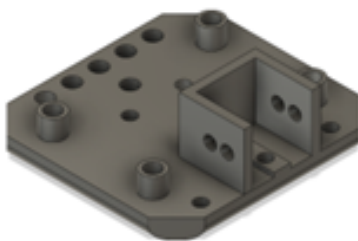
Rysunek 18.4. Uchwyt na silniki krokowe



(a) rysunek wykonawczy



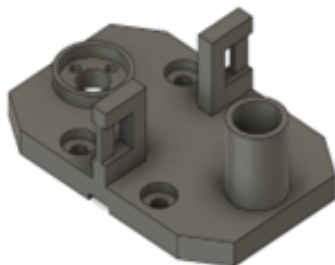
(b) rzeczywisty wygląd

Rysunek 18.5. Uchwyt na rolki do pasków zębatych

(a) rysunek wykonawczy



(b) rzeczywisty wygląd

Rysunek 18.6. Wózek liniowy osi X

(a) rysunek wykonawczy



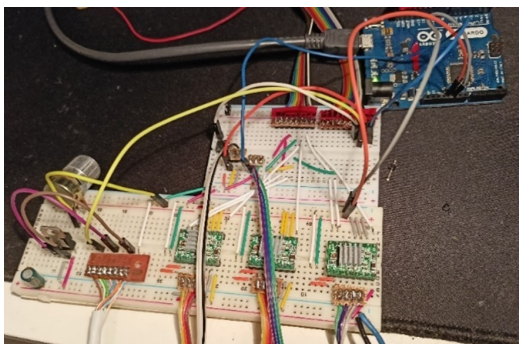
(b) rzeczywisty wygląd

Rysunek 18.7. Wózek liniowy osi X i Z

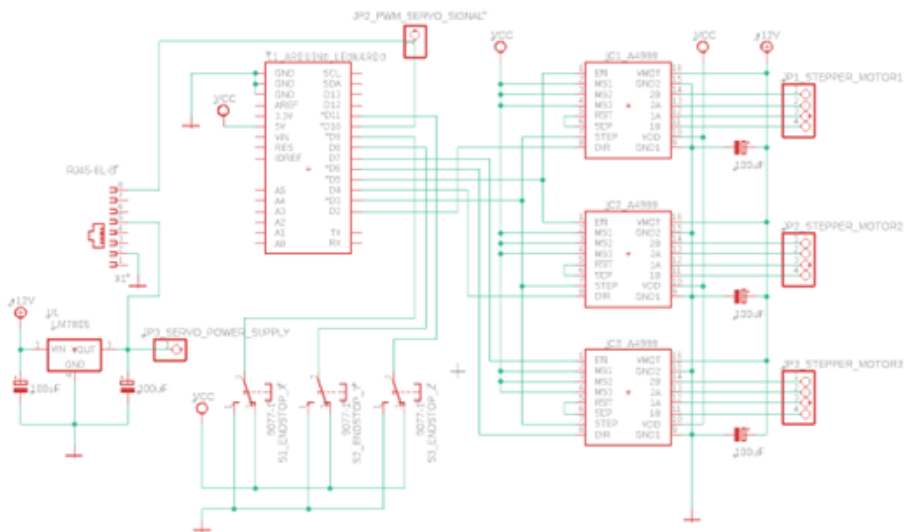
18.3.3. Układ sterujący

Układ elektroniczny do sterowania urządzeniem przedstawiono na rysunku 18.8, natomiast schemat ideowy rozwiązania przedstawiono na rysunku 18.9. Do budowy układu użyto elementów przewlekanych, które można umieścić na płytce prototypowej. Konstrukcja nie wymaga dużej liczby komponentów, jednak kluczowymi elementami są płytki zawierające sterownik A4988 [1], który umożliwia kontrolę pracy sterowników. Wyprowadzenia sterowników są połączone z portami płytki zgodnej z Arduino Leonardo. W przypad-

ku sterowników silników krokowych podłączono wyprowadzenia cyfrowe do ustawienia stanów logicznych na wyjściu. Wejścia ENABLE zostały połączone, co umożliwia ruch modułu głowicy w osiach X i Y, zwiększając żywotność sterowników. Sygnały STEP wszystkich sterowników zostały również połączone, ponieważ generowany sygnał jest taki sam dla obu silników. Wejście STEP jest podłączone do wyjścia nr 3 na płytce Arduino Leonardo. Wejścia sterowników, które odpowiadają za kierunek obrotu silników, są połączone z oddzielnymi wyjściami mikrokontrolera. Wejścia wybierające podział kroku są połączone z napięciem 5 V, ustawiając wszystkie sterowniki w tryb szesnastokrotnego podziału kroku. Wyprowadzenia zasilania VMOT są podłączone do zasilacza generującego napięcie o wartości 12 V o maksymalnym natężeniu prądu o wartości 3 A. W celu stabilizacji napięcia zastosowano trzy kondensatory elektrolityczne. Wejścia SLEEP oraz RESET w każdym sterowniku A4988 zostały połączone zgodnie z dokumentacją układu A4988.



Rysunek 18.8. Rzeczywisty wygląd układu elektronicznego, odpowiedzialnego za sterowanie pracą manipulatora, umieszczonego na płytce prototypowej (w fazie testowej) [3]



Rysunek 18.9. Schemat ideowy układu elektronicznego odpowiedzialnego za sterowanie pracą manipulatora, w układzie umożliwiającym podłączenie głowicy chwytającej [3]

18.3.4. Oprogramowanie, interfejs graficzny i listy poleceń

Program wgrany na mikrokontroler koncentrował się głównie na trzech aspektach: komunikacji szeregowej z PC, interpretacji komend, właściwym ustawianiem stanów logicznych na wyprowadzeniach sterownika silników krokowych. Dodatkowym aspektem było odczytywanie momentu znalezienia się manipulatora w punkcie zerowym poprzez rejestrację zamknięcia obwodu przez czujniki krańcowe. Program podzielony był na sekcje dopasowane do komend odbieranych przez port szeregowy. Komendy były interpretowane w zależności od pierwszego znaku, jaki zawierały oraz od wartości liczbowych, które były konwertowane na liczbę impulsów podawanych na sterownik silników krokowych. Przykładem przetwarzania komendy, np. żądania ustawienia głowicy w punkcie zerowym jest kod przedstawiony na rysunku 18.10. Komunikacja między PC a płytką sterującą odbywała się poprzez protokół UART, przez złącze USB, wykorzystując prędkość 9600 baud. Za realizację komunikacji szeregowej w PC odpowiadał program wykorzystujący bibliotekę pySerial [7]. Wartości liczbowe przekazywane za pomocą UART były dekodowane i przypisywane do odpowiednich zmiennych.

```
//przetwarzanie żądania pozycjonowania głowicy w punkcie zero
if(!Home == true){
  digitalWrite(enablePinZ, LOW); //aktywacja silnika odpowiedzialnego za ruch w osi Z
  digitalWrite(enablePin, HIGH); //dezaktywacja pozostałych silników
  digitalWrite(dirPinZ, HIGH); //ustawienie stanu wysokiego na wejście DIR sterownika silnika osi Z - ruch głowicy do góry
  while(digitalRead(zendstopZ)==LOW){ //dopóki głowica nie dotknie czujnika krańcowego Z, wykonywana jest procedura podnoszenia głowicy
    digitalWrite(stepPinZ, HIGH); //generowanie impulsu sygnału prostokątnego, jako sygnał do wykonania kroku
    delayMicroseconds(100);
    digitalWrite(stepPinZ, LOW);
    delayMicroseconds(20);
  }
  digitalWrite(enablePinZ, HIGH); //dezaktywacja silnika osi Z
  digitalWrite(enablePin, LOW); //aktywacja pozostałych silników
  digitalWrite(dirPinZ, HIGH); //ustawienie stanu wysokiego na wejście DIR sterowników pozostałych silników - ruch głowicy w lewo
  digitalWrite(dirPinL, HIGH);

  while(digitalRead(yendstop)==LOW){ //dopóki głowica nie dotknie czujnika krańcowego Y, wykonywana jest procedura przemieszczania głowicy w lewo
    digitalWrite(stepPinY, HIGH); //generowanie impulsu sygnału prostokątnego, jako sygnał do wykonania kroku
    delayMicroseconds(200);
    digitalWrite(stepPinY, LOW);
    delayMicroseconds(20);
  }

  digitalWrite(dirPinL, HIGH); //ustawienie stanu wysokiego na wejście DIR sterownika silnika lewego
  digitalWrite(dirPinR, LOW); //ustawienie stanu niskiego na wejście DIR sterownika silnika prawego
  delay(100);

  while(digitalRead(xendstop)==LOW){ //dopóki głowica nie dotknie czujnika krańcowego X, wykonywana jest procedura przemieszczania głowicy w przód
    digitalWrite(enablePin, LOW); //generowanie impulsu sygnału prostokątnego, jako sygnał do wykonania kroku
    digitalWrite(stepPinX, HIGH);
    delayMicroseconds(200);
    digitalWrite(stepPinX, LOW);
    delayMicroseconds(20);
  }

  digitalWrite(enablePin, HIGH); //dezaktywacja silnika lewego oraz prawego

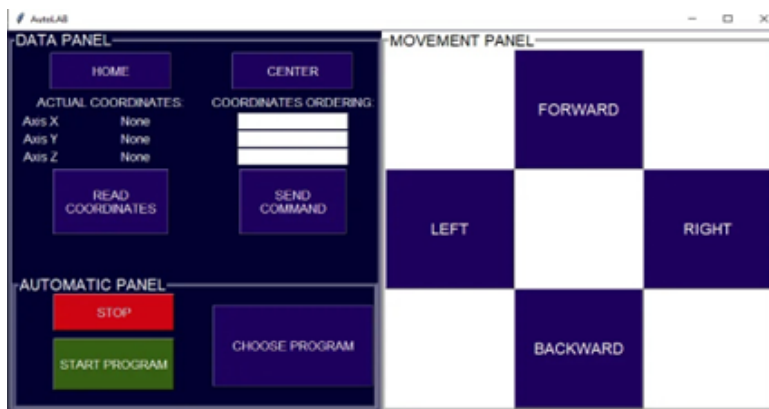
  xaxis = "0"; //zerowanie koordynatów
  yaxis = "0";
  zaxis = "0";

  xcoord = 0;
  ycoord = 0;
  zcoord = 0;
  Home = false; //zmiana stanu zmiennej Home, sygnalizująca zakończenie procedury ustawiania głowicy w punkcie zero
}
}
```

Rysunek 18.10. Fragment kodu odpowiedzialny za przetwarzanie żądania pozycjonowania głowicy w punkcie zerowym [3]

Interfejs graficzny (rysunek 18.11) składał się z modułów podwykonawczych, które zajmują się odbieraniem informacji od użytkownika dotyczących położenia modułu głowicy oraz komend, jakie mają być wykonane. Dzięki temu interfejsowi użytkownik może intuicyjnie i łatwo sterować manipulatorem. Wyposażono go w przyciski umożliwiające

wykonanie konkretnych funkcji programu oraz trzy pola tekstowe, w których wyświetlane są informacje o aktualnych koordynatach położenia głowicy. Dodatkowo interfejs zawiera trzy pola do wprowadzania danych („widżety” typu „entry”), które służą do podawania przez użytkownika koordynat wymaganego położenia. W trakcie tworzenia tego interfejsu wykorzystano bibliotekę TKinter [8].



Rysunek 18.11. Interfejs graficzny wraz z podziałem na funkcje [3]

W sekcji DATA PANEL znajdują się elementy odpowiedzialne za wysyłanie pojedynczych komend oraz wymuszenie przemieszczenia o zadaną wartość podawaną w polach tekstowych. Ruch w wybranych osiach odbywa się w zależności od wybranego pola tekstowego. Zatwierdzenie przemieszczenia odbywa się przez użycie przycisku SEND COMAND. Przycisk w lewym górnym rogu odpowiada za funkcję „HOME”, która wysyła do urządzenia znak „h” inicjujący ustawienie głowicy w pozycji zerowej. Procedura ta obejmuje ruch głowicy w kierunku lewej ścianki urządzenia, aż wózek liniowy nie aktywuje czujnika krańcowego po lewej stronie belki. Po wykryciu sygnału z czujnika mikroprocesor zmienia kierunek obrotu silników i przemieszcza głowicę w osi X do przedniej ścianki urządzenia, gdzie aktywuje drugi czujnik krańcowy. Następnie następuje zerowanie koordynat, a urządzenie wysyła komunikat o zakończeniu wykonywania rozkazu.

Aktywowanie funkcji „CENTER” skutkowało wysłaniem do urządzenia znaku „c”, który sygnalizuje żądanie ustawienia głowicy na środku płaszczyzny roboczej. To powoduje, że głowica zostaje przesunięta do koordynat $X = 2000$, $Y = 2000$, $Z = 0$. W przypadku, gdy głowica nie jest w pozycji zerowej na początku, konieczne jest wywołanie funkcji HOME przed użyciem funkcji CENTER, aby zapewnić poprawne pozycjonowanie. Po wykonaniu tej operacji nie jest to już wymagane przy dalszej pracy urządzenia.

Urządzenie przechowuje informacje o położeniu manipulatora przez zmiany wartości zmiennych koordynujących, dopasowanych do każdej z osi ruchu manipulatora. Za pomocą funkcji READ użytkownik ma możliwość uzyskania informacji o obecnych wartościach zmiennych koordynujących. Odbywa się to przez wysłanie znaku „r”, interpretowanego przez mikroprocesor, jako sygnał do przesłania informacji o aktualnej pozycji za pomocą UART do PC (rysunek 18.12). W następnym kroku odebrane informacje zostają wyświetlone na panelu interfejsu graficznego.

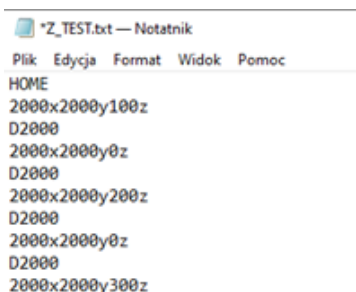
```

//przetwarzanie żądania odczytywania pozycji głowicy
if(Read == true){
  Serial.println("X: "+String(xoord)+" Y: "+String(yoord)+" Z: "+String(zoord));
  Read = false;
  Once = false;
}

```

Rysunek 18.12. Fragment kodu odpowiedzialny za przetwarzanie żądania odczytania aktualnych wartości koordynat [3]

Funkcje zawarte w sekcji „AUTOMATIC PANEL” odnoszą się do trybu automatyzacji działania urządzenia. Przycisk z napisem „CHOOSE PROGRAM” odpowiada za wywołanie funkcji otwierającej okno z przeglądaniem zawartości folderów w celu odnalezienia pliku CSV, w którym są zawarte uporządkowane komendy interpretowane przez urządzenie. Przykład takiego pliku pokazany jest na rysunku 18.13. Wybranie pliku oraz wciśnięcie przycisku START PROGRAM skutkowało rozpoczęciem wykonywania zawartych w pliku komend. Przycisk STOP umożliwiał zakończenie pracy urządzenia zanim program komend został całkowicie wykonany.



```

*Z_TEST.txt - Notatnik
Plik  Edycja  Format  Widok  Pomoc
HOME
2000x2000y100z
D2000
2000x2000y0z
D2000
2000x2000y200z
D2000
2000x2000y0z
D2000
2000x2000y300z

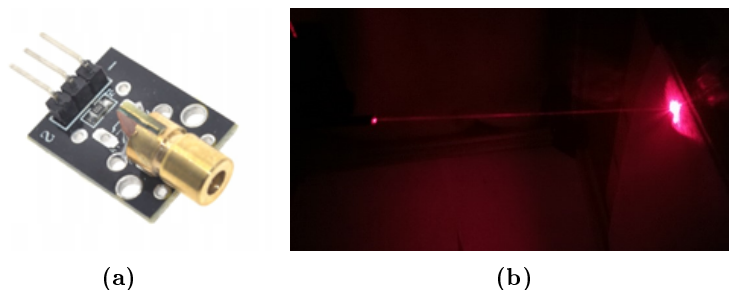
```

Rysunek 18.13. Fragment programu badań kompatybilny z zaimplementowaną metodą przetwarzania komend [3]

18.3.5. Głowice wykonawcze

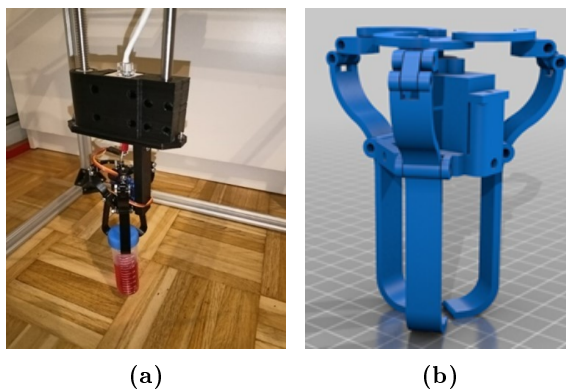
Aby zapewnić pełną konfigurowalność dołączanych głowic oraz zachować ich maksymalną funkcjonalność i uniwersalność, umożliwiono użytkownikowi dostosowanie dowolnego modułu pomiarowego do współpracy z manipulatorem. Łączność między manipulatorem a głowicą została ułatwiona przez zastosowanie złącza RJ45, które jest wyeksponowane na płycie sterowniczej. To złącze umożliwia podpięcie wolnych wejść i wyjść mikroprocesora, wejść analogowych, portów komunikacyjnych lub nawet połączenie głowicy z innym urządzeniem.

Do testowania precyzji pozycjonowania oraz funkcjonalności połączenia między głowicą a manipulatorem skonstruowano układ z prostą diodą laserową KY-008 [9] o długości fali 650 nm i mocy 5 mW. Dioda została połączona szeregowo z rezystorem 1 k Ω i zintegrowana na płycie uniwersalnej. Na tej samej płycie umieszczono także wtyk RJ45 wraz z liniami zasilającymi. Głowica laserowa została podłączona do modułu głowicy po stronie manipulatora, a druga strona manipulatora połączona była przewodem UTP z płytą sterowniczą (do wyprowadzeń zasilających). Moduł lasera (rysunek 18.14), ze względu na niską masę i kompaktowe wymiary, nie wymagał dodatkowego mocowania do modułu głowicy. Zastosowany zatrząsk wtyku RJ45 zapewnił stabilną pozycję głowicy lasera.



Rysunek 18.14. Moduł lasera diodowego KY-008 [9] oraz jego wykorzystanie w trakcie testu rotacji modułu głowicy, zdjęcie zostało wykonane w warunkach ograniczonego oświetlenia, z 5-sekundowym czasem naświetlania [3]

Aby zapewnić urządzeniu możliwość fizycznej ingerencji w pozycję określonych obiektów umieszczonych w polu roboczym, skonstruowano głowicę chwytaną. Projekt głowicy został pobrany z portalu Thingiverse (autor: Diego Pontones [10]), umożliwia ona chwytanie obiektów przez ruch obrotowy, generowany przez serwomechanizm SG-90 w zakresie 180° , powodujący zmianę kąta nachylenia elementów chwytanych. Konstrukcja głowicy chwytaka oraz jej projekt zostały przedstawione na rysunku 18.15.

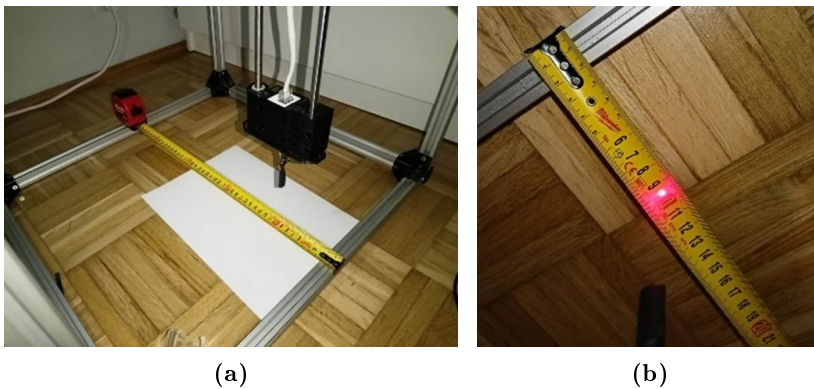


Rysunek 18.15. Po lewej- Przedstawienie działania manipulatora z dołączoną głowicą chwytającą. Po prawej – model STL złożonego chwytaka [3, 10]

Ruch chwytający jest sterowany przez serwomechanizm TowerPro SG-90, obsługiwany przez sygnał PWM. Wartość wypełnienia sygnału definiuje siłę chwytania. Głowica wymaga zewnętrznego źródła zasilania 5 V o natężeniu 1,5 A. Aby uniknąć ograniczeń wydajnościowych płytki Arduino Leonardo, zastosowano stabilizator napięcia LM7805CV przy napięciu zasilającym 12 V, wymagającym radiatora podczas ciągłej pracy serwomechanizmu. Obsługa ruchu chwytającego jest realizowana przez generowanie sygnału PWM z wykorzystaniem biblioteki Servo.h. Głowica chwytająca jest podłączona do manipulatora za pomocą złącza RJ45, wykorzystując jedynie 3 linie do przesyłu zasilania i sygnału PWM. Stabilność głowicy zapewnia dodatkowy moduł mocujący, umożliwiający jej przykręcenie do płytki sterowniczej po stronie manipulatora.

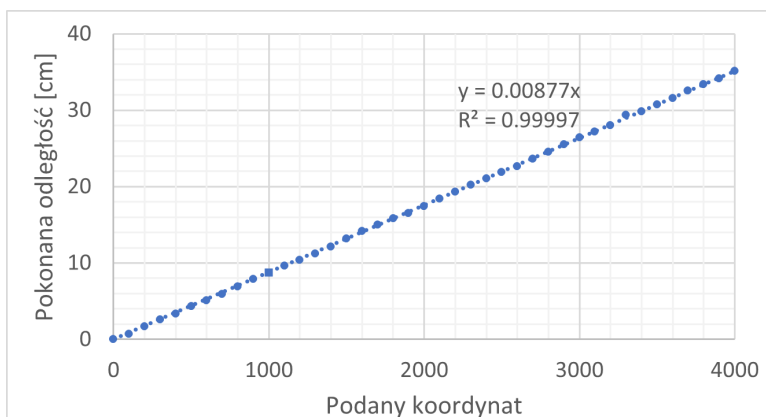
18.4. Uzyskane wyniki

Aby określić jakość pozycjonowania oraz funkcjonalność konstrukcji, przeprowadzono kilka testów. Pierwszym testem było sprawdzenie, jaką liniowością charakteryzują się wszystkie osie układu pozycjonowania. Sprawdzone to poprzez stworzenie listy komend przesuwających głowice lasera o 100 jednostek, odpowiadających koordynatom podawanym w komendach. Wykonano układ (rysunek 18.16), w którym wiązka lasera nakierowana była na miernik długości, po każdej wykonanej komendzie odczytywano wartość z punktu padania wiązki lasera. Do przeprowadzenia testu w osi Z posłużono się głowicą laserową skierowaną równolegle do pola roboczego oraz arkuszem papieru milimetrowego, na który padała wiązka lasera.

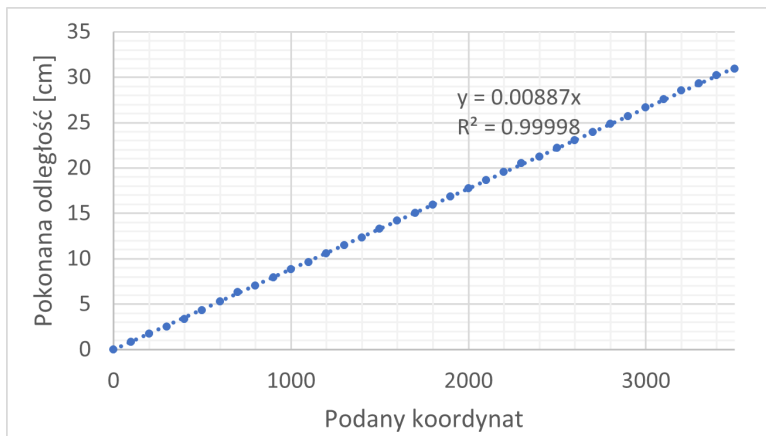


Rysunek 18.16. Układ pomiarowy do sprawdzenia jakości pozycjonowania [3]

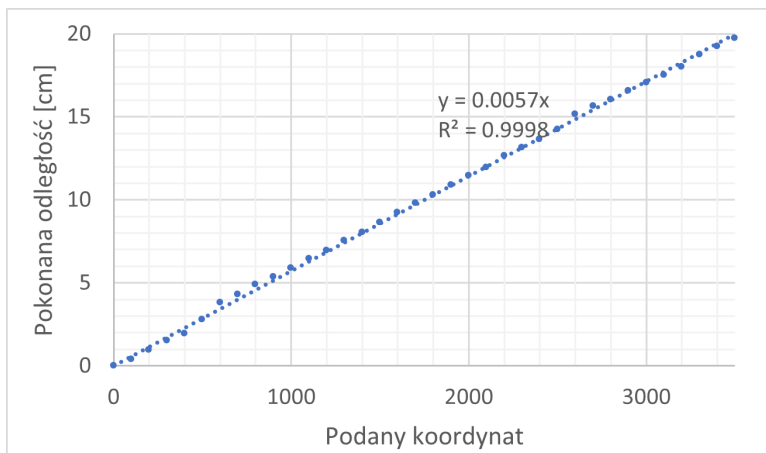
Następnie przeliczono odczytane wartości na rzeczywistą pokonaną odległość głowicy i skorelowano ją z podanymi koordynatami. Dzięki temu otrzymano współczynniki przetwarzania koordynat oraz współczynnik korelacji R^2 . Wyniki przedstawiono na wykresach (rysunki 18.17–18.19) [3].



Rysunek 18.17. Przemieszczenie głowicy manipulatora wzdłuż osi X w funkcji wartości podanego koordynatu



Rysunek 18.18. Przemieszczenie głowicy manipulatora wzdłuż osi Y w funkcji wartości podanego koordynatu



Rysunek 18.19. Przemieszczenie głowicy manipulatora wzdłuż osi Z w funkcji wartości podanego koordynatu

Obserwowano płynny i liniowy ruch manipulatora w osi X , jednak wystąpiły drgania głowicy związane z konstrukcją modułu pozycjonowania w osi Z . Ze względu na małą stabilność tego modułu, wynikającą z długości prowadnicy i śruby trapezowej, wiązka lasera oscylowała wokół osi podczas ruchu, ale po zakończeniu przemieszczenia stabilizowała się.

Wyniki pomiarów dla osi X wykazują dużą liniowość, co potwierdza wysoki współczynnik korelacji R^2 wynoszący 0,99997. Wartość współczynnika kierunkowego wynosi 0,00877, co sugeruje, że przy zmianie koordynatu o 1, głowica teoretycznie przesuwana się o 0,09 mm. Natomiast przy zmianie o 100 przesunięcie wynosi 8,87 mm. Jednak precyzja pozycjonowania w osi X jest niska w porównaniu do innych, komercyjnych konstrukcji.

Test dla osi Y wykazał dokładniejsze pozycjonowanie niż w przypadku osi X , prawdopodobnie ze względu na brak przemieszczenia prowadnicy środkowej. Współczynnik korelacji R^2 wyniósł 0,99998, a wartość współczynnika kierunkowego 0,00887.

W przypadku osi Z , wyniki różnią się znacząco od pozostałych. Wynika to z innego

sposobu przetwarzania pozycji. Ze względu na ograniczony budżet eksperymentalnie zastosowano śrubę trapezową i prowadnicę aluminiową do ruchu w osi Z . Moduł głowicy umieszczono tylko na ruchomym elemencie, czyli wózku liniowym osi Z . To rozwiązanie spowodowało szereg problemów, w tym skokowe wykonywanie ruchu. Przyczyną obejmują brak wystarczającej sztywności uchwytu, elastyczność materiału wózka oraz zbyt dużą odległość rolek prowadnicy. Rotacja wózka w trakcie ruchu w osi Z również wpłynęła negatywnie na funkcjonowanie. Wprowadzenie mocniejszego silnika skutecznie wyeliminowało blokowanie się prowadnicy. Aby całkowicie wyeliminować skokowy ruch w osi Z , konstrukcja manipulatora wymagałaby gruntownej modyfikacji. Podczas ruchu w osi Z zaobserwowano skokowy ruch oraz rotację modułu głowicy. To spowodowane jest ruchem obrotowym silnika, co powoduje z kolei wygięcie uchwytu i rotację modułu. Jednakże, ze względu na centralne umieszczenie głowic, ta rotacja jest minimalna i nie ma istotnego wpływu na ich funkcjonowanie. Mimo problemów z pracą skokową ruch w osi Z jest realizowany liniowo, choć z niższym współczynnikiem korelacji R^2 równym 0,9998. Wartość współczynnika kierunkowego wynosi 0,0057, co oznacza, że na zmianę koordynatu o 100 w osi Z , głowica przesuwa się o 5,70 mm. Jednak odchylenie standardowe pozycjonowania w osi Z jest wyższe, wynoszące 1,3 mm. Widać także zjawisko pracy skokowej.

Kolejnym etapem testowania konstrukcji było sprawdzenie, jak urządzenie poradzi sobie z przenoszeniem elementów na statywie. Zadaniem było przeniesienie próbówki o objętości 50 ml, wypełnionej zabarwioną cieczą o objętości 30 ml, z pozycji trzeciego miejsca prowizorycznie wykonanego stelażu na próbówkę na pozycję pierwszą. Test przeniesienia próbówki został wykonany w sposób prawidłowy, mając na uwadze precyzję pozycjonowania. Głowica manipulatora została odpowiednio ustawiona nad próbówką, zachowując dystans w osi Z . Następnie opuszczono ją na odpowiednią wysokość, umożliwiającą chwycenie próbówki. Elementy chwytające zostały zaciśnięte, a głowica cofnięta do punktu wyjściowego w osi Z . Następnie przesunięto obiekt w osi X , umożliwiając bezkolizyjne umieszczenie próbówki na pierwszym stanowisku. Głowica została opuszczona, a po kontakcie z blatem elementy chwytające zostały rozluźnione. Ostatnim krokiem było podniesienie głowicy z rozwartymi elementami chwytającymi w celu uniknięcia kolizji i powrót do pozycji zerowej w osi Y . Fazy przeprowadzonego testu przedstawiono na rysunku ??, na którym są ponumerowane zgonie z kolejnością wystąpienia.

18.5. Podsumowanie

Zaprojektowane i skonstruowane urządzenie ma duży potencjał rozwojowy. Choć częściowo przypomina komercyjne produkty, znacząco różni się od nich precyzją i możliwościami. Dzięki udanej implementacji innowacyjnego, konfigurowalnego montażu głowic konstrukcja ma perspektywy na rozwinięcie w kierunku nowych zastosowań. Mimo obecności tylko dwóch modułów – głowicy chwytającej i laserowej – wykazano możliwość podłączenia innych modułów zgodnych z systemami Arduino. Zaprojektowany interfejs użytkownika wyróżnia się niezawodnością, prostotą i estetyką, a podział programu na oddzielne wątki wykonawcze znacząco podnosi funkcjonalność całej konstrukcji. Założenie dotyczące niskiego kosztu produkcji urządzenia zostało zrealizowane dzięki wykorzystaniu używanych komponentów oraz budżetowych rozwiązań, takich jak wydruk 3D własnoręcznie zapro-



Rysunek 18.20. Przedstawienie klitek z punktów pracy manipulatora w trakcie wykonywania funkcji transportującej próbki z barwnikiem ze stanowiska trzeciego do stanowiska pierwszego, z podziałem na etapy ruchu

jektowanych elementów konstrukcyjnych. Wartościowym osiągnięciem jest także udana implementacja kinematyki CoreXY [2], która działa bez zarzutów w tej konstrukcji. Mimo wyzwań związanych z dużymi wymiarami urządzenia udało się osiągnąć prawidłowe funkcjonowanie i spełnić kluczowe założenia przedstawione w pracy. Po wprowadzeniu modyfikacji w funkcjonowaniu pozycjonowania i wyeliminowaniu efektu skokowego w osi Z, urządzenie mogłoby być używane do automatyzacji procesów w laboratorium biomedycznym. Oprócz modyfikacji mechanicznych warto rozważyć rozwinięcie urządzenia pod kątem integracji z modułami sieciowymi, co umożliwiłoby zdalne sterowanie urządzeniem z dowolnego miejsca na świecie. Dodanie sprzętowego panelu sterowania ręcznego byłoby istotnym ulepszeniem, które wyzwoliłoby urządzenie od konieczności pracy z komputerem. Również implementacja asercji w kodzie byłaby kluczowa w odporności konstrukcji na błędy danych lub problemy komunikacyjne. Dodatkowo wyposażenie konstrukcji w fizyczny przycisk umożliwiający natychmiastowe zatrzymanie pracy urządzenia byłoby ważnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikowi oraz samego urządzenia. Istnieje również możliwość rozbudowy projektu o dodatkowe moduły umożliwiające dozowanie

cieczy, naświetlanie próbek, pomiar temperatury oraz wilgotności względnej, generowanie specyficznego mikroklimatu wewnątrz urządzenia oraz pomiar pH cieczy. Ponadto zastosowanie kamery umożliwiłoby identyfikację niespotykanych problemów oraz pracę z urządzeniem bez konieczności obecności operatora na miejscu.

Bibliografia

- [1] Dokumentacja techniczna układu A4988 – DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection.
- [2] AbdelHamid, A., Abdeldayem, M., Mabrouk, M., Low cost X-Y core positioning system using stepper motor *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering* **2018**, 18(18).
- [3] Karaś P., Projekt i realizacja modułowego manipulatora dla laboratorium biomedycznego. Praca inżynierska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2023.
- [4] Katalog ofert sklepu V-slot Polska. Dostępny online: <https://vslot-poland.com/Aluminum-profile-2020-anodized-silver-2000mm> (dostęp: 05-06-2022).
- [5] Strona producenta drukarki Ender 3 pro. Dostępny online: <https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer> (dostęp: 17-12-2022).
- [6] Strona producenta filamentu poliaktydowego 3D POWER. Dostępny online: <https://3dpower.pl> (dostęp: 06-12-2022).
- [7] Dokumentacja biblioteki pySerial. Dostępny online: <https://pythonhosted.org/pyserial/> (dostęp: 20-03-2022).
- [8] Dokumentacja biblioteki Tkinter. Dostępny online: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> (dostęp: 15-07-2022).
- [9] Dokumentacja techniczna modułu lasera KY-008. Dostępny online: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1415012/AZ-Delivery/KY-008/1> (dostęp: 19-12-2022).
- [10] Projekt chwytaka robotycznego, Diego Pontonez alias maquina_persante, Robot Gripper with three fingers for Chess Robot. Dostępny online: <https://maquinapensante.com/2016/02/07/3d-printed-chess-robot-gripper/> (dostęp: 19-12-2022).

Projekt i konstrukcja robota karmiącego pacjenta z niedowładem kończyn górnych

mgr inż. Agnieszka Adamczyk
Inżynieria Biomedyczna

prof. dr hab. Krystian Kubica
Katedra Inżynierii Biomedycznej

W niniejszej pracy przedstawiono proces projektowania, wykonania oraz przetestowania funkcjonalnego robota karmiącego. Zaprojektowane stanowisko karmiące składa się z robota sterowanego czterema serwomechanizmami, miski, łyżki, czytnika kart, czujnika temperatury, diody RGB, akumulatora, przycisków sterujących i głównego włącznika. Na rynku są już dostępne roboty karmiące, lecz żaden nie ma wbudowanego czujnika temperatury umożliwiającego kontrolę temperatury podawanego posiłku. Kolejnym innowacyjnym elementem jest czytnik kart umożliwiający zapisanie danych pacjenta na specjalnej karcie. Ponadto większość stanowiska została wykonana za pomocą technologii druku 3D, a część elektroniczna jest sterowana za pomocą Arduino Uno, co sprawia, że cena robota jest konkurencyjna, więc robot jest dostępny dla szerokiego grona odbiorców.

19.1. Cel i założenia

W poniższej pracy przedstawiony zostanie projekt koncepcyjny zrobotyzowanego stanowiska do karmienia osoby z niedowładem kończyn górnych. Robot ten będzie miał na celu wspomaganie osób niemających pełnej kontroli nad swoimi kończynami górnymi. Główne cele projektu to:

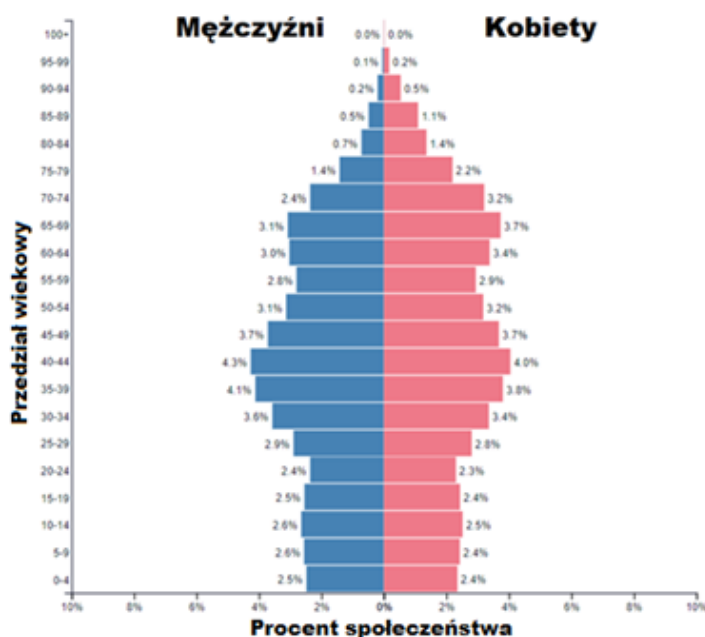
- zaprojektowanie robota z 4 stopniami swobody, z identyfikacją osoby upoważnionej oraz temperaturą posiłku,
- skonstruowanie funkcjonalnego robota,
- stworzenie programu sterującego na platformę Arduino,
- przetestowanie projektu.

19.2. Wstęp teoretyczny

Pierwszym etapem projektu było rozeznanie aktualnej sytuacji demograficznej w celu oszacowania potencjału rynku oraz przeanalizowanie już dostępnych robotów karmiących.

19.2.1. Sytuacja demograficzna

Jednym z większych problemów współczesnego świata jest niekorzystna sytuacja demograficzna społeczeństwa, co pokazano na rysunku 19.1. Ze względu na ujemny przyrost naturalny, coraz mniej młodych, sprawnych osób przypada na jednego emeryta. Oznacza to, że coraz więcej osób w średnim wieku musi zajmować się osobami niepełnosprawnymi samodzielnie w domu lub oddawać ich do ośrodków opieki. W związku z powyższym ważnym zagadnieniem jest podejmowanie projektów mających na celu optymalizację opieki nad osobami starszymi i niesamodzielnymi. Tego typu konstrukcje mogą znajdować zastosowanie zarówno u osób prywatnych, jak i w specjalistycznych ośrodkach, a piramida demograficzna jasno wskazuje, że potrzeby tego rynku będą w kolejnych latach stale rosnąć.



Rysunek 19.1. Piramida demograficzna dla Polski na rok 2023, źródło: [1]

19.2.2. Dostępne komercyjnie stanowiska karmiące

W procesie projektowania nowego manipulatora karmiącego istotnym krokiem jest przeprowadzenie analizy dostępnych na rynku konstrukcji. Na rysunku 19.2 przedstawiono wybrane roboty, które aktualnie są dostępne komercyjnie. Roboty te są sprzedawane przez firmy zagraniczne, w związku z powyższym ich ceny podane zostały w dolarach lub funtach brytyjskich. W przeliczeniu na złotówki (przyjmując kurs na dzień 20.06.2023, czyli dla dolara 4,07 PLN, a dla funta brytyjskiego 5,21 PLN) ich ceny wynoszą odpowiednio: 33 374 PLN, 32 031 PLN, 25 008 PLN, 14 387 PLN [2–5].



(a) Obi



(b) The Mealtime Partner



(c) Bestic | Made2Aid



(d) Meal Buddy

Rysunek 19.2. Przykładowe dostępne komercyjnie roboty karmiące [2–5]

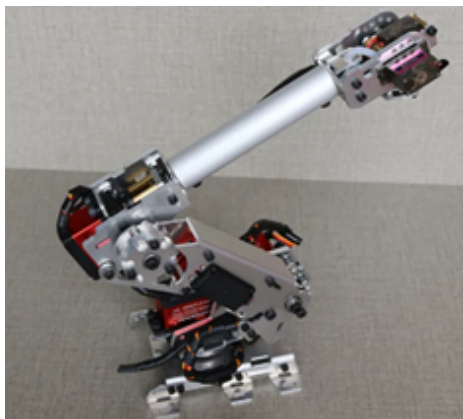
W każdym z analizowanych manipulatorów, z wyjątkiem robota Mealtime Partner, można zaobserwować występowanie konfiguracji antropomorficznej. Niektóre jednak posiadają również dodatkowe człony zwiększające liczbę stopni swobody, co sprawia, że modele różnią się liczbą par kinematycznych. Kolejną wspólną cechą wszystkich modeli jest występowanie chwytaka w postaci łyżki. Wszystkie modele pobierają pokarm poprzez nagarnianie go łyżką. Aby skutecznie realizować to zadanie, miski zostały geometrycznie dostosowane do nabierania pokarmu przewidzianą łyżką. Wspomniane naczynia są kolejnym elementem występującym w każdej z analizowanych konstrukcji. Pojemniki na jedzenie we wszystkich modelach są, podobnie jak łyżki, demontowalne, co pozwala na utrzymanie stanowiska w czystości. Po dokładnej analizie konstrukcji i wymiarów dostępnych robotów przystąpiono do projektowania własnego rozwiązania [2–6].

19.3. Projekt i wykonanie

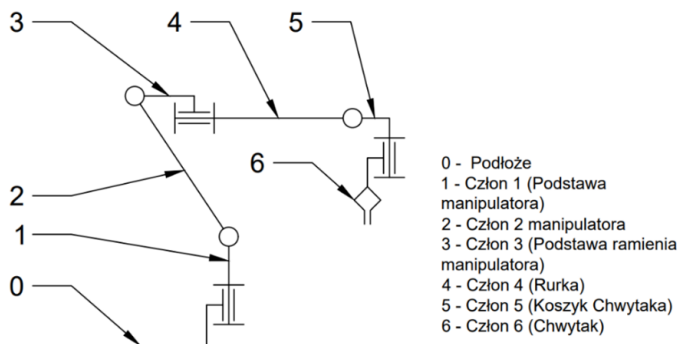
Najważniejszym elementem projektu jest sam manipulator, dlatego właśnie od niego rozpoczęto proces projektowania. Aby przyspieszyć pracę nad projektem, starannie wybrano i zakupiono gotowy manipulator, który został następnie przeprojektowany do wybranego celu.

19.3.1. Analiza konstrukcji

Na rysunku 19.3 przedstawiono zdjęcie wybranego manipulatora. Po złożeniu urządzenia sporządzono jego model kinematyczny, który pokazano na rysunku 19.4.



Rysunek 19.3. Wybrany manipulator bazowy, źródło: [7]



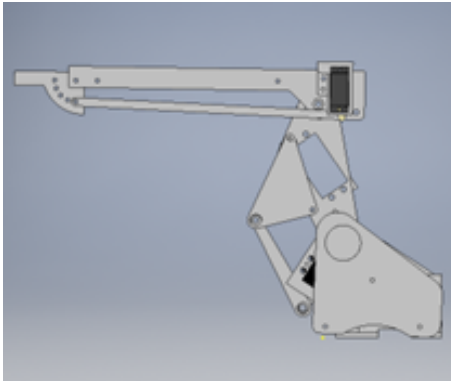
Rysunek 19.4. Model kinematyczny oryginalnego manipulatora, opracowanie własne na podstawie [8]

Podczas składania robota zdefiniowano potrzebę wprowadzenia następujących zmian:

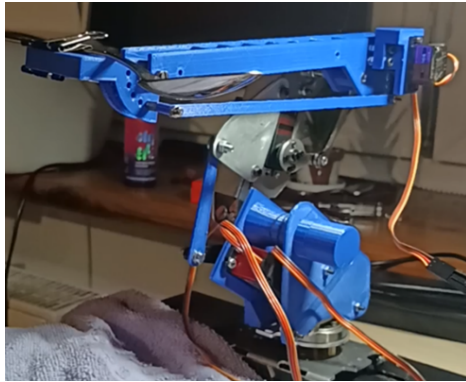
- modyfikacja całego ramienia, które rozpoczyna się rurką (człon 3) z uwagi na znaczne luzy połączenia oraz niewystarczający zakres ruchowy,
- modyfikacja połączenia członu 1 i 2 będącego specyficzną zębatką z uwagi na potencjalne problemy aktualnego rozwiązania,
- modyfikacja podstawy (człon 1) z uwagi na luzy połączenia,
- modyfikacja chwytaka, by spełniał założone zadanie.

19.3.2. Model i wydruk prototypu

Wymienione w poprzednim punkcie mankamenty zostały skutecznie usunięte, a znaczna część elementów robota uległa modyfikacji. Zamodelowaną konstrukcję oraz zmontowany prototyp przedstawiono na rysunku 19.5. Po ustaleniu geometrii ramienia dobrano łyżkę



(a) model w programie
Autodesk Inventor



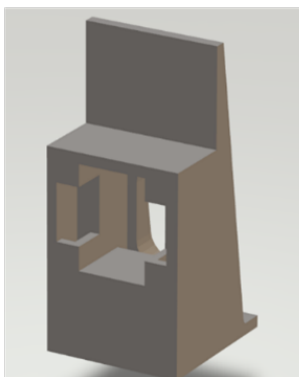
(b) wydrukowany i złożony prototyp

Rysunek 19.5. Końcowa wersja manipulatora, opracowanie własne

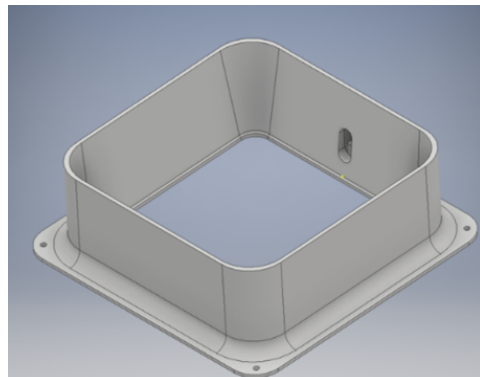
oraz miskę. Oba elementy zostały zakupione dzięki czemu posiadają wszelkie certyfikaty dopuszczające produkt do kontaktu z żywnością. Miska nie została poddana żadnym modyfikacjom, łyżkę natomiast wygięto, by spełniała przyjęte założenia.

19.3.3. Pomiar temperatury

Po wyborze odpowiedniej miski następnym krokiem było rozważenie sposobu pomiaru temperatury wewnątrz niej. W tym celu konieczne było wybranie odpowiedniego czujnika, przetestowanie jego możliwości oraz zaprojektowanie dedykowanego uchwytu. Po przeglądzie dostępnych technik pomiaru temperatury zdecydowano się na wykorzystanie czujnika temperatury GY-906 MLX90614, do którego przylutowano piny. Czujnik przetestowano pod względem odległości, w jakiej musi znajdować się od dobranej miski, by dawać odpowiednie wyniki. Następnie zaprojektowano uchwyt na miskę z dedykowaną obejmą na czujnik oraz osłoną. Zaprojektowany element widać na rysunku 19.6.



(a) sam uchwyt na czujnik



(b) cała obejmą na miskę

Rysunek 19.6. Uchwyt na czujnik temperatury wmontowany w miskę

19.3.4. Drukowanie elementów

Opisane wcześniej elementy robota były projektowane w środowisku Autodesk Inventor Professional 2017, a wyniki tych prac wyprowadzono w postaci plików w formacie .stl. Tak przygotowane pliki czytywano do środowiska Ultimaker Cura 5.1.1 celem wygenerowania plików wsadowych w formacie .gcode, które stanowią pliki sterujące drukarką 3D. Wydruki wykonywano na drukarce Anet A8. Spis wszystkich wydrukowanych elementów przedstawiono w tabeli 19.1.

Tabela 19.1. Spis wszystkich wydrukowanych elementów, opracowanie własne

Numer	Nazwa elementu	Czas drukowania	Ilość filamentu PLA	
			[g]	[m]
1	Uchwyt Serwa 1 (Podstawy)	54'	4	1,4
2	Ściana Podstawy 1	3h 19'	19	6,5
3	Ściana Podstawy 2	1h 50'	12	4,2
4	Kapselek	18'	1	0,4
5	Cięgno Serwa 2	15'	2	0,5
6	Ramię Robota	5h 16'	29	9,8
7	Uchwyt Serwa 4 (Chwybaka)	53'	4	1,4
8	Cięgno Serwa 4 (Chwybaka)	43'	3	1,2
9	Chwybak	1h 35'	8	2,8
10	Obudowa Miski	17h 16'	103	34,5
11	Obudowa Czujnika Temperatury	1h 3'	6	1,9
Suma:		33h 22'	191	64,6

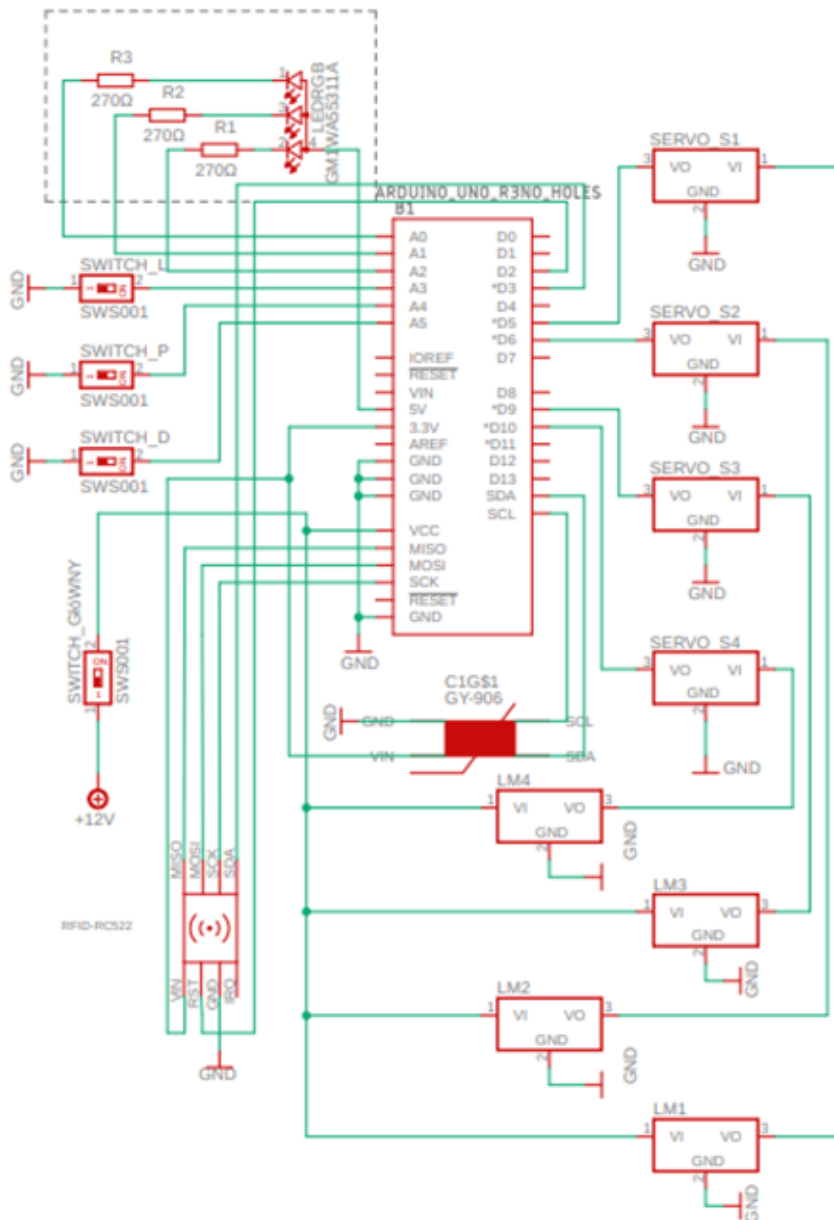
19.4. Część elektroniczna

Oprócz zaprojektowania konstrukcji mechanicznej, kolejną ważną kwestią w projekcie było opracowanie układu elektronicznego. Najistotniejsze elementy przedstawiono w tabeli 19.2.

Tabela 19.2. Spis wszystkich elementów elektronicznych tworzących robota, opracowanie własne

Nazwa komponentu	Parametr	Ilość
Arduino Uno	Mikrokontroler: ATmega328	1
Serwomechanizm TD-8120mg	Momencie obrotowy: 21,8 [kg/cm]	3
Serwomechanizm MG90s	Momencie obrotowy: 2 [kg/cm]	1
Stabilizatory napięcia LM7805	Napięcie wyjściowe: 5 V	4
Czujnik GY-906 MLX90614	Napięcie zasilające: 5 V lub 3,3 V	1
Czytnik RFID RC522 oraz karta	Napięcie zasilające: 3,3 V	1
Dioda LED	Trójkolorowa RGB	1
Akumulator litowo-polimerowy	Pojemność: 3300mAh/Napięcie: 11.1 V	1
Włącznik główny	-	1
Przyciski	Dwupinowe typu Tact Switch	3
Płytki stykowa	Liczba otworów: 400	1

Omówione elementy zostały połączone w jeden układ elektroniczny według schematu widocznego na rysunku 19.7.



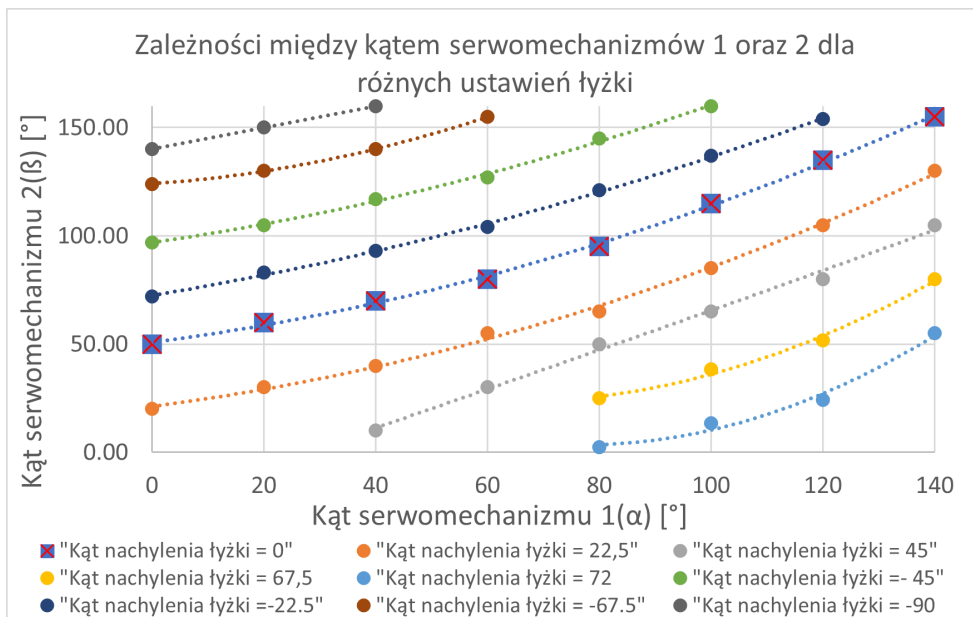
Rysunek 19.7. Układ elektroniczny, opracowanie własne

19.5. Programowanie

Po wykonaniu części mechanicznej oraz elektronicznej projektu przystąpiono do zaprogramowania stanowiska.

19.5.1. Ustalenie ruchów ramienia

Kluczową kwestią było zaprojektowanie ruchu ramienia. Z uwagi na to, że ramię będzie przemieszczać łyżeczkę zawierającą pokarm, musi ona zawsze znajdować się równolegle do podłoża, by dotarła ona do miejsca docelowego nie zgubiwszy przenoszonej porcji jedzenia. W tym celu serwomechanizmy muszą stale przyjmować wymuszone pozycje spełniające warunek równoległości ostatniego członu do podłoża. Obliczono teoretyczne zależności między wartościami, a następnie wykonano testy w celu ustalenia odpowiednich parametrów. Wyniki przedstawiono na rysunku 19.8.

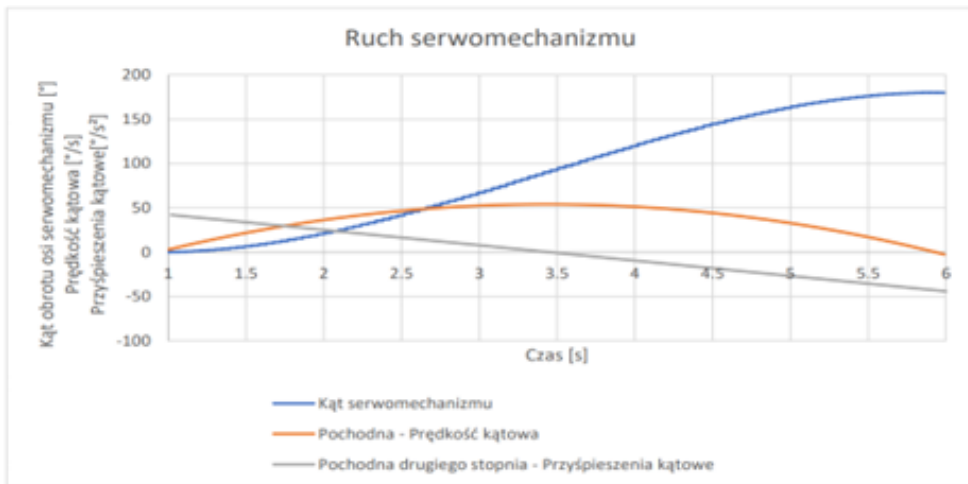


Rysunek 19.8. Wykres zależności kątów serwomechanizmów, opracowanie własne

Informacje wynikające z wykresu zaimplementowano w kodzie programu, a następnie całość ponownie przetestowano. Testy potwierdziły oszacowane wartości, co pozwoliło na przejście do kolejnego etapu.

19.5.2. Zmiana pozycji serwomechanizmów

Następną kluczową kwestią było zapewnienie płynnej zmiany prędkości łyżki, co minimalizowało ryzyko straty pokarmu podczas transportu. Domyślnie serwomechanizmy zmieniają pozycję natychmiastowo po wysłaniu sygnału, co skutkuje bardzo gwałtownymi ruchami. W związku z powyższym napisano własną funkcję powodującą płynne przyspieszenie na początku oraz zwalnianie na końcu ruchu, połączoną z kontrolą położenia w każdej milisekundzie ruchu, korzystając z funkcji `millis()`. Zabieg ten pozwolił na płynny i niemal synchroniczny ruch wszystkich serwomechanizmów, każdego w zdefiniowanym zakresie kątowym. Wykres ruchu serwomechanizmu pokazano na rysunku 19.9.



Rysunek 19.9. Ruch osi serwomechanizmu, opracowanie własne na podstawie [9]

19.5.3. Początek programu – setup i odczyt karty

Ważną kwestią była weryfikacja użytkownika za pomocą karty oraz dostosowanie wysokości do indywidualnego użytkownika. W celu zrealizowania tego zadania na karcie zapisano dane użytkownika dotyczące wysokości, na jaką ma sięgnąć łyżka. Po uruchomieniu robota przyjmuje on pozycję początkową i czeka na przyłożenie karty. W momencie, w którym zostanie ona przyłożona, zachodzi odczyt pozycji jaką ma przyjmować ramię robota w przypadku karmienia danego użytkownika. Początek programu został pokazany na rysunku 19.10.

```

34 //ustawienia
35 void setup() {
36   serwo[0].attach(S0); //Serwomechanizm 0 podłączony do pinu S0
37   serwo[1].attach(S1); //Serwomechanizm 1 podłączony do pinu S1
38   serwo[2].attach(S2); //Serwomechanizm 2 podłączony do pinu S2
39   serwo[3].attach(S3); //Serwomechanizm 3 podłączony do pinu S3
40   pinMode(przyciskPrawy, INPUT_PULLUP); //Przycisk prawy
41   pinMode(przyciskSrodkowy, INPUT_PULLUP); //Przycisk środkowy
42   pinMode(przyciskLewy, INPUT_PULLUP); //Przycisk lewy
43   pinMode(ledCzerwony, OUTPUT); //Ustawienie pinu odpowiedzialnego za diodę czerwoną
44   pinMode(ledNiebieski, OUTPUT); //Ustawienie pinu odpowiedzialnego za diodę niebieską
45   pinMode(ledZielony, OUTPUT); //Ustawienie pinu odpowiedzialnego za diodę zieloną
46   digitalWrite(ledZielony, HIGH); //Wyłączenie diody zielonej
47   digitalWrite(ledCzerwony, LOW); //Włączenie diody czerwonej
48   digitalWrite(ledNiebieski, HIGH); //Wyłączenie diody niebieskiej
49   Serial.begin(9600); //ustawienie monitora portu szeregowego
50   SPI.begin(); //ustawienie czytnika kart
51   mfc522.PCD_Init();
52   mlx.begin();
53   while (!odczytKarty()); //program nie rozpoczyna działania póki nie zostanie przyłożona karta
54   digitalWrite(ledCzerwony, HIGH); //Wyłączenie diody czerwonej
55 }

```

Rysunek 19.10. Funkcja setup w programie, opracowanie własne

Po poprawnym odczycie karty program przechodzi do części właściwej, przedstawionej w kolejnym podrozdziale.

19.5.4. Część właściwa programu – pętla loop

Następna w programie występuje powtarzana przez cały czas działania programu funkcja `loop()` (pętla), którą widać na rysunku 19.11.

```

57 void loop() {
58   if (Start == 0)
59   {
60     while (!odczytKarty2());
61     Start = 1;
62     Sygnalizowanie_Wystartowania();
63     czekaj(1);
64     WybranyZaczep = Dane.toInt();
65     if (WybranyZaczep == 0) WybranyZaczep = 1;
66   }
67
68   KontrolaTemperatury(); //kontrola temperatury i świecenie odpowiedniej diody zachodzi ciągle
69
70   while (digitalRead(przyciskLewy) == LOW) { //zmianaWysokości
71     KontrolaTemperatury();
72     WybranyZaczep--;
73     if (WybranyZaczep < 1) WybranyZaczep = 3;
74     Pozycjonowanie();
75   }
76
77   while (digitalRead(przyciskSrodkowy) == LOW) { //Przerwa podczas karmienia
78     KontrolaTemperatury();
79     Pauza();
80   }
81
82   while (digitalRead(przyciskPrawy) == LOW) { //Nabranie kolejnej porcji
83     KontrolaTemperatury();
84     Nabieranie();
85   }
86 }

```

Rysunek 19.11. Funkcja loop w programie, opracowanie własne

Przy pierwszym uruchomieniu programu sprawdzany jest warunek `if`, który, podobnie jak w ustawieniach (funkcji `setup()`), blokuje dalsze wykonywanie programu na funkcji `odczytKarty2()`. Jest to podobna funkcja, jak ta w ustawieniach (funkcji `setup`), lecz podczas gdy tamta jedynie sprawdzała, czy karta została wykryta przez czujnik, ta odczytuje z niej zakodowaną wartość. Odczytana wartość zostaje przekazana do zmiennej `Dane` i zostaje wykorzystana do ustawienia wysokości karmienia dla konkretnego użytkownika. W przypadku wystąpienia błędu w odczycie wartość ta jest ustawiana na uniwersalną – przeznaczoną dla osoby o wzroście około 170 cm.

Po odczytaniu karty następuje zasygnalizowanie gotowości do działania poprzez parę krótkich mrugnięć zieloną diodą, co powoduje funkcja `Sygnalizowanie_Wystartowania()`. Program przechodzi następnie do kolejnej fazy, w której występuje stała kontrola temperatury i sygnalizowanie jej kolorem diody, za co odpowiada funkcja `KontrolaTemperatury()`. Zielony kolor sygnalizuje temperaturę optymalną dla szkliwa, czyli 30–40°C. Niebieski – dowolną temperaturę poniżej progu 30°C. Czerwony oznacza natomiast temperaturę mogącą grozić poparzeniu – powyżej 70°C. Kolor żółty natomiast sygnalizują temperaturę powyżej progu optymalnego dla szkliwa, lecz poniżej temperatury niebezpiecznej – czyli zakres 40–70°C.

W dalszej części programu znajdują się trzy instrukcje warunkowe sprawdzające, czy został wciśnięty któryś przycisk. Jeżeli zostanie naciśnięty pierwszy przycisk, następuje

zmiana ustawienia wysokości, na jaką zostaje podniesiona łyżka. Robot w tym momencie ustawia łyżkę w pozycji, jaką będzie on od tej pory przybierał podczas karmienia, dzięki czemu użytkownik wie, która pozycja będzie dla niego najoptymalniejsza. Początkowo pozycja ta została odczytana z karty, lecz dzięki temu przyciskowi może ona zostać w dowolnym momencie zmieniona.

Drugi przycisk odpowiada za przerwę podczas jedzenia. Robot wykonuje instrukcję odpowiedzialną za zabranie łyżki sprzed twarzy użytkownika i umieszcza ją w okolicy miski. W tym położeniu robot zajmuje stosunkowo mało miejsca, a chwytak jest bezpiecznie schowany w objęciu miski. Z tego powodu pozycja ta jest zalecaną podczas nieużywania robota, należy więc nacisnąć ten przycisk przed wyłączeniem go włącznikiem głównym.

Ostatni przycisk służy do wykonania instrukcji związanej z nabraniem przez robota porcji pokarmu i dostarczeniem jej w okolice ust użytkownika. Wywołowaną funkcję widać na rysunku 19.12.

```

89 void Nabieranie() {
90     Powrot();
91     Nagarnianie();
92     Strzepywanie();
93     Otarcie();
94     Pozycjonowanie();
95 }

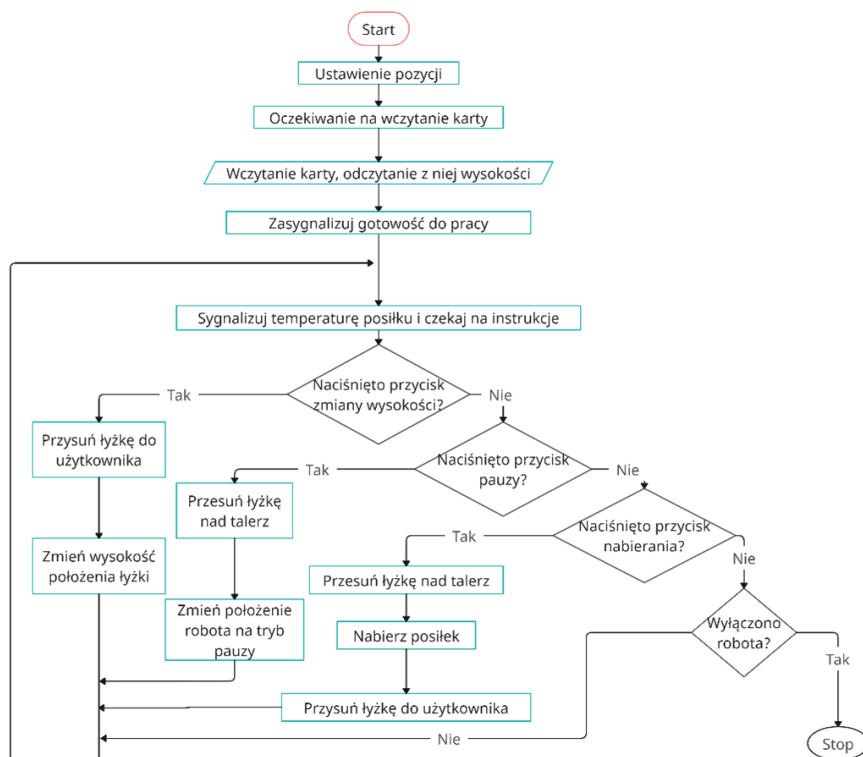
```

Rysunek 19.12. Funkcja odpowiedzialna za nabranie pokarmu, opracowanie własne

Jak widzimy na rysunku, funkcja ta składa się z paru sekwencji ruchowych. Ważne było podzielenie tego polecenia na podsekwencje, gdyż umożliwiło to na etapie projektowania niezależne testowanie każdego etapu pobierania pokarmu.

- Pierwsza funkcja – Powrot() – jest odpowiedzialna za bezpieczne dla użytkownika powrót ramiennia do pozycji rozpoczynającej ruch, w której ramię znajduje się nad miską.
- Druga funkcja – Nagarnianie() – odpowiada za nabranie pokarmu przez łyżkę. Kolejna funkcja – Strzepywanie() – wymusza na ramieniu podniesienie łyżki nad miską i delikatne potrząśnięcie nią w celu strącenia znajdującego się na brzegach jedzenia. Dzięki temu minimalizuje się ryzyko utracenia zawartości łyżki podczas transportu do miejsca docelowego.
- Następną funkcją – Otarcie() – odpowiada za otarcie spodu łyżki o brzeg miski, co minimalizuje ryzyko pochłapania użytkownika lub drogi do niego zawartością łyżki. Jest to funkcja szczególnie istotna w przypadku pobierania pokarmu płynnego. Występuje ona dwukrotnie, by zwiększyć dokładność, z jaką łyżka zostaje oczyszczona od spodu.
- Ostatnią funkcją jest Pozycjonowanie() – funkcja ta odpowiada za bezpieczne i skuteczne dostarczenie pokarmu do zadeklarowanego miejsca, czyli okolicy ust użytkownika.

Cały program działa według schematu blokowego widocznego na rysunku 19.13.

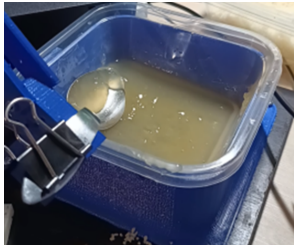


Rysunek 19.13. Schemat blokowy pokazujący działanie programu, opracowanie własne

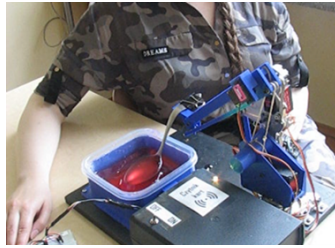
19.6. Testy stanowiska

Po zmontowaniu robota od strony mechanicznej, elektronicznej oraz zakodowaniu go należało przeprowadzić testy końcowe. W celu oceny funkcjonalności robota zdecydowano się przygotować próbny posiłek i spróbować go spożyć przy użyciu robota. Jako posiłek testowy wybrano kisiel z uwagi na prostotę jego przygotowania, jednolitą strukturę oraz konsystencję.

Na rysunku 19.14a przedstawiono łyżkę podczas sekwencji nabierania posiłku. Łyżka jest podnoszona z oparciem o ściankę naczynia, co powoduje oderwanie porcji jedzenia od zbitej masy kisielu. W wyniku tego ruchu pokarm został skutecznie nabrany i nie opuścił naczynia, więc sekwencję nabierania uznano za zadowalającą. Postanowiono wykonać test również na jedzeniu sypkim, co widać na rysunku 19.14b. W tym przypadku wybrano kaszę kuskus z uwagi na jej drobną, jednolitą strukturę. Przetestowano działanie robota również w przypadku, gdy miska jest pełna. Na rysunku 19.14b oraz 19.14e widzimy robota pobierającego pokarm z pełnego naczynia, a następnie ocierającego spód łyżki o bok miski. Sekwencja ta sprawia, że nadmiar pokarmu jest strącany przed opuszczeniem obszaru stanowiska. Następnie przetestowano działanie robota również na jedzeniu płynnym – zupie, co przedstawiono na rysunku 19.14c. Pokarm również w tym przypadku był w stanie bezpiecznie dotrzeć do użytkownika. Na rysunku 19.14f widać również wysokość, na jaką zostało dostarczone jedzenie, umożliwiając osobie karmionej pobranie pokarmu.



(a) robot nabierający porcję zimnego kisielu przy misce pełnej w 1/3



(b) robot nabierający porcję gorącego kisielu przy pełnej misce



(c) robot przenoszący płynny pokarm – zupę



(d) robot nabierający porcję kaszy kuskus



(e) robot obcierający łyżkę o miskę przed przeniesieniem porcji jedzenia

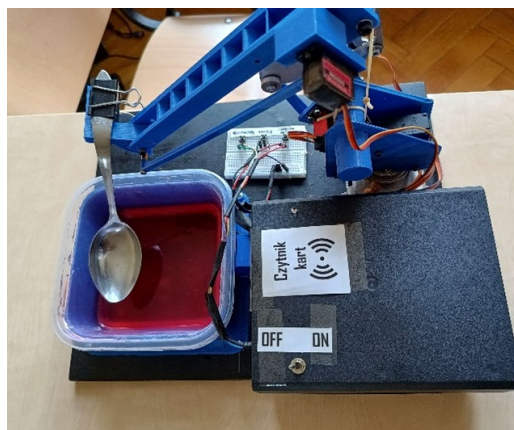


(f) robot podający porcję jedzenia użytkownikowi

Rysunek 19.14. Zdjęcia z testów stanowiska. Opracowanie własne

19.7. Podsumowanie

Celem przedstawionej pracy było zaprojektowanie i skonstruowanie funkcjonalnego robota karmiącego. Zmontowane stanowisko widać na rysunku 19.15. Przyjęty cel oraz założenia zostały spełnione, a końcowa faza projektu pozwoliła również na przetestowanie praktycznej funkcjonalności robota.



Rysunek 19.15. Zmontowane stanowisko robota, opracowanie własne

Podstawą opracowanego robota był gotowy manipulator, jednakże jego liczne mankamenty powodujące luzy w robocie wymusiły znaczne zmiany konstrukcyjne. W ostatecznej formie większość elementów oryginału została wymieniona na nowe. Wszystkie występujące w robocie elementy przedstawiono w postaci tabeli 19.3.

Tabela 19.3. Spis wszystkich elementów konstrukcyjnych tworzących robota, opracowanie własne

Numer	Nazwa elementu	Liczba	Typ elementu
1	Mocowanie podstawy	1	Oryginalny element
2	Prawa noga mocująca podstawę	1	Oryginalny element
3	Prawa noga mocująca podstawę	1	Oryginalny element
4	Dystanse mocujące podstawę	3	Oryginalny element
5	Dolna obejmą łożyska podstawy	1	Oryginalny element
6	Górna obejmą łożyska podstawy	1	Wytoczony element
7	Dystanse stabilizujące uchwyt serwa	2	Wytoczony element
8	Uchwyt Serwa 1 (Podstawy)	1	Wydrukowany element
9	Ściana Podstawy 1	1	Wydrukowany element
10	Ściana Podstawy 2	1	Wydrukowany element
11	Kapselek	1	Wydrukowany element
12	Cięgno Serwa 2 (Ramię robota przy podstawie)	1	Wydrukowany element
13	Wał	1	Wytoczony element
14	Dystans na wale	1	Wytoczony element
15	Ramię Robota Przy podstawie	1	Oryginalny element
16	Usztywnienie ramienia robota przy podstawie	1	Oryginalny element
17	Dystanse ramienia robota przy podstawie	3	Oryginalny element
18	Przedłużenie ramienia robota przy podstawie	1	Wykonany element
19	Orczyk Serwa 3 (Ramię robota)	1	Oryginalny element
20	Cięgno Serwa 3 (Ramię robota)	1	Oryginalny element
21	Ramię Robota	1	Wydrukowany element
22	Uchwyt Serwa 4 (Chwybaka)	1	Wydrukowany element
23	Cięgno Serwa 4 (Chwybaka)	1	Wydrukowany element
24	Chwybak	1	Wydrukowany element
25	Obudowa Miski	1	Wydrukowany element
26	Obudowa Czujnika Temperatury	1	Wydrukowany element
27	Obudowa na elektronikę	1	Zakupiony element
28	Miska	1	Zakupiony element
29	Łyżka	1	Zakupiony i przerobiony element
Suma:			34

Jak widać w spisie, w skład stanowiska wchodziły 34 elementy. W oryginalnej formie zachowało się łącznie 14 elementów. Wydrukowanych zostało 11, wykonanych innymi technikami 6, zakupionych 3, z czego jeden później przerobiono.

Elementy wykonane z PLA przeszły liczne zmiany konstrukcyjne, które nie zostały opisane w streszczeniu, jednakże pełen opis został zawarty w pracy magisterskiej. Stanowisko robota jest w przedstawionej podczas końcowych testów formie funkcjonalne i zdolne do nakarmienia użytkownika. Jednakże projekt ten posiada potencjał, by zostać produktem komercyjnym. W celu komercjalizacji przede wszystkim należałoby wszystkie metalowe elementy zastąpić drukowanymi oraz zaprojektować estetyczną obudowę na ramię robota. Odmienną kluczową kwestią są przyciski, które należałoby wymienić. W aktualnej formie są one funkcjonalne, lecz służą jedynie w celu pokazania idei pracy

robota. W przypadku używania robota przez osobę niepełnosprawną należałoby zamontować w miejsce aktualnych przełączników przyciski innego typu. Ważnym byłoby też zaprojektowanie sposobu mocowania przełączników w odpowiednich miejscach, umożliwiając tym samym sterowanie za pomocą nóg lub barków.

Bibliografia

- [1] PopulationPyramid. Dostępny online: <https://previous.populationpyramid.net/poland/2023/> (dostęp: 13-02-2023).
- [2] Obi. Dostępny online: <https://meetobi.com/> (dostęp: 12-08-2021).
- [3] Performance Health. Dostępny online: <https://www.performancehealth.com/meal-buddy-systems> (dostęp: 12-08-2021).
- [4] Made2Aid. Dostępny online: <https://www.made2aid.co.uk/onlinestoreproducts?productId=101121&company=Made2Aid&product=Bestic&producttype=%20&category=> (dostęp: 12-11-2022).
- [5] MEALTIME PARTNERS. Dostępny online: https://www.mealtimepartners.com/products/MtP_dining_device/MtP_dining_device.htm (dostęp: 12-11-2022).
- [6] Park D., Hoshi Y., Mahajan H., Kim H., Erickson Z., Rogers W., Kemp C., Active robot-assisted feeding with a general-purpose mobile manipulator: Design, evaluation, and lessons learned. *Robotics and Autonomous Systems* **2020**, 124.
- [7] Aliexpress. Dostępny online: <https://aliexpi.com/p1N9> (dostęp: 12-11-2022).
- [8] Miller S., *Teoria maszyn i mechanizmów: analiza układów kinematycznych*, wydanie pierwsze, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1996.
- [9] YouTube. Dostępny online: https://www.youtube.com/watch?v=pcfJJxv6q1s&ab_channel=SamWane (dostęp: 12-06-2023).

Konstrukcja przyrządu do mierzenia sił nacisku szczęki

inż. Marta Kaczmarek

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Mateusz Popek

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Celem pracy inżynierskiej było skonstruowanie przyrządu służącego do pomiaru sił nacisku, jakie wywiera szczęka podczas gryzienia oraz w stanie spoczynku. Zakres pracy obejmował przegląd literaturowy w obszarze zaburzeń sił nacisku szczęki oraz dostępnych konstrukcji pomiarowych, dobór odpowiednich elementów, konstrukcja urządzenia i jego testy. Wyniki przeglądu literaturowego wskazały na potrzebę konstrukcji taniego urządzenia, za pomocą którego mierzono by rozkład sił nacisku szczęki ze względu na coraz większą liczbę osób cierpiących na zaburzenia pracy narządu żucia. W celu zapewnienia poprawności działania urządzenia, a także bezpieczeństwa i komfortu osoby badanej oraz przeprowadzającej pomiar, postawiono odpowiednie założenia projektowe. Na ich podstawie skonstruowano urządzenie, oprogramowano je i połączono z platformą mobilną Thingier.io w celu wizualizacji i zapisu wyników pomiarów. Następnie przeprowadzono testy skonstruowanego przyrządu, które wykazały jego prawidłowe działanie.

20.1. Cel i założenia

Celem pracy było zaprojektowanie i skonstruowanie urządzenia służącego do pomiaru sił nacisku, jakie wywiera szczęka podczas gryzienia oraz w stanie spoczynku. Wyniki tego typu pomiarów są wykorzystywane celem wykrycia zaburzeń okluzji, czyli zwichnięcia szczęki. Zakres pracy obejmował:

- dobór odpowiednich sensorów nacisku,
- dobranie układu zasilania,
- dobór oraz wydruk obudowy,
- dobranie platformy mobilnej i oprogramowanie jej,
- konstrukcję urządzenia i jego testy,
- akwizycję i wizualizację danych testowych.

20.2. Wstęp teoretyczny

Zaburzenia czynnościowe stawu skroniowo-żuchwowego to jedna z trzech głównych (po chorobie próchnicowej i chorobach przyzębia) przyczyn wizyt w gabinecie stomatologicznym. Szacuje się, iż ok. 50–80% populacji osób dorosłych cierpi z powodu dysfunkcji narządu żucia, a szczyt zapadalności przypada między 30. a 40. rokiem życia. Wiek ten ulega stopniowemu, systematycznemu obniżeniu ze względu na przyspieszenie tempa życia oraz nasilenie działania i odczuwania czynników stresowych [1, 2].

Ze względu na skomplikowaną etiologię, a także dużą różnorodność i małą swoistość objawów, diagnostyka schorzeń stawów skroniowo-żuchwowych jest trudna, a leczenie stanowi istotne, interdyscyplinarne wyzwanie [3].

Przy prawidłowym zwarciu powierzchni zębów łuku górnego i dolnego powinny swobodnie się ze sobą stykać. Stabilna okluzja cechuje się pozostaniem w równowadze wszystkich działających sił – zwarciovych, wyrzynania się zębów, nacisku tkanek miękkich. Siły zwarciovie są różne w zależności od części łuku zębowego. Najmniejsze wartości występują dla zębów siecznych, większe dla kłów i zębów przedtrzonowych, a największe w obrębie zębów trzonowych [4].

Na nieprawidłowości w zwarciu szczęki oraz zmiany w obrębie stawów skroniowo-żuchwowych wskazują objawy kliniczne, tj. nadmierne starcie zębów, obnażenie zębiny, recesje dziąsłowe, impresje na języku, ubytki klinowe na wysokości szyjek zębowych, a nawet złamanie i utrata żywotności zęba [4].

Zaburzeniem czynnościowym układu stomatognatycznego jest bruksizm. Schorzenie dotyczy 8% populacji dorosłej. Częściej występuje u osób w młodym wieku. U osób po sześćdziesiątym roku życia rozpowszechnienie bruksizmu zmniejsza się do 3% [7].

Ze względu na różnorodność powtarzalnych ruchów szczęki dzieli się go na:

- świadomy – osoba chora w stanie czuwania zbyt mocno zaciska zęby,
- nieświadomy – osoba chora zgrzyta zębami.

Występowanie jednego rodzaju bruksizmu znacząco zwiększa ryzyko wystąpienia drugiego [8].

Ze względu na złożoność i częstotliwość występowania zaburzeń okluzji opracowano kilka technik, które mają umożliwić ich zdiagnozowanie i zaplanowanie odpowiedniego leczenia.

Tradycyjną i jednocześnie najbardziej popularną metodą oceny okluzji jest badanie przeprowadzone za pomocą kalki artykulacyjnej. Umożliwia ona rozpoznanie uprzywilejowanych stron żucia. Kalka okluzyjna jest pofarbowana z dwóch stron – pierwsza na kolor niebieski, a druga na czerwony [8]. Pod wpływem nacisku szczęki papier zmienia zabarwienie i pozostawia atramentowy ślad na zębach.

Jedną z metod cyfrowego badania okluzji jest przeprowadzenie badania za pomocą techniki T-Scan. Obecna wersja, o nazwie T-Scan 10 Novus, kosztuje około 11 950 dolarów. Urządzenie umożliwia m.in. lokalizację miejsc przedwczesnych kontaktów i węzłów urazowych oraz pomiar procentowej siły przypadającej na każdego zęba w porównaniu do maksymalnej siły wywieranej na wszystkie zęby. Wyniki można obejrzeć na obrazach 2D i 3D. Prezentowana jest także trajektoria centrum sił oraz wykres przedstawiający wartości siły nacisku w czasie [4, 7].

Dostępne metody diagnozowania mają wiele zalet, ale także istotne wady. Wykorzystanie kalki jest rozwiązaniem najbardziej korzystnym cenowo. Jednakże niecyfrowe sposoby opierają się głównie na subiektywnej ocenie lekarza, co może powodować więcej błędów. W licznych badaniach wykazano, że znaki pozostające na papierze i na powierzchni zębów nie wskazują intensywności działających sił [9].

Cyfrowe metody diagnostyczne są zdecydowanie dużo dokładniejsze. Minimalizują wystąpienie błędów spowodowanych przez subiektywną ocenę lekarza. Umożliwiają „dokładną analizę rozłożenia sił okluzyjnych oraz czasu okluzji i dyskuzji w czasie” [5]. Choć system T-Scan 10 jest coraz częściej stosowany, to jego cena na pewno wpływa na fakt, że nie jest wykorzystywany powszechnie do predykcji i wczesnej diagnostyki problemów [9].

20.3. Projekt i wykonanie

W celu zapewnienia poprawności działania urządzenia, a także bezpieczeństwa i komfortu osoby badanej oraz przeprowadzającej pomiar, postawiono założenia projektowe:

- urządzenie zasilane bateryjnie – zapewnienie bezpieczeństwa przeciwporażeniowego osoby badanej oraz obsługującej urządzenie,
- urządzenie bezprzewodowe – przesył zmierzonych wartości za pomocą WiFi,
- pomiar siły nacisku w pięciu punktach – zastosowanie pięciu czujników nacisku: dwóch w rejonie zębów trzonowych, dwóch w rejonie zębów przedtrzonowych, jednego w rejonie siekaczy,
- obudowa w kształcie łyżki wyciskowej – odpowiednio cienka, składająca się z dwóch części, wydrukowana z elastycznego materiału za pomocą drukarki 3D,
- wizualizacja danych na komputerze oraz na urządzeniu mobilnym, tj. telefon, tablet,
- niski koszt urządzenia – dobór tanich komponentów.

20.3.1. Elementy składowe

Odpowiedni dobór wszystkich elementów składowych urządzenia umożliwia jego prawidłowe działanie. Przy doborze elementów kierowano się ich parametrami, kompatybilnością, jakością, dostępnością, a także ceną. Dobrano moduł Arduino Nano 33 IoT, zawierający mikrokontroler SAMD21G18A z rdzeniem ARM CortexM0+, a także moduł WiFi i Bluetooth U-Blox NINA-W102 ESP32. Napięcie zasilania wynosi 4,5–21 V, a napięcie wyjściowe 3,3 V.

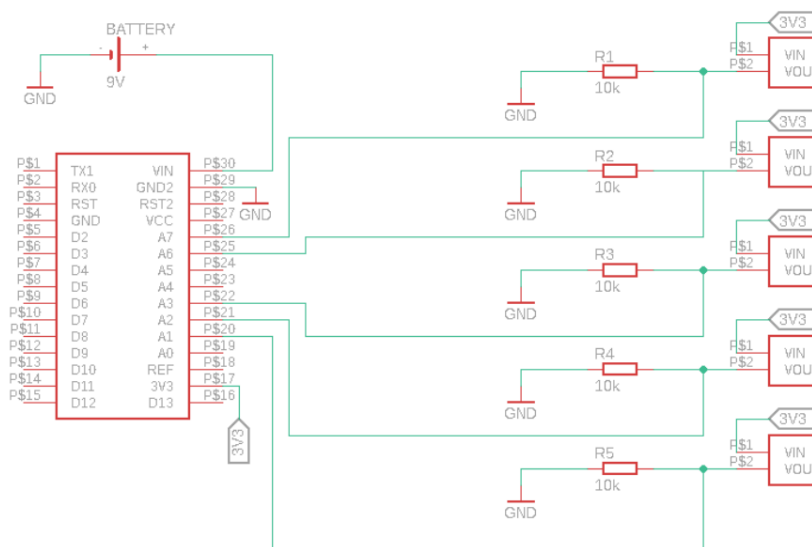
Wybrano analogowe czujniki nacisku SEN0294 firmy DFROBOT. Zdecydowano się na okrągły kształt czujników z krótkimi odprowadzeniami, ponieważ zapewniają większą dokładność pola wykrywania i umożliwiają wygodne ułożenie w zaprojektowanej obudowie. Ich średnica wynosi 18,3 mm, a grubość 0,4 mm. Charakteryzują się trwałością a także dużą szybkością reakcji, przez co znajdują liczne zastosowania w różnych urządzeniach biomedycznych. Składają się z pokrywającej cienkiej folii, warstwy przewodzącej, rezystancyjnej warstwy węglowej i folii bazowej TPU [11].

Zdecydowano się na bateryjne zasilanie skonstruowanego urządzenia przede wszystkim ze względu na fakt bezpieczeństwa przeciwporażeniowego osoby badanej, a także osoby przeprowadzającej pomiar. Wykorzystano baterię 9 V.

W programie Autodesk Fusion 360 zaprojektowano i wydrukowano elastyczną obudowę, stanowiącą rusztowanie i osłonę dla użytych czujników. Została ona wydrukowana z materiału Flexfill TPU 98A, na drukarce Prusa i3 MK2,5S.

20.3.2. Schemat elektryczny urządzenia

Zaprojektowano schemat elektryczny przyrządu do mierzenia sił nacisku szczęki w programie EAGLE, który przedstawiono na rysunku 20.1.



Rysunek 20.1. Schemat elektryczny przyrządu do mierzenia sił nacisku szczęki (opracowanie własne)

Moduł Arduino Nano 33 IoT zasilono 9 V baterią. W układzie wykorzystano pięć czujników wykrywających siłę. Każdy z nich posiada dwa wyprowadzenia. Jeden z nich podłączono do wyjścia zasilającego 3,3 V. Drugi podłączono do masy poprzez rezystor obniżający napięcie o wartości 10 kΩ. Czujnik siły działa na zasadzie zmiennego rezystora. Po połączeniu go ze stałym rezystorem uzyskano dzielnik napięcia. Punkt pomiędzy czujnikiem a rezystorem obniżającym o stałej wartości połączono z wejściem analogowym płytki [12]. Po przyłożeniu siły rezystancja czujników nacisku maleje, czyli wzrasta wartość napięcia wyjściowego.

20.3.3. Platforma mobilna do wizualizacji wyników

Zdecydowano się na połączenie urządzenia z platformą Thingier.io. Jest to platforma typu open-source. Zapewnia potrzebne narzędzia do dwukierunkowej komunikacji z urządzeniami, tj. Linux, Arduino, Raspberry Pi. Zdecydowano się na tę bezpłatną platformę ze względu na kompatybilność z wybranym urządzeniem Arduino Nano 33 IoT. Thingier.io umożliwia zarówno wyświetlanie danych w czasie rzeczywistym, jak i ich zapisanie i przechowywanie. Wyniki pomiarów można prezentować nie tylko na komputerze, ale także

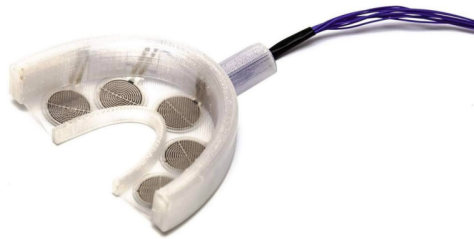
na urządzeniu mobilnym, tj. tablet czy telefon, z pobraną darmową aplikacją Thinger.io. Dodatkowym atutem jest możliwość tworzenia pulpitu nawigacyjnego przez dostosowanie kolorów oraz wstawianie dostępnych widżetów, np. wykresów pierścieniowych, wskaźników [13].

20.3.4. Oprogramowanie urządzenia

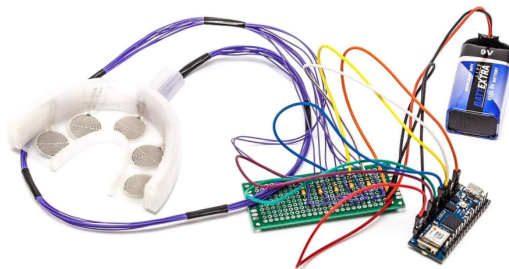
Oprogramowanie dla skonstruowanego urządzenia zostało napisane w środowisku Arduino IDE z wykorzystaniem dostępnych bibliotek.

20.3.5. Realizacja projektu

Na podstawie przygotowanego projektu z dobranych wcześniej elementów skonstruowano przyrząd do mierzenia sił nacisku szczęki. Przylutowano przewody druciane PCV o średnicy 0,5 mm do rezystancyjnych czujników mierzących siłę. Rozmieszczono je odpowiednio w obudowie i przyklejono do podstawy w celu uniknięcia przesuwania. Przewody poprowadzono zaprojektowaną ścieżką (rysunek 20.2). Przylutowano męskie złącza goldpin do modułu Arduino Nano 33 IoT. Do wykorzystywanych wejść i wyjść przyłączono przewody z żeńskimi złączami na końcach. Do baterii 9 V przyłączono klip z przewodami, ze zdjętą na końcach izolacją. Następnie przylutowano odpowiednio przewody oraz rezystory do dwustronnej płytki uniwersalnej o wymiarach 30×70 mm. Zdjęcie całego skonstruowanego urządzenia przedstawiono na rysunku 20.3.



Rysunek 20.2. Obudowa z rozmieszczonymi czujnikami (zdjęcie własne)



Rysunek 20.3. Skonstruowany przyrząd do mierzenia sił nacisku szczęki (zdjęcie własne)

20.3.6. Sposób działania urządzenia

Elastyczna obudowa zostaje umieszczona w jamie ustnej pacjenta. Za pomocą pięciu rezystancyjnych czujników nacisku SEN0294, rozmieszczonych w obudowie, przeprowadzany jest pomiar nacisku, jaki wywiera szczeka w rejonie zębów trzonowych, przedtrzonowych i siekaczy. Urządzenie jest bezprzewodowe, zasilane baterią 9 V. Zebrane dane są przesyłane z mikrokontrolera do komputera i/lub urządzenia mobilnego za pomocą WiFi. Na ekranie komputera, tableta, czy telefonu prezentowane są wartości sił nacisku dla każdego z pięciu rejonów pomiarowych, w czasie rzeczywistym oraz prezentowany jest wykres zmian wartości sił w czasie. Istnieje możliwość zapisania wyników pomiarów do pliku CSV.

20.4. Testy skonstruowanego przyrządu

Testy skonstruowanego przyrządu do mierzenia sił nacisku szczęki podzielono na trzy etapy. W pierwszym sprawdzano poprawność działania czujników. W drugim i trzecim etapie sprawdzano poprawność działania skonstruowanego urządzenia poza jamą ustną i w niej.

20.5. Uzyskane wyniki

W pierwszym etapie położono 2-kilogramowy obciążnik na każdy z wykorzystanych czujników. Sprawdzone także wpływ dwuczęściowej obudowy na pomiar. W tym celu położono 2-kilogramowe obciążenie na każdy z czujników umieszczonych pomiędzy dwiema częściami obudowy. Wyniki pierwszego etapu testów przedstawiono w tabeli 20.1.

Tabela 20.1. Wyniki pomiarów siły nacisku dla obudowy umieszczonej w obciążanym gipsowym modelu szczęki

Umieszczenie	Czujnik 1 [N]	Czujnik 2 [N]	Czujnik 3 [N]	Czujnik 4 [N]	Czujnik 5 [N]
Poza obudową	20,36	20,38	20,31	20,42	20,35
W obudowie	19,75	19,81	19,77	19,73	19,82

Wszystkie czujniki działają poprawnie i wskazują zbliżoną wartość siły. Różnice mogą wynikać z ułożenia obciążnika. Zwracane wartości przy zastosowaniu obudowy są bardzo zbliżone do wyników pomiarów bez, co pokazuje, że nie ma ona istotnego wpływu na przeprowadzane badanie.

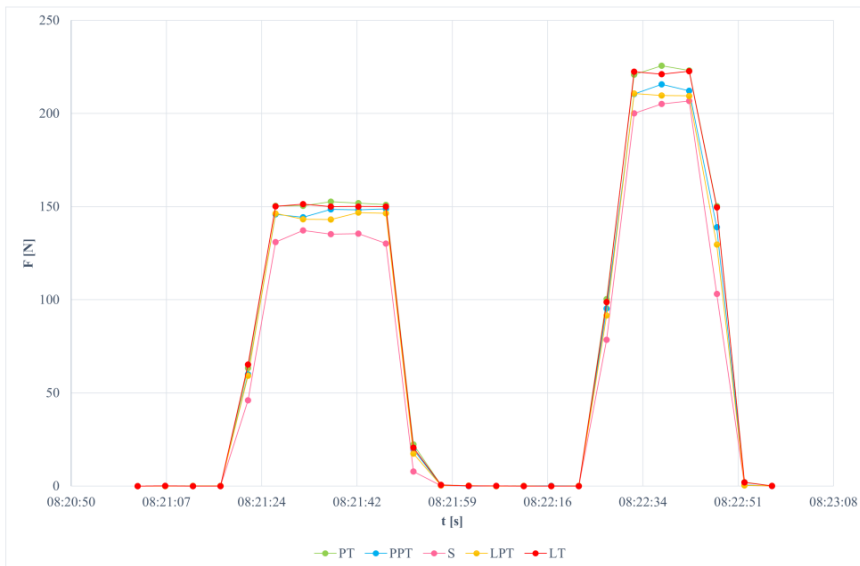
W drugim etapie testów obudowę z czujnikami ułożono w gipsowym modelu szczęki, który obciążano żeliwnymi talerzami do sztangi o różnej wadze. Następnie sprawdzono również wpływ braków w uzębieniu na wyniki pomiarów, ponieważ lewe dolne zęby trzonowe i przedtrzonowe modelu były ruchome. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w drugim etapie testów zestawiono w tabeli 20.2. Zdefiniowano skróty dla poszczególnych rejonów jamy ustnej: PT — prawe trzonowce, PPT – prawe przedtrzonowce, S – siekacze, LPT – lewe przedtrzonowce oraz LT – lewe trzonowce.

Tabela 20.2. Wyniki pomiarów siły nacisku dla obudowy umieszczonej w obciążanym, gipsowym modelu szczęki

Obciążenie [kg]	PT [N]	PPT [N]	S [N]	LPT [N]	LT [N]
1	9,21	8,78	9,63	8,34	9,74
2	15,75	15,81	14,77	15,73	14,82
5	42,75	43,81	42,77	44,73	42,82
5 (bez PPT)	47,03	0,11	46,43	45,11	45,12

W tym przypadku obudowa nie leżała na płaskiej powierzchni. Różnice w wynikach z różnych rejonów wynikają z odmiennej powierzchni kontaktu. Wyniki wykazują poprawność działania urządzenia. Wraz ze wzrostem obciążenia wzrastają wartości sił. Po usunięciu lewych dolnych zębów przedtrzonowych wartość siły mierzona w tym rejonie spadła do wartości bliskiej 0 N, a pozostałe wzrosły.

W trzeciej części testów obudowę z czujnikami umieszczono w jamie ustnej osoby konstruującej urządzenie i badano wpływ okluzji i dyskluzji na wyniki pomiarów. Stworzono wykres wartości sił nacisku w czasie (rysunek 20.4).

**Rysunek 20.4.** Wyniki pomiaru przeprowadzonego w jamie ustnej (zdjęcie własne)

Pomiar trwał około 2 min. Osoba badana po 20 s delikatnie zacisnęła zęby. Wyniki są różne dla poszczególnych rejonów jamy ustnej. Największe wartości sił są rejestrowane w rejonie zębów trzonowych, mniejsze w rejonie zębów przedtrzonowych, a najmniejsze w rejonie siekaczy. Taki rozkład jest zgodny z teoretycznym [10]. W kolejnym kroku pacjent lekko otworzył usta na 25 s. Po tym czasie zacisnął mocniej zęby na około 15 s. Zarejestrowano wyższe wartości sił o około 70 N. Wyniki pomiarów wskazują na poprawne działanie urządzenia.

20.6. Podsumowanie

Zrealizowano cel powyższej pracy inżynierskiej. Zaprojektowano i skonstruowano urządzenie służące do pomiaru sił nacisku, jakie wywiera szczęką podczas gryzienia oraz w stanie spoczynku.

Przyrząd spełnia wszystkie postawione założenia. Dobrano odpowiednie, tensometryczne czujniki nacisku. Wykorzystano pięć czujników, by realizować pomiar w każdym rejonie jamy ustnej: rejon zębów trzonowych i przedtrzonowych, po obu stronach jamy ustnej, a także rejon siekaczy. Zdecydowano się na zasilanie bateryjne 9 V, by urządzenie było bezpieczne dla pacjenta oraz osoby przeprowadzającej pomiar i bezprzewodowe. Obudowa wydrukowana z materiału Flexfill TPU 98A jest odpowiednio elastyczna. Z łatwością można ją umieścić w jamie ustnej. Wykorzystany materiał jest jednym z najtwardszych tego typu, co sprawia, że dzięki zastosowaniu grubszych warstw obudowa jest jednocześnie odpowiednio sztywna i stanowi rusztowanie dla przyklejonych czujników. Dwie części obudowy idealnie do siebie przylegają i nie przesuwają się względem siebie.

Wyniki pomiarów są przesyłane za pomocą WiFi do komputera, a także urządzenia mobilnego, tj. telefonu. Możliwe jest monitorowanie sił nacisku w czasie rzeczywistym. Zdecydowano się wyświetlać wyniki na platformie Thinger.io. Stworzony pulpit nawigacyjny jest czytelny, prosty i estetyczny. Zmierzone wyniki są zapisywane. Istnieje możliwość eksportu danych do pliku CSV.

Wyniki przeglądu literaturowego wskazały na potrzebę konstrukcji taniego urządzenia, za pomocą którego mierzono by rozkład sił nacisku szczęki. Coraz więcej osób cierpi na zaburzenia pracy narządu żucia [1, 2]. Dostępne obecnie systemy są bardzo drogie. Wysoka cena jest powodem wykonywania tego typu pomiarów w nielicznych gabinetach. By pomiary sił nacisku mogły być wykonywane z dużo większą częstotliwością, skonstruowano urządzenie z tańszych, dostępnych komponentów. Ich ceny zestawiono w tabeli 20.3.

Tabela 20.3. Zestawienie cen poszczególnych elementów urządzenia [14–16]

Element	Liczba [szt.]	Cena [zł]
Arduino Nano 33 IoT	1	139,00
Czujnik SEN0294	5	24,88
Rezystor 10 k Ω	5	0,40
Przewód druciany PCV	1 (rolka)	26,90
Przewód z żeńskimi złączami	1 (zestaw 40 szt.)	17,50
Flexfill TPU 98A	1 (500 g)	156,67
Płytki uniwersalna dwustronna 30 × 70 mm	1	2,70
Bateria 9 V	1	4,50
Klip na baterię 9 V	1	1,50

Koszt całego urządzenia oszacowano na 475,17 zł (nie wliczono kosztu wydruku i spawania). Cena jest znacząco niższa niż dostępnego systemu T-Scan, który kosztuje około 12 000 dolarów [9].

Zastosowane czujniki sprawdzono przed umieszczeniem ich w obudowie. Testy wykazały ich poprawne działanie. Przeprowadzono również pomiar z identycznym obciążeniem, dla czujników umieszczonych w obudowie. Wykazano, że obudowa nie wpływa znacząco na wyniki pomiarów. Po skonstruowaniu urządzenia sprawdzono jego działanie. Obudowę

z czujnikami umieszczono w modelu gipsowym szczęki, który następnie obciążano żeliwnymi tarczami o różnej wadze. Im cięższy był obciążnik, tym urządzenie zwracało większe wartości sił. Na koniec wykonano pomiar rzeczywisty w jamie ustnej i zaprezentowano wykres zależności wartości sił w czasie (rysunek 20.4). Otrzymane wyniki są zgodne z teoretycznymi. Największe wartości sił są rejestrowane w rejonie zębów trzonowych, mniejsze w rejonie zębów przedtrzonowych, a najmniejsze w rejonie siekaczy [10].

Kolejnym etapem powinno być przeprowadzenie szczegółowych badań wykazujących dokładność urządzenia i powtarzalność zwracanych wartości. Możliwy jest także dalszy rozwój urządzenia. W przyszłości zamiast korzystania z platformy open-source do wyświetlania i przechowywania wyników, może zostać stworzona, dedykowana urządzeniu aplikacja. Posiadałaby bazę pacjentów. Wyświetlane wyniki zapisywałyby się przy konkretnych osobach.

Bibliografia

- [1] Owczarek-Drabińska J.E., Zielińska I., Temporomandibular disorders and kinesiotaping: literature review. *Protetyka Stomatologiczna* **2022**, 72.1, s. 59–67.
- [2] Oleszek-Listopad J., Robak B., Szymańska J., Etiologia i epidemiologia dysfunkcji układu ruchowego narządu żucia – Etiology and epidemiology of temporomandibular disorders. *Hygeia Public Health* **2019**, 54.2, s. 92–96.
- [3] Oleszek-Listopad J., Szymańska J., Temporomandibular disorder – current state of knowledge, *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu* **2018**, 24.2, s. 82–88.
- [4] Owczarek J.E., Radwan-Oczko M., Zaburzenia czynnościowe układu ruchowego narządu żucia a wiek pacjentów. *Dobrostan a Stan Zdrowia* **2016**, s. 157–166.
- [5] Czarnek M., Wieczorek A., Comparison of the quality of occlusion control with the use of occlusion paper and t-scan, based on the literature, 2020.
- [6] Sączuk K., Wilmont P., Pawlak Ł., Łukomska-Szymańska M., Bruxism: Aetiology and diagnostics. A literature review. *Protetyka Stomatologiczna* **2018**, 68.4, s. 456–463.
- [7] Ziółkowska-Kochan M., Borkowska A., Bruksizm-problem interdyscyplinarny Bruxisma multidyscyplinarny problem Konstrukcja i walidacja skali Cognitive Screening Scale for Schizophrenia View project Neuropsychology of somatic disorders View project. 2007.
- [8] Dias R.A.B., Rodrigues M.J.P., Messias A.L., Guerra F.A.D.A., Manfredini D., Comparison between conventional and computerised methods in the assessment of an occlusal scheme. *Journal of Oral Rehabilitation* **2020**, 47, s. 221–228.
- [9] Sutter B., Digital Occlusion Analyzers: A Product Review of T-Scan 10 and Occlusense. *Advanced Dental Technologies Techniques* **2019**.
- [10] Sierpińska T., Szarmach I., The influence of occlusal discrepancies on the disclosure of pathological tooth wear early stages – personal experience. *Prosthodontics* **2015**, 65, s. 202–213.
- [11] Karta katalogowa czujnika SEN0294 firmy DFROBOT. Dostępny online: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/SEN0294_Web.pdf (dostęp: 07-03-2023).
- [12] Interface Force Sensors. Dostępny online: <https://microcontrollerslab.com/force-sensor-fsr-arduino-tutorial/> (dostęp: 07-03-2023).
- [13] Thingier.io. Dostępny online: <https://docs.thingier.io/> (dostęp: 07-03-2023).
- [14] TEM. Dostępny online: <https://www.tme.eu/pl/details/df-sen0294/czujniki-pozostale/dfr-obot/sen0294/> (dostęp: 09-03-2023).

[15] Botland. Dostępny online: <https://botland.com.pl/> (dostęp: 08-03-2023).

[16] Prusa3D. Dostępny online: <https://www.prusa3d.com/pl/> (dostęp: 08-03-2023).

System wirtualnej rzeczywistości do nauki udzielania pomocy przedmedycznej

inż. Miłosz Bonikowski
Inżynieria Biomedyczna

dr hab. inż. Cezary Sielużycki, prof. uczelni
Katedra Inżynierii Biomedycznej

W ramach realizacji pracy dyplomowej, autor zastosował gogle VR i program symulacyjny, aby umożliwić osobom pragnącym zdobyć wiedzę z zakresu pierwszej pomocy praktyczne treningi w wirtualnym świecie z programowalnymi fantomami. System umożliwiał monitorowanie uczestnika szkolenia przez instruktora, który mógł ocenić działania ratownika i udzielić obiektywnej opinii. Autor połączył najlepsze cechy istniejących rozwiązań na rynku, dodając elementy treningu świadomości sytuacyjnej i odporności na stres związane z brakiem wiedzy na temat uszkodzonego. System był kompatybilny z popularnym na rynku systemem VR, OpenXR i działał na różnych urządzeniach, takich jak Oculus czy Valve Index. Przeprowadzone testy z udziałem przedstawicieli zawodów związanych z pierwszą pomocą (ratownik medyczny, policjant, żołnierz) były pozytywne. Projekt stanowi podstawę do dalszego rozwoju, z planowanym rozbudowaniem interfejsu użytkownika, scenariuszy, animacji i dodatkowych przypadków, takich jak urazy mechaniczne czy wypadki komunikacyjne.

21.1. Cel i założenia

Celem pracy było stworzenie prototypu systemu szkoleniowego wirtualnej rzeczywistości (VR) do nauki udzielania pierwszej pomocy. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- stworzenie prototypu systemu szkoleniowego wirtualnej rzeczywistości (VR) do nauki udzielania pierwszej pomocy,
- wykorzystanie gogli VR i programu symulacyjnego w celu umożliwienia praktycznego treningu wirtualnym świecie z programowalnymi fantomami,
- zapewnienie możliwości obserwacji uczestnika szkolenia przez instruktora za pomocą podglądu pierwszoosobowego oraz oglądanie całej sceny wirtualnej w celu dokonania obiektywnej oceny działań ratownika,

- połączenie najlepszych cech istniejących rozwiązań na rynku w ramach jednego systemu szkoleniowego VR,
- dodanie elementów treningu świadomości sytuacyjnej i odporności na stres związane z brakiem wiedzy na temat stanu osoby poszkodowanej,
- kompatybilność z dominującym na rynku systemem VR, OpenXR, oraz obsługa różnych rodzajów kontrolerów,
- przeprowadzenie testów i uzyskanie pozytywnego odbioru funkcjonalności programu przez przedstawicieli zawodów związanych z udzielaniem pierwszej pomocy.

21.2. Wstęp teoretyczny

21.2.1. Pierwsza pomoc

Pierwsza pomoc jest zbiorem czynności wykonywanych w razie nagłej potrzeby w przypadku urazu, wypadku lub ataku choroby. Czynności te wykonuje się w celu ochrony zdrowia i życia poszkodowanego do czasu przybycia wykwalifikowanej pomocy. Pomocy przedmedycznej udziela się w celu zminimalizowania niepożądanych następstw zdarzenia oraz gdy czas oczekiwania na służby zwiększyłby prawdopodobieństwo wystąpienia tych następstw [1]. Pierwsza pomoc jest dokładnie definiowana jako zespół czynności ratunkowych, które są wykonywane przez bezpośrednich lub pośrednich świadków zdarzenia [2].

21.2.2. Czynności ratownicze

Są to działania wykonywane przez ratownika lub osobę, która udzielając pierwszej pomocy, prawnie zyskuje status ratownika [3]. Zakres oraz kolejność czynności ma szczególne znaczenie dla powodzenia akcji ratowniczej, stąd w trakcie szkoleń położony jest nacisk na wykształcenie świadomości sytuacyjnej i odporności na działanie w stresie.

Do podstawowego zakresu czynności ratowniczych należą:

- sprawdzenie i zabezpieczenie miejsca zdarzenia,
- sprawdzenie stanu poszkodowanego,
- wezwanie pomocy,
- wykonywanie czynności ratunkowych ratujących życie,
- wykonywanie pozostałych czynności zależnych od stanu poszkodowanego,
- ułożenie poszkodowanego w pozycji bezpiecznej, jeśli zachodzi taka potrzeba [4].

21.3. Aspekty prawne

Udzielanie pierwszej pomocy uregulowane jest przez polskie prawo. Jest to obowiązek każdej osoby, która takiej pomocy może udzielić bez narażania samego siebie lub osób postronnych [5]. Należy też wiedzieć, że przestępstwa nie popełnia osoba, która nie udzieli pomocy komuś, kto wymaga zabiegu lekarskiego lub w warunkach, gdy taka pomoc może być udzielona przez odpowiednie instytucje lub osoby do tego powołane [6]. Można też odstąpić od udzielania pomocy w przypadku złego samopoczucia lub gdy nie czujemy się odpowiednio przeszkoleni [7].

21.4. Dysproporcje w dostępie do pierwszej pomocy

Istniejące prace naukowe wskazują występujące zjawisko tak zwanej dysproporcji w dostępie do pierwszej pomocy. Problem ten jest poważny, jednak nie jest powszechnie znany, a samo zjawisko ma dwa podłoża. Pierwsze z nich to różnice wynikające z płci osoby udzielającej pierwszej pomocy [8]. Badania pokazały, że w porównaniu do mężczyzn kobiety gorzej radzą sobie w roli ratownika, a także w sytuacjach stresowych [9]. Średnio szybciej też tracą siły podczas przeprowadzania resuscytacji krążeniowo-oddechowej. Występowały także problemy z przenoszeniem czy zmianą pozycji przytomnych i nieprzytomnych poszkodowanych. W przeciwieństwie do mężczyzn kobiety lepiej za to radzą sobie z wieloma zadaniami naraz, wykazują się lepszą podzielnością uwagi i wielozadaniowością.

Drugi problem powiązany był z płcią i wiekiem osób poszkodowanych. W badaniach kobiety, dzieci oraz osoby starsze otrzymywały pierwszą pomoc rzadziej niż dorośli mężczyźni [10]. Jako przyczyny wskazywano: inaczej wyglądający zawał serca w przypadku kobiet (brak charakterystycznego klucza w klatce czy chwytania „za serce”) [11], strach ratowników przed uszkodzeniem klatki piersiowej osoby starszej [12] czy przed dotknięciem stref intymnych kobiet, braki w wiedzy w przypadku udzielania pomocy dzieciom i niemowlakom [13]. Problemy te wynikają pośrednio z zastosowania podczas szkoleń fantomów o męskim torsie, natomiast fantomy dziecięce czy damskie prawie nie występują. W trakcie samych kursów rzadko porusza się też temat usuwania odzieży poszkodowanych, co ma wpływ na przełamanie bariery wstydu czy strachu przed oskarżeniami o molestowanie.

21.4.1. Wirtualna rzeczywistość

Rzeczywistość wirtualna jest cyfrowym obrazem trójwymiarowym stworzonym przy użyciu techniki informatycznej. Do poprawnego działania wymaga specjalnych gogli z ekranami, soczewkami, żyroskopem i akcelerometrem wraz z czujnikami położenia. Środowisko VR przypomina monitor w kształcie sfery, w której centrum znajduje się głowa użytkownika. Przy poruszaniu przez użytkownika głową gogle, dzięki odpowiednim czujnikom, otrzymują informację, o jaki kąt przesunąć obraz. W ten sposób imituje się złudzenie obecności w świecie wirtualnym. Użytkownik nie powinien jednak patrzeć na płaski ekran, ponieważ taki rodzaj wyświetlania obrazu nie ukazuje głębi przestrzeni. W tym celu w goglach znajdują się dwa ekrany, które wyświetlają przesunięty obraz. Całość obserwowana jest przez soczewki, dzięki którym symulowane jest widzenie stereoskopowe [14].

Na całość odczuć wirtualnego świata poza obrazem składają się też inne, dodatkowe elementy. Dźwięk oraz związane z nim doznania w dużym stopniu wpływają na ogólny odbiór oraz tzw. immersję, czyli poczucie zanurzenia w VR. Jest to drugi w kolejności najważniejszy element środowiska wirtualnego. Warto uwzględnić również dwa kolejne zmysły – węch oraz dotyk. Póki co zapachy pojawiają się w VR raczej jako ciekawostka i rzadko występują poza typowymi prezentacjami możliwości, za to dotyk jest wykorzystywany znacznie częściej. Wszędzie tam, gdzie użytkownik wchodzi w interakcję ze światem wirtualnym, potrzebna jest informacja zwrotna. Jest ona przekazywana przez kontrolery umieszczone na dłoniach. Kontrolery to urządzenia, za pomocą których wchodzi się w interakcję ze światem wirtualnym. Zawierają szereg przycisków, sensorów oraz generatorów

wibracji. Obecnie najbardziej zaawansowanymi kontrolerami na rynku konsumenckim są Valve Index Knuckles [16], które były używane do prac nad niniejszym projektem.

21.4.2. Immersja

Immersja jest procesem zanurzania się w świecie wirtualnym lub fantastycznym. Jest to utrata percepcji, czyli postrzegania świata realnego, gdzie całość uwagi skupiona jest na obiekcie wirtualnym lub wyobrażonym, a bodźce dochodzące ze źródeł innych niż wirtualne są częściowo ignorowane przez mózg [15]. W przypadku VR immersja daje wrażenie realnej obecności w świecie wirtualnym i mimowolnego odczuwania związanych z nim emocji. Im więcej bodźców zostanie zasymulowanych dla większej liczby zmysłów, tym lepszy efekt zostanie uzyskany. W miarę przebywania w VR ludzki mózg zaczyna się adaptować do nowych warunków. Brak niektórych bodźców (takich jak np. odczuwanie wiatru) przestaje być zauważalny, a inne ulegają wzmocnieniu. Mózg jest też w stanie wytworzyć iluzję odczuwania bodźca, jeżeli użytkownik takiego odczucia się spodziewa. Immersja pozwala także oszukiwać mózg w celu wywołania reakcji mimowolnych, takich jak strach czy stres, które wytwarzane są przez mózg na podstawie wirtualnych bodźców wizualnych czy też dźwiękowych [17].

21.5. Wirtualna rzeczywistość w edukacji

W pracy [20] zwraca się uwagę na model ucznia XXI wieku. Jest to osoba, która chce uczyć się przez aktywny udział w zajęciach, zabawę, interaktywność oraz manipulacje przedmiotami. Cyfrowe formy nauki poprzez VR zaspokajają potrzeby kreatywnego i niemonotonnego zdobywania wiedzy. VR w edukacji nie jest czymś nowym. Nagrana implementacja cyfrowego systemu VR pojawiła się w 1966 roku w formie symulatora do celów szkoleniowych dla US Air Force¹. Technologia ta pozostawała niedostępna dla sektora publicznego do roku 1970. W 1991 roku firma Virtuality Group wydała serię gier zręcznościowych [22]. Jednak gry te okazały się niepopularne, czego efektem było zaprzestanie produkcji. W lipcu 1995 roku Nintendo wypuściło własny system gier oparty na VR, *The Virtual Boy* [23]. To również okazało się komercyjnym niepowodzeniem, a sprzęt został wycofany ze sprzedaży pół roku później.

W pracy [18] badany był wpływ zastosowania VR w edukacji. Przetestowano ponad 100 różnych aplikacji z szerokiego zakresu dziedzin. Badacze podzielili programy z uwagi na ich zastosowanie. Były to między innymi: symulacja, trening, dostęp do limitowanych zasobów i nauczanie na odległość. Autorzy wypunktowali następujące czynniki czyniące z VR dobre narzędzie edukacyjne:

- immersyjność, która sprawiała, że uczniowie chętniej dłużej pozostawali w środowisku edukacyjnym i nie chcieli go opuszczać; był to jednocześnie najczęściej wspomniany przez uczestników badania czynnik pozytywny; „poczucie obecności” pozwalało uczniom lepiej skupić się na temacie,
- motywacja – VR zdecydowanie poprawiała chęć uczniów do uczestnictwa w zajęciach.

¹<https://mindmatters.ai/2020/06/vr-was-invented-by-an-air-force-engineer>

Autorzy cytują kilka źródeł badań nad motywacją i VR, w których stwierdzono, że:

- lepiej zmotywowani uczniowie mają tendencję do lepszego uczenia się [24],
- uczniowie są zazwyczaj bardziej zmotywowani aplikacjami graficznymi 3D niż 2D [25],
- ciągłe korzystanie z VR może poprawić zarówno motywację uczniów, jak i zapamiętywanie informacji na dłużej [26].

Cechy te sprawiają, że zastosowanie VR do nauki tak skomplikowanego i wymagającego tematu jak pierwsza pomoc jest uzasadnione i może przynieść zauważalne efekty. Studenci w środowisku wirtualnym lepiej przyswoją wiedzę, a symulowane zdarzenia sprawią, że będą mogli ją wykorzystać w praktyce bez obaw czy zawahania [19, 21].

21.6. Projekt i wykonanie

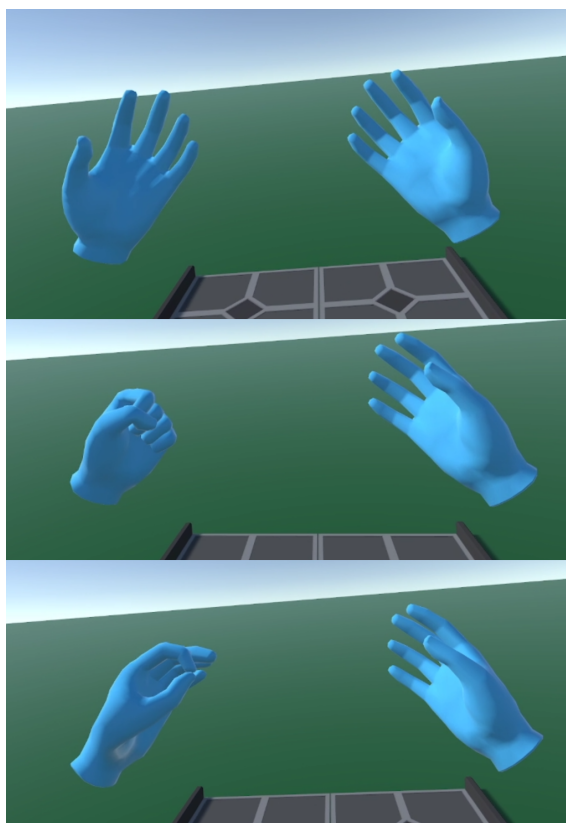
21.6.1. System przemieszczania się

Zaimplementowany system przemieszczania się działa na podstawie zlokalizowania położenia kamery (głowy) w układzie kartezjańskim. Pozycję tę można zmieniać na dwa sposoby – poruszając się fizycznie po pokoju lub przy pomocy joysticka umieszczonego pod kciukiem na lewym kontrolerze (w przypadku osoby praworęcznej). Ze zmianą tych współrzędnych związany jest też ruch niewidzialnego cylindra o średnicy i wysokości odpowiadających wymiarom ciała stojącego człowieka. Był ten zachowuje się jak bariera, która nie pozwala ćwiczącemu przenikać przez obiekty umieszczone w świecie wirtualnym.

Obrotem postaci steruje się w podobny sposób – obracając się fizycznie wokół własnej osi lub poprzez poruszenie joysticka umieszczonego pod kciukiem, tym razem na prawym kontrolerze (w przypadku osoby praworęcznej). W celu uniknięcia występowania choroby lokomocyjnej związanej ze stałym obrotem zastosowano obrót skokowy. Metoda ta polega na obróceniu kamery o zadany kąt w momencie pochylenia drążka w lewo lub w prawo. Obrót ten jest na tyle szybki, że zjawisko obrotu nie jest rejestrowane przez mózg, co przekłada się na brak zawrotów głowy [33].

21.6.2. System interakcji

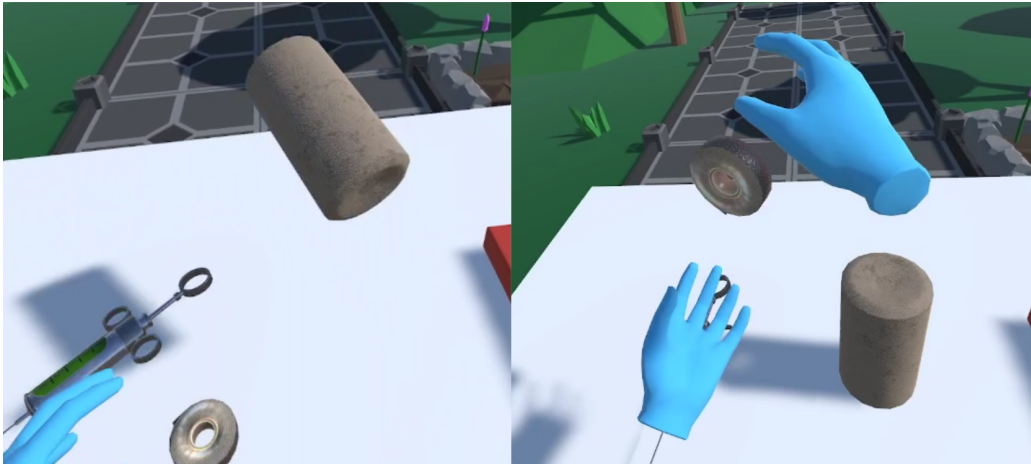
Kolejnym ważnym czynnikiem świata wirtualnego jest możliwość wchodzenia w interakcję z istniejącymi w nim obiektami. Technika poruszania dłońmi zbliżona jest do tej stosowanej w przypadku ruchu ciała. Współrzędne punktu w układzie kartezjańskim sparowane są z lokalizacją kontrolera w świecie rzeczywistym. Z punktem tym połączony jest model dłoni (rysunek 21.1), na który naniesiono siatkę kolizji, uniemożliwiającą przenikanie dłoni przez obiekty. Siatka ta dzieli kształt z modelem dłoni, dzięki czemu miejsce kolizji jest intuicyjne, tzn. następuje w miejscu, gdzie dłoń się znajduje.



Rysunek 21.1. Zrzuty ekranu przedstawiające model dłoni

Następnym krokiem było umożliwienie trenującemu chwytania przedmiotów (rysunek 21.2). W tym celu zastosowano rozszerzenie *XRGrabInteractable*, które powoduje, że wybrane przedmioty mogą być podnoszone. Chwyt następuje przez spełnienie dłonią określonych warunków w obrębie siatki przedmiotu, jak i na samym kontrolerze. Proces ten to sekwencja następujących po sobie zdarzeń, która przebiega w sposób następujący. Rzeczywisty chwyt dłonią wykrywany jest przez czujnik kontrolera, który wysyła sygnał do programu. Program, rejestrując informację, emuluje ją jako wciśnięcie przycisku, co wykrywane jest przez skrypt dłoni wirtualnej. Skrypt, rejestrując zmianę statusu flagi chwytu, uruchamia dwie funkcje. Pierwsza odpowiada za animację chwytu dłoni wirtualnej, natomiast druga zawiera warunek sprawdzający obecności dłoni w obszarze przedmiotu o statusie `interactable == true`. Jeśli warunek chwytu zostanie spełniony, to współrzędne przedmiotu zaczynają zmieniać się zgodnie ze zmianą położenia dłoni, będąc jedynie przesuniętymi w przestrzeni o odległość dzielącą punkt położenia dłoni i środek przedmiotu. Tego typu rozwiązanie powodowało poważny problem, który mógł wytrącić ćwiczącego z immersji. Wirtualna dłoń nie znajdowała się w spodziewanym miejscu chwytu, lecz zawsze pozostawała w domyślnym ułożeniu w stosunku do wirtualnego punktu chwytu, który znajduje się w środku modelu. To powodowało nienaturalny wygląd dłoni wirtualnej i jednoczesny spadek immersyjności. Problem ten mógł być rozwiązany poprzez przygotowanie odrębnych animacji ułożenia dłoni w zależności od sposobu chwytu

i rodzaju przedmiotu. Metoda ta okazała się jednak zbyt skomplikowana i pracochłonna, dlatego zdecydowano się na znacznie prostsze rozwiązanie, szeroko znane autorowi z innych produkcji VR. Sposób polegał na dodaniu kolejnej funkcji, która uruchamiana w momencie wykrycia chwytu ukrywała całkowicie teksturę dłoni, przez co przed oczami poruszał się sam chwytany przedmiot. Mogłoby się wydawać, że jest to rozwiązanie mało immersyjne, jednakże jego popularność [30–32] świadczy o jego dobrej użyteczności. Uwaga ćwiczącego skupiona jest na chwyconym przedmiocie, a brak dłoni często nawet nie był zauważany przez testerów.

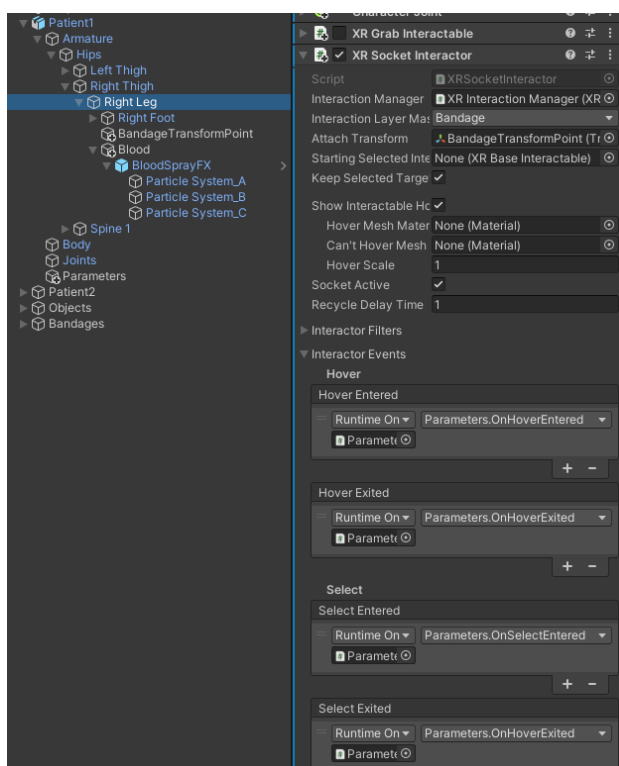


Rysunek 21.2. Zrzuty ekranu przedstawiające chwytanie przedmiotów

Aby wprowadzić wspomniane wcześniej rozwiązanie, zaimplementowano klasę `HideOrShow`, która ukrywa model dłoni w momencie chwytania przedmiotów.

21.6.3. Gniazda (ang. *sockets*)

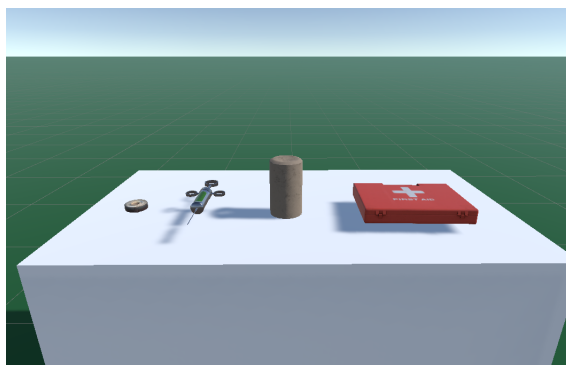
Gniazda są punktami w przestrzeni, do których osoba ćwicząca może przyłączać trzymane przedmioty. Połączenie odbywa się poprzez zbliżenie trzymanego rekwizytu do obszaru detekcji będącego pewnym otoczeniem geometrycznym punktu gniazda. Puszczanie przedmiotu spowoduje zapisanie jego współrzędnych i uniemożliwi zmianę położenia. W celu umieszczenia gniazda w wybranym miejscu zastosowano rozszerzenie `XRSocketInteractor`, które sprawia, że w środku modelu pojawia się punkt, do którego przyłączane są przedmioty. Następnie punkt ten należy obrócić w taki sposób, aby przyłączony przedmiot znajdował się w pożądanym położeniu względem modelu, do którego jest przyłączany. Gniazda mogą też zmieniać położenie przedmiotu, obracając i skalując jego model według potrzeby. Ważną funkcją jest też zastosowanie etykiet, dzięki którym gniazdo będzie przyjmować tylko przedmioty opatrzone taką samą etykietą co gniazdo. Narzędzie to zostało wykorzystane między innymi w scenariuszu tamowania krwawienia, gdzie zakłada się bandaż na kończynę. Na rysunku 21.3 przedstawiono panel konfiguracji gniazda.



Rysunek 21.3. Zrzut ekranu przedstawiający panel konfiguracji gniazda

21.6.4. Bandaże

Bandaże są przedmiotami (rysunek 21.4) możliwymi do podniesienia przez ćwiczącego, dającymi się umieścić w miejscu rany, zatrzymując krwawienie. Wykorzystany model bandaża dostępny był w zasobach *Unity*. Przedmiot opatrzono etykietą `bandage` oraz naniesiono nań skrypt `XRGrabInteractable` umożliwiający podnoszenie przedmiotu. Skrypt `Rigidbody` nadaje przedmiotowi masę oraz umożliwia włączenie dla przedmiotu oddziaływań fizycznych, na przykład grawitacji. `MeshCollider` odpowiada za włączenie kolizji, przez co bandaż nie przenika przez inne obiekty znajdujące się w świecie wirtualnym.



Rysunek 21.4. Zrzut ekranu przedstawiający przykładowe przedmioty

21.6.5. Manekiny (ang. *ragdolls*)

Manekiny (rysunek 21.5) z zasobów *Unity* używane w programie mają podstawowe cechy, dzięki którym można wykonywać na nich proste czynności. Najważniejszym czynnikiem było nadanie im masy oraz umożliwienie wchodzenia w interakcję. Manekiny można przesuwać i zmieniać ich ułożenie, ponieważ zachowują się bezwładnie niczym nieprzytomna osoba.



Rysunek 21.5. Zrzut ekranu przedstawiający manekin leżący na ławce

Kolejną zaimplementowaną funkcją był skrypt **Parameters**. Skrypt ten odpowiada za symulację wszystkich podstawowych funkcji życiowych, które potrzebne są do przeprowadzenia podstawowego badania fizykalnego. W celu konfiguracji nowego manekina należy w pole skryptu wprowadzić ilość krwi oraz ciśnienie górne i dolne (rysunek 21.6).

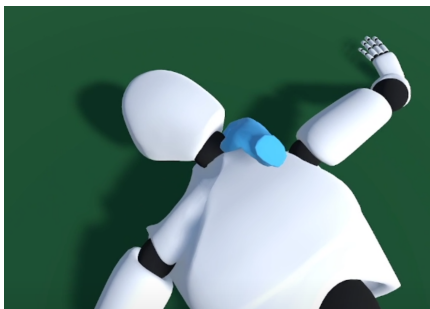


Rysunek 21.6. Zrzut ekranu przedstawiający okno konfiguracji parametrów manekina

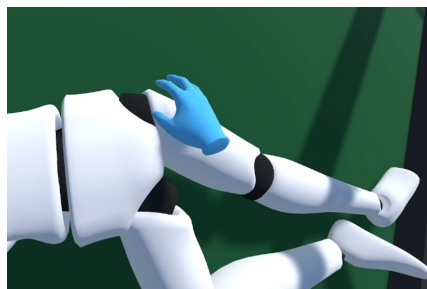
Na podstawie tych danych skrypt wyznacza tempo bicia serca, symulując wyczuwalne tętno, np. w odcinku szyjnym. W rytmie tętna dochodzi też do intensywnego krwawienia z tętnicy. Manekiny posiadają także skrypty wytwarzające drgania kontrolera w przypadku złamanych kończyn.

21.6.6. Sprawdzanie parametrów, badanie fizykalne

Badanie fizykalne jest podstawową metodą diagnostyczną, którą stosuje się po rozmowie z poszkodowanym (jeśli jest przytomny). Zbierania informacji dokonuje się między innymi poprzez palpację (obmacywanie), oglądanie, opukiwanie czy osłuchiwanie [27]. W obecnej wersji programu skupiono się na oglądaniu i palpacji, ponieważ metody te mogą zostać użyte przez osoby przypadkowe oraz nie wymagają zaawansowanego sprzętu czy specjalistycznej wiedzy medycznej. Oglądanie manekina może dostarczyć informacji o krwawieniu czy nienaturalnie wykręconych kończynach. Więcej wiadomości dostarcza natomiast obmacywanie. Manekinowi można sprawdzić puls na tętnicy szyjnej oraz wykryć złamane kończyny przez przesuwanie po niej dłonią. Symulacja pulsu wykorzystuje skrypt parametrów manekina poprzez powiązanie z nim odcinka szyjnego. Gdy dłoń ratownika znajdzie się w obszarze szyjnym (rysunek 21.7), wysłany jest (albo nie) sygnał do kontrolera, który generuje wibracje w rytmie bicia serca. Sprawdzanie kończyny polega na dotykaniu dłonią kończyny na całej jej długości (rysunek 21.8). Wykrycie złamania sygnalizowane jest przez kontroler za pomocą wibracji.



Rysunek 21.7. Zrzut ekranu przedstawiający sprawdzanie pulsu



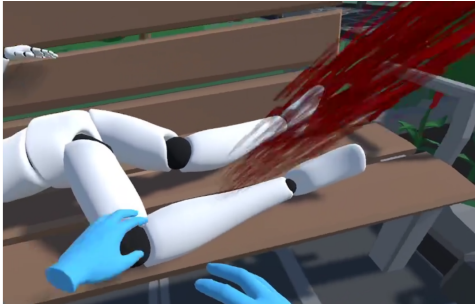
Rysunek 21.8. Zrzut ekranu przedstawiający sprawdzanie kończyny pod kątem złamań

21.6.7. Pozycja bezpieczna

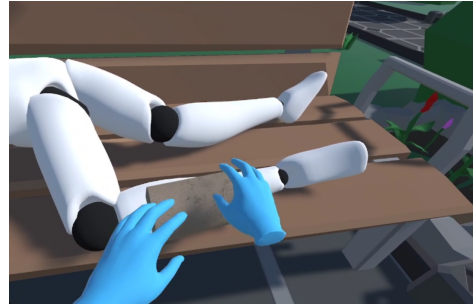
Osobę nieprzytomną, bez zaburzeń oddechowych i urazów ciała należy ułożyć w pozycji ratowniczej określonej jako bezpieczna (inaczej boczna ustalona) [28]. Pozycja ta pozwala zachować drożność dróg oddechowych, zapobiega zapadaniu się języka na tylną ścianę gardła, a także przedostawaniu się do układu oddechowego ciała obcych, wymiocin czy krwi. Istnieją również przeciwwskazania w układaniu poszkodowanych w pozycji bezpiecznej. Są to między innymi zakłócenia oddechowe, urazy kręgosłupa i kości czaszki, urazy klatki piersiowej i brzucha, złamania kończyn i miednicy. Program pozwala zmieniać ułożenie fantomów, a poprawność stosowania pozycji bocznej oceniana jest przez osobę prowadzącą szkolenie. Poszkodowanym nadano masę, dzięki czemu ich ciała zachowują się jak ciała nieprzytomnych osób.

21.6.8. Tamowanie krwawienia

Symulacja krwawienia polega na generowaniu cząsteczek krwi oraz zliczaniu ilości utraconego płynu. Krwawienie może zostać powstrzymane przez nałożenie bandaża na ranę. Nastąpi wtedy zatrzymanie emisji cząsteczek (rysunek 21.9 oraz 21.10).



Rysunek 21.9. Zrzut ekranu przedstawiający tamowanie krwawienia



Rysunek 21.10. Zrzut ekranu przedstawiający tamowanie krwawienia

Krwawienie zdefiniowane jest w skrypcie `Parameters` flagą `isBleeding`. Miejsce krwawienia zdefiniowane jest jako obiekt klasy `GameObject`, na który nałożono efekty cząsteczkowe krwi. Status `isBleeding == true` sprawi, że od licznika będzie odejmowana pewna wartość, aż do wykrwawienia, co zmieni status flagi `isSaved` na `false`, a akcja ratunkowa zakończy się niepowodzeniem. Miejsce krwawienia jest jednocześnie gniazdem przyjmującym obiekty z etykietą `bandage`. Nałożenie bandaża zmieni status flagi `isBleeding` na `false`, blokując utratę krwi przez poszkodowanego.

21.6.9. Usztywnianie złamań

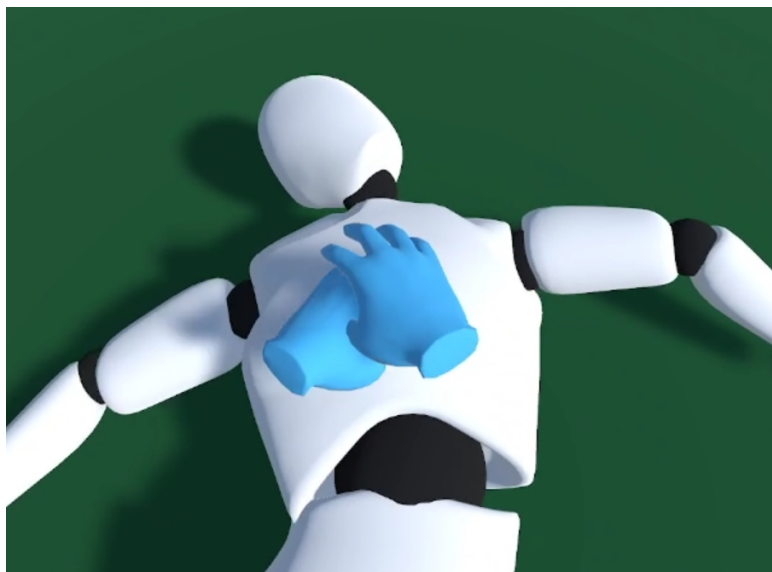
Złamanej kończynie odpowiada skrypt z flagą `isBroken` definiującą złamanie. Gdy `isBroken == true`, program uruchomi drgania kontrolera, kiedy dłoń ćwiczącego znajduje się w obszarze złamanej kończyny. Działa tu ten sam mechanizm co w przypadku badania tętna, jednak tym razem drgania generowane są tylko wtedy, kiedy dłoń pozostaje w ruchu wzdłuż badanej kończyny. Wykrycie złamania zmieni status kolejnej flagi w skrypcie, która odblokowuje gniazdo umożliwiające założenie stabilizatora. Założenie stabilizatora zmieni status flagi `isBroken` na `false`.

21.6.10. Resuscytacja krążeniowo-oddechowa

Resuscytacja krążeniowo-oddechowa (RKO) polega na uciskaniu klatki piersiowej poszkodowanego przy pomocy obu dłoni (rysunek 21.11). Uciskanie należy wykonywać w odpowiednim tempie wynoszącym około 100/min.

Czynność ta została w uproszczony sposób przeniesiona do programu w postaci skryptu RKO zawierającego dwa zagnieżdżone warunki.

Pierwszy sprawdza, czy dłonie ratownika są złączone ze sobą w poprawny sposób. Drugi weryfikuje obecność obu dłoni w obszarze klatki piersiowej. Jeśli oba warunki są spełnione, wtedy do zmiennej `pressCounter` (licznik uciśnień) zostanie dodana wartość 1.



Rysunek 21.11. Zrzut ekranu przedstawiający uciskanie klatki piersiowej

`pressCounter` zostanie automatycznie wyzerowany, jeśli częstotliwość uciśnień będzie znacząco większa albo mniejsza niż 100/min. Po wykonaniu 30 poprawnych uciśnień status flagi `isBreathing` zostanie zmieniony na `true`. Skrypt zawiera też licznik powiązany ze skryptem `Parameters` i odliczający czas do zatrzymania krążenia. Jeśli jego wartość osiągnie zero, wtedy status flagi `isSaved` zostanie zmieniony na `false`, a akcja ratunkowa zakończy się niepowodzeniem. Licznik ten przypomina ten zastosowany w skrypcie krwawienia. Zostanie on zatrzymany, gdy status flagi `isBreathing` wynosi `true`. Status tej flagi ma wpływ również na krwawienie. Jeśli na ciele poszkodowanego nie zostaną zatamowanie krwawienia, to uciskanie klatki piersiowej będzie powodować wyciek krwi w tempie uciskania [29].

21.7. Film przedstawiający działanie programu

Krótki materiał filmowy prezentujący działanie programu można obejrzeć pod adresem https://youtu.be/9vxYEwmhE_w.

21.8. Podsumowanie

Udało się zrealizować wszystkie założone cele pracy, a sam symulator został przetestowany przez reprezentantów zawodów związanych z udzielaniem pomocy medycznej – policjanta, ratownika medycznego oraz żołnierza. Wszyscy trzej uczestnicy badania wykazali duże zainteresowanie programem. W ciągu około godziny każdy z uczestników zapoznał się z zaimplementowanymi funkcjami oraz możliwościami rozwoju systemu. Podczas testów programu uczestnicy mieli możliwość zapoznania się z najczęściej spotykanymi scenariuszami pierwszej pomocy, które są przedstawiane w symulatorze. W zaimplementowanych

scenariuszach uwzględniono różnorodne zdarzenia, takie jak opatrywanie ran, udzielanie pomocy osobie nieprzytomnej, prowadzenie resuscytacji krążeniowo-oddechowej i inne podstawowe procedury ratunkowe. Policjant, ratownik medyczny oraz żołnierz docenili korzyści wynikające z wykorzystania programu do szkolenia i doskonalenia umiejętności z zakresu pierwszej pomocy, co stanowi solidną podstawę do dalszego rozwoju projektu.

Bibliografia

- [1] Ministerstwo Zdrowia, Pierwsza pomoc. Dostępny online: <https://www.gov.pl/web/zdrowie/pierwsza-pomoc> (dostęp: 02-12-2022).
- [2] Dz. U. 2021, poz. 2053, Ustawa z dnia 8 września 2006 r. o Państwowym Ratownictwie Medycznym. Dostępny online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20210002053> (dostęp: 02-12-2022).
- [3] Ministerstwo Edukacji i Nauki, Podstawowe zasady postępowania ratownika na miejscu wypadku, Zintegrowana Platforma Edukacyjna, Dostępny online: <https://zpe.gov.pl/a/podstawowe-zasady-postepowania-ratownika-na-miejscu-wypadku/Ds4kwSU3E> (dostęp: 02-12-2022).
- [4] Pogotowie Ratunkowe Tarnów, Łańcuch przeżycia, podstawowe czynności ratownicze, Dostępny online: <http://pspr.tarnow.pl/media/assets/pierwsza-pomoc/bls.pdf> (dostęp: 10-12-2022).
- [5] Kodeks karny, Art. 162. par. 1., Dostępny online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20220001138> (dostęp: 22-12-2022).
- [6] Erkao, Podstawy prawne udzielania pierwszej pomocy, Dostępny online: <https://kursypierwszejpomocy.com.pl/pierwsza-pomoc-prawo> (dostęp: 22-12-2022).
- [7] Kodeks karny, Art. 162. par. 2., Dostępny online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20220001138> (dostęp: 22-12-2022).
- [8] Blewer A., McGovern S., Schmicker R., May S., Morrison, L., Aufderheide T., Daya M., Idris A., Callaway C., Kudenchuk P., Vilke G., Abella B., Gender Disparities Among Adult Recipients of Bystander Cardiopulmonary Resuscitation in the Public, *Circulation: Cardiovascular Quality and Outcomes*, **2018**, *11*(8).
- [9] Krammel M., Schnaubelt S., Weidenauer D., Winnisch M., Steininger M., Eichelter J., Hamp T., van Tulder R., Sulzgruber P., Gender and age-specific aspects of awareness and knowledge in basic life support, *PLOS ONE*, **2018**, *13*(6).
- [10] Amacher S., Schumacher C., Legeret C., Tschan F., Semmer N., Marsch S., Hunziker S., Influence of gender on the performance of cardiopulmonary rescue teams: A randomized, prospective simulator study, *Critical Care Medicine*, **2017**, *45*(7).
- [11] American Heart Association, Warning signs of a heart attack, Dostępny online: <https://www.heart.org/en/health-topics/heart-attack/warning-signs-of-a-heart-attack> (dostęp: 13-12-2022).
- [12] Safety First Aid Training (SFAT) UK, How does a first aid course for children differ from an adult's?. Dostępny online: <https://www.firstaidtraining.co.uk/paediatric-first-aid-course-vs-adults> (dostęp: 13-12-2022).
- [13] Cardio Partners, What are the differences between infant, child, and adult CPR?, Dostępny online: <https://www.aed.com/blog/what-are-the-differences-between-infant-child-and-adult-cpr/> (dostęp: 13-12-2022).
- [14] Howard I., Rogers B., *Binocular Vision and Stereopsis*, Oxford University Press, 1996.
- [15] Barfield W., Zeltzer D., Sheridan T., Slater M., Presence and performance within virtual environments. W *Virtual Environments and Advanced Interface Design*; Barfield W., Furness T., Oxford University Press, Inc., 1995, s. 473.

- [16] Valve Corporation. Kontrolery. Dostępny online: <https://www.valvesoftware.com/pl/index/controllers> (dostęp: 09-12-2022).
- [17] Virtual reality's psychological and behavioral effects. Dostępny online: <https://youtu.be/Cil7OT8bGik> (dostęp: 13-12-2022).
- [18] Kavanagh S., Luxton-Reilly A., Wuensche B., Plimmer B., A systematic review of Virtual Reality in education, *Themes in Science and Technology Education* **2017**, *10(2)*, s. 85–119.
- [19] Helsel S., Virtual reality and education. Myth or reality? *Educational Technology* **1992**, *32(5)*, s. 38–42.
- [20] Elmqaddeem N., Augmented reality and virtual reality in education. Myth or reality? *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)* **2019**, *14*, s. 234–242.
- [21] Mian S., Sellappan P., Asiah L., Nauman S., Usman K., Raza H., Motivating medical students using virtual reality based education. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)* **2020**, *15(2)*, s. 160–174.
- [22] Virtuality ties up Atari deal. Dostępny online: <https://www.independent.co.uk/news/business/virtuality-ties-up-atari-deal-1611632.html> (dostęp: 16-12-2022).
- [23] Historia konsoli Virtual Boy – Time Warp. Dostępny online: <https://youtu.be/1lvBJUF8psU> (dostęp: 16-12-2022).
- [24] Sutcliffe K., Vogus T., Organizing for resilience W: *Positive Organizational Scholarship: Foundations of a New Discipline*, Cameron K., Dutton J., Quinn R., Berrett-Koehler, San Francisco, CA, 2003.
- [25] Limniou M., Roberts D., Papadopoulos N., Full immersive virtual environment CAVETM in chemistry education. *Computers & Education* **2008**, *51*.
- [26] Burdea G., Coiffet P., Virtual reality technology. *Presence* **2003**, *12*, s. 663–664.
- [27] Kinalski R., *Kompendium Rehabilitacji i Fizjoterapii dla Studentów Oddziałów Fizjoterapii Akademii Medycznych*, Elsevier Urban & Partner, 2002.
- [28] Komenda Powiatowa Policji w Kamieniu Pomorskim, Pozycja bezpieczna. Dostępny online: https://kamien.policja.gov.pl/zka/akt_ualnosci/pierwsza-pomoc/pozycja-bezpieczna/6978_Pozycja-bezpieczna.html (dostęp: 22-11-2022).
- [29] Ministerstwo Edukacji i Nauki, Resuscytacja krążeniowo-oddechowa. Dostępny online: <https://zpe.gov.pl/a/resuscytacja-krzeniowo-oddechowa/D1H3G81jq> (dostęp: 18-12-2022).
- [30] Free Lives, GORN. Dostępny online: <https://store.steampowered.com/app/578620/GORN> (dostęp: 18-12-2022).
- [31] Valve, The Lab. Dostępny online: https://store.steampowered.com/app/450390/The_Lab/?l=polish (dostęp: 18-12-2022).
- [32] Schell Games, I expect you to die. Dostępny online: https://store.steampowered.com/app/587430/I_Expect_You_To_Die (dostęp: 18-12-2022).
- [33] Zużewicz K., Fizjologiczne skutki uboczne wykorzystywania technik rzeczywistości wirtualnej. *CIOP-PIB* **2010**.

Zastosowanie urządzeń mobilnych do diagnostyki i rehabilitacji cieśni nadgarstka

inż. Martyna Grygiel
Inżynieria Biomedyczna

dr hab. inż. Mirosław Łątka, prof. uczelni
Katedra Inżynierii Biomedycznej

W pracy dyplomowej przedstawiono rozwinięty system telemedyczny, którego głównym celem jest wspieranie procesu diagnostyki i rehabilitacji pacjentów z zespołem cieśni nadgarstka. System ten składa się z dwóch aplikacji: mobilnej i webowej, skierowanych przede wszystkim do specjalistów medycznych. Aplikacja mobilna umożliwia przeprowadzenie testów diagnostycznych z wykorzystaniem standardowego kwestionariusza diagnostycznego wykorzystywanego przy rozpoznaniu zespołu cieśni nadgarstka oraz elektromiografii powierzchniowej, wykorzystując czujnik z elektrodami przymocowanymi do ciała pacjenta w okolicach dłoni. Ponadto aplikacja umożliwia udostępnianie multimedialnych materiałów dostarczanych przez specjalistów. Aplikacja webowa służy do prezentacji wyników pomiarów oraz umożliwia pobranie tych danych do dalszej analizy. Oba narzędzia są dostępne w języku polskim, ułatwiając korzystanie pacjentom oraz lekarzom. Wynikowy system został sprawdzony na małej grupie testowej i jest gotowy do dalszych badań i analiz.

22.1. Cel i założenia

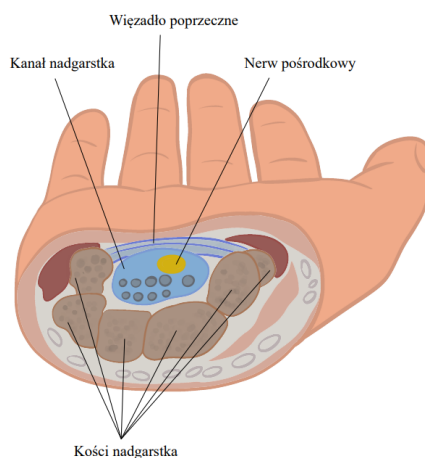
Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- opracowanie projektu systemu telemedycznego wspomagającego diagnostykę i rehabilitację zespołu cieśni nadgarstka,
- implementacja aplikacji mobilnej dostępnej na urządzenia z systemem Android,
- implementacja aplikacji webowej do prezentacji i zarządzania zgromadzonymi danymi,
- zrealizowanie przykładowych pomiarów z wykorzystaniem przygotowanego systemu.

22.2. Wstęp teoretyczny

Zespół cieśni nadgarstka to uciskowa choroba nerwu pośrodkowego. Może wynikać z uszkodzenia nerwu obwodowego lub z mechanicznego ściskania nerwu w obrębie nadgarstka. Dane statystyczne wskazują, że spośród schorzeń związanych z uwięzieniem nerwów zespół cieśni nadgarstka stanowi 90% wszystkich przypadków [1, 2].

Cieśń nadgarstka to struktura kostno-włóknista umiejscowiona w nadgarstku. Granice jego położenia określają między innymi kości nadgarstka [3]. Zaznaczony na rys. 22.1 nerw pośrodkowy (łac. *nervus medianus*) to największy nerw unerwiający grupę mięśni zginaczy kończyny górnej.



Rysunek 22.1. Przekrój poprzeczny nadgarstka na podstawie [1]

Zespół cieśni nadgarstka klasyfikuje się do grupy urazów, których przyczyną jest długotrwałe nadwyreżenie mięśni i ścięgien [5]. Za główny czynnik ryzyka uważane są często powtarzane ruchy nadgarstka, które powodują chroniczne przeciążenie mięśni i ścięgien. Na chorobę narażone są osoby pracujące biurowo z akcesoriami, takimi jak klawiatura lub mające kontakt ze sprzętem wibrującym, na przykład pracownicy budowlani [1]. Występowanie zespołu cieśni nadgarstka może być powiązane między innymi z współistniejącą otyłością czy zaburzeniami metabolizowania witaminy C i B6 [5, 6].

W kontekście objawów grupuje się je głównie ze względu na częstotliwość występowania. Do najbardziej typowych należą: parestezje, drętwienie i ból w okolicy nadgarstka, który może promieniować dalej w kierunku ramienia dotkniętego schorzeniem. W późniejszych stadiach następuje między innymi osłabienie siły chwytu czy osłabienie czucia w obszarze dotkniętej dłoni [7, 8].

Klasyczne podejście diagnostyczne rozpoczyna się od rozpoznania dostrzegalnych przez pacjenta objawów i przeprowadzenia testów prowokujących wystąpienie dolegliwości. Stosuje się również wywiad w postaci na przykład kwestionariusza diagnostycznego. Najpopularniejszym jest Bostoński Kwestionariusz Zespołu Cieśni Nadgarstka, który ma dwie główne części. Pierwsza ocenia nasilenie i częstotliwość objawów związanych z chorobą, a druga polega na ocenie trudności w wykonywaniu konkretnych czynności, takich

jak pisanie. Obydwa aspekty ocenia się w skali od 1 do 5, gdzie wyższe wyniki wskazują na większe nasilenie objawów lub trudności w funkcjonowaniu. Podczas analizy punkty uzyskane w ramach Skali Nasilenia Objawów (ang. *Symptom Severity Scale – SSS*) i Skalę Stanu Funkcjonalnego (ang. *Functional Status Scale – FSS*) traktuje się osobno. Ostateczny wynik jest obliczany na podstawie punktów podzielonych przez liczbę pytań i zaokrąglany do drugiego miejsca po przecinku. Wynik ten jest prezentowany w pięciostopniowej skali, gdzie wyższa wartość oznacza większe prawdopodobieństwo wystąpienia zespołu cieśni nadgarstka [9].

Złotym standardem w dalszych badaniach są testy elektrodyagnostyczne, takie jak badanie przewodnictwa nerwowego (elektro-neurografia) czy elektromiografia igłowa. Badanie elektroneurograficzne polega na pomiarze prędkości przewodzenia czuciowego i ruchowego w nerwie pośrodkowym na poziomie nadgarstka [10]. Elektro-neurografię często uzupełnia się za pomocą elektromiografii igłowej, w której wprowadza się elektrodę igłową w obszar mięśnia odwodziela krótkiego kciuka [11]. Jednak metody te nie są idealnym i samodzielnym narzędziem diagnostycznym ze względu na wieloczynnikowe podłoże ZCN. Często są uzupełniane wykorzystaniem między innymi ultrasonografii. Dodatkowo podejmowane są próby wykorzystania elektromiografii powierzchniowej jako nieinwazyjnej metody diagnostycznej [12].

W związku z szeroko pojętym postępem technologicznym w diagnostyce zespołu cieśni nadgarstka zaczęły pojawiać się również niekonwencjonalne metody wykorzystujące urządzenia mobilne. Niekonwencjonalne podejście diagnostyczne reprezentuje wykorzystanie nowoczesnych technologii między innymi do badań przesiewowych. Do tej grupy zaliczyć można na przykład projekt aplikacji mobilnej na tablet, która opiera swoją funkcjonalność na badaniu ruchomości kciuka [13].

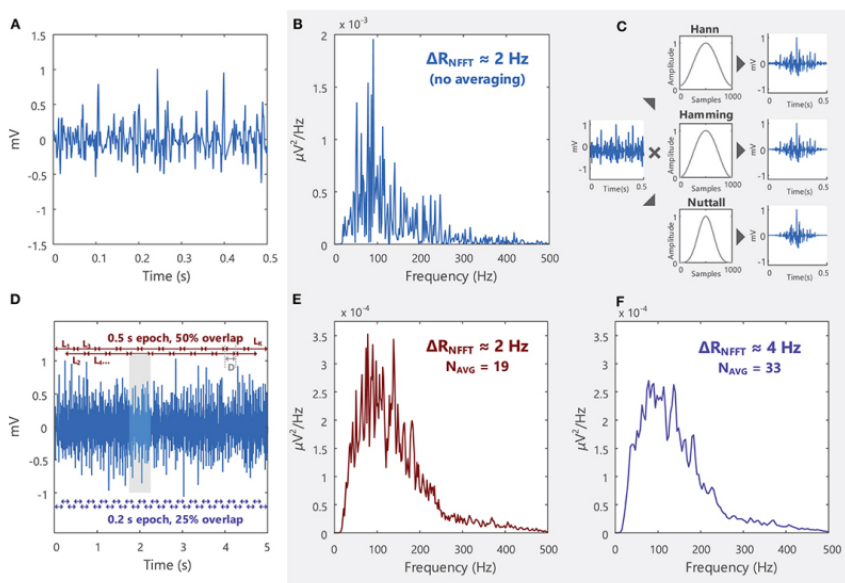
Ze względu na inwazyjność najczęściej wykorzystywanej przy ZCN elektromiografii igłowej podejmowane są próby wykorzystania elektromiografii powierzchniowej. W tej technice korzysta się z elektrod powierzchniowych w celu pomiaru aktywności mięśni. Dotychczas udało się skorelować zmiany parametrów sygnału między pacjentami o stopniu ciężkim i łagodnym zespołu cieśni nadgarstka. Podczas badania osoba, na której przeprowadzano pomiar, wykonywała maksymalny dobrowolny skurcz mięśnia odwodziela krótkiego kciuka. Wynikiem badań było stwierdzenie, że metoda elektromiografii powierzchniowej może wspierać standardowe metody diagnostyczne w przypadku pacjentów z zespołem cieśni nadgarstka o średnim oraz wysokim stadium [12].

U pacjentów z zespołem cieśni nadgarstka prowadzi się leczenie chirurgiczne lub niechirurgiczne w zależności od m.in. stopnia nasilenia objawów. Leczenie zachowawcze obejmuje stosowanie ortezy, terapie fizyczne oraz leki przeciwzapalne. Fizjoterapia oparta na ćwiczeniach ma na celu mobilizację poślizgu nerwu pośrodkowego i rozciąganie tkanek miękkich [14, 15].

Przechodząc do elektromiografii (EMG), która w formie powierzchniowej stanowiła główny element zrealizowanego systemu, jest ona badaniem sygnałów pochodzących z mięśni, czyli ich potencjału czynnościowego. Sygnał EMG jest kontrolowany przez układ nerwowy i zależy od fizjologicznych i anatomicznych właściwości mięśni. Podczas procesu rejestracji EMG głównymi występującymi problemami, które wpływają na czystość sygnału są występujące zniekształcenia i wysoki stosunek szumu do sygnału. Sygnał EMG może

być analizowany zarówno w skali czasowej, jak i częstotliwościowej. Amplituda sEMG (ang. *surface EMG – elektromiografia powierzchniowa*) w dziedzinie czasu może nieść informacje na przykład na temat tego, czy mięsień jest aktywowany. Dziedzina częstotliwości natomiast dostarcza cennych informacji odnośnie zmian prędkości przewodzenia komórek mięśniowych, co stanowi podstawę do oceny zmęczenia mięśni [16].

Analizę częstotliwościową można przeprowadzić na przykład z zastosowaniem transformaty Fouriera. Ze względu na niestacjonarność sygnału często jest on dzielony na krótsze fragmenty, co jest możliwe przy zastosowaniu między innymi metody Welcha, która dokonuje tego podziału i przeprowadza okienkowanie, to znaczy mnoży każdy segment przez funkcję okna (np. Hamminga) i uśrednia wszystkie fragmenty poddane modyfikacji (rys. 22.2) [16].



Rysunek 22.2. A) Sygnał sEMG próbkowany z częstotliwością 2000 Hz w dziedzinie czasu, (B) widmo mocy sygnału w dziedzinie częstotliwości, (C) metoda Welcha dzieli sygnał na okna (pokazany na D), (E) zredukowane fałszywe piki obecne w (B), (F) wygładzenie gęstości widmowej mocy za pomocą wzrostu uśrednień N_{AVG} [16]

W dziedzinie czasu amplitudy surowego sygnału oscyluje losowo wokół wartości 0 V, stąd obliczenie średniej wartości nie niesie żadnych istotnych informacji. Konieczne jest wprowadzenie średniej kwadratowej (ang. *Root Mean Square – RMS*) lub średniej wartości bezwzględnej (ang. *Mean Absolute Value – MAV*). W tym przypadku stosuje się krótkie okna czasowe. Wzrost amplitudy może świadczyć o wyższej aktywności mięśnia, jeśli nie występuje przesłuch z innych mięśni. Warto dodać, że amplitudy sygnału w różnych warunkach pomiarowych, zależnych od na przykład zmęczenia badanego, mogą przyjmować różne wartości. Zatem w dziedzinie czasu należy dodatkowo zastosować odpowiedni punkt odniesienia, na przykład amplitudę podczas maksymalnego dobrowolnego skurczu [16, 17].

22.3. Projekt i wykonanie

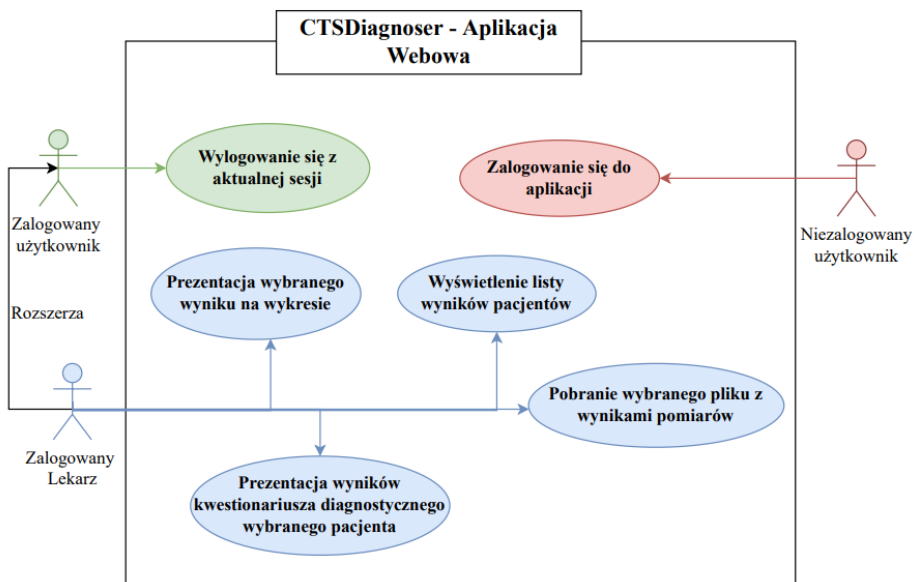
Zrealizowanie systemu rozpoczęto od stawianemu specyfikacji wymagań i wyboru technologii, w których będzie on implementowany. Następnie sporządzony i opisany został schemat działania systemu. Ostatnimi krokami była jego implementacja i wykonanie pomiarów na niewielkiej grupie testowej.

22.3.1. Wymagania

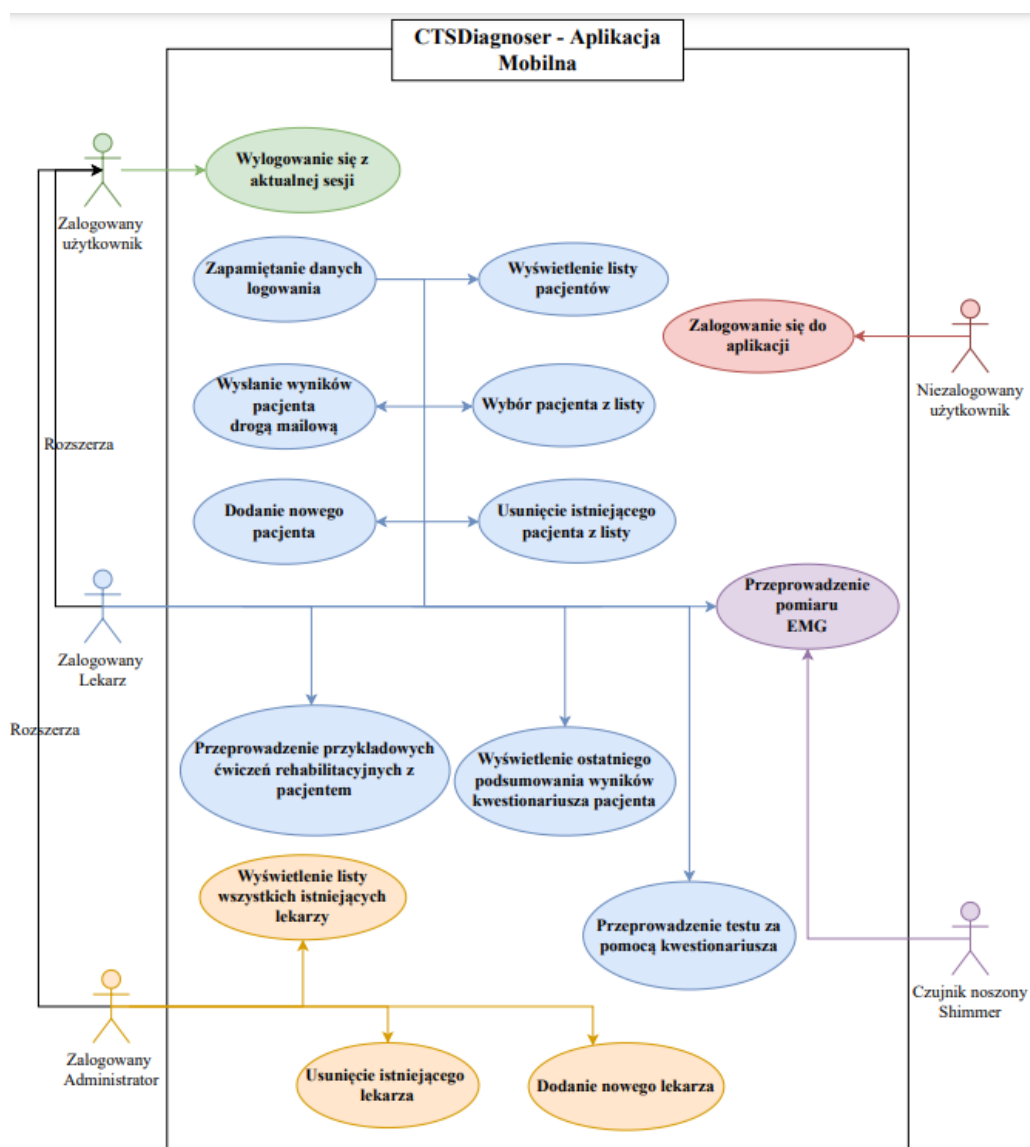
Najważniejsze wymagania zrealizowanego oprogramowania stanowiły:

- możliwość administracji pacjentami z profilu lekarza w aplikacji mobilnej,
- możliwość multimedialnej prezentacji i przesłania nagrań ćwiczeń rehabilitacyjnych przez lekarza,
- prezentacja i dostępność do pobrania lokalnie wyników pacjentów danego lekarza za pośrednictwem aplikacji webowej,
- przeprowadzenie i zapis pomiaru elektromiografii powierzchniowej, jak i kwestionariusza diagnostycznego
- możliwość sprawdzenia w czasie rzeczywistym przebiegu surowego sygnału EMG w aplikacji mobilnej,
- integracja aplikacji z czujnikiem za pośrednictwem Bluetooth i API do komunikacji z czujnikiem Shimmer.

Realizację powyższych wymagań i pełny obraz funkcjonalności, jakie zawarte są za projektowanym oprogramowaniu, prezentują diagramy przypadków użycia, odpowiednio: aplikacji webowej na rys. 22.3 oraz aplikacji mobilnej na rys. 22.4.



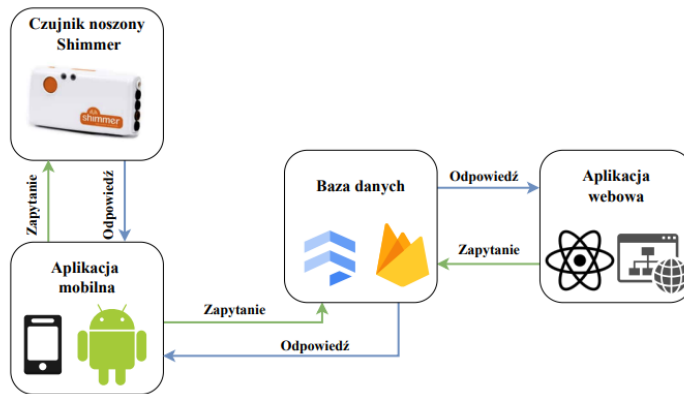
Rysunek 22.3. Diagram przypadków użycia aplikacji webowej



Rysunek 22.4. Diagram przypadków użycia aplikacji webowej

22.3.2. Przegląd oprogramowania

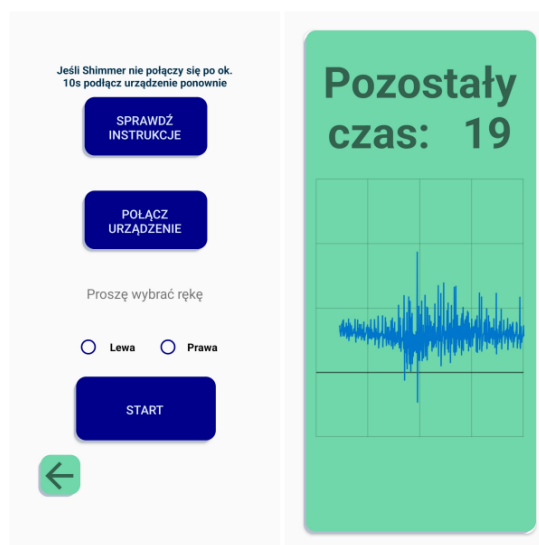
Wybór technologii był powiązany z powszechnością użytkowania i łatwością w obsłudze. Aplikacja mobilna została napisana na urządzenia z systemem Android ze wsparciem od wersji 4.2 do 12. Wykorzystanym językiem programowania była Java. Webowa natomiast została zrealizowana w języku JavaScript i TypeScript wraz z biblioteką React.js. System logowania oparto na Firebase Auth, bazę danych na Firebase Database, a przestrzeń przechowywania danych pomiarowych w chmurze zapewniło Firebase Storage. Komunikację między poszczególnymi elementami systemu zawarto na schemacie (rys. 22.5).



Rysunek 22.5. Diagram przypadków użycia aplikacji webowej

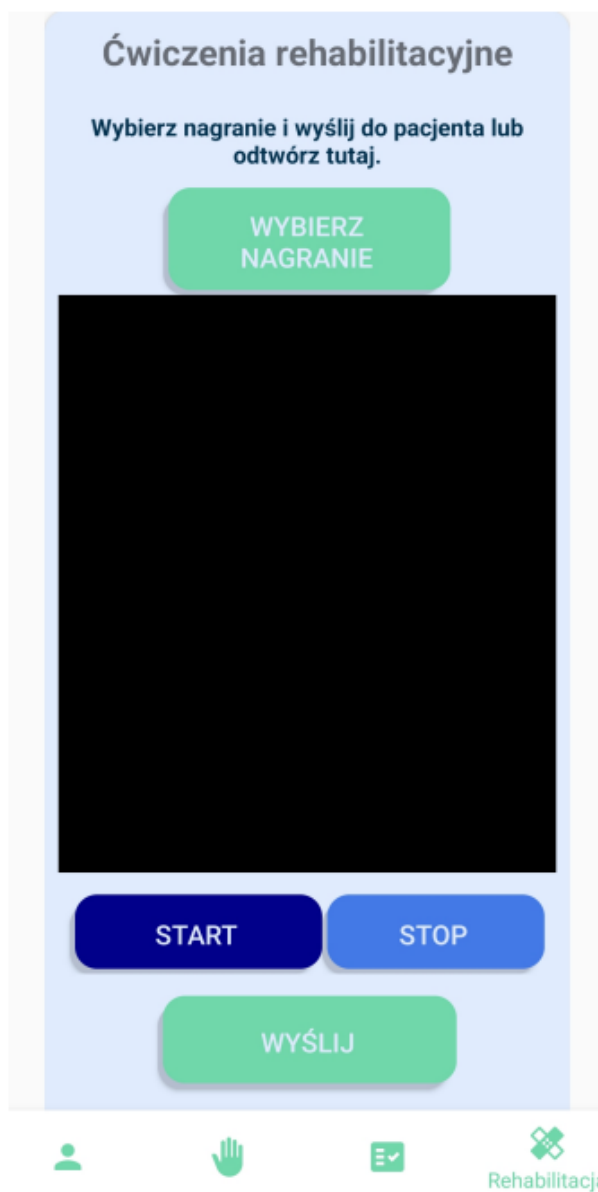
Kluczowy element stanowiła aplikacja mobilna, która odpowiadała za wysyłanie i odbieranie zapytań z czujnika Shimmer oraz przesyłanie i odbieranie danych z bazy Firebase. Baza danych z kolei wysyłała i odbierała zapytania z aplikacji webowej.

Komponent mobilny realizował proces autoryzacji lekarza i administratora. Po zalogowaniu na panelu administratora widniała możliwość dodawania i usuwania lekarzy. Lekarz z kolei miał dostęp do zarządzania pacjentami i prowadzenia pomiarów. Pomiar EMG rozpoczynał się od panelu połączenia z czujnikiem i wyboru badanej ręki (rys. 22.6). Przed właściwym rozpoczęciem pomiaru pojawiało się krótkie okno z odliczaniem do jego rozpoczęcia. Podczas pomiaru widoczny był przebieg surowego sygnału EMG w czasie i czas pozostały do końca badania (rys. 22.6).



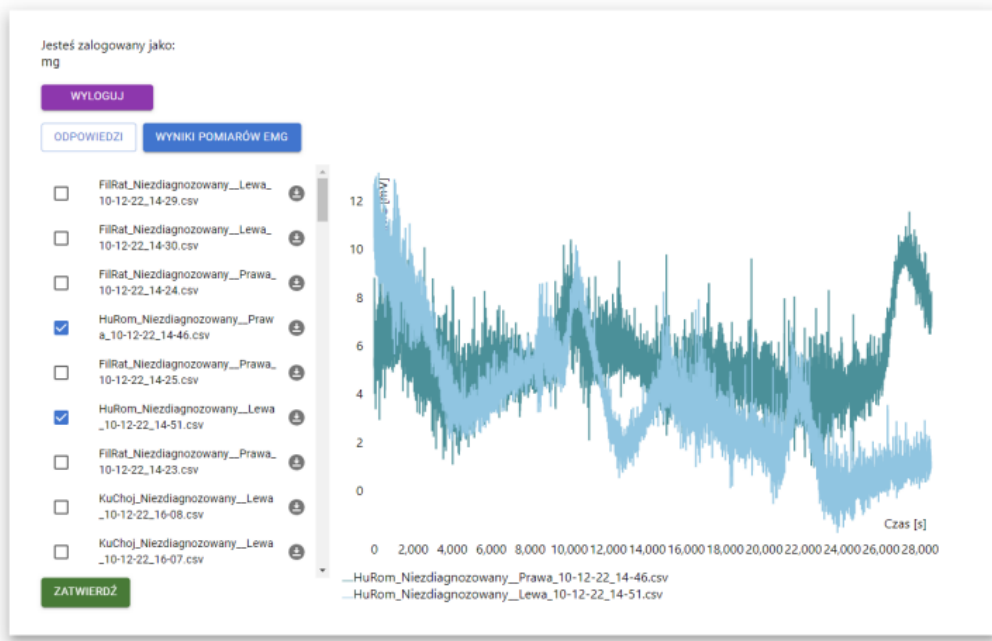
Rysunek 22.6. Od lewej: okno połączenia się z czujnikiem i dostosowania parametrów badania w aplikacji mobilnej, okno podczas realizacji pomiaru

Realizacja elementu rehabilitacyjnego odbywała się poprzez okno możliwości wyboru i przesłania nagrania z dostępnych na urządzeniu (rys. 22.7).



Rysunek 22.7. Okno udostępniania materiałów multimedialnych

Komponent webowy natomiast realizował prezentację i zapis wyników. Główny panel aplikacji webowej został zaprezentowany na poniższym rysunku (rys. 22.8).



Rysunek 22.8. Główny panel aplikacji webowej

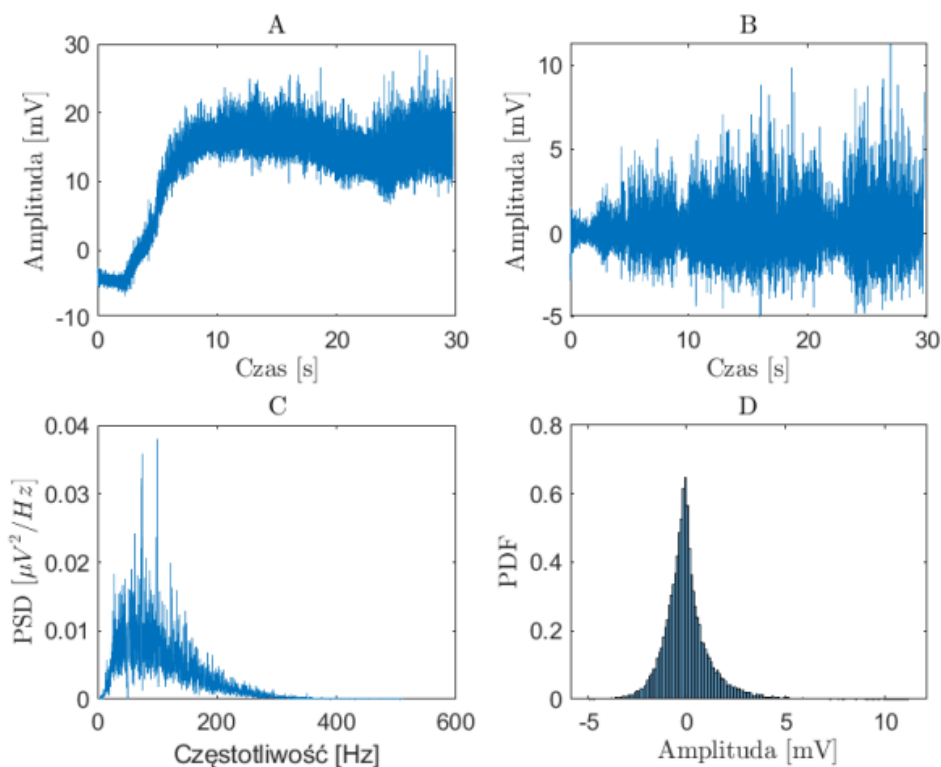
Przeprowadzenie testu diagnostycznego wykorzystującego sEMG opierało się na ustawieniu badanej ręki w stabilnej pozycji i maksymalnym wychyleniu kciuka do pozycji bocznej, a następnie utrzymaniu maksymalnego wychylenia przez 30 sekund. Pomiar powtórzono trzykrotnie dla każdej ręki. Do badania wykorzystane zostały jednorazowe elektrody powierzchniowe. Wszelkie instrukcje wykonywania pomiaru i przygotowania skóry zostały zawarte w aplikacji. Badanymi były 3 niezdiagnozowane osoby w wieku 22, 52 i 75 lat.

22.3.3. Wdrożenie

Aplikacja mobilna w aktualnym momencie rozwoju jest możliwa do wgrania na urządzenia mobilne poprzez jej zbudowanie z wykorzystaniem Android Studio na urządzenia z odblokowanymi opcjami dewelopera lub poprzez wygenerowany plik APK (ang. *Android Application Package*). Aplikacja webowa natomiast została wdrożona za pomocą usługi Firebase Hosting z wykorzystaniem darmowego planu do celów testowych.

22.4. Uzyskane wyniki

Analiza wyników sEMG została przeprowadzona w programie Matlab. Surowy sygnał przefiltrowano z zastosowaniem filtru górnoprzepustowego 5 Hz i usunięto składową stałą częstotliwości 50 Hz będącą szumem z sieci. Do prezentacji sygnału w postaci częstotliwościowej wykorzystano oszacowanie widmowej gęstości mocy Welch. Na rysunku 22.9 przedstawiono testowe wyniki dla ręki lewej osoby badanej w wieku 22 lat (autor pracy).



Rysunek 22.9. Wyniki pomiarów sEMG dla ręki lewej, wiek badanego: 22 lata
 (A) surowy sygnał, (B) sygnał po filtracji, (C) widmo mocy sygnału,
 (D) funkcja gęstości prawdopodobieństwa

Przy analizie odpowiedzi uzyskanych w Bostońskim Kwestionariuszy Zespołu Cieżni Nadgarstka najbardziej istotny ze względu na analizę jest średni wynik dla części odpowiadającej za Skalę Nasilenia Objawów i Skalę Stanu Funkcjonalnego. Przykładowy wynik dla obu skali uzyskany za pomocą kwestionariusza umieszczono w tabeli 22.1.

Tabela 22.1. Wyniki kwestionariusza dla testowej osoby badanej

Skala Nasilenia Objawów		Skala Stanu Funkcjonalnego	
średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe
1,27	0,14	1,25	0,16

22.5. Podsumowanie

W ramach pracy dyplomowej napisano oprogramowanie wspomagające diagnostykę i rehabilitację zespołu ciężni nadgarstka. Interfejs aplikacji mobilnej jest prosty w obsłudze, bazujący na dolnym pasku nawigacji wykorzystywanym w wielu współczesnych aplikacjach. Zaimplementowany został standardowy kwestionariusz diagnostyczny wykorzystywany przy rozpoznaniu zespołu ciężni nadgarstka oraz zaproponowana nieinwazyjna me-

toda bazująca na elektromiografii powierzchniowej. Aplikacja umożliwia zarządzanie zarówno pacjentami i ich wynikami, jak i przygotowanymi przez lekarza multimedialnymi prezentacjami ćwiczeń rehabilitacyjnych. Element diagnostyczny aplikacji pod kątem programistycznym jest w pełni rozszerzalny przez umieszczenie go w osobnej zakładce paska nawigacji. To umożliwia późniejsze wprowadzenie dodatkowych nieinwazyjnych metod bez konieczności skomplikowanych przekształceń struktury oprogramowania. W aplikacji webowej lekarz ma możliwość prezentacji i pobrania wybranych przez siebie wyników do dalszej analizy. Wszelkie dane diagnostyczne w aplikacji mobilnej i webowej są zabezpieczone za pomocą procesu logowania. Zatem wymagania funkcjonalne i нефункционалне zaprezentowanego systemu zostały spełnione.

Pomiar elektromiografii powierzchniowej został zrealizowany na małej grupie wyłącznie na potrzeby testowania. Otrzymywany surowy sygnał po dalszej analizie i filtrowaniu w postaci częstotliwościowej (rys. 22.9) jest spójny z widmem częstotliwościowym EMG zaprezentowanym w danych literaturowych [16]. Dla osoby testowej nie odnotowano objawów w stopniu nasilonym, co potwierdzają wyniki kwestionariusza zamieszczone w tabeli 22.1. Cel zaprojektowania nieinwazyjnej metody diagnostycznej został spełniony, jednakże w celu wdrożenia zaproponowanego rozwiązania konieczne jest przeprowadzenie pomiarów na większą skalę, w tym u osób zdiagnozowanych i pooperacyjnych w różnym czasie.

Dodatkowo przeanalizowano istniejące rozwiązania w zakresie aplikacji mobilnych. Aplikacje te w większości przypadków skupiają się na metodzie ruchomości kciuka z wykorzystaniem ekranu telefonu. W żadnej z nich nie został zastosowany dodatkowy element w postaci czujnika noszonego oraz wykres w czasie rzeczywistym. Zatem zaproponowane rozwiązanie różni się od dotychczas prezentowanych sposobem podejścia do tematu diagnostyki zespołu cieśni nadgarstka. Dodatkowo nie zaobserwowano wykorzystania materiałów multimedialnych wspierających proces rehabilitacji.

W odniesieniu do technologii aplikacja mobilna została zrealizowana w pełni w języku Java i skierowana do użytku przez urządzenia z systemem Android. Aplikacja webowa napisana została z wykorzystaniem biblioteki React.js. Do realizacji procesu autoryzacji użytkowników, systemu bazodanowego i przechowywania plików, które wykorzystywała aplikacja mobilna i webowa, wykorzystano usługi dostarczane przez platformę Firebase. Dodatkowo część webową wdrożono za pomocą narzędzia Firebase Hosting.

Zrealizowane oprogramowanie ma wiele możliwości rozwoju. Jednym z nich jest możliwość zaimplementowania dodatkowych testów wspierających diagnostykę zespołu cieśni nadgarstka, na przykład modyfikację badania polegającego na sprawdzaniu ruchomości kciuka z zastosowaniem ekranu telefonu. Warte rozważenia byłoby wprowadzenie statystyk dla danego pacjenta pod postacią na przykład wykresów podsumowujących udzielone w kwestionariuszu odpowiedzi czy daty ostatniego pomiaru.

W odniesieniu do pomiaru sEMG warto byłoby przeprowadzić analizę dla większej grupy osób, w tym zdiagnozowanych i pooperacyjnych o różnym stopniu nasilenia objawów. Wtedy możliwym do zrealizowania byłoby poszerzenie możliwości analizy o zastosowanie wzorca, na podstawie którego byłaby możliwość dokonania wstępnej klasyfikacji badanych pod kątem występowania ZCN. Tym sposobem system mógłby stać się wiarygodnym narzędziem wspierającym diagnozę zespołu cieśni nadgarstka.

Bibliografia

- [1] Sevy J.O., Varacallo M., Carpal tunnel syndrome. Dostępny online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448179/> (dostęp: 10-10-2022).
- [2] Ibrahim I., Khan W.S., Goddard N., Smitham P., Carpal tunnel syndrome: A review of the recent literature, *The Open Orthopedics Journal* **2012**.
- [3] Presazzi A., Bortolotto C., Zacchino M., Madonia L., and Draghi F., Carpal tunnel: Normal anatomy, anatomical variants and ultrasound technique. *Journal of Ultrasound*, **2011**, 14:40–46 .
- [4] Schunke M., Schulte E., Schumacher U., Voll M., Wesker K., *Prometeusz Atlas Anatomii Człowieka. T. 1: Anatomia ogólna i układ mięśniowo-szkieletowy*. Nomenklatura Angielska, MedPharm Polska, 1998.
- [5] Gołąbek R., Majcher P., Zespół cieśni nadgarstka. *Sport i Turystyka. Środkowoeuropejskie Czasopismo Naukowe*, **2018**, 1, 123–140.
- [6] Scott F., Duncan M., Bhate O., Mustaly H., *Pathophysiology of Carpal Tunnel Syndrome*, Springer International Publishing, Cham 2017.
- [7] Osiak K., Elnazir P., Walocha J.A., Pasternak A., Carpal tunnel syndrome: state-of-the-art review., *Folia Morphologica*.
- [8] Genova A., Dix O., Saefan A., Thakur M., Hassan A., Carpal tunnel syndrome: A review of literature, *Cureus*, **2020**.
- [9] Mastej S., Polska adaptacja i walidacja bostońskiego kwestionariusza zespołu cieśni nadgarstka (Boston Carpal Tunnel Questionnaire), Praca doktorska, Rzeszów, 2021.
- [10] Aroori S., Spence R.A., Carpal tunnel syndrome, *Ulster Med. J.*, **2008**, s. 6–17.
- [11] El-Emary W., Hassan M., Needle electromyography in carpal tunnel syndrome: is it valuable or predictable? *Egyptian Rheumatology and Rehabilitation*, **2016**, s. 43–44.
- [12] Chang-Beom K., Chan-Hyuk P., Chang-Hwan K., Hyun-Sung L., Myeong-Ok K., Changes in surface electromyography signal according to severity in patients with carpal tunnel syndrome, *J. Electrodiagn. Neuromuscul. Dis.*, **2020**, s. 15–22.
- [13] Fujita K., Watanabe T., Kuroiwa T., Sasaki T., Nimura A., Sugiura Y., A tablet-based app for carpal tunnel syndrome screening: Diagnostic case-control study. *JMIR Mhealth Uhealth*, **2019**.
- [14] Gniadek M., Trybus M., Zespół kanału nadgarstka: etiologia i leczenie. *Przegląd Lekarski*, **2016**, 73(7), 520–524.
- [15] Nazarieh M., Hakakzadeh A., Ghannadi S., Maleklou F., Tavakol Z., Alizadeh Z., Nonsurgical management and post-surgical rehabilitation of carpal tunnel syndrome: An algorithmic approach and practical guideline, *Asian Journal of Sports Medicine*.
- [16] McManus L., De Vito G., Lowery M., Analysis and biophysics of surface emg for physiotherapists and kinesiologists: Toward a common language with rehabilitation engineers, *Frontiers in Neurology*, **2020**, s. 11.
- [17] Raez M., Hussain M., Mohd-Yasin F., Techniques of emg signal analysis: detection, processing, classification and applications. *Biol. Proced. Online*, **2006**, s. 11–35.



Oficyna Wydawnicza
Politechniki Wrocławskiej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
ISBN: 978-83-7493-260-8

