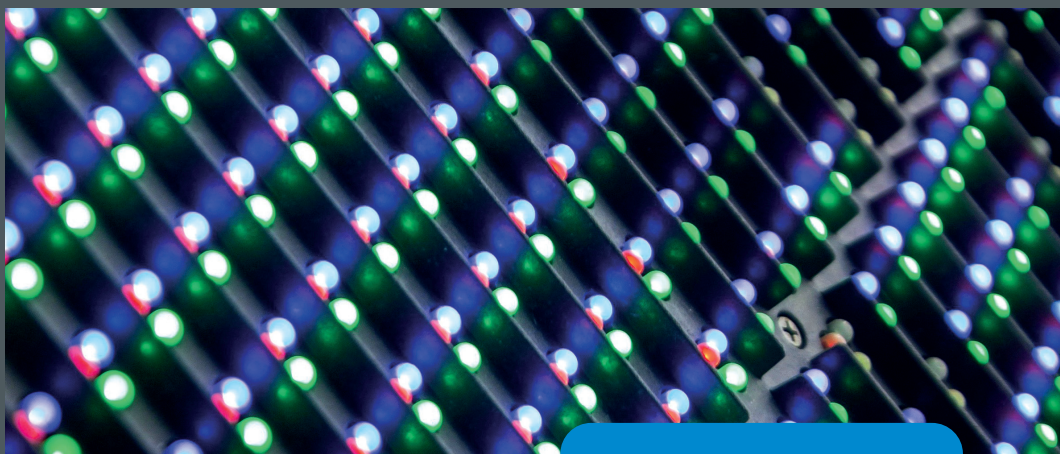


Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Wrocławski im. prof. Kazimierza Idaszewskiego

Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej

**Trendy i rozwiązania technologiczne
w elektrotechnice**



edycja 2024

Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej 2024

Trendy i rozwiązania technologiczne w elektrotechnice

Redakcja: dr inż. Remigiusz Mydlikowski

KOMITET NAUKOWY:

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

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 2024

© Copyright by Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Wrocławski, Wrocław 2024

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: 978-83-7493-291-2

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

Spis treści

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, FOTONIKI I MIKROSYSTEMÓW	9
1. Wektorowanie ciągu w zadaniu sterowania bezzałogowym obiektem latającym	11
<i>inż. Eryk Moźdżeń, opiekun: dr inż. Robert Muszyński</i>	
2. Moduł animatroniczny oczu dla robotów społecznych z aktywnym wykrywaniem źródła dźwięku	17
<i>inż. Jakub Marczak, opiekun: dr inż. Mateusz Cholewiński</i>	
3. Sterowanie modelem blokarta przy zmiennej sile wiatru i obecności przeszkód	29
<i>inż. Zuzanna Kunikowska, opiekun: dr inż. Bogdan Kreczmer</i>	
4. Projektowanie i implementacja modułu obsługującego system elektroniczny rakiety eksperymentalnej R5 Aurora	39
<i>inż. Jakub Siuda, opiekun: dr inż. Konrad Kluwak</i>	
5. Przenośny zasilacz regulowany sterowany mikrokontrolerem	47
<i>inż. Mateusz Wójcik, opiekun: dr inż. Wojciech Dowski</i>	
6. Projekt i budowa robota usługowego	61
<i>inż. Artur Woliński, opiekun: dr inż. Mateusz Cholewiński</i>	
7. Opracowanie i optymalizacja wysokowydajnego wzmacniacza mocy wysokiej częstotliwości	69
<i>mgr inż. Grzegorz Krupa, opiekun: dr inż. Grzegorz Budzyń</i>	
8. Analiza możliwości zaprojektowania szerokopasmowego przetwornika ultradźwiękowego do pomiarów transmisyjnych w tkankach miękkich	81
<i>mgr inż. Janusz A. Domaradzki, opiekun: prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Opieliński</i>	
9. Optymalizacja efektywności wysokiej mocy rezonansowego przetwornika LLC	91
<i>mgr inż. Jakub Zatoń, opiekun: dr inż. Grzegorz Budzyń</i>	
10. Technology for Human – Manipulator communication using gestures	105
<i>mgr inż. Sebastian Koryl, opiekun: dr inż. Katarzyna Zadarnowska</i>	

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY	119
11. System do wspomaganie centrowania kominów termicznych podczas lotów szybowcowych	121
<i>inż. Dominik Ciechomski, opiekun: dr inż. Krystian Krawczyk</i>	
12. Dydaktyczny model robota typu SCARA	127
<i>inż. Bartosz Piotr Habas, opiekun: dr inż. Marcin Pawlak</i>	
13. Zastosowanie robota ramieniowego do procesu automatycznego pozycjonowania elementów	139
<i>inż. Jakub Głogowski, opiekun: dr hab. inż. Marcin Wolkiewicz</i>	
14. System automatycznego napełniania butelek wykorzystujący sterownik X20 firmy B&R	145
<i>inż. Wojciech Dąbrowicki, opiekun: dr hab. inż. Piotr Serkies</i>	
15. Sterownik napędu agregatu chłodniczego	149
<i>mgr inż. Michał Bukato, opiekun: dr inż. Piotr Derugo</i>	
16. Szeregowe zwarcie łukowe w instalacji elektrycznej niskiego napięcia	159
<i>mgr inż. Kamila Żabicka, opiekun: dr inż. Michał Czosnyka</i>	
17. Możliwości wykorzystania spektrum wyższych częstotliwości w prądzie silnika indukcyjnego do wykrywania jego uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych	167
<i>mgr inż. Dawid Smolarek, opiekun: dr hab. inż. Marcin Habrych, prof. uczelni</i>	
18. Zastosowanie sztucznej inteligencji w procesie sortowania przedmiotów z wykorzystaniem robota przemysłowego	175
<i>mgr inż. Igor Powązka, opiekun: dr inż. Paweł Ewert</i>	
WYDZIAŁ INFORMATYKI I TELEKOMUNIKACJI	183
19. Projekt systemu do pomiaru jakości powietrza z komunikacją BT	185
<i>inż. Paweł Bogdan, opiekun: dr inż. Jarosław Emilianowicz</i>	
20. Określanie jakości obrazów oka na potrzeby algorytmów wykrywania tęczy	195
<i>inż. Bartosz Kozłowski, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
21. Analiza wybranych systemów biometrii anulowalnej pod kątem nielinkowości szablonów oraz wpływu na współczynniki FAR i FRR	203
<i>Izabela Majchrowska, opiekun: dr inż. Wojciech Wodo</i>	
22. Analiza bezpieczeństwa typowej stacji końcowej w Internecie	217
<i>mgr inż. Michał Józków, opiekun: dr inż. Marcin Jaroszewski</i>	

WYDZIAŁ PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI	225
23. Konstrukcja i oprogramowanie urządzenia do pomiaru położenia kręgosłupa	227
<i>inż. Ivan Danylenko, opiekun: dr inż. Mateusz Popek</i>	
24. System wspomagający osoby niedowidzące	235
<i>inż. Maciej Urban, opiekun: dr inż. Mateusz Popek</i>	
25. Aplikacja webowa wspomagająca zdrowy tryb życia	245
<i>inż. Sebastian Bednarski, opiekun: dr inż. Agnieszka Kazimierska</i>	
26. Parametryzacja ujemnej fali niezgodności w odpowiedzi na bodźce słuchowe	257
<i>mgr inż. Zofia Dobrowolska, opiekun: dr hab. inż. Cezary Sielużycki</i>	

Przedmowa

Z wielką radością i ogromną satysfakcją przyjmuję kolejną – 5 już edycję – monografię zawierającą prezentację konkursowych prac dyplomowych realizowanych na Politechnice Wrocławskiej. Oprócz publikacji prac o wysokiej merytorycznej wartości naukowo-technicznej jest to również swego rodzaju podsumowanie działalności naukowej Stowarzyszenia Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej w roku 2024. Jednolite, ogólnopolskie i silne Stowarzyszenie Elektryków Polskich realizuje swe cele statutowe również wśród młodzieży akademickiej. Działalność Oddziału Wrocławskiego SEP jest jednym z najlepszych tego przykładów.

Konkursy na najlepsze prace dyplomowe na Politechnice Wrocławskiej są bez wątpienia niezwykle cenną inicjatywą stowarzyszeniową, która nieprzerwanie trwa od 60 lat. Komisja ds. Młodzieży i Studentów Oddziału Wrocławskiego SEP powołana w 1965 roku od początku działalności intensywnie wspiera i motywuje studentów i młodzież do pogłębiania wiedzy, a także rozwijania zainteresowań związanych z branżą elektryczną. Jest to niezwykle cenny wkład zarówno w edukację, jak również w promocję działania naszego Stowarzyszenia wśród przyszłych inżynierów. Komisja intensywnie działa na rzecz angażowania studentów w działalność naukową i społeczną. Oprócz konkursów organizuje również wycieczki techniczne i zajęcia tematyczne. Od 2020 r. wydaje monografię z nagrodzonymi pracami co jest kolejną aktywnością dla kreatywnych, zaangażowanych naukowo studentów. Na szczególną uwagę zasługuje również współpraca Komisji przy organizacji ogólnopolskich olimpiad tematycznych prowadzonych przez nasze Stowarzyszenie. Miałem przyjemność osobiście uczestniczyć w tych wydarzeniach w marcu 2009 roku, gdy na Politechnice Wrocławskiej odbywały się zawody finałowe (III etap) ogólnopolskiej Olimpiady Wiedzy Elektrycznej i Elektronicznej Euroelektra (kol. Jerzy Leszczyński był wówczas członkiem Komitetu Głównego oraz Naukowego Olimpiady).

W roku 2025 Komisja ds. Młodzieży i Studentów Oddziału Wrocławskiego SEP będzie obchodzić niezwykle podniosły jubileusz 60-lecia powołania i nieprzerwanej działalności, trwale wpisującej się w 106-letni dorobek Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Będzie jeszcze wiele okazji do celebrowania tego wspaniałego jubileuszu, ale przy każdej okazji podkreślam, że wydarzenia, a zwłaszcza dzieła powstałe w wyniku działalności Stowarzyszenia Elektryków Polskich są możliwe tylko dzięki zaangażowaniu i pasji członków SEP. Rangę udziału aktywnych członków SEP w całokształcie działalności naszego Stowarzyszenia podwyższa znacząco fakt, że zaangażowanie członków ma wymiar społeczny. Dzisiejszej młodzieży trudno jest zrozumieć, a jeszcze trudniej zaakceptować działalność społeczną. Tym większe należą się podziękowania kol. Remigiuszowi Mydlkowskiemu za to, że udaje się Mu, jako obecnemu przewodniczącemu Komisji ds. Młodzieży i Studentów Oddziału Wrocławskiego SEP, angażować młodzież, w tym młodzież akademicką w działalność naszego Stowarzyszenia. Serdecznie gratuluję tego ogromnego sukcesu!

Zachęcam do zapoznania się z pracami opublikowanymi w niniejszej monografii. Nagrodzeni w konkursie prezentują niezwykle wysoki poziom merytoryczny, a także często charakteryzują się innowacyjnym spojrzeniem na problemy powszechnie stosowanych rozwiązań technologicznych. To jest nam, w Polsce bardzo potrzebne (w zasadzie niezbędne) w kontekście transformacji polskiego systemu energetycznego z cechami przełomowości technologicznej. Stowarzyszenie Elektryków Polskich tym zagadnieniem poświęciło IV Kongres Elektryki Polskiej w 2024 roku. Publikowane w niniejszej monografii rozwiązania wpisują się w tematykę kongresową, a co jeszcze ważniejsze dają nadzieję na to, że nowa kadra inżynierska, z dobrymi tradycjami i merytorycznym wsparciem ze strony naszego Stowarzyszenia, będzie w przyszłości zdolna do realizacji niezwykle złożonego procesu transformacji. Jako wykładowca akademicki oraz promotor doktorów nauk, magistrów i inżynierów doceniam przygotowanie publikacji prezentującej najlepsze prace obronione na Politechnice Wrocławskiej. Mam nadzieję, że inicjatywa będzie kontynuowana. Podejmę również działania w celu rozpropagowania takiego sposobu promocji i realnej działalności Stowarzyszenia Elektryków Polskich na uczelniach wyższych.

Dziękuję kol. doktorowi inżynierowi Remigiuszowi Mydlikowskiemu za redakcję tej monografii, dziękuję całemu Komitetowi Naukowemu za pracę włożoną w przygotowanie i weryfikację poszczególnych rozdziałów oraz dziękuję władzom Politechniki Wrocławskiej za umożliwienie wydania tej monografii w Oficynie Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Wszystkim nagrodzonym za swoje prace dyplomowe serdecznie gratuluję, życzę dalszego rozwoju naukowego i realizacji zawodowej w dobrze wybranych kierunkach technicznych oraz mam nadzieję na młodzieżowe wsparcie działalności Stowarzyszenia Elektryków Polskich, bo Stowarzyszenie Elektryków Polskich to My!



dr hab. inż. Sławomir Cieślik, prof. PBŚ
prezes Stowarzyszenia Elektryków Polskich
Warszawa, 3 listopada 2024 roku

Wydział Elektroniki,
Fotoniki i Mikrosystemów

Wektorowanie ciągu w zadaniu sterowania bezzałogowym obiektem latającym

inż. Eryk Możdżeń
Automatyka i Robotyka

dr inż. Robert Muszyński
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Celem pracy było skonstruowanie jednowirnikowego drona oraz sterowanie nim przez wektorowanie ciągu, czyli zmianę jego wartości oraz kierunku. Zaprojektowano i wykonano konstrukcję mechaniczną oraz dedykowany układ sterownika lotu. Napisano programy służące do sterowania robotem, wizualizacji danych sensorycznych oraz kalibracji jego podzespołów. Rozbudowano oprogramowanie wbudowane sterownika lotu oraz dokonano procesu identyfikacji wartości parametrów dla zaproponowanego modelu matematycznego. Wykonany jednowirnikowiec zachowuje stabilność podczas lotu, utrzymując zadaną wysokość nad ziemią oraz orientację w osi pionowej. Testy wykazały, że występujący efekt żyroskopowy został zamodelowany i skompensowany poprawnie.

1.1. Cel i założenia

Celem pracy było skonstruowanie jednowirnikowego, bezzałogowego statku powietrznego UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*) oraz wykorzystanie jego opisu matematycznego w zadaniu sterowania przez wektorowanie ciągu TVC (ang. *Thrust Vector Control*). Do wykonania platformy testowej umożliwiającej sprawdzenie zaproponowanego algorytmu sterowania przyjęto następujące założenia projektowe:

- pojedynczy wirnik w roli źródła siły ciągu,
- zbiór niezależnie sterowanych powierzchni odchylających strumień powietrza,
- wykorzystanie możliwie tanich i dostępnych podzespołów elektronicznych.

1.2. Model obiektu

Model obiektu stanowi podstawę „wirtualnego bliźniaka”, dzięki któremu możliwa jest powtarzalna predykcja zachowania obiektu bez ryzyka narażania rzeczywistego układu na szwank. Rozpatrywanego jednowirnikowca opisano za pomocą nieliniowego obiektu

dynamicznego. Aby opisać położenie i orientację robota w przestrzeni zdefiniowano dwa układy współrzędnych. Stacjonarny układ odniesienia $X_w Y_w Z_w$ zwany jest dalej globalnym. Początek lokalnego układu współrzędnych $X_b Y_b Z_b$ znajduje się w środku ciężkości drona, analogicznie jak w pracy [1]. Orientacja lokalnego układu współrzędnych została opisana parametryzacją Eulera ZYX zwanej kiwaniem–kołysaniem–myszkowaniem KKM (ang. *Roll Pitch Yaw*) [2].

Wektorowanie ciągu realizowane zostało za pomocą wirnika napędowego oraz zestawu łopatek odchylających strumień powietrza. W pracach [1, 3, 4] śmigła reprezentowano modelem (1.1).

$$F_t = K_\omega \omega_r^2, \quad (1.1)$$

gdzie F_t jest wartością generowanej siły ciągu, ω_r jest prędkością obrotową wirnika a K_ω jest stałą charakteryzującą układ. Siłę ciągu zamodelowano również równaniem (1.2).

$$F_t = K_t u_t, \quad (1.2)$$

gdzie u_t jest wartością z przedziału $[0; 1]$ symbolizującą prędkość obrotową silnika (0 – brak ruchu, 1 – prędkość maksymalna), a K_t jest stałą charakteryzującą układ. Wirnik podczas obrotu wytwarza moment obrotowy M_r spowodowany oporami powietrza. Wartość momentu została zamodelowana analogicznie jak w pracy [4] i ma postać (1.3).

$$M_r = K_\tau u_t, \quad (1.3)$$

gdzie K_τ to stała charakteryzująca układ. Zmiana osi obrotu szybko obracającej się masy powoduje występowanie efektu żyroskopowego. W literaturze [3] wartość generowanego momentu M_{gyr} zamodelowano zależnością (1.4).

$$M_{gyr} = \begin{bmatrix} J_r \omega_r \omega_y \\ -J_r \omega_r \omega_x \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

gdzie J_r jest połączonym momentem bezwładności śmigła oraz silnika w osi obrotu a ω_x oraz ω_y są prędkościami kątowymi korpusu.

Według prac [1, 4] dla wartości siły F_n generowanej przez łopatkę n , która ma kierunek prostopadły do działania siły ciągu, można przyjąć model (1.5).

$$F_n = C_l F_t \alpha_n, \quad (1.5)$$

gdzie C_l jest współczynnikiem dobranym na podstawie [1, 5] a α_n jest kątem wychylenia łopatki od pionu. Model obowiązuje dla niewielkich wartości odchyleń w przedziale $\pm 15^\circ$.

Dynamika jednowirnikowca wyprowadzona z formalizmu Newtona–Eulera została opisana równaniem (1.6). Elementy J_{xx} , J_{yy} i J_{zz} stanowią przekątną macierzy bezwładności, m jest masą całkowitą drona. Kąty ϕ , θ , ψ odpowiadają parametryzacji KKM natomiast parametry l i r opisują położenia środków łopatek w lokalnym układzie współrzędnych. Wektory $[x \ y \ z]^T$ oraz $[v_x \ v_y \ v_z]^T$ reprezentują odpowiednio położenie i prędkość postępową korpusu wyrażone w globalnym układzie współrzędnych. Siły F_i , gdzie $i = 1, \dots, 4$

to siły generowane przez łopatki ruchome, natomiast F_s to siły generowane przez łopatki pomocnicze (nieruchome).

$$\begin{cases}
 \dot{\phi} = \omega_x + \omega_y s_\phi t_\theta + \omega_z c_\phi t_\theta \\
 \dot{\theta} = \omega_y c_\phi - \omega_z s_\phi \\
 \dot{\psi} = \omega_y \frac{s_\phi}{c_\theta} + \omega_z \frac{c_\phi}{c_\theta} \\
 \dot{\omega}_x = \frac{1}{J_{xx}}(J_{yy} - J_{zz})\omega_y\omega_z + \frac{1}{J_{xx}}l(F_3 - F_1) + \frac{J_r}{J_{xx}}\omega_r\omega_y \\
 \dot{\omega}_y = \frac{1}{J_{yy}}(J_{zz} - J_{xx})\omega_x\omega_z + \frac{1}{J_{yy}}l(F_4 - F_2) - \frac{J_r}{J_{yy}}\omega_r\omega_x \\
 \dot{\omega}_z = \frac{1}{J_{zz}}(J_{xx} - J_{yy})\omega_x\omega_y - \frac{1}{J_{zz}}r(F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + 4F_s) + \frac{1}{J_{zz}}M_r \\
 \dot{x} = v_x c_\theta c_\psi + v_y(s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi) + v_z(c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi) \\
 \dot{y} = v_x c_\theta s_\psi + v_y(s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi) + v_z(c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi) \\
 \dot{z} = -v_x s_\theta + v_y s_\phi c_\theta + v_z c_\phi c_\theta \\
 \dot{v}_x = \frac{1}{m}(F_2 - F_4) + g s_\theta \\
 \dot{v}_y = \frac{1}{m}(F_3 - F_1) - g s_\phi c_\theta \\
 \dot{v}_z = \frac{1}{m}F_t - g c_\phi c_\theta
 \end{cases} \quad (1.6)$$

1.3. Sterowanie

Jednowirnikowiec z wektorowaniem ciągu jest układem z natury niestabilnym. Z tego powodu konieczne jest stworzenie algorytmu sterowania, które wykorzystując sprzężenie zwrotne zapewni stabilizację oraz umożliwi kontrolę nad układem. Do tego celu został zastosowany regulator LQR (ang. *Linear-Quadratic Regulator*), będący liniowym regulatorem optymalizującym wartość kwadratowej funkcji kosztu. Celem stabilizacji układu proponuje się sprzężenie zwrotne w postaci (1.7)

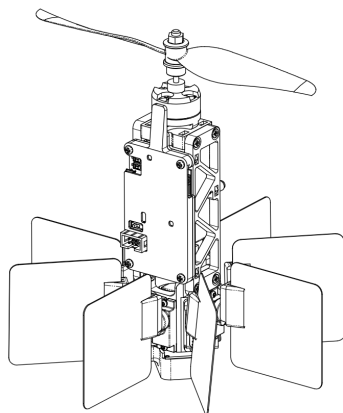
$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{e}, \quad (1.7)$$

gdzie \mathbf{u} jest wektorem sterowań, \mathbf{e} jest uchybem regulacji a \mathbf{K} jest macierzą pochodzącą z linearyzacji modelu (1.6) w punkcie stabilności (orientacja pionowa, brak ruchu).

Aby wyeliminować uchyb w stanie ustalonym spowodowany niedokładnością wykonania elementów platformy rozszerzono regulator o człon całkujący [6]. Wymusza to rozszerzenie wektora uchybu o dodatkowe wiersze będące wynikiem całkowania wybranych elementów.

1.4. Platforma testowa

Do wykonania platformy testowej wybrano wariant konstrukcji przedstawiony na rysunku 1.1. Charakteryzuje się układami wykonawczymi umiejscowionymi na zewnątrz, pozostawiając układy elektroniki wewnątrz konstrukcji. Do wykonania elementów mechanicznych robota użyto technologii druku FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*). W tym celu wszystkie elementy konstrukcji zostały zamodelowane z użyciem platformy Onshape.



Rysunek 1.1. Kompletna platforma

Mechanikę jednowirnikowca można podzielić na cztery główne części:

- blok serwomechanizmów łączący ze sobą orczyki łopatek i umożliwiający im kontrolowany ruch,
- ramę zawierającą baterię, sterownik lotu, sterownik silnika, silnik wirnika,
- sekcję dolną zabezpieczającą dalmierz ultradźwiękowy skierowany w dół,
- łopatki wyposażone w mechanizm kontrolowanej separacji, chroniący delikatne serwomechanizmy przy zderzeniach.

W roli napędów został użyty silnik BLDC (ang. *Brushless Direct-Current Motor*) w parze z 8-calowym śmigłem oraz 4 popularne serwomechanizmy SG90. Pierwotnie założona ilość łopatek (4) została dwukrotnie powiększona z powodu zbyt dużego momentu obrotowego generowanego przez wirnik podczas pracy. W połowie łopatek możliwe jest niezależne sterowanie wychyleniem, w pozostałych kąta natarcia jest stały.

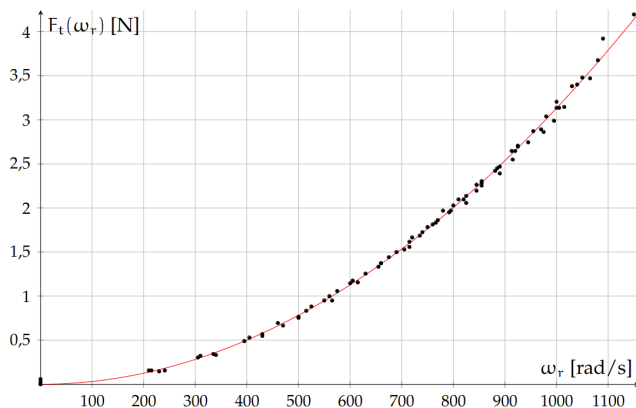
Sterownik lotu został zaprojektowany w programie KiCad. Wyposażony został w IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*), magnetometr, barometr, miernik mocy, prędkościomierz silnika BLDC a także umożliwiający komunikację z uzuciem WiFi mikrokontroler ESP8266. Jednostka główna w postaci mikrokontrolera STM32F4 odpowiedzialna jest za:

- odczyt danych z czujników,
- estymację orientacji i wysokości z użyciem EKF (ang. *Extended Kalman Filter*),
- dwustronną komunikację ze stacją pilota,
- obliczanie i zadawanie sterowań w czasie rzeczywistym.

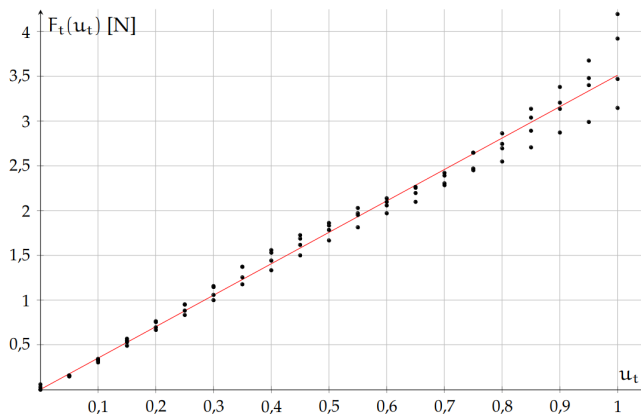
Oprogramowanie sterownika lotu zostało napisane w języku C++ wykorzystując system czasu rzeczywistego FreeRTOS. Do komunikacji i wizualizacji danych pochodzących z robota została napisana aplikacja okienkowa wykorzystująca bibliotekę Qt.

1.5. Uzyskane wyniki

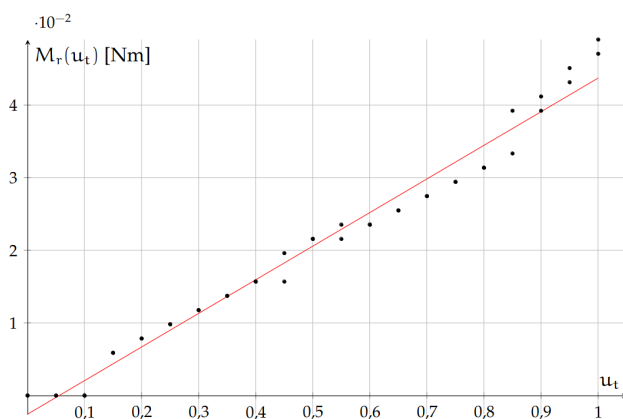
Wyniki identyfikacji parametrów pozwoliły na skuteczne dopasowanie optymalnych współczynników modelu. Wykresy 1.2, 1.3 i 1.4 przedstawiają wyniki pomiarów siły ciągu oraz momentu obrotowego wraz z krzywymi najlepszego dopasowania.



Rysunek 1.2. Ciąg w zależności od prędkości obrotowej wirnika



Rysunek 1.3. Ciąg w zależności od sterowania silnika



Rysunek 1.4. Moment obrotowy generowany przez wirnik od sterowania silnika

Ocena zdolności do lotu konstrukcji była podstawą weryfikacji osiągnięcia celu projektu. Wykonano dziesiątki testów sprawdzających zachowanie robota podczas lotu w powietrzu. Układ sterowania był w stanie ustabilizować obiekt na zadanej wysokości pod warunkiem, że orientacja drona była zbliżona do pionu, a bateria była dostatecznie naładowana. Ze względu na ostateczną wagę drona w zawisie silnik wirnika pracował blisko swoich maksymalnych obrotów, co znacznie ogranicza możliwości zwiększania siły ciągu.

Można stwierdzić, że efekt żyroskopowy został zamodelowany poprawnie, ponieważ zaobserwowana korelacja między uchybem w osiach X i Y była marginalna. Niedoskonałości konstrukcji mechanicznej sprawiły, że jednowirnikowiec miał tendencje do powolnego lotu w jedną ze stron. Umożliwiło to wprowadzenie alternatywnego sposobu kontroli kierunku lotu, przez obracanie się całym robotem w tę stronę. Testy pokazały, że obiekt jest bardzo podatny na obecność wiatru i w takich warunkach nie jest możliwa kontrolna nad nim.

1.6. Podsumowanie

Konstrukcja mechaniczna okazała się wystarczająco wytrzymała, a mechanizm separacji łopatek działał, dzięki czemu całość przetrwała wielokrotne upadki. Modularność platformy pozwoliła na łatwe i szybkie wprowadzanie zmian, jednak kosztem konieczności zastosowania dużej ilości śrub zwiększających masę całkowitą. Sterownik lotu spełnił postawione wymagania funkcjonalne. Zastosowanie sieci WiFi w roli medium komunikacyjnego nie sprawiło problemów, a zasięg na otwartej przestrzeni okazał się wystarczający do przeprowadzenia testów platformy. Kluczem do osiągnięcia stabilnego lotu okazały się skalibrowane napędy łopatek. Wykonany jednowirnikowiec zachowuje stabilność podczas lotu, więc cel pracy został osiągnięty.

Bibliografia

- [1] Jacobsen E.B., Modelling and Control of Thrust Vectoring Mono-copter. Praca magisterska, Aalborg University, Aalborg, Dania, 2021.
- [2] Tchoń K., Muszyński R., Robotyka, Notatki do wykładów, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2018.
- [3] Dominguez V.H., Garcia-Salazar O., Amezquita-Brooks L., Reyes-Osorio L.A., Santana-Delgado C., Rojo-Rodriguez E.G., Micro Coaxial Drone: Flight Dynamics, Simulation and Ground Testing, *Aerospace* **2022**, 9(5), s. 245.
- [4] Carholt O.C., Fresk E., Andrikopoulos G., Nikolakopoulos G., Design, Modelling and Control of a Single Rotor UAV, 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Ateny, Grecja, 21–24.06.2016.
- [5] Brennen C.E., The Flat Plate Airfoil. *An Internet Book on Fluid Dynamics*, Caltech, 2008.
- [6] Malkapure H.G., Chidambaram M., Comparison of Two Methods of Incorporating an Integral Action in Linear Quadratic Regulator. *IFAC Proceedings Volumes* **2014**, 47(1), s. 55–61.

Moduł animatroniczny oczu dla robotów społecznych z aktywnym wykrywaniem źródła dźwięku

inż. Jakub Marczak
Automatyka i Robotyka

dr inż. Mateusz Cholewiński
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Praca przedstawia przykładowy projekt kompaktowego modułu mechanizmów oczu i powiek dla robotów społecznych, zastępującego wspólnie stosowane wyświetlacze i nieruchome oczy. Projekt rozwiązuje zarówno kwestie konstrukcyjne i sterowania, których normalnie musieliby się podjąć twórcy danego robota, tracąc przy tym czas i zasoby.

W ramach sterowania oczami, podjęto próbę implementacji systemu aktywnego wykrywania źródła dźwięku, opartego na algorytmie SRP-PHAT. Ostatecznie, choć wyniki działania algorytmu nie były w pełni zadowalające, pokazano, że możliwe jest zastąpienie, często drogiego i wymagającego obliczeniowo, systemu wizyjnego, kilkoma drobnymi mikrofonami, które nietrudno zakamuflować w twarzy, czy ciele robota.

Moduł wykonany został z wykorzystaniem techniki osadzania topionego materiału (FDM), a wchodzące w jego skład mechanizmy oczu i powiek oparte na przegubach kulowych i przekładniach zębatych, dając przy tym łącznie 7 stopni swobody. Sterowanie serwomechanizmami oczu i powiek, a także obliczenia związane z przetwarzaniem dźwięku, odbywają się z poziomu mikrokontrolera Espressif ESP-32, działającego w systemie czasu rzeczywistego FreeRTOS.

2.1. Cel i założenia

Celem pracy jest zaprojektowanie i zbudowanie przykładowego modułu, składającego się z dwóch mechanizmów oczu i mechanizmu powiek, wraz ze zintegrowanym systemem aktywnego wykrywania źródła dźwięku, opartym na czterech mikrofonach.

Celem opracowania systemu wykrywania źródła dźwięku jest natomiast przedstawienie alternatywy do systemów wizyjnych stosowanych w robotyce oraz zaprezentowanie sposobu działania i implementacji algorytmu SRP-PHAT dla łatwo dostępnych i tanich komponentów elektronicznych.

Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- moduł w domyśle ma za zadanie odwzorowywać ludzkie oczy i ich sposób ruchu, zatem ich wygląd i budowa mają być zbliżone do prawdziwych oczu,
- praca ma pokazać, że wdrożenie modułu w robocie jest stosunkowo proste i na jego podstawie można go udoskonalać i rozwijać na potrzeby konkretnych robotów,
- do budowy modułu wykorzystana zostanie jedna z technik wytwarzania addytywnego dla tworzyw sztucznych,
- algorytm ma działać w obrębie zastosowania modułu oczu, dlatego też dokładność otrzymanych wyników, czy chociażby optymalizacja czasu wykonywanych obliczeń, nie jest priorytetem.

2.2. Wstęp teoretyczny

W tym rozdziale opisane zostaną trzy zagadnienia, niezbędne do zrozumienia pozostałej części streszczenia pracy. Pierwsze z nich odnosi się do technologii wytwarzania części konstrukcyjnych modułu, natomiast kolejne dwa – do problematyki detekcji źródła dźwięku i implementowanego algorytmu detekcji.

2.2.1. Wytwarzanie addytywne, technika FDM

Wytwarzanie addytywne, przyrostowe (ang. *additive manufacturing*), polega na formowaniu detalu przez warstwowe dozowanie półpłynnego materiału, najczęściej polimerów, ale również metali, czy nawet gliny. Jest to kompletne przeciwieństwo rozpowszechnionych dotychczas, tradycyjnych metod obróbki, w których detal formuje się przez stopniowe usuwanie lub deformację materiału obrabianego. Mowa tutaj o procesach cięcia, gięcia, tłoczenia i walcowania oraz najważniejszego – skrawania, do którego z kolei zalicza się frezowanie, toczenie, wiercenie i szlifowanie.

Szczegółowy przegląd i analizę współczesnych metod wytwarzania addytywnego przeprowadzono w książce pt. „*Additive Manufacturing Technologies*” [1]. FDM i SLA, głównie za sprawą malejących cen drukarek o prostej konstrukcji, a także zwiększonej dostępności filamentów i żywic polimerowych, są obecnie najpopularniejsze.

W technice FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*), nawinięty na szpulę filament (polimer o okrągłym przekroju), jest ekstrudowany (przeciskany) ze zmienną prędkością i doprowadzany do stanu półpłynnego przez element grzewczy, tzw. *ekstruder*. Ten porusza się w trzech osiach, najczęściej wykorzystując do tego przekładnie pasowe w osiach x i y oraz śrubową w osi z (pionowej). Półpłynny materiał rozprowadzany jest warstwa po warstwie, tworząc zadaną geometrię, jak i geometrie pomocnicze, które umożliwią wykonanie konkretnego detalu. Mowa tutaj, przede wszystkim, o wspornikach (*supportach*, od angielskiego *support* – wspornik), które pełnią punkt podparcia dla kolejnych warstw, przykładowo wiszących w powietrzu.

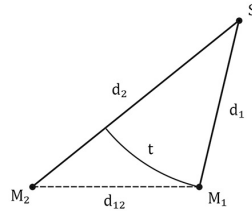
Drukarki FDM często posiadają także stół grzewczy, który, nagrzany zazwyczaj do temperatury około 50–60°C, zwiększa przyczepność pierwszej warstwy i jednocześnie lepiej zabezpiecza cały detal przed oderwaniem się od stołu.

2.2.2. Problem detekcji źródła dźwięku

Nie bez przyczyny, oczy ludzi, ale też i tysiące gatunków zwierząt, zestawione są w parze – pozwala to na zdecydowanie lepszą percepcję głębi i odległości, niż w przypadku jednego oka. Identycznie jest w przypadku uszu – występujące po przeciwnych stronach, nie tylko zwiększają w ten sposób zakres słyszalności, ale pozwalają na ustalenie przez mózg kierunku, a nawet źródła dochodzącego dźwięku.

Potraktujmy dwa, zestawione obok siebie w odległości d_{12} , mikrofony M_1 i M_2 , jako właśnie taką parę uszu. Niech S będzie punktowym źródłem dźwięku, fali akustycznej, rozchodzącej się w powietrzu. Dla uproszczenia pominiemy zjawisko tłumienia fali i typowe, towarzyszące fali dźwiękowej zjawiska, w tym na przykład odbicia, echo. Dla lepszego zrozumienia, poruszajmy się po jednej płaszczyźnie, przykładowo XY . Kształt czoła fali kulistej, w tym wypadku, można by też potraktować jako zwykły odcinek, a nie fragment koła. Takie przybliżenie byłoby dość dobre w przypadku, gdy źródło dźwięku znajduje się bardzo blisko lub bardzo daleko mikrofonów.

Układ mikrofonów względem źródła, dochodzące do nich fale akustyczne oraz czoło fali w chwili t przedstawiono na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1. Układ pary mikrofonów i punkтового źródła dźwięku

Z powyższego rysunku można wywnioskować, że odległości d_1 i d_2 , między źródłem a konkretnymi mikrofonami, różnią się między sobą, a co za tym idzie – fala akustyczna dociera do nich w różnym czasie. Zakładając, że fala rozchodzi się w powietrzu, jej prędkość wynosi $c = 343 \text{ m/s}$. W przedstawionej sytuacji M_1 wykryje ten sam dźwięk, który wykryje M_2 , o wiele wcześniej, z różnicą Δt określoną jako:

$$\Delta t = \frac{\|d_2 - d_1\|}{c} \quad (2.1)$$

Przesunięcie w czasie rejestrowanych przez odbiorniki sygnałów Δt określane jest jako **TDOA** (ang. *Time Difference of Arrival*). TDOA można wyznaczać na dwa sposoby. Pierwszy z nich polega po prostu na mierzeniu konkretnego czasu przesunięcia odbieranych sygnałów, wyrażonego jako różnicę chwil dotarcia sygnałów do odbiorników l -tego i m -tego TOA (ang. *Time of Arrival*):

$$\text{TDOA} = M_l - M_m \quad (2.2)$$

Wymaga to jednak wiedzy *a priori* na temat parametrów sygnału. Drugie podejście wykorzystuje z kolei korelację wzajemną pary sygnałów l -tego i m -tego $M_l - M_m$, na danym przedziale $[-T, T]$, gdzie T to maksymalne możliwe opóźnienie, wynoszące d_{12}/v :

$$\text{TDOA} = \arg \max_{t \in [-T, T]} [M_l \star M_m](t) \quad (2.3)$$

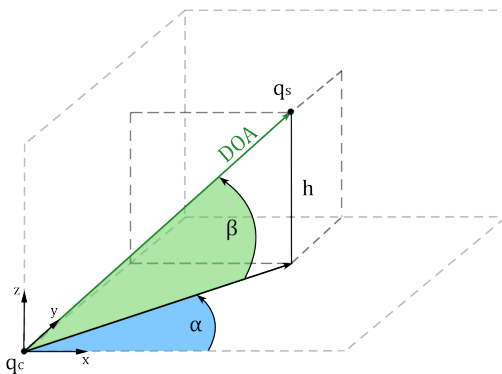
2.2.3. Algorytm SRP-PHAT

Algorytm SRP-PHAT [2, str. 80] [3] (ang. *Steered-Response Power with Phase Transform*) jest jednym z wariantów algorytmów wykrywania źródeł akustycznych SSL (ang. *Sound Source Localization*) z rodziny SRP.

SRP-PHAT oparty jest na technice kształtowania wiązki na podstawie opóźnienia i sumy, tzw. *delay-and-sum beamformer* [2, s. 74]. Jest połączeniem uogólnionej korelacji wzajemnej (GCC, ang. *Generalized Cross Correlation*) oraz *Steered Response Power* [2, s. 73] i łączy zalety obu tych rozwiązań, czyniąc algorytm najbardziej wydajnym i odpornym na zakłócenia spośród pozostałych z rodziny.

SRP-PHAT działa na ograniczonej, zdyskretyzowanej przestrzeni, posiada określoną z góry rozdzielczość. Obliczenia przeprowadzane są dla kolejnych wycinków tej przestrzeni tak, by znaleźć najlepsze dopasowanie (tutaj maksimum) – miejsce, w którego otoczeniu znajduje się potencjalnie źródło sygnału akustycznego.

Przestrzeń trójwymiarową można podzielić na kolejne sześciiany, ze środkami geometrycznymi, określonymi przez współrzędne kartezjańskie x , y , z . W celu ograniczenia ilości obliczeń, lepiej jest jednak podzielić przestrzeń kątami azymutu α i wzniesienia β (ang. *azimuth, elevation*) względem początku układu współrzędnych q_c (przykładowo środka geometrycznego wycinka twarzy), co przedstawiono na rys. 2.2. Warto tutaj zaznaczyć, że dla modułu oczu ważniejsze jest nie dokładne określenie pozycji źródła q_s , względem początku układu q_c , a kierunek źródła dźwięku (DOA).



Rysunek 2.2. Kierunek DOA (*Direction of Arrival*) źródła dźwięku q_s , znajdującego się na wysokości h , określony kątami azymutu α i wzniesienia β

Założmy, że znamy położenie źródła dźwięku i wynikowe TDOA wynosi τ_n . Dla każdej z możliwych par l - m sygnałów x z zestawu mikrofonów M wyznaczana jest uogólniona korelacja wzajemna \hat{R}_{lm} :

$$\hat{R}_{lm}(\tau_n) = \frac{1}{N} \sum_{w=0}^{N-1} \frac{X_m(w)X_l^*(w)}{|X_m(w)X_l^*(w)|} e^{j\frac{2\pi}{N}\tau_n} \quad (2.4)$$

dla funkcji wążącej $\Psi_{lm}(w) = \frac{1}{|X_m(w)X_l^*(w)|}$, gdzie:

- N – liczba próbek,
 X – transformata Fouriera sygnału x ,
 X^* – sprzężenie zespolone transformaty Fouriera sygnału x ,
 τ_{lm} – przypuszczane opóźnienie między sygnałami mikrofonów l i m ,
 (w wyniku działania SRP-PHAT otrzymujemy estymację $\hat{\tau}$).

Wyniki korelacji wzajemnych \hat{R}_{lm} wszystkich par mikrofonów l – m dla przypuszczanego τ_n są sumowane:

$$\hat{P}(\tau_n) = \sum_{l=1}^M \sum_{m=l+1}^M \hat{R}_{lm}(\tau_n) \quad (2.5)$$

$\hat{P}(\tau_n)$ wyznaczone jest dla kolejnych przypuszczanych τ_n z określonego zbioru T .

Ostatecznie estymacja TDOA, na podstawie której można wyznaczyć interesujące nas w procesie sterowania oczami kąty α i β , to maksymalna wartość $\hat{P}(\tau_n)$, wyznaczona spośród elementów zbioru T :

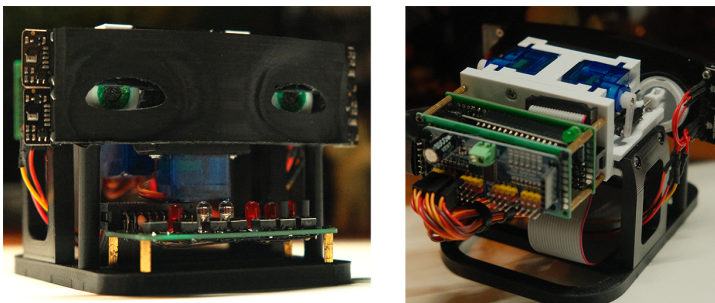
$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau_n \in T} \hat{P}(\tau_n) \quad (2.6)$$

Po przekształceniach położenie źródła dźwięku q_s wyraża się natomiast jako:

$$q_s = \begin{bmatrix} q_{sx} \\ q_{sy} \\ q_{sz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{cx} + \frac{h \times \sin(\alpha)}{\operatorname{tg}(\beta)} \\ q_{cy} + \frac{h \times \cos(\alpha)}{\operatorname{tg}(\beta)} \\ q_{cz} + h \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.3. Projekt i wykonanie

Projekt animatronicznego modułu oczu z aktywnym wykrywaniem źródła dźwięku (rys. 2.3) można podzielić na trzy części: mechaniczną, elektroniczną i programową.

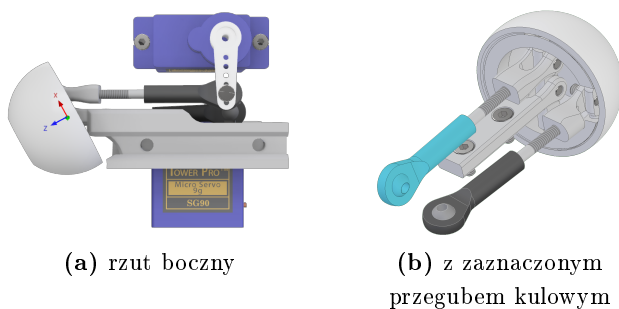


Rysunek 2.3. Moduł oczu

2.3.1. Część mechaniczna

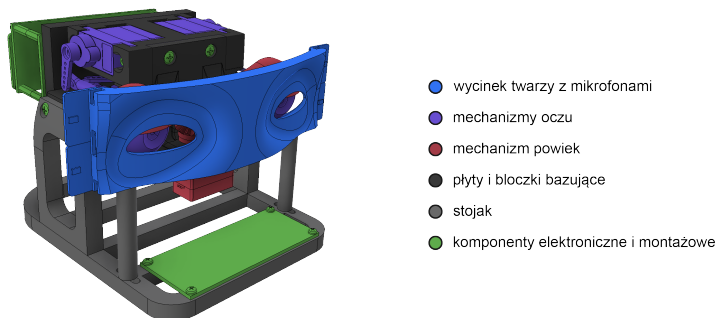
Moduł został zaprojektowany jako kompaktowy system, umożliwiający bliskie naturalnemu odwzorowanie ruchu ludzkich oczu i powiek. Składa się z kilku elementów (rys. 2.5), w tym głównie:

1. **Dwa mechanizmy oczu** (rys. 2.4), działające na zasadzie zamiany ruchu obrotowego dwóch serwomechanizmów na ruch posuwisto-zwrotny popychaczy przez przeguby kulowe (rys. 2.4b). Obroty wokół obu osi są całkowicie niezależne – ruch gałki w jednej osi nie wpływa na ruch w drugiej.



Rysunek 2.4. Mechanizm oka

2. **Mechanizm powiek**, pełniący trzy funkcje: mrugania, wyrażania emocji oraz śledzenia źrenic. Składa się z wałka sprzężonego z przekładnią zębatą (stożkową), zasilaną pojedynczym serwomechanizmem.
3. **Wycinek twarzy z mikrofonami MEMS**, który, poza „symulowaniem” twarzy robota, pozwala na stabilne i precyzyjne umiejscowienie czterech mikrofonów, wchodzących w skład systemu wykrywania źródła dźwięku.
4. **Płyty i bloczki bazujące**, mające na celu zintegrowanie elementów modułu w spójną całość i umożliwienie montażu modułu w głowie robota,.
5. Stojak oraz komponenty elektroniczne i montażowe.



Rysunek 2.5. Model modułu z wyodrębnionymi częściami

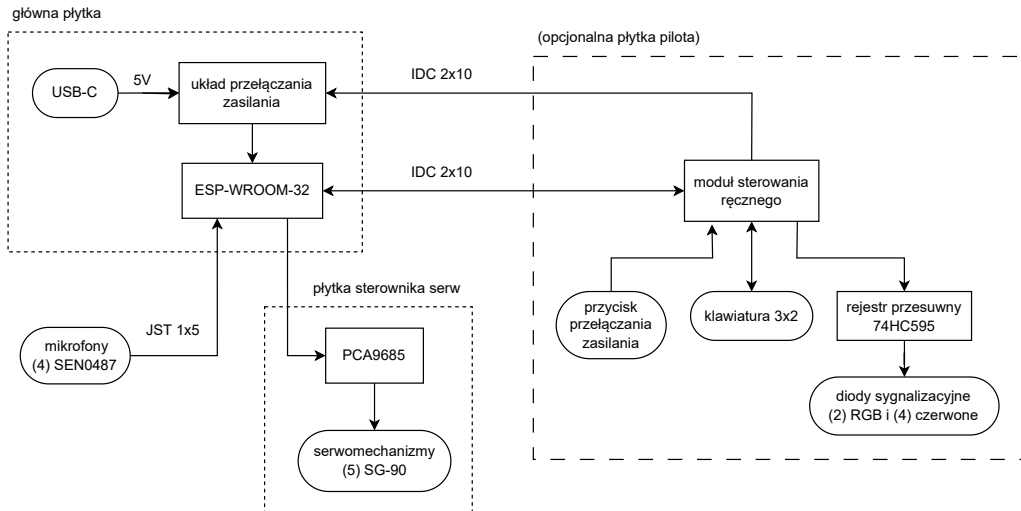
2.3.2. Część elektroniczna

Do komponentów elektronicznych modułu oczu należą, przede wszystkim: mikrokontroler, zestaw czterech mikrofonów MEMS, pięć serwo mechanizmów SG-90 i ich sterownik PCA9685, a także układ przełączania zasilania, oparty na tranzystorze MOSFET.

Dodatkowym, opcjonalnym komponentem jest moduł sterowania ręcznego (rysunek 2.7a), który umożliwia ręczne sterowanie obiema gałkami oczu i powiekami oraz załączanie zasilania za pomocą przycisków, a także sygnalizowanie podstawowych informacji odnośnie trybu pracy i serwo mechanizmów przez diody LED.

Wymienione części elektroniczne modułu zebrano na trzech uniwersalnych płytkach o wymiarach 30×70 mm, przeznaczonych do montażu przewlekane (THT).

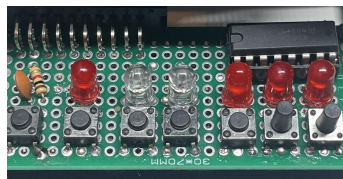
Strukturę układu elektronicznego modułu, jak i zależności między poszczególnymi komponentami, przedstawiono w formie schematu blokowego na rysunku 2.6.



Rysunek 2.6. Schemat blokowy projektu elektronicznego modułu

Sercem modułu jest dwurdzeniowy mikrokontroler ESP32-WROOM-32 firmy Espressif, znajdujący się na jednej z płytek przewlekanych (rys. 2.7b). Taktowany zegarem 240 MHz, zapewnia płynne wykonywanie zadań określonych w ramach systemu czasu rzeczywistego.

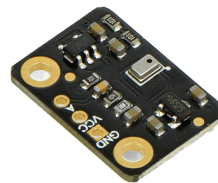
Mikrokontroler dokonuje akwizycji pomiarów dźwięku z czterech mikrofonów MEMS SEN0487 firmy DFRobot (rys. 2.7c), wykorzystując przy tym cztery swoje 12-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe (ADC). Dane te są wykorzystywane w obliczeniach SRP-PHAT, których wyniki są przekazywane jako sterowania w formie sygnału PWM do płytki sterownika serwo mechanizmów PCA9685.



(a) płytka sterowania ręcznego



(b) mikrokontroler ESP32

(c) mikrofon
SEN0487

Rysunek 2.7. Wybrane komponenty elektroniczne modułu

2.3.3. Część programowa

Mikrokontroler ESP32 działa w systemie czasu rzeczywistego FreeRTOS, który szereguje zadania. Program został opracowany w języku C++ dla frameworku Arduino, który wspiera również mikrokontrolery firmy Espressif. W programie wykorzystano timery sprzętowe do akwizycji pomiarów z mikrofonów. Do szeregowanych na dwóch rdzeniach zadań należą (posortowane według priorytetu: od najwyższego do najniższego):

1. `sourceDetectionTask` – przetwarzanie zebranych danych z mikrofonów w ramach algorytmu detekcji źródła dźwięku SRP-PHAT, w tym wyliczanie transformat Fouriera;
2. `manualControllerTask` – obsługa modułu sterowania ręcznego, w tym przycisków, diod sygnalizacyjnych i rejestru przesuwnego;
3. `expressionTask` – podstawowe ekspresje powiek i oczu, przeprowadzane na podstawie nagłych zmian natężenia dźwięku (zasypianie, zaskoczenie);
4. `blinkingTask` – mruganie powiek w losowych interwałach (od 2.5 do 4 sekund);
5. `printTask` – (domyślnie wyłączone) wyświetlanie komunikatów niezbędnych przy debugowaniu.

2.4. Uzyskane wyniki

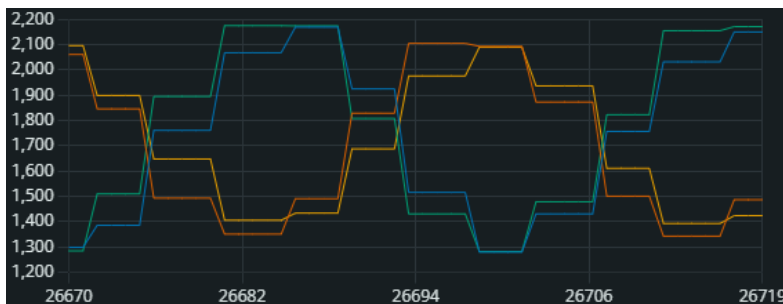
Pod względem konstrukcyjnym mechanizmy oczu oraz powiek doskonale się sprawdzają, chodzą bardzo płynnie i dostatecznie szybko. Najdrobniejsze elementy mechanizmów nie ulegają większemu zużyciu nawet po tysiącach cykli.

Zastosowanie systemu czasu rzeczywistego w mikrokontrolerze umożliwiło proste i bezproblemowe szeregowanie zadań – wydzielono zadania dla mrugania, ruchu gałek, sterowania z poziomu pilota, a także obliczeń algorytmu SRP-PHAT. Zadania wykonują się praktycznie równolegle, z wyjątkiem zadania algorytmu, które wykonuje się średnio co jedną sekundę – dużo czasu zajmują pętle po wszystkich iteracjach kątów α i β , ale też samo wyliczanie transformat Fouriera. Czas ten wzrasta wraz ze zwiększaniem ilości próbek transformaty oraz ze zmniejszaniem inkrementów kątów α i β .

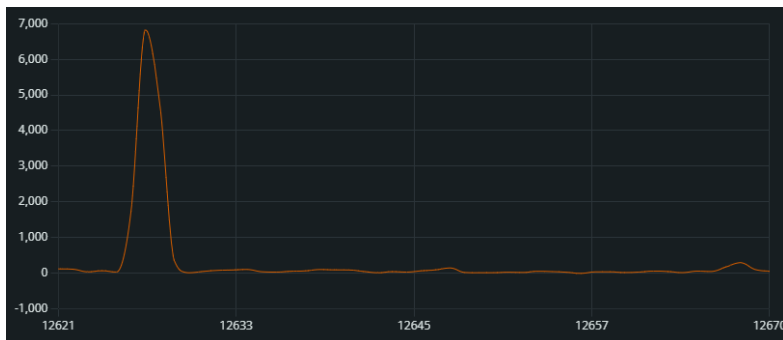
Dla wybranej częstotliwości próbkowania 10 kHz (i sygnału – 5 kHz), odczytywano poprawnie dane z czterech kanałów przetwornika analogowo-cyfrowego ADC1. W celu przetestowania działania zestawu mikrofonów, z poziomu aplikacji w telefonie wygenerowano sygnał dźwiękowy o częstotliwości 1 kHz. Przebiegi każdego z sygnałów następnie wyry-

sowano, wykorzystując do tego narzędzie *Serial Plotter* ze środowiska programistycznego Arduino IDE. Plotter dokonywał na bieżąco odczytów z portu szeregowego, na którym mikrokontroler wypisywał kolejne wartości pomiarów. Na wykresie (rys. 2.8a) zauważono wyraźne przesunięcie w fazie par sygnałów, które wynikało z położenia mikrofonów względem źródła dźwięku. Przesunięcie wystąpiło również dla poszczególnych mikrofonów z pary, jednak było ono znacznie mniej widoczne, co wynikało z mniejszego, niemal o rząd wielkości, odstępu między mikrofonami.

Zgodność generowanej częstotliwości 1 kHz z pomiarami mikrofonów, zobrazowano również pod postacią wyznaczonej dla sygnału transformaty Fouriera. Algorytm szybkiej transformacji (FFT) wykonywano dla 256 próbek i częstotliwości próbkowania 10 kHz. Nałożono także okno Hamminga, a do narysowania histogramu (rys. 2.8b) obliczono moduł transformaty.



(a) przebieg



(b) transformata Fouriera z oknem Hamminga

Rysunek 2.8. Przebieg i wykres transformaty Fouriera sygnałów analogowych zestawu czterech mikrofonów dla oddalonego o 10 cm generatora sygnału o częstotliwości 1 kHz

Największym problemem okazała się być implementacja algorytmu SRP-PHAT. Nie wykluczone, że błędy spowodowane były działaniem biblioteki `arduinoFFT`, którą wykorzystano do obliczeń transformat Fouriera i niezbędne było jej rozszerzenie o dodatkowe funkcjonalności, w tym działania na transformatach. Wpływ na ostateczny wynik miał najprawdopodobniej również zakres działania mikrofonów MEMS, ich ilość, ale także ich dokładność, nie mówiąc już o bardzo niskiej (256) ilości próbek dla FFT i dość ograniczonej częstotliwości próbkowania 10 kHz.

Intuicyjnie, w pierwszej kolejności należało wziąć pod uwagę szумы – pochodzące od serwomechanizmów, czy po prostu z otoczenia, przykładowo drgania przenoszone przez stół, na którym leży moduł oczu. Przefiltrowanie tych drgań (poniżej 500 Hz i powyżej 3000 Hz) przy pomocy filtru pasmowoprzepustowego jednak wiele nie dało i, choć algorytm generował orientacyjne wyniki, tak były one obarczone zbyt dużym błędem i nie można było ich praktycznie wykorzystać przy sterowaniu mechanizmami oczu.

2.5. Podsumowanie

W ramach pracy pomyślnie zaprojektowano i skonstruowano animatroniczny moduł oczu, składający się z dwóch mechanizmów oczu, mechanizmu powiek, wycinka twarzy, elementów bazujących i stojaka. Skonstruowano także układ elektroniczny, w skład którego wszedł mikrokontroler Espressif ESP-32, sterownik serwomechanizmów PCA9685, układ przełączania zasilania, moduł sterowania ręcznego oraz zestaw czterech mikrofonów MEMS SEN0487.

W ramach badań przeprowadzonych nad algorytmem SRP-PHAT, zaimplementowano odczytywanie przetwornika analogowo-cyfrowego z przerywania timera sprzętowego, wyznaczanie transformat Fouriera algorytmem Cooleya–Tukeya oraz wyrysowywanie mierzonych sygnałów i ich transformat na porcie szeregowym. Ostatecznie, implementacja algorytmu SRP-PHAT nie powiodła się, a przynajmniej nie w zadowalającym stopniu – osiągnięta precyzja jest zbyt niska, by móc bezpośrednio sterować modułem oczu, na podstawie pomiarów przeprowadzanych przez mikrofony.

2.5.1. Proponowane zmiany i udoskonalenia modułu

Moduł, choć w stosunku do rozmiarów głowy typowego robota sam w sobie jest dość mały, można jeszcze zdecydowanie pomniejszyć. Najwięcej miejsca zajmuje sposób montażu serwomechanizmów osi y oczu. Ten wynika bezpośrednio z ograniczeń ruchu nałożonych przez mechanizm oczu – niemożliwy jest chociażby obrót sworznia głównego wokół jego osi głównej (czyli osi x oka), przez co serwomechanizmy osi y nie mogą zostać zamontowane tak samo jak serwomechanizmy osi x , na płycie bazującej.

Zminiaturyzować można także cały układ elektroniczny. Tutaj najprostsze byłoby zaprojektowanie jednej, dwustronnej płytki PCB o wymiarach około 30×70 mm (w module są obecnie takie trzy) i zleconej do wykonania, przykładowo firmie JLC PCB. Ta po jednej stronie posiadałaby sterownik serwomechanizmów (może być nawet oddzielny tak jak teraz, to jednak pogrubiliby płytkę o około 4–5 mm), a po drugiej mikrokontroler ESP32 i blok zasilania, zintegrowane już z płytką (samo ESP32 w module znajduje się na płycie deweloperskiej, którą bez problemu można „przerzucić” na oddzielną płytkę i pozbyć się przy okazji zbędnych elementów). Moduł sterowania ręcznego w normalnym module byłby opcjonalny, a obecny sposób przekazywania do niego danych można przerobić na ustandaryzowaną, zajmującą o wiele mniej miejsca magistralę.

Moduł w wersji produkcyjnej powinien komunikować się, przede wszystkim, szybko – komunikacja szeregową przez interfejs RS232, wykorzystywana pobieżnie w tej pracy, do najszybszych już zdecydowanie nie należy. Przesyłane dane warto również ustandary-

zować, ustrukturyzować, by bez względu na platformę sprzętową, czy urządzenie *master* (które panowałyby nad pracą modułu oczu), dane zawsze były czytelne dla każdego i przesyłane w całości, bez błędów. SPI, USB, Ethernet, CAN, Protocol Buffers (protobuf) – to tylko niektóre z technologii, które bez problemu można zaimplementować w module (nie wspominając też o tym, że ESP32 komunikuje się również po WiFi i Bluetooth).

Bibliografia

- [1] Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M., *Additive manufacturing technologies*, wydanie trzecie, Wydawnictwo Springer, Berlin, Niemcy, 2020.
- [2] DiBiase J.H., A High-Accuracy, Low-Latency Technique for Talker Localization in Reverberant Environments Using Microphone Arrays. Rozprawa doktorska, Brown University, Rhode Island, Stany Zjednoczone, 01-05-2000.
- [3] Chen H., Liu C., Chen Q., Efficient and robust approaches for three-dimensional sound source recognition and localization using humanoid robots sensor arrays. *International Journal of Advanced Robotic Systems* **2020**, *17*, s. 1–5.

Sterowanie modelem blokarta przy zmiennej sile wiatru i obecności przeszkód

inż. Zuzanna Kunikowska
Automatyka i Robotyka

dr inż. Bogdan Kreczmer
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Niniejsza praca powstała w wyniku chęci stworzenia systemu sterowania dla pojazdów z napędem żaglowym, który w sposób optymalny wykorzystuje siłę wiatru, utrzymuje kurs kompasowy oraz wykrywa i autonomicznie omija napotykane przeszkody. Skonstruowany model blokarta został opracowany od podstaw celem zapewnienia odpowiedniego standardu kluczowych elementów konstrukcji, wpływających na jakość sterowania. Wykorzystano mikrokontroler do obsługi zastosowanych czujników oraz elementów wykonawczych. Przeprowadzono badania zależności siły ciągu żagla od kąta ustawienia bomu dla różnych kierunków wiatru. Były one kluczowe dla uzyskiwania optymalnej prędkości przez pojazd. Opracowano algorytmy sterowania, zapewniające optymalne ustawianie żagla, utrzymywanie kursu kompasowego i omijanie przeszkód przy zmiennej sile i kierunku wiatru. Przeprowadzono eksperymenty potwierdzające skuteczność systemu sterowania. Opracowany system mógłby stanowić wsparcie dla załogi, sugerując odpowiednie reakcje oraz umożliwić stałe monitorowanie warunków wiatrowych i detekcję przeszkód.

3.1. Cel i założenia

Celem niniejszej pracy jest zaprojektowanie i zaimplementowanie systemu sterowania modelem blokarta. System ten ma umożliwić optymalne wykorzystywanie siły wiatru oraz zapewnić poruszanie się wzdłuż zadanego kursu kompasowego w środowisku kolizyjnym. Głównymi założeniami projektowymi pracy są:

- zaprojektowanie oraz zbudowanie modelu blokarta wraz z jego ożagłowaniem,
- wykonanie odpowiedniego sterownika wyposażonego w sensory oraz elementy wykonawcze, które zapewnią właściwe sterowanie blokartem,
- stworzenie systemu sterowania umożliwiającego: utrzymywanie kursu kompasowego, optymalne sterowanie żaglem, wykrywanie przeszkód oraz ich autonomiczne omijanie przy zmiennej sile i kierunku wiatru.

3.2. Wstęp teoretyczny

Blokart jest jednoosobowym pojazdem z napędem żaglowym. Składa się z wózka, masztu i żagla. Wózek wyposażony jest w kierownicę, trzy koła i siedzenie. Operator, korzystając z szotów, reguluje ustawienie rogu szotowego żagla w zależności od kierunku wiatru.

Żagiel przekształca energię wiatru, wytwarzając siły aerodynamiczne. Wypadkowa siła aerodynamiczna rozkładana jest na siłę ciągu, od której zależy prędkość poruszania się, oraz siłę przechylającą. Momentowi przechylającemu przeciwdziała stateczność, od której zależy dopuszczalna wielkość powierzchni ożaglowania przy określonej sile wiatru.

Prędkość poruszania się jednostki bezpośrednio związana jest z kątami natarcia żagla, które wpływają na siły aerodynamiczne. Optymalny kąt natarcia jest zależny od charakterystyki aerodynamicznej żagla, czyli zależy od jego charakterystyki geometrycznej takiej jak smukłość, wybrzuszenie oraz skręt. Wzór (3.1) opisuje stosunek długości podstawy żagla do jego wysokości, co definiuje smukłość żagla.

$$S_m = \frac{L}{H} \quad (3.1)$$

Wyższa smukłość wpływa na zwiększenie siły nośnej generowanej przez żagiel oraz zmniejszenie oporu siły aerodynamicznej, jednak negatywnie wpływa na stateczność. Wybrzuszenie żagla wyraża się wzorem (3.2), czyli jest stosunkiem głębokości żagla do długości jego cięciwy.

$$w = \frac{G}{c} \quad (3.2)$$

Wybrzuszenie wpływa na profil aerodynamiczny żagla. Optymalne wybrzuszenie umożliwia zwiększenie siły nośnej przy określonym kącie natarcia. Opis pracy żagla oraz przedstawione wzory (3.1) i (3.2) zostały opracowane na podstawie [1].

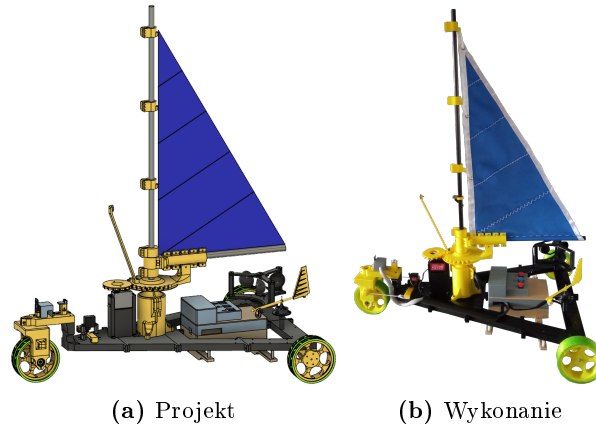
Dobieranie optymalnego kąta natarcia żagla jest teoretycznie możliwe za pomocą modeli matematycznych, ale ze względu na liczne i skomplikowane zależności, takie jak np. nielaminarny przepływ powietrza czy ograniczone możliwości wyznaczenia parametrów aerodynamicznych konstrukcji, właściwsze wydaje się podejście empiryczne.

3.3. Projekt i wykonanie

Wykonano projekt konstrukcji modelu blokarta oraz zaprojektowano system sterowania. Brak dostępnych rozwiązań komercyjnych dopasowanych do rozmiarów modelu wymusił własne zaprojektowanie żagla oraz stworzenie czujników do pomiaru siły wiatru. Przygotowano projekt systemu sterowania blokartem z następującymi założeniami: umożliwienie dostosowywania kąta natarcia żagla do siły wiatru, sterowanie serwomechanizmem w celu osiągnięcia pożądanej pozycji żagla, kontrola kierunku jazdy za pomocą przedniego koła zgodnie z zadaniem kierunkowym, wykrywanie przeszkód, omijanie ich oraz powrót na docelowy kurs. Na podstawie opracowanego projektu przystąpiono do realizacji modelu blokarta.

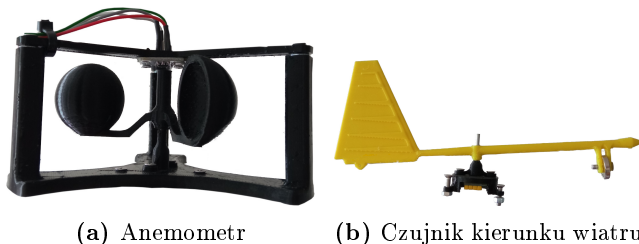
3.3.1. Konstrukcja

Model blokarta został zaprojektowany z uwzględnieniem możliwości wydruku jego komponentów drukarką 3D korzystając z technologii FDM. Projekt wykonany został przy użyciu programu Fusion 360. Na rysunku 3.1 przedstawiono finalny projekt modelu blokarta (rysunek 3.1a) oraz stworzoną konstrukcję rzeczywistą (rysunek 3.1b).



Rysunek 3.1. Model blokarta

Żagiel został wyprofilowany, aby zwiększyć jego sprawność w porównaniu do modeli dostępnych na rynku. Składa się z 5 brytów, co umożliwiło dokładniejsze jego wyprofilowanie. Na podstawie wzorów (3.1) i (3.2) obliczono, że smukłość żagla wynosi 1,75, a wybrzuszenie $1/4$. Konieczne było opracowanie nowego rozwiązania dla czujników siły wiatru, z uwagi na potrzebę posiadania lekkich czujników, których masa znacząco nie wpływałaby na zakres ruchu blokarta. Wykonano ich konstrukcję mechaniczną uwzględniając mocowania dla modułów czujników, takich jak enkoder magnetyczny (dla anemometru) oraz magnetometr (dla czujnika kierunku wiatru), co zostało przedstawione na rysunku 3.2.

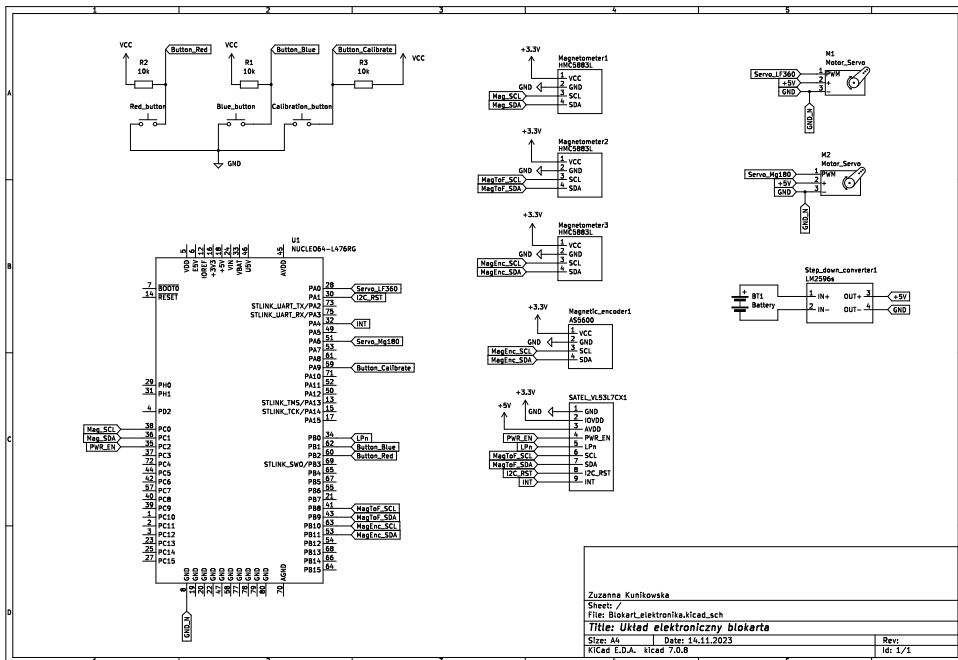


Rysunek 3.2. Czujniki siły wiatru

3.3.2. Układ elektroniczny blokarta

Podczas projektowania układu elektronicznego blokarta wykorzystano moduł Nucleo z 32-bitowym mikrokontrolerem STM32L476RG, który posiada rdzeń ARM Cortex M4

o taktowaniu 80 MHz. W celu spełnienia założeń projektowych, uwzględniono trzy magnetometry *HMC5883L* do pomiaru pola magnetycznego w trzech osiach, umożliwiające określenie orientacji czujnika kierunku wiatru, bomu oraz blokarta. Dodatkowo, do pomiaru kierunku i prędkości obrotów anemometru zastosowano enkoder magnetyczny *AS5600*. Czujnik odległości ToF *VL53L7CX* został wykorzystany do detekcji i lokalizacji przeszkód. W projekcie zdecydowano się na dwa serwomechanizmy *PowerHD LF-20MG-360* i *MG-90S* ze względu na ich moment obrotowy, wymiary i zakres ruchu. Zasilanie układu zapewnia zewnętrzna bateria o napięciu nominalnym 9 V, które jest obniżane i stabilizowane przy użyciu przetwornicy step-down ze sterownikiem *LM2596*. Moduły *HMC5883L*, *AS5600* oraz *VL53L7CX* zawierają wszystkie niezbędne do działania układów elementy pasywne, więc nie było konieczne ich uwzględnianie na schemacie układu elektronicznego przedstawionego na rysunku 3.3.

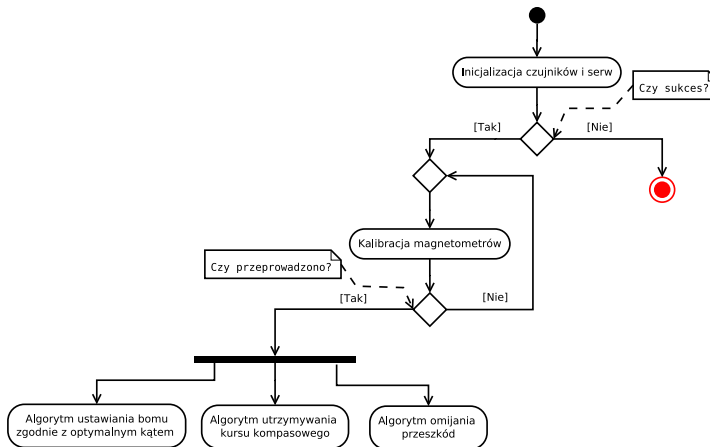


Rysunek 3.3. Schemat układu elektronicznego blokarta

Podczas realizacji układu elektronicznego blokarta wykorzystano płytkę drukowaną uniwersalną dwustronną, do której przyłutowano gniazda. Umożliwiło to wygodne połączenie poszczególnych pinów modułu Nucleo ze wszystkimi sensorami i elementami wykonawczymi.

3.3.3. Oprogramowanie

Zaprojektowano główną funkcję programu, której schemat przedstawia rysunek 3.4. Obejmuje trzy algorytmy: ustawiania bomu zgodnie z optymalnym kątem w zależności od aktualnych warunków wiatrowych, utrzymywania kursu kompasowego oraz wykrywania i omijania przeszkód.



Rysunek 3.4. Schemat blokowy działania głównej funkcji programu

Algorytm ustawiania bomu zgodnie z optymalnym kątem określa kąt ustawienia bomu w zależności od burty nawietrznej i strony, po której znajduje się żagiel. Algorytm utrzymywania kursu kompasowego korzysta z odczytów magnetometru, a jego celem jest utrzymanie zadanego kursu kompasowego przez sterowanie kołem przednim. Algorytm omijania przeszkód wykorzystuje odczyty z matrycowego czujnika odległości ToF. W przypadku wykrycia przeszkody, program modyfikuje oczekiwaną wartość kursu kompasowego, aby uniknąć kolizji.

Podczas realizacji sterownika użyto modułu Nucleo. Oprogramowanie zostało stworzone w środowisku STM32CubeIDE. Sterownik obsługiwał: trzy magnetometry, enkoder magnetyczny, czujnik odległości ToF, 3 przyciski oraz 2 serwomechanizmy. Komunikacja z czujnikami odbywała się przez magistralę I^2C , a sterowanie serwomechanizmami realizowano za pomocą dwóch liczników czasu generujących sygnał PWM. Obsługa przycisków została zrealizowana przez konfigurację trzech pinów jako wejścia/wyjścia ogólnego przeznaczenia (GPIO) z podciągnięciem do VDD. Komunikacja między sterownikiem a komputerem odbywała się przez interfejs szeregowy USART.

3.4. Uzyskane wyniki

Zaimplementowane algorytmy zostały zweryfikowane przez testy w dwóch scenariuszach. Pierwszy z nich, opisany w podrozdziale 3.4.1, dotyczył pomiaru siły ciągu żagla w zależności od kierunku wiatru. Następnie przeprowadzono testy, opisane w podrozdziale 3.4.2, potwierdzające skuteczność algorytmów utrzymywania kursu kompasowego oraz detekcji i unikania kolizji przy zmiennej sile wiatru.

3.4.1. Testowanie algorytmu sterowania żaglem

Stworzono specjalne stanowisko pomiarowe (rysunek 3.5) składające się z: Arduino UNO, belki tensometrycznej, wzmacniacza, przycisku, wyświetlacza LCD, ograniczeń bocznych kół przymocowanych do deski, liny oraz wentylatora. Przygotowane stanowisko umożliwiło wykonanie 50 pomiarów po naciśnięciu przycisku, z których obliczano średnią wartość. To rozwiązanie znacząco poprawiło precyzję pomiarów w środowisku z turbulentnym przepływem powietrza generowanym przez wentylator.



Rysunek 3.5. Stanowisko pomiarowe do testów w kontrolowanych warunkach

Wykonano pomiary siły ciągu żagla w zależności od kąta ustawienia bomu dla różnych kierunków wiatru. Ustawiano wentylator w stałej pozycji i wykonywano serię pomiarów. Procedurę powtarzano, przestawiając wentylator, aż uzyskano pełen zakres pomiarowy, pomijając obszar kąta martwego. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów określono optymalne kąty ustawienia bomu, które zapewniały maksymalną siłę ciągu żagla dla danego kierunku wiatru. Otrzymane wyniki zostały zapisane w tabeli 3.1.

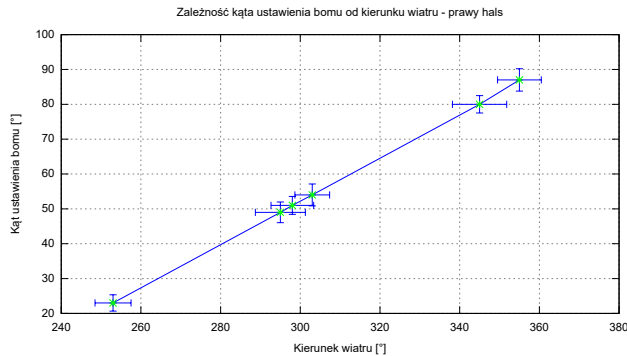
Tabela 3.1. Optymalne kąty ustawienia bomu (β) zależne od kierunku wiatru względem ustawienia modelu blokarta (θ)

β [°]	$\Delta\beta$ [°]	θ [°]	$\Delta\theta$ [°]
268,0	2,5	0,0	4,7
271,0	2,6	10,0	6,0
283,0	2,5	20,0	4,4
289,0	2,2	30,0	5,8
294,0	2,4	40,0	4,9
301,0	2,5	50,0	5,0
307,0	2,6	60,0	5,6
313,0	2,3	70,0	4,9
44,0	2,5	290,0	4,9
55,0	2,4	300,0	5,1
60,0	2,5	310,0	5,7
63,0	2,5	320,0	4,6
67,0	2,3	330,0	4,1
75,0	2,6	340,0	4,4
87,0	2,1	350,0	5,6
91,0	2,1	360,0	5,2

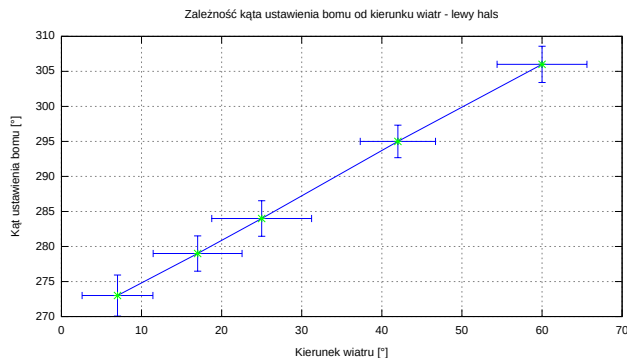
Na podstawie tych danych wyznaczono równania funkcji liniowej najlepiej dopasowanej do przedstawionych pomiarów, z podzieleniem na prawy i lewy hals. Było to kluczowe do stworzenia algorytmu, który w sposób optymalny dobiera kąt ustawienia bomu w zależności od warunków wiatrowych. Przeprowadzono analogiczne pomiary dla modelu z działającym algorytmem sterowania kątem ustawiania bomu zależnie od kierunku wiatru. Wyniki zostały zebrane w tabeli 3.2 oraz przedstawione na rysunku 3.6 dla prawego i 3.7 dla lewego halsu.

Tabela 3.2. Pomiary optymalnego kąta ustawienia bomu (β) realizowanego przez algorytm sterowania zależnie od kierunku wiatru względem ustawienia modelu blokarta (θ)

β [°]	$\Delta\beta$ [°]	θ [°]	$\Delta\theta$ [°]
7,0	4,4	273,0	2,9
17,0	5,6	279,0	2,5
25,0	6,2	284,0	2,5
42,0	4,7	295,0	2,3
60,0	5,6	306,0	2,6
253,0	4,5	23,0	2,4
295,0	6,3	49,0	3,0
298,0	5,4	51,0	2,6
303,0	4,4	54,0	3,1
345,0	6,8	80,0	2,4
355,0	5,5	87,0	3,2



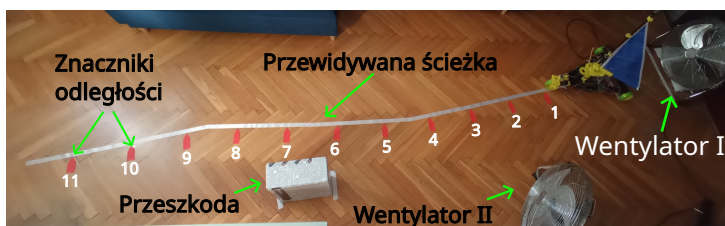
Rysunek 3.6. Zależność kąta ustawienia bomu od kierunku wiatru dla prawego halsu



Rysunek 3.7. Zależność kąta ustawienia bomu od kierunku wiatru dla lewego halsu

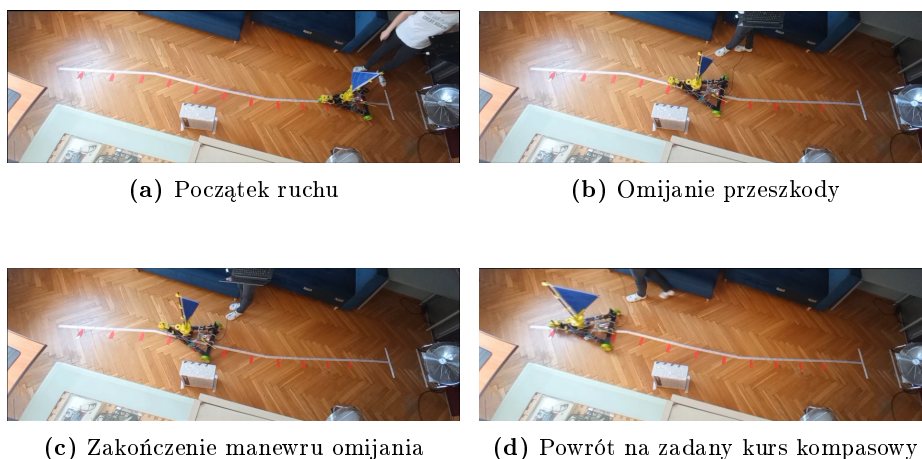
3.4.2. Testowanie algorytmu utrzymania kursu kompasowego i unikania kolizji

Blokart miał przemieszczać się zgodnie z zadanym kursem kompasowym. W sytuacji zagrożenia kolizją z obiektem miał automatycznie przeprowadzić manewr zmiany kursu. Po osiągnięciu bezpiecznej odległości od obiektu pojazd miał powrócić na pierwotny kurs. Przygotowano stanowisko testowe, tak jak to zostało pokazane na rysunku 3.8.



Rysunek 3.8. Stanowisko testowe

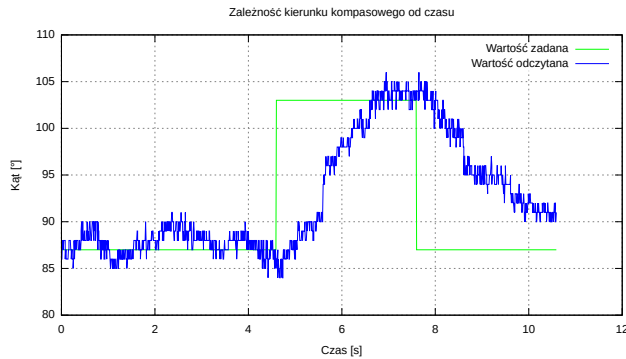
Eksperyment rozpoczął się ustawieniem modelu blokarta tak, aby przednie koło było wzdłuż przewidywanej ścieżki, zgodnie z rysunkiem 3.9a. Pojazd poruszał się z określonym kursem kompasowym. Wykrycie przeszkody inicjowało manewr omijania. Model skręcał przednie koło w prawo, unikając kolizji z przeszkodą z lewej strony. W trakcie manewru, zgodnie z rysunkiem 3.9b, model poruszał się wzdłuż zmodyfikowanego kursu kompasowego. Po trzech sekundach, brak wykrytej przeszkody powodował powrót do pierwotnego kursu, co zostało zobrazowane na rysunku 3.9c. Ostatecznie, model wracał na pierwotny kurs kompasowy, zakończony skręceniem przedniego koła w lewo, jak pokazano na rysunku 3.9d.



Rysunek 3.9. Przebieg eksperymentu potwierdzającego działanie systemu sterowania

Podczas realizacji przedstawionego eksperymentu dokonywano pomiarów: kierunku wiatru wzdłuż ścieżki ruchu blokarta, kierunku kompasowego w zależności od czasu oraz kąta ustawienia bomu w zależności od czasu. Na podstawie wykresu przedstawionego na ry-

sunku 3.10 można odczytać, że między 4 a 5 sekundą ruchu nastąpiła zmiana kierunku kompasowego. Wynika to z wykrycia przeszkody po lewej stronie modelu, co jest zgodne ze sceną przedstawioną na rysunku 3.8.



Rysunek 3.10. Zależność kursu kompasowego od czasu dla wartości zadanej oraz wartości odczytanej

3.5. Podsumowanie

Wszystkie cele pracy zostały zrealizowane, w tym wykonanie modelu blokarta i stworzenie systemu sterowania uwzględniającego zmienne warunki wiatrowe i obecność przeszkód. Przeprowadzono skuteczne testy potwierdzające poprawność zaimplementowanych algorytmów.

Stworzenie modelu blokarta było niezbędne do przeprowadzenia badań i implementacji systemu sterowania. Zmniejszenie modelu był konieczny ze względu na ograniczenia czasowe, brak specjalistycznych narzędzi oraz doświadczenia. Mniejszy rozmiar konstrukcji umożliwił przeprowadzenie wiarygodnych testów potwierdzających poprawną realizację pracy. Spowodowało to jednak też wiele trudności. Istnieje niewiele modeli żaglowców, których rozmiary umożliwiłyby wykorzystanie ich podczas tworzenia pracy. Szczególnym wyzwaniem było stworzenie czujników siły wiatru przedstawionych na rysunku 3.2. Wynikało to z konieczności ograniczenia ich masy, w porównaniu do dostępnych rozwiązań komercyjnych. W czujniku kierunku wiatru zastosowano magnes neodymowy do zaburzania pola magnetycznego, co umożliwiło precyzyjne pomiary przy użyciu magnetometru bez zaburzania ruchu lotki. Wadą zastosowanego rozwiązania jest konieczność przeprowadzania procesu kalibracji po każdym uruchomieniu sterownika.

Przeprowadzenie testów wymagało przygotowania odpowiednich stanowisk oraz warunków. Nielaminarny przepływ powietrza generowany przez wentylatory wprowadził znaczne wyzwania. Wykonywanie wielu pomiarów oraz obliczanie ich wartości średniej w warunkach turbulentnych umożliwiło uzyskanie powtarzalny charakterystyk. Na podstawie przedstawionych pomiarów w tabelach 3.1 i 3.2 można stwierdzić poprawność działania algorytmu optymalnego sterowania żaglem w zależności od kierunku wiatru. Kąt ustawienia bomu dla danego kierunku wiatru jest w granicach błędów pomiarowego dla działającego algorytmu sterowania. W przypadku wyników przedstawionych na rysunku 3.10 różnica wartości odczytanej z wartością zadaną wynika z konieczności prze-

jechania odpowiedniej odległości przez pojazd, aby skierował się na właściwy kurs. Czas osiągnięcia oczekiwanego azymutu jest uzależniony od prędkości poruszania się modelu blokarta. Podczas tego eksperymentu potwierdzono pomiarami działanie systemu, który zapewnia optymalne sterowanie żaglem, utrzymuje kurs kompasowy, wykrywa i autonomicznie omija przeszkody.

Zastosowane rozwiązanie mogłoby być używane jako wsparcie dla załogi jednomasztowych jednostek pływających lub jeżdżących, które sugerowałoby odpowiednią reakcję na zmieniające się warunki. Możliwe jest rozwijanie pracy, na przykład przez dodanie modułu do odtwarzania dźwięku, aby użytkownik był w przystępny sposób informowany o wykonywanych manewrach. Zastosowanie dodatkowego napędu w postaci silników prądu stałego umożliwiłoby wspomaganie jazdy modelu w sytuacjach, gdy siła wiatru jest niewystarczająca jak również pozwoliłoby na hamowanie pojazdu.

Bibliografia

- [1] Marchaj C., *Teoria żeglowania. Aerodynamika żagla*, wydanie czwarte, Alma-Press Sp. z o.o., Warszawa, Polska, 2016.

Projektowanie i implementacja modułu obsługującego system elektroniczny rakiety eksperymentalnej R5 Aurora

inż. Jakub Siuda

Automatyka i Robotyka

dr inż. Konrad Kluwak

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Głównym celem omawianej pracy dyplomowej inżynierskiej jest zaprojektowanie oraz stworzenie modułu do obsługi systemu elektronicznego rakiety eksperymentalnej R5 „Aurora”, nazywanego w streszczeniu modułem obsługującym oraz modułem obliczeniowo-komunikacyjnym. W pracy przedstawione zostały zagadnienia teoretyczne oraz praktyczne dotyczące projektowania systemów wbudowanych od strony elektronicznej jak i programistycznej. Opisane zostały rozwiązania związane z systemami komunikacji przewodowej oraz bezprzewodowej, akwizycją i zapisem danych oraz sterowaniem i obsługą rozproszonego systemu elektronicznego. Głównym efektem pracy jest urządzenie zdolne do obsługi złożonego systemu elektronicznego rakiety, którego możliwości zostały potwierdzone przez testy komunikacyjne oraz lotne. Dodatkowo system również pozwala na jego rozwój oraz łatwą modyfikację pod przyszłe projekty koła naukowego PWr in Space.

4.1. Wstęp

Od 2019 roku koło naukowe PWr in Space rozwija projekt poddźwiękowej rakiety napędzanej silnikiem hybrydowym, o docelowym apogeum wynoszącym 3 km. Głównymi elementami rakiety są: silnik hybrydowy, struktura nośna z włókna węglowego i szklanego, dwustopniowy system odzysku, ładunek badawczego oraz rozproszony system elektroniczny z centralnym punktem, którym jest komputer pokładowy. Najnowsza wersja projektu nosi nazwę R5 „Aurora”, w której wprowadzono liczne ulepszenia w konstrukcji rakiety i butli silnika, jak i również stworzono moduł obsługujący system elektroniczny, który wchodzi w skład komputera pokładowego rakiety.



Rysunek 4.1. Wizualizacja rakiety R5 Aurora [1]

4.2. Cel i wymagania projektowe

Celem pracy jest stworzenie kompleksowego modułu obsługi systemu elektronicznego, którego zadaniem będzie sterowanie całym systemem rakiety oraz utrzymywanie komunikacji z modułami stacji naziemnej. Moduł ten stworzy podstawę przyszłych komputerów pokładowych jak i rozwinięciem oraz ustandaryzuje obecny system elektroniczny. W zakres projektu wchodzi stworzenie schematów elektronicznych, zaprojektowanie płytki drukowanej „PCB”, stworzenie oprogramowania spełniającego poniższe wymagania oraz przetestowanie stworzonej pracy. W ramach określonego celu projektu, zdefiniowane zostały poniższe wymagania, które muszą zostać spełnione przez moduł obsługujący:

- implementacja oraz obsługa maszyny stanów,
- obsługa komunikacji bezprzewodowej na pasmach EU868 i US915 oraz o częstotliwości 2.4 GHz,
- odbieranie danych od modułów elektronicznych rakiety oraz ich wysterowanie,
- odbiór, przetwarzanie i rozpatrywanie przychodzących komend sterujących,
- wysyłanie telemetrii,
- zapis danych na nośniki pamięci nieulotnej,
- obsługa błędów oraz bezpieczeństwa całego systemu.

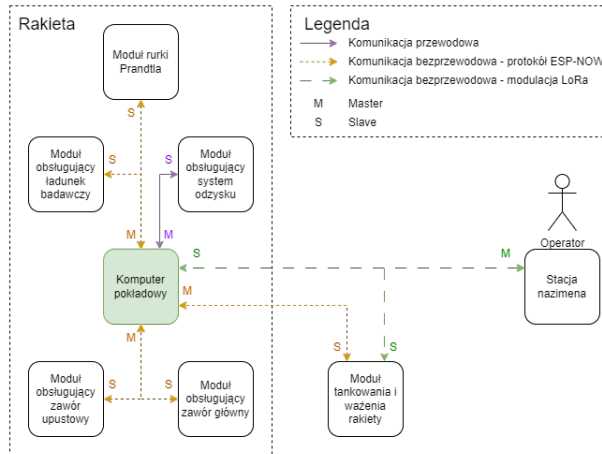
4.3. System elektroniczny rakiety

System elektroniczny projektu R5 „Aurora” składa się z kilku modułów posiadających własne źródło zasilania oraz komunikujących się bezprzewodowo z systemem obsługującym. Wyjątkiem jest tutaj moduł systemu odzysku, który ze względów bezpieczeństwa oraz redundancji komunikuje się przewodowo z komputerem pokładowym i korzysta z jego zasilania.

Głównym elementem tego systemu jest moduł obliczeniowo-komunikacyjny wchodzący w skład komputera pokładowego, który służy jako pośrednik komunikacji między stacją naziemną a modułami znajdującymi się w rakiecie lub jej bliskim otoczeniu. Moduły wewnątrz rakiety używają krótkozasięgowej komunikacji do wymiany danych z komputerem pokładowym, podczas gdy stacja naziemna używa komunikacji dalekiego zasięgu do wysyłania komend sterujących i odbioru telemetrii. Ze względów bezpieczeństwa system tankowania obsługuje oba sposoby komunikacji. Domyślnie używa on połączenia krótkozasięgowego, ale w przypadku awarii komputera pokładowego może zostać przełączony na obsługę komunikacji dalekiego zasięgu.

Przekaz danych w systemie opiera się na asymetrycznym modelu master-slave. W opisywanym systemie elektronicznym występują trzy linie komunikacyjne. Bezprzewodowa transmisja danych krótkiego zasięgu oraz transmisja przewodowa są kontrolowane przez komputer pokładowy, podczas gdy bezprzewodowa transmisja dalekiego zasięgu jest ob-

służeniwana przez stację naziemną. Na rysunku 4.2 zaprezentowano linie komunikacyjne systemu elektronicznego oraz podłączone do nich moduły wraz z ich rolami.



Rysunek 4.2. Schemat komunikacji między modułami elektronicznymi

4.4. Moduł obsługujący

Moduł obsługujący został zaprojektowany w taki sposób aby możliwe było zapewnienie obsługi systemu elektronicznego rakiety przy jednoczesnym zachowaniu uniwersalności, pod względem dobranych podzespołów oraz stworzonego oprogramowania, tak aby układ mógł być ponownie wykorzystywany w innych projektach. W ogólności możemy podzielić go na elektronikę oraz oprogramowanie.

Elektronika to zespół elementów, które umożliwiają realizację wcześniej zdefiniowanych wymagań. Obejmuje to m.in. mikroprocesor, różnorodne czujniki, moduły komunikacji radiowej, GPS, pamięci flash i SD oraz układy zasilania. Element ten również pozwala na połączenie modułu obsługującego z innymi elementami komputera pokładowego, przez odpowiednie złącza.

Oprogramowanie odpowiada za zarządzanie elementami elektronicznymi, tworząc abstrakcyjną warstwę, która wykorzystuje te układy w określony sposób. Jest odpowiedzialne za logikę systemu, dostosowywanie mechanizmów komunikacji oraz możliwość dostosowania modułu do potrzeb misji i rakiety. Tworzy również interfejs umożliwiający użytkownikowi sterowanie systemem.

Z logiki działania systemu możemy wyodrębnić kilka kluczowych elementów:

- **Maszyna stanów** – definiuje różne stany, w jakich może znajdować się system i określa przejścia między nimi. Stany determinują sposób działania oprogramowania w danym momencie, jednocześnie zabezpieczając system przed wykonaniem nieporządných operacji.
- **Komendy sterujące** – określają polecenia, które mogą być przekazywane do systemu w celu sterowania jego zachowaniem. Dzięki nim operator w prosty i klarowny sposób jest w stanie sterować całym systemem rakiety oraz przeprowadzać operacje naziemne doprowadzające do startu rakiety.

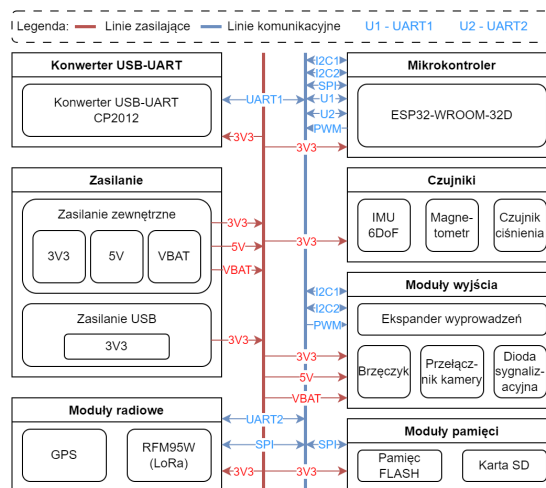
- **Telemetria** – moduł obsługujący przesyła zebrane dane z całego systemu elektronicznego, co stały okres czasu, dostarczając na bieżąco informacje o stanie rakiety. Jednocześnie sposób wysyłania telemetry narzuca schemat działania komunikacji dalekiego zasięgu.
- **Procedura odliczania** – składa się ona ze zbioru jasno określonych następujących po sobie wydarzeń, które doprowadzają do startu rakiety. Procedura ta rozpoczyna autonomię działania systemu (modułu obsługującego), która trwa aż do zakończenia misji.

4.5. Elektronika modułu

Układ elektroniczny posiada 2 osobne elementy odpowiedzialne za dostarczenie zasilania. Pierwszy z nich dostarcza napięcia o wartościach 3.3 V (3V3), 5 V (5V) i 7.8 V (VBAT) z zewnętrznego źródła, którym jest moduł zasilający komputera pokładowego. Drugi element natomiast dostarcza zasilanie o wartości 3.3 V oraz komunikację z mikrokontrolerem przez złącze USB. Główne napięcie zasilania modułu wynosi 3.3 V oraz jest nazywane główną linią zasilania. Reszta z linii dostarcza napięcie na mniej znaczące elementy, bez których system nadal będzie w stanie działać poprawnie, lecz z ograniczonymi możliwościami.

Elementy zastosowane w układzie komunikują się z mikrokontrolerem przez takie protokoły komunikacji szeregowej, jak: UART, SPI oraz I²C. Również jeden element sterowany jest przez modulację szerokością impulsów PWM. Uogólniony schemat połączeń (rys. 4.3) ukazuje elementy wchodzące w skład modułu oraz najważniejsze zależności między nimi, takie jak sposób komunikacji oraz dostęp do zasilania.

Na podstawie schematu na rysunku 4.3 powstał model płytki drukowanej, który został zlecony do produkcji. Następnie wszystkie niezbędne elementy zostały przylutowane na płytkę PCB, a cały układ został dokładnie zbadany i przetestowany pod kątem poprawności działania systemu.

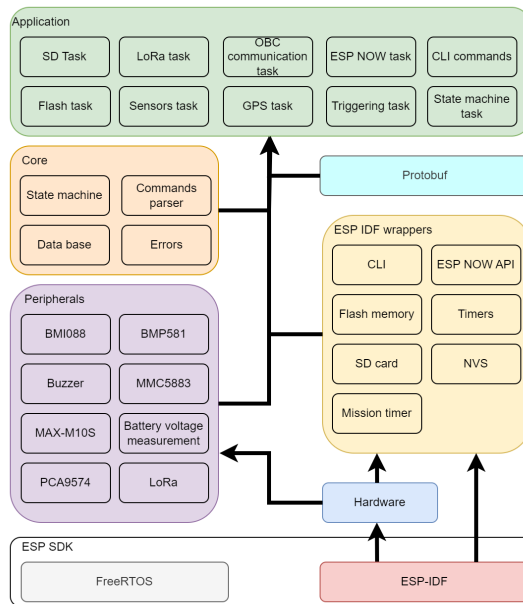


Rysunek 4.3. Uogólniony schemat połączeń między elementami elektronicznymi

4.6. Oprogramowanie modułu

Oprogramowanie pozwala na użycie wcześniej powstałej elektroniki, w taki sposób aby moduł spełnił założenia projektowe. Implementuje ono warstwę logiczną systemu, która na podstawie danych z czujników, informacji z innych modułów elektronicznych oraz sygnałów zewnętrznych, wykonuje wcześniej zdefiniowane akcje oraz sprawdza poprawność działania całego systemu. Za wykonywanie stworzonego oprogramowania odpowiedzialny jest mikrokontroler ESP-WROOM-32, który bezpośrednio obsługuje elementy elektroniczne przedstawione w poprzednim rozdziale. Program ze względu na jego złożoność oraz różnorodność wykonywanych zadań został oparty o system czasu rzeczywistego *FreeRTOS*, który pozwala na współbieżne, a nawet i w przypadku wybranego mikrokontrolera, równoległe wykonywanie kodu oprogramowania.

Elementy oprogramowania można podzielić na kilka warstw (rys. 4.4), z których najniższą stanowi środowisko programistyczne ESP, zawierające framework ESP-IDF i system operacyjny czasu rzeczywistego FreeRTOS. Warstwa sprzętowa konfiguruje mikrokontroler i protokoły komunikacji, które używane są do komunikacji z modułami i czujnikami. Niektóre elementy ESP-IDF zostały zmodyfikowane i opisane w warstwie opakowującej (ESP IDF wrapper). Rdzeń oprogramowania, oznaczony jako warstwa core, zawiera najważniejsze elementy logiczne systemu, natomiast warstwa aplikacyjna łączy te elementy tworząc logikę działania układu.



Rysunek 4.4. Schemat warstwowy oprogramowania

Zdecydowano się na zdecentralizowane podejście, gdzie każde zadanie uwzględnia aktualny stan rakiety indywidualnie i jest w stanie samodzielnie zażądać jego zmianę. Dane wytwarzane przez zadania zapisywane są bezpośrednio do elementu przechowującego in-

formacje o stanie rakiety (Data base), co ułatwia rozbudowę systemu i eliminuje dodatkowe zależności między zadaniami.

Rdzeń 0 obsługuje komunikację bezprzewodową, zdarzenia czasowe i maszynę stanów z najwyższym priorytetem. Rdzeń 1 zajmuje się komunikacją z modułami i czujnikami, gdzie każde zadanie ma taki sam priorytet, a operacje wykonywane są sekwencyjnie. Komunikacja między zadaniami odbywa się przez kolejki, które pozwalają na swobodną wymianę danych między współbieżnie działającymi fragmentami oprogramowania. Przedstawiony opis oprogramowania jest spojrzeniem wysokopoziomowym, natomiast nie wchodzi on w szczegóły działania ukazanych zadań, które tak naprawdę definiują działanie poszczególnych funkcjonalności modułu obsługującego takich jak maszyna stanów lub obsługa komunikacji krótkiego zasięgu.

4.7. Analiza danych z lotu

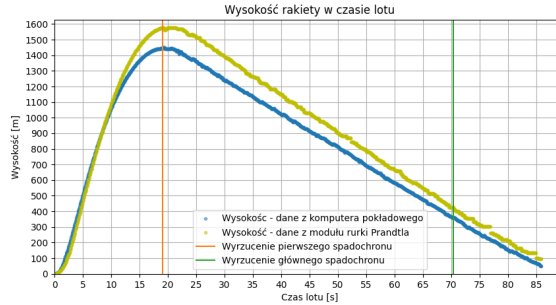
W czerwcu 2023 r. podczas zawodów Spaceport America Cup rakieta R5 Aurora odbyła swój pierwszy lot, wraz z modułem obsługującym na pokładzie. Był to pierwszy test lotny stworzonego projektu, którego poprzedzały niezliczone ilości testów naziemnych. Rakietą osiągnęła apogeum wynoszące około 1500 m, oraz wylądowała na powierzchni ziemi, a moduł obliczeniowo-komunikacyjny przez cały czas trwania misji dostarczał telemetrię rakiety oraz pozwalał na sterowanie systemem bez żadnych zauważalnych problemów. Również dzięki temu, z poziomu stacji naziemnej znane były podstawowe parametry lotu w czasie rzeczywistym, takie jak dane nawigacyjne, które pozwoliły na bezproblemowe odnalezienie rakiety przez zespół. Po odzyskaniu rakiety, przystąpiono do sprawdzenia nagrań oraz analizy danych z lotu, zebranych przez moduł obsługujący. Dane zapisywane były na pamięć SD z częstotliwością 20 Hz oraz zawierały informacje na temat działania całego systemu oraz pomiary ze wszystkich modułów elektronicznych.

Ze względu na charakter dokumentu przedstawiona zostanie jedynie analiza danych najbardziej istotnych z punktu widzenia zawodów, natomiast pełny przegląd zebranych informacji znajduje się w pracy dyplomowej.



Rysunek 4.5. Klatka nagrania zrobionego przez kamerę komputera pokładowego

Na rysunku 4.6 przedstawiono zmianę wysokości, na której znajdowała się rakietka w czasie trwania lotu. Wartość ta była mierzona oddzielnie przez moduł rurki Prandtla oraz moduł obliczeniowo-komunikacyjny. Pomarańczową linią zaznaczono moment wyrzucenia pierwszego spadochronu, a zieloną chwilę, w której otwarto główny spadochron. Widać, że pierwsza część odzysku została uruchomiona idealnie w momencie osiągnięcia apogeum przez raketę, a druga część na wysokości około 400 metrów, zgodnie z założeniami.



Rysunek 4.6. Wykres wysokości rakiety od czasu lotu

4.8. Podsumowanie

W trakcie realizacji projektu, udało się z powodzeniem wykonać ustalone założenia projektowe oraz sprawdzić działanie projektu w docelowych warunkach pracy. W ramach pracy zrealizowano następujące aspekty projektu:

- określenie założeń projektowych,
- opracowanie układu elektronicznego modułu,
- stworzenie projektu płytki drukowanej,
- wykonanie zaprojektowanego urządzenia oraz przetestowanie poprawności jego działania,
- przeprowadzenie testów komunikacji dalekiego zasięgu,
- opracowanie architektury oprogramowania oraz zależności między elementami wchodzącymi w jej skład,
- stworzenie oprogramowania, które realizuje zdefiniowane założenia projektowe.

Projekt został pomyślnie przetestowany podczas lotu, gdzie nie ukazały się żadne krytyczne błędy.

Stworzony moduł, stanowi podstawę komputera pokładowego, który rozwijany będzie przez przyszłe pokolenia członków koła naukowego PWr in Space. Natomiast wiedza zebrana w opisywanej pracy dyplomowej, ma za zadanie służyć jako dokumentacja opisanego projektu oraz całego systemu elektronicznego wykorzystywanego w raketach tworzonych przez koło naukowe.

Bibliografia

- [1] PWr in Space: Strona główna. Dostępny online: <https://pwrinspace.pwr.edu.pl/> [dostęp: 29-02-2024].

Przenośny zasilacz regulowany sterowany mikrokontrolerem

inż. Mateusz Wójcik

Automatyka i Robotyka

dr inż. Wojciech Domski

Katedra Cybernetyki i Robotyki

Niniejsza praca obejmuje projekt obwodu elektronicznego oraz oprogramowania regulowanego zasilacza stabilizowanego opartego o sterowanie mikrokontrolerem. W ramach czynności podjętych podczas realizacji projektu obrano założenia projektowe, stworzono schemat ideowy oraz dokonano doboru elementów. Następnie dokonano montażu oraz testów wstępnych obwodu drukowanego urządzenia. Do generowania sygnałów sterujących oraz akwizycji danych wykorzystano peryferia użytego mikrokontrolera. Układ wykonawczy urządzenia zrealizowano w topologii mostkowej przetwornicy *buck-boost*. W ramach oprogramowania zaimplementowano pętle regulacji napięcia wyjściowego oraz interfejs komunikacyjny. Stworzono także aplikację pozwalającą na sterowanie zasilaczem oraz wizualizację danych pomiarowych. W ramach aspektu badawczego pracy przeprowadzono analizę sprawności energetycznej urządzenia oraz zbadano odpowiedzi układu regulacji. Finalnie, przedstawiono podsumowanie przeprowadzonych w ramach pracy czynności oraz nakreślono plany rozwojowe projektu.

5.1. Cel i założenia

Celem pracy jest stworzenie programowalnego urządzenia, którego zadaniem jest przetwarzanie energii elektrycznej z pierwotnego źródła zasilania (np. pakietu ogniw litowo-jonowych) [1]. Parametry wyjściowe układu, takie jak napięcie, natężenie prądu czy tryb pracy mogą ulegać zmianom na żądanie użytkownika.

Zasilacz przewiduje możliwość podłączenia do urządzenia nadrzędnego, wysyłającego nastawy przewidzianym w projekcie kanałem komunikacyjnym. Możliwości takiego połączenia będą wówczas tożsame z możliwościami oferowanymi przez laboratoryjny zasilacz regulowany z możliwością zasilania z przenośnego źródła energii.

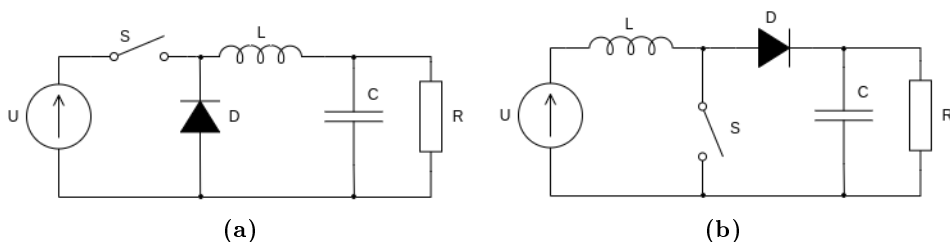
Główne założenia projektowe zrealizowanego projektu układu przekształtnika to:

- zakres napięć wejściowych: 9–18 V,
- zakres napięć wyjściowych: 0–24 V,

- zakres prądów wyjściowych: 0–3 A,
- rozdzielczość nastaw napięcia wyjściowego: 100 mV,
- rozdzielczość nastaw natężenia prądu wyjściowego: 10 mA,
- maksymalna moc wyjściowa: 72 W,
- częstotliwość pracy przekształtnika: 300 kHz,
- sprawność przekształcania przy $P \approx P_{\max}$: $\geq 80\%$.

5.2. Wstęp teoretyczny

Impulsowe przekształtniki napięcia, do których zalicza się opisywane urządzenie, działają w oparciu o naprzemienną konwersję energii elektrycznej w energię pola magnetycznego [2]. Elementem gromadzącym energię w tego typu zasilaczach jest cewka indukcyjna. Zależnie od topologii przekształtnika gromadzona w induktorze energia może zostać użyta do wygładzenia nagłych zmian prądu – np. w przetwornicy obniżającej napięcie (ang. *buck*). W przetwornicy podwyższającej (ang. *boost*) topologia zaś pozwala na skorzystanie z napięcia samoindukcji elementu indukcyjnego, w efekcie zwiększając wartość napięcia wyjściowego ponad napięcie wejściowe układu. Topologie tych dwóch typów przekształtników impulsowych prezentują rysunki 5.1a oraz 5.1b [3].



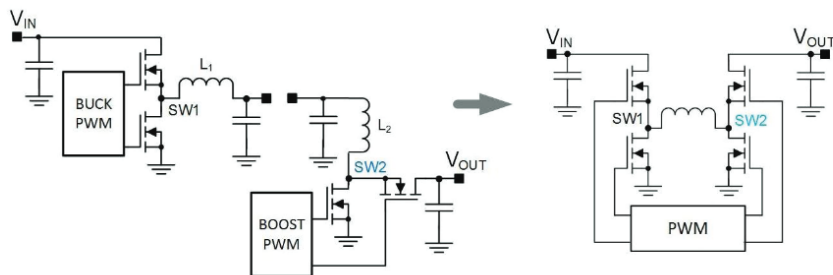
Rysunek 5.1. Topologie wybranych przekształtników impulsowych: (a) topologia przekształtnika obniżającego, (b) topologia przekształtnika podwyższającego.

Widoczny na rysunku 5.1 klucz **S** jest elementem pracującym cyklicznie. Oznacza to, że na każdy cykl pracy następuje jego zwarcie, a następnie rozwarcie. Stosunek czasu zwarcia klucza **S** oraz czasu trwania całego cyklu nazywamy **współczynnikiem wypełnienia**. Jest on parametrem opisującym aktualny stan pracy przetwornicy.

Jego wartość musi zawierać się w pewnych odgórnie określonych granicach dla zapewnienia optymalnej pracy komponentów zasilacza. Współczynnik ten określa równanie (5.1).

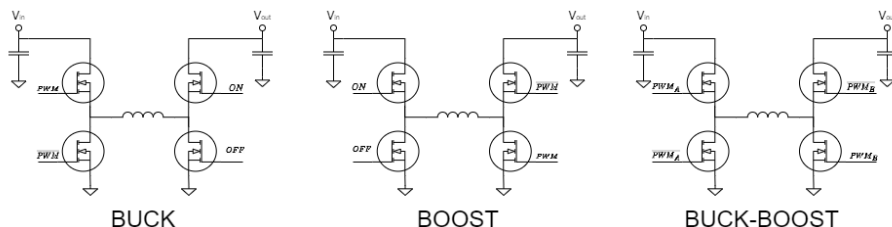
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}. \quad (5.1)$$

Opisywany w niniejszym artykule projekt przetwornicy korzysta z dwóch topologii jednocześnie. Zostało to osiągnięte przez zastosowanie topologii mostkowej. Topologia ta jest kaskadowym połączeniem topologii *buck* oraz *boost*. Takie rozwiązanie pozwala użytkownikowi na osiągnięcie napięć wyjściowych niższych, równych bądź wyższych niż źródło zasilania urządzenia. Przebieg konwersji dwóch opisywanych topologii w topologię mostkową przedstawia rys. 5.2 [4].



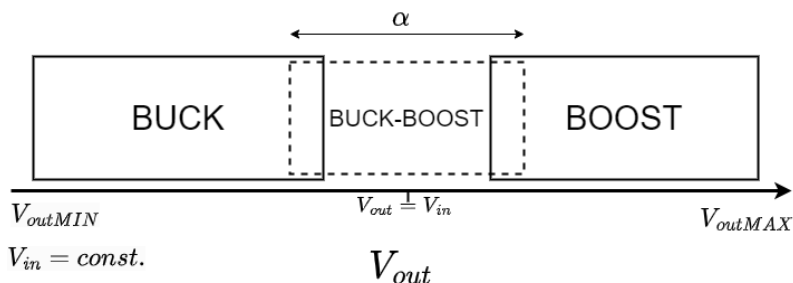
Rysunek 5.2. Topologia mostkowa jako kaskadowe połączenie topologii obniżającej oraz podwyższającej

Topologia mostkowa pozwala na obniżanie oraz podwyższanie napięcia wyjściowego urządzenia. W zależności od żądania użytkownika, aktywacji ulegają odpowiednie pary kluczy. Wówczas nieaktywna para tranzystorów pozostaje otwarta w taki sposób, by zapewnić przepływ prądu w obwodzie.



Rysunek 5.3. Stan kluczy w trybach pracy przekształtnika w topologii mostkowej

Istnieje jednak zakres napięć wyjściowych, dla którego niemożliwe jest osiągnięcie zadanej wartości, posilkując się jedynie jedną z części topologii mostkowej. Dla tego zakresu wprowadza się tryb obniżająco-podwyższający (ang. *buck-boost*), który łączy pracę dwóch wcześniej opisanych topologii. Opisywane tryby pracy prezentuje rys. 5.3. Zakresy trybów pracy dla zmiennych napięć wyjściowych przedstawiono na rys. 5.4 [5].

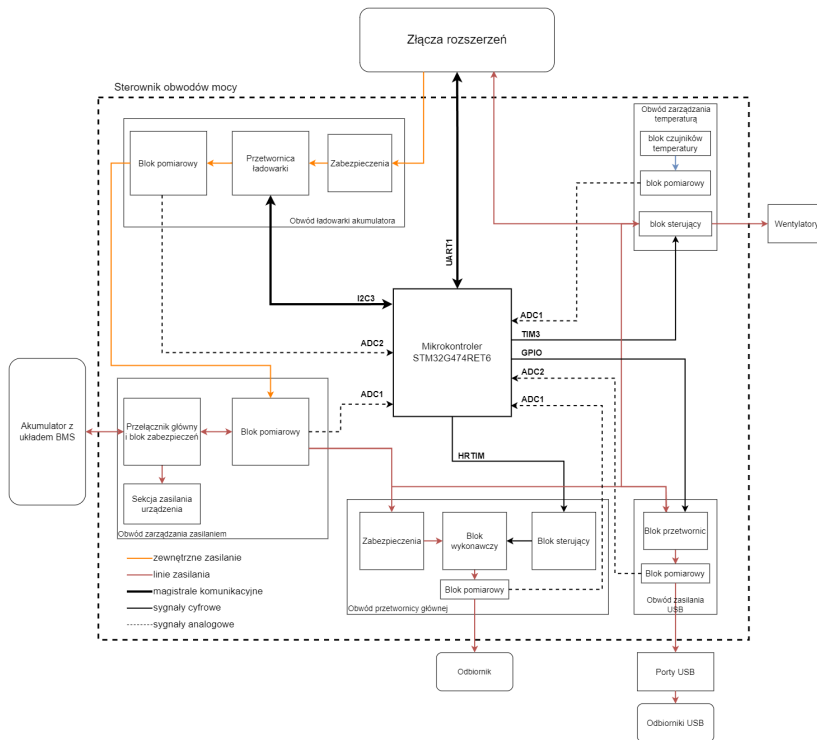


Rysunek 5.4. Tryby pracy w zależności od wartości nastawy napięcia wyjściowego. Szerokość aktywności trybu *buck-boost* zaznaczono symbolem α

Na podstawie informacji zawartych w niniejszym rozdziale zrealizowano projekt, montaż oraz oprogramowanie stabilizowanego zasilacza impulsowego.

5.3. Projekt i wykonanie

W ramach przygotowań do realizacji projektu na podstawie założeń projektowych stworzono schemat blokowy. Schemat ten zawiera zarówno moduły konieczne do realizacji podstawowej funkcjonalności projektowanego urządzenia, jak również bloki odpowiedzialne za funkcje dodatkowe, takie jak np. bloki zabezpieczeń. Blokowy schemat architektury urządzenia przedstawiono na rys. 5.5.

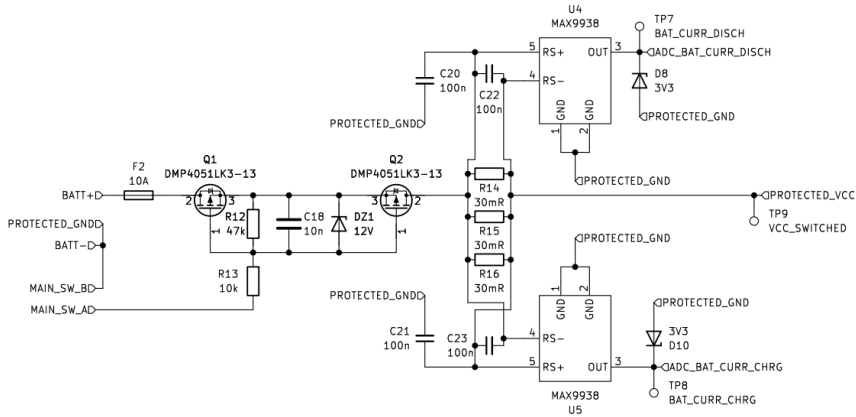


Rysunek 5.5. Schemat blokowy urządzenia

Następną sekcję niniejszego artykułu poświęcono krótkiemu opisowi występujących na powyższym schemacie bloków urządzenia.

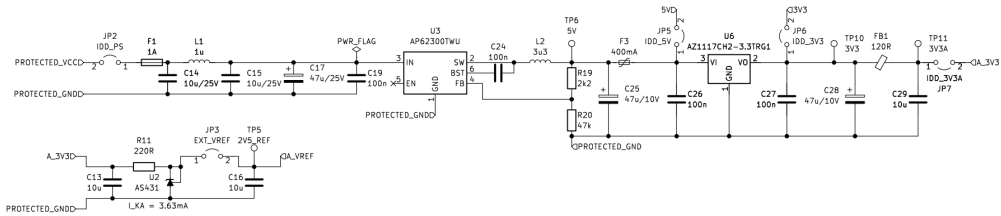
5.3.1. Układ elektroniczny

Wejściem urządzenia jest blok zarządzania zasilaniem. Zawiera on układy zabezpieczające zasilacz przed przetężeniami oraz odwrotną polaryzacją podłączenia źródła energii. W tym bloku znajdują się także bloki pomiarowe, dzięki którym możliwe jest monitorowanie energii pobieranej przez urządzenie w czasie rzeczywistym. Schemat ideowy tego bloku prezentuje rys. 5.6.



Rysunek 5.6. Schemat ideowy bloku wejściowego

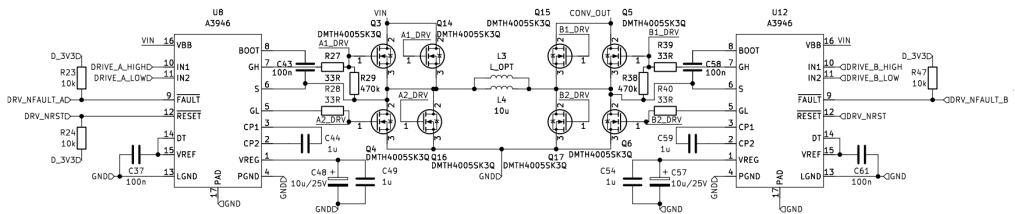
Blok zarządzania zasilaniem zawiera również przetwornicę impulsową odpowiedzialną za zasilanie podzespołów urządzenia. W celu zwiększenia precyzji pomiarów zaimplementowano również zewnętrzne, precyzyjne źródło napięcia odniesienia o wartości 2,5 V. Wymienione elementy sekcji zasilania urządzenia pokazano na rys. 5.7.



Rysunek 5.7. Schemat ideowy bloku sekcji zasilania urządzenia

Po przejściu przez obwód zarządzania zasilaniem, energia elektryczna trafia do układu wykonawczy przekształtnika. Jest on modułem urządzenia odpowiedzialnym za przekształcanie napięcia z zewnętrznego źródła na takie o parametrach podyktowanych przez użytkownika.

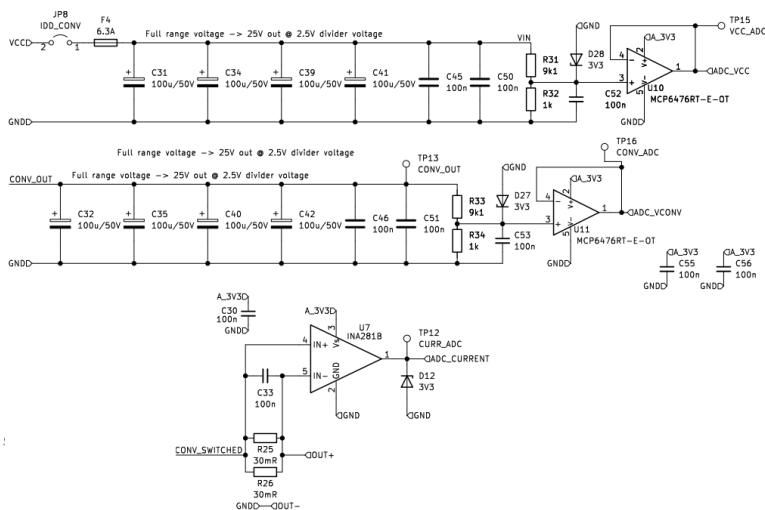
Układ kluczujący tego bloku zrealizowany jest w topologii mostkowej, opisanej w podrozdziale 5.2.. W bloku tym zawarto induktor, tranzystory, a także sterowniki bram, wyposażone w pompę ładunkową. Zastosowano je wobec konieczności sterowania sygnałem o współczynniku wypełnienia równym 1. Schemat ideowy opisywanego bloku przedstawia rys. 5.8



Rysunek 5.8. Schemat ideowy bloku wykonawczego przetwornicy głównej

Pomiar napięcia wyjściowego zrealizowany został za pomocą dzielnika napięcia obniżającego jego wartość do poziomu bezpiecznego dla wbudowanego w mikrokontroler przetwornika analogowo-cyfrowego. Dodatkowy układ buforujący umożliwia zapewnienie niskiej impedancji wyjściowej układu pomiarowego, co umożliwi próbkowanie z wysoką prędkością.

Pomiar prądów zrealizowano, stosując wzmacniacze pomiarowe oraz rezystory bocznikowe podłączone szeregowo z obciążeniem. Układy pomiarowe zaprezentowano na rys. 5.9.



Rysunek 5.9. Schemat ideowy bloku pomiarowego obwodu przetwornicy głównej

Urządzenie zostało wyposażone także w bloki pomocnicze. Rozszerzają one funkcjonalność zasilacza o możliwość monitorowania temperatury elementów przetwornicy. Umożliwiają one również ładowanie urządzeń w standardzie *USB QuickCharge 3.0* [6] przez gniazda USB oraz ładowanie podłączonego pakietu ogniw zewnętrznym źródłem zasilania.

5.3.2. Mikrokontroler i oprogramowanie

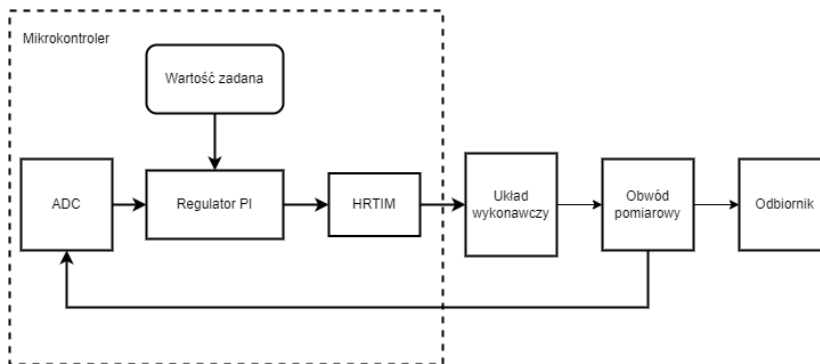
Część sterująca urządzenia zrealizowana została za pomocą mikrokontrolera oznaczonego symbolem *STM32G474RET6*. Układ ten został wybrany ze względu na zasób analogowych peryferiów. Umożliwiły one na zrealizowanie pętli regulacji przekształtnika głównego zasilacza, logiki sterującej układami pomocniczymi oraz rutyn pomiarowych.

Na zadania realizowane przez wymieniony mikrokontroler składają się:

- generowanie sygnałów sterujących obwodem wykonawczym przekształtnika głównego,
- regulacja napięcia wyjściowego,
- pomiar parametrów roboczych urządzenia,
- sterowanie zespołem przetwornic zasilających gniazda USB,
- zarządzanie procesem ładowania wbudowanego akumulatora,
- komunikacja z użytkownikiem lub urządzeniem nadrzędnym.

Zadaniem najwyższego priorytetu postawionym wobec układu jest generacja sygnałów dla układu wykonawczego. Sterowanie blokiem powoduje (w normalnych warunkach pracy urządzenia) pojawienie się pewnych wartości napięć i prądów na wyjściu bloku wykonawczego. Wartości te są mierzone za pomocą wbudowanego w mikrokontroler, 16-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Następnie dane te są przetwarzane oraz generowany jest wartość błędu, będący różnicą wartości aktualnej oraz zadanej. Na podstawie wartości błędu dokonywana jest korekta sterowań, aby utrzymać jak najmniejszą różnicę między wartością zadaną oraz aktualną [5].

Pełny przepływ informacji przez mikrokontroler, układy peryferyjne oraz wymienione bloki urządzenia prezentuje rys. 5.10.



Rysunek 5.10. Schemat przepływu informacji w urządzeniu

Sterowanie układem wykonawczym z częstotliwością rzędu setek kiloherców umożliwia dostępne w tej rodzinie mikrokontrolerów peryferium licznika wysokiej precyzji (ang. *HRTIM* – *High Resolution Timer*). Na to peryferium składa się wiele liczników taktowanych za pomocą zegara głównego mikrokontrolera zwielokrotnionego za pomocą pętli sprzężenia fazowego. Częstotliwość zegara taktującego peryferium *HRTIM* wówczas opisuje równanie (5.2) [7].

$$f_{HRCK} = \frac{SYSCLK}{AHB_{PRESC}} \cdot \frac{HRTIM_{MULT}}{APB2_{PRESC}} = 170 \text{ MHz} \cdot 32 = 5,44 \text{ GHz}, \quad (5.2)$$

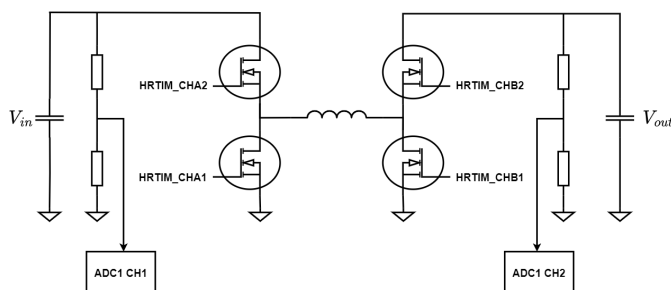
gdzie:

- $SYSCLK$ – częstotliwość głównego zegara mikrokontrolera, równa 170 MHz,
- AHB_{PRESC} – dzielnik częstotliwości taktowania magistrali AHB, równy 1,
- $APB2_{PRESC}$ – dzielnik częstotliwości taktowania magistrali APB2, równy 1,
- $HRTIM_{MULT}$ – mnożnik dla pętli PLL układu licznika *HRTIM*, równy 32.

Dzięki zastosowaniu tak wysokiej częstotliwości taktowania możliwe jest zapewnienie odpowiednio dużej głębi bitowej dla generowanych sygnałów. Osiągnięto to przez podział częstotliwości f_{HRCK} . Rozdzielczość generowanego sygnału prezentuje wówczas zależność (5.3).

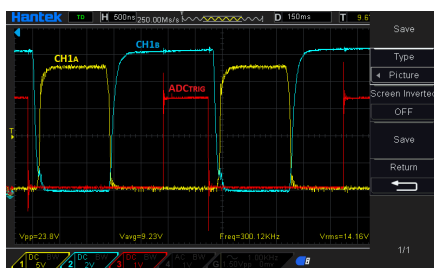
$$n_{PWM} = \frac{f_{HRCK} - f_{PWM}}{f_{PWM}} = \frac{5,4497 \text{ GHz}}{300 \text{ kHz}} = 18132.33 \approx 18132. \quad (5.3)$$

Generowane sygnały dla sekcji wykonawczej podzielono na dwa bloki. Każdy z nich będąc osobnym kanałem peryferium *HRTIM* steruje parą tranzystorów w topologii mostkowej. Podłączenie kanałów licznika prezentuje rys. 5.11.

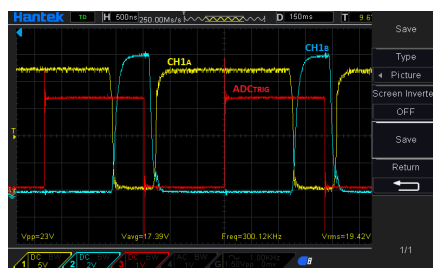


Rysunek 5.11. Uproszczony schemat podłączenia sekcji wykonawczej do układów peryferyjnych mikrokontrolera

Przetwornik analogowo-cyfrowy zsynchronizowano do sygnału sterującego układem wykonawczym. W ten sposób zagwarantowano wykluczenie z danych pomiarowych zakłóceń powodowanych przez szybki wzrost napięcia w momencie klucowania tranzystorów. Zrealizowano to w taki sposób, aby początek pomiaru przez przetwornik przypadał na połowę czasu trwania dłuższego z sygnałów podawanych na bramy tranzystorów. Sposób synchronizacji przetwornika przedstawiają rys. 5.12a oraz 5.12b.



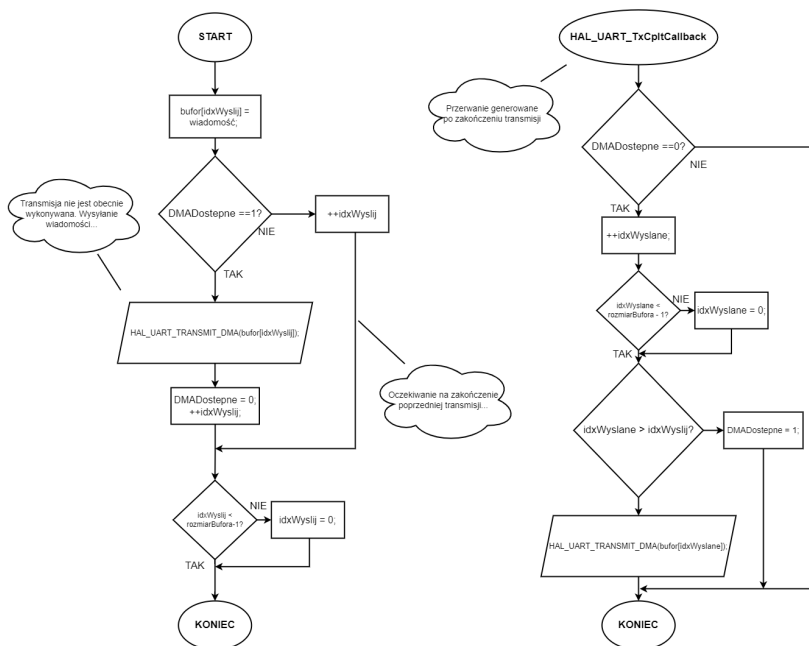
(a) Synchronizacja ADC dla małych wypełnień.



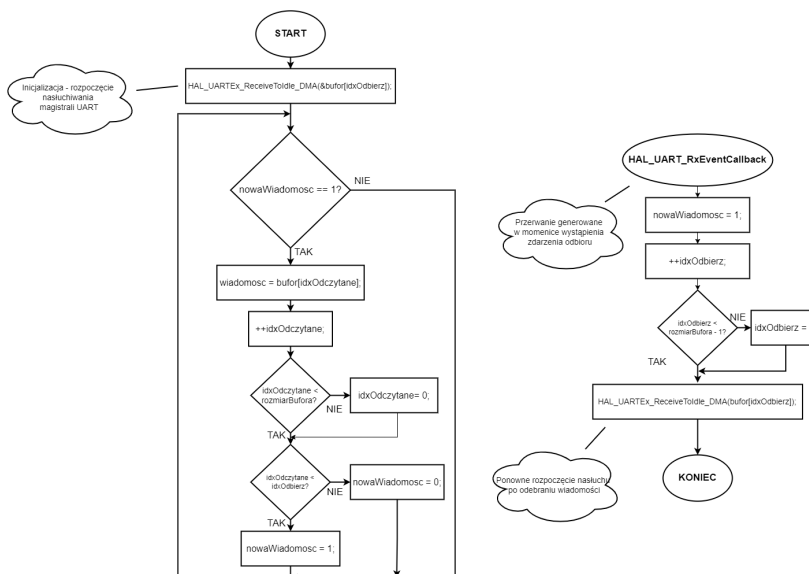
(b) Synchronizacja ADC dla dużych wypełnień.

Rysunek 5.12. Synchronizacja przetwornika analogowo-cyfrowego dla dwóch skrajnych wartości wypełnienia sygnału sterującego

W celu komunikacji z urządzeniem posłużono się jedną z udostępnianych przez mikrokontroler magistral *UART*. Na potrzeby bezkolizyjnego wysyłania oraz odbierania wiadomości zaimplementowano algorytm kolejujący wiadomości wysyłane oraz odczytujący komunikaty odebrane. Ze względu na konieczność zapewnienia pracy pętli pomiarowych oraz pętli regulacji w czasie rzeczywistym dla zdecydowano się na wykorzystanie mechanizmu DMA (ang. *Direct Memory Access*). Dzięki temu mikrokontroler wysyła wiadomości z minimalnym udziałem jednostki arytmetycznej, a przetwarzanie następuje między kolejnymi zadaniami o wyższym priorytecie. Schemat blokowy algorytmów prezentują rysunki 5.13 oraz 5.14.



Rysunek 5.13. Schemat blokowy algorytmu odpowiedzialnych za wysyłanie komunikatów

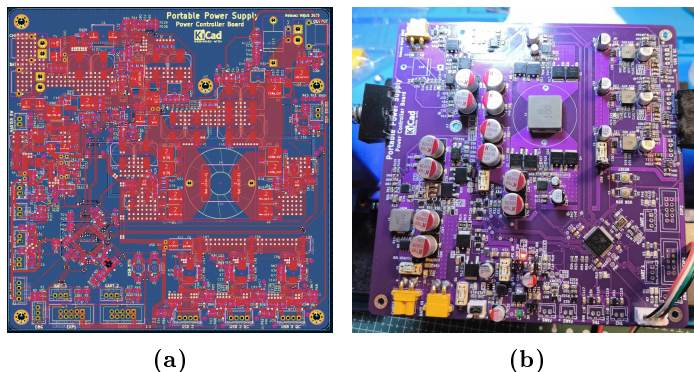


Rysunek 5.14. Schemat blokowy algorytmu odpowiedzialnych za odbieranie komunikatów

5.3.3. Montaż

Schemat ideowy przeniesiono na dwustronną płytę drukowaną, wykorzystując w większości elementy o montażu powierzchniowym. Projekt zrealizowano za pomocą środowiska EDA *KiCAD*. Projekt obwodu drukowanego prezentuje rys. 5.15.

Po przeprowadzeniu czynności związanych z montażem komponentów przeprowadzono testowe uruchomienie. W ramach niego sprawdzono wartości napięć na wszystkich liniach zasilania urządzenia oraz sprawdzono działanie układów pomiarowych. Po tych czynnościach wlutowano mikrokontroler oraz wgrano program testowy w celu sprawdzenia poprawności jego montażu.

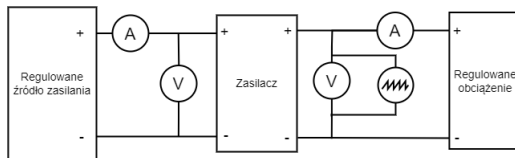


Rysunek 5.15. Obwód drukowany urządzenia: (a) mozaika obwodu w programie KiCAD, (b) urządzenie podczas testów

5.4. Uzyskane wyniki

Zmontowany zasilacz poddano testom mającym na celu sprawdzenie urządzenia pod kątem efektywności przekształcania, stabilności napięcia wyjściowego pod wpływem zmian obciążenia czy generowania zakłóceń szybkozmiennych.

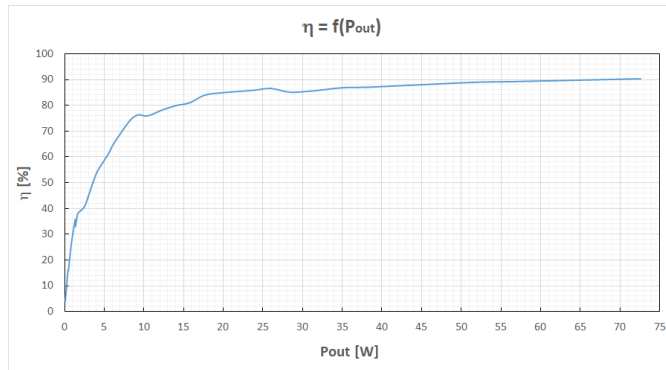
Badań urządzenia dokonano dla trzech różnych napięć wejściowych, symulując trzy różne stany naładowania akumulatora. Układ pomiarowy w trakcie trwania badań skonstruowanego zasilacza przedstawia rys. 5.16.



Rysunek 5.16. Schemat układu pomiarowego podczas badań urządzenia

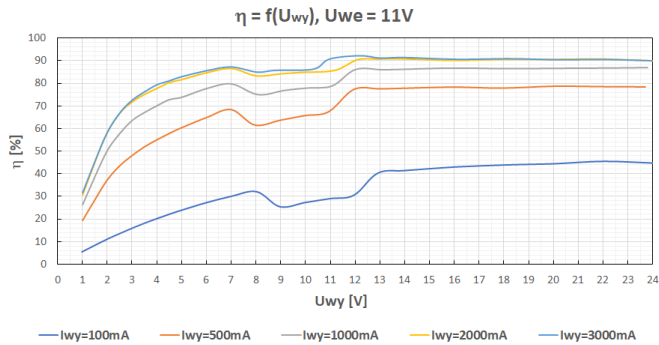
5.4.1. Badanie sprawności przekształtnika głównego

Regulując wartość napięcia wyjściowego przy stałym prądzie obciążenia sporządzono pięć serii badań dla każdego napięcia, symulując trzy różne stopnie obciążenia układu wykonawczego. W ten sposób zbadano zasilacz w wielu scenariuszach użytkowania. Na podstawie pomiarów sporządzono charakterystykę średniej sprawności elektrycznej w funkcji oddawanej do odbiornika mocy. Wykres tej charakterystyki może posłużyć do zgrubnego określenia sprawności urządzenia dla założonych parametrów pracy. Wykres tej charakterystyki prezentuje rysunek 5.17.

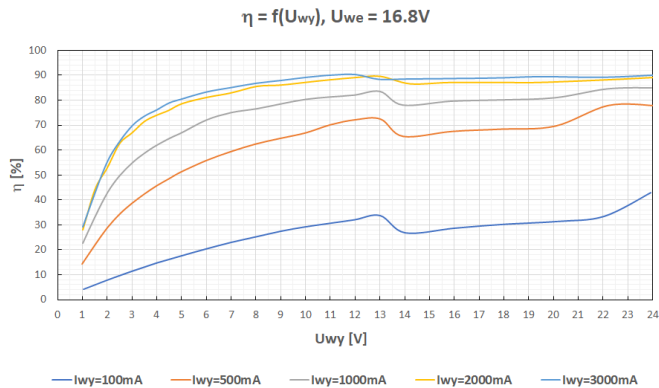


Rysunek 5.17. Charakterystyka średniej sprawności elektrycznej w funkcji mocy wyjściowej dla najwyższego badanego napięcia wyjściowego

Wybrane charakterystyki prezentujące zależności między sprawnością urządzenia a napięciem wyjściowym pokazano na rysunkach 5.18 i 5.19.



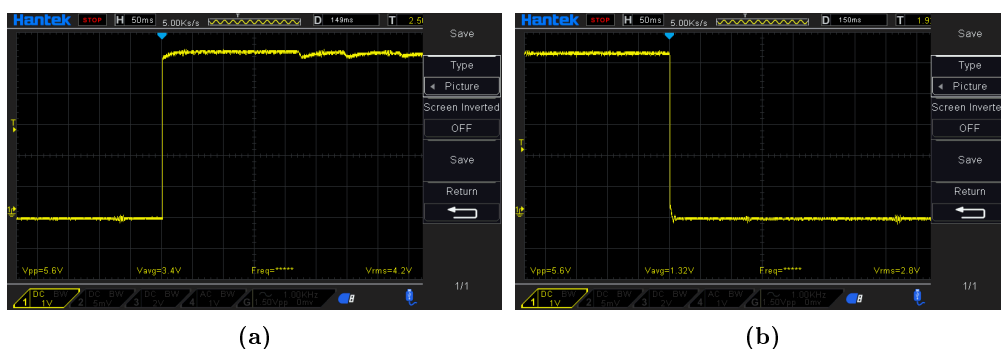
Rysunek 5.18. Charakterystyka $\eta = f(U_{wy})$ przy $U_{we} = 11 V$



Rysunek 5.19. Charakterystyka $\eta = f(U_{wy})$ przy $U_{we} = 16,8 V$

5.4.2. Badanie stabilności napięcia wyjściowego pod wpływem zmian nastaw

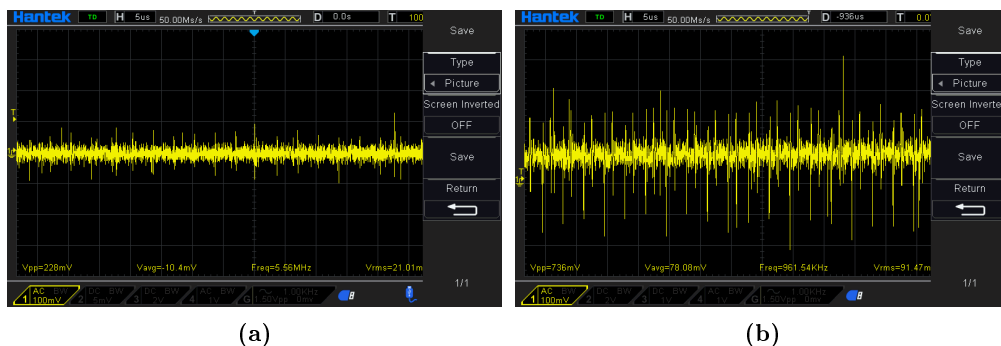
Następną czynnością w ramach badania zasilacza było sprawdzenie reakcji pętli regulacji na skokową zmianę napięcia wyjściowego. Wówczas wykonano załączenie oraz wyłączenie zasilacza w tym samym układzie pomiarowym. Zaobserwowano oscylogramy widoczne na rysunkach 5.20a oraz 5.20b.



Rysunek 5.20. Oscylogramy napięcia wyjściowego pod wpływem skokowej zmiany jego wartości: (a) skokowy wzrost napięcia wyjściowego, (b) skokowy spadek napięcia wyjściowego

5.4.3. Badanie przekształtnika pod kątem generowania zakłóceń szybkochybiennych

Ostatnią czynnością przeprowadzoną w ramach badań urządzenia był pomiar składowej zmiennej napięcia wyjściowego pod pełnym obciążeniem przetwornicy głównej. Pomiar przeprowadzono za pomocą oscyloskopu. Zaobserwowano oscylogramy widoczne na rysunkach 5.21a, 5.21b.



Rysunek 5.21. Oscylogramy składowej zmiennej napięcia wyjściowego pod pełnym obciążeniem przekształtnika: (a) $U_{wy} = 5V$, (b) $U_{wy} = 24V$

5.5. Podsumowanie

Badania efektywności przekształcania przetwornicy głównej wskazują, że sprawność energetyczna przy pełnej mocy przekracza 90%, co przewyższa oczekiwania projektanta. Charakterystyki przedstawione na rys. 5.18 oraz 5.19 prezentują logarytmiczny przyrost sprawności wobec przyrostu mocy oddawanej do odbiornika. Na opisywanych wykresach widoczny jest także pewien zakres napięć U_{wy} , dla których wartości η ulegają gwałtownemu spadkowi o kilka punktów procentowych. Zakres ten przypada na wartości, gdzie $U_{wy} \approx U_{we}$. Sytuacja ta związana jest z automatycznym przełączeniem się przekształtnika w tryb obniżająco-podwyższający. Generuje to wówczas większą sumę strat przełączania w układzie wykonawczym, skutkiem czego sprawność energetyczna urządzenia nieznacznie spada.

Niska sprawność przekształcania dla niewielkich mocy wynika z konsumowania energii przez samo urządzenie. Jest to najlepiej widoczne dla serii pomiarów, gdzie prąd wyjściowy I_{wy} wynosił 100 mA. Moc wykorzystywana na zasilanie mikrokontrolera, bloków funkcjonalnych urządzenia oraz układów peryferyjnych wynosi niewiele ponad 3 W w stanie pełnej aktywności urządzenia. Sprawia to, że dla małych obciążeń moc oddawana do odbiornika jest zaledwie małą częścią mocy pobieranej z pierwotnego źródła zasilania.

Na oscylogramach przedstawiających reakcję układu regulacji na skokowe zmiany nastaw zaobserwowano stromy wzrost i spadek napięcia wyjściowego do wartości zadanej. Brak widocznych przeregulowań świadczą o prawidłowym dostrojeniu regulatora PI w głównym przekształtniku.

Przebiegi oscyloskopu prezentujące składową zmienną podczas wymuszenia maksymalnego prądu wyjściowego urządzenia płynącego przez obciążenie. Zaobserwowane wartości ukazują impulsowy charakter jego pracy. Obserwuje się wówczas krótkotrwałe impulsy napięcia nałożone na stałe napięcie wyjściowe. Stanowią one o pojawiających się na zaciskach wyjściowych urządzenia zakłóceń szybkodziennych. Dla małych obciążeń międzyszczytowa wartość napięcia nie przekracza 250 mV. Obserwuje się również wzrost poziomu zakłóceń wraz ze wzrostem obciążenia zasilacza. Dla pełnej mocy zasilacza wartość ta wynosi niemal 750 mV.

Bibliografia

- [1] Bashir T., Ismail S.A., Song Y., Irfan R.M., Yang S., Zhou S., Zhao J. Gao L., A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries. *Energy Materials*, **2021**, *20*, s. 1–59.
- [2] Roberts S., *DC/DC Book of Knowledge, Practical tips for the User*, wydanie trzecie, Recom Engineering GmbH, Austria, 2016.
- [3] Horowitz P., Hill W., *The Art of Electronics*, wydanie trzecie, Cambridge University Press, Wielka Brytania, 2015.
- [4] Choudhary V., Hegarty T., Pace D., Under the hood of a noninverting buck-boost converter. Power Supply Design Seminar, Texas Instruments 2016.
- [5] STMicroelectronics; *AN4449 Application note – Buck-boost converter using the STM32F334 Discovery kit.*, 2014.
- [6] USB Implementers Forum; *Battery Charging Specification*, rewizja 1.2.
- [7] STMicroelectronics, *AN4539 Application note – HRTIM cookbook*. 2014.

Projekt i budowa robota usługowego

inż. Artur Woliński
Automatyka i Robotyka

dr inż. Mateusz Cholewiński
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Praca inżynierska koncentruje się na stworzeniu kompleksowego robota usługowego, zdolnego do efektywnego sprzątanania i wielofunkcyjnego zastosowania. Projekt obejmuje mechanikę, elektronikę i oprogramowanie z uwzględnieniem integracji z systemem ROS. Mechaniczna konstrukcja robota została zaprojektowana i wydrukowana w technologii 3D. W obszarze elektroniki stworzono płytke PCB, na której znajdują się wszystkie niezbędne do funkcjonowania robota komponenty elektroniczne, takie jak: mostki H, mikrokontroler, układy zasilania itd. W kontekście oprogramowania skoncentrowano się na stworzeniu uniwersalnego sterownika opartego o mikrokontroler ESP32. Umożliwiającego sterowanie elektroniką oraz współpracę z systemem ROS, zainstalowanym na Raspberry Pi. Testy potwierdziły poprawność działania poszczególnych podzespołów, ze szczególnym uwzględnieniem komunikacji z systemem ROS, co potwierdziły eksperymentalne wizualizacje odległości w programie RViz. Podsumowując, stworzony robot spełnia założenia projektowe, oferując efektywne sprzątananie i uniwersalność dla różnych zastosowań. Praca stanowi wszechstronne podejście do projektowania robotów usługowych.

6.1. Cel i założenia

Głównym celem realizowanej pracy inżynierskiej było stworzenie kompleksowego robota usługowego, zdolnego do efektywnego sprzątanania, a jednocześnie stanowiącego uniwersalną platformę robotyczną do wykonywania różnorodnych zadań. Poniżej przedstawione są główne założenia projektowe:

- stworzenie mechanicznej konstrukcji opartej na technologii druku 3D, uwzględniającej zarówno efektywność sprzątanania, jak i ogólną wytrzymałość,
- opracowanie płytki PCB z niezbędnymi komponentami elektronicznymi, takimi jak mostki H, mikrokontroler, układy zasilania,
- skoncentrowanie się na stworzeniu uniwersalnego sterownika opartego o mikrokontroler ESP32, umożliwiającego sterowanie elektroniką i współpracę z systemem ROS na Raspberry Pi,

- przeprowadzenie testów w celu potwierdzenia poprawności działania poszczególnych komponentów, ze szczególnym uwzględnieniem poprawnego działania pod systemem ROS.

6.2. Wstęp teoretyczny

Roboty usługowe korzystają z różnych platform, m.in. z napędem różnicowym, gąsienicowym, holonomicznym i nożnym. Platformy z napędem różnicowym są popularne w robotyce sprzątającej ze względu na zwrotność i to taki tym platformy został wykorzystany przy projekcie.

Model matematyczny robota o napędzie różnicowym jest kluczowy do sterowania. Uwzględnia kinematykę ruchu, a równania kinematyczne dla tego robota można opisać jako:

$$v = \frac{R}{2} \cdot (\omega_l + \omega_r) \quad (6.1)$$

$$\omega = \frac{R}{L} \cdot (\omega_r - \omega_l) \quad (6.2)$$

gdzie:

- v – prędkość liniowa robota,
- ω – prędkość kątowna,
- R – promień koła,
- ω_l i ω_r – prędkości obrotowe lewego i prawego koła.

Równania te są podstawą do implementacji algorytmów sterowania.

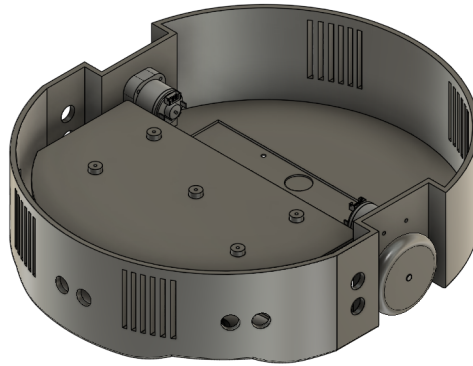
6.3. Projekt i wykonanie

Z racji na skomplikowanie problemu zbudowania w pełni funkcjonalnego urządzenia od podstaw, projekt i wykonanie można podzielić na kilka głównych sekcji.

6.3.1. Konstrukcja mechaniczna

Konstrukcja mechaniczna robota odgrywa kluczową rolę w jego wydajności i niezawodności. Zastosowanie platformy z napędami różnicowymi pozwala na precyzyjne manewry i skręcanie w miejscu, co jest istotne w sprzątaniu przestrzeni mieszkalnych.

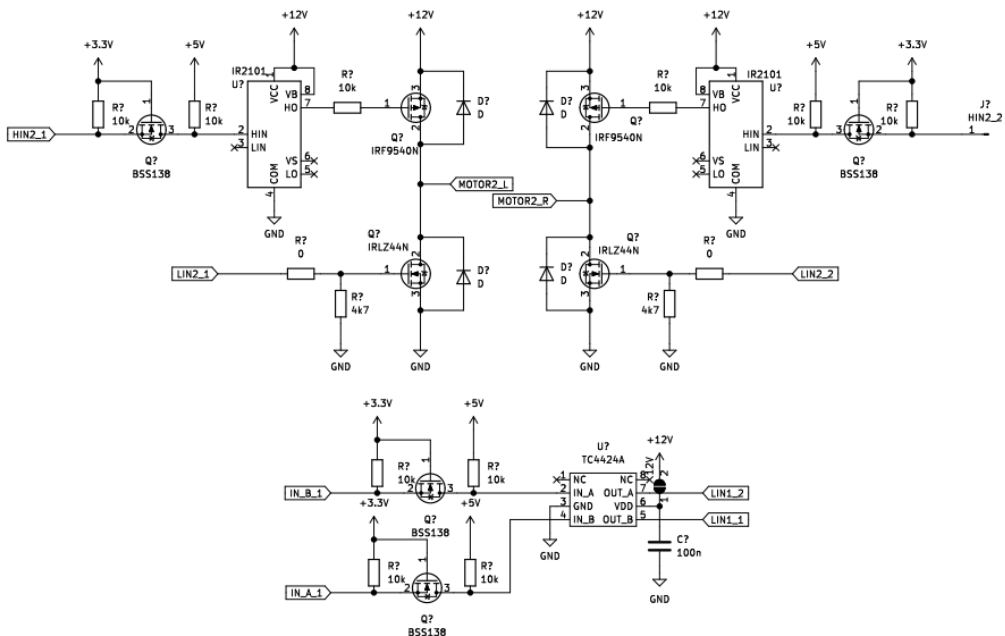
Obudowa została zaprojektowana w programie Fusion360 i następnie wydrukowana, przy pomocy drukarki 3D. Stanowi ona podstawę do zamontowania pozostałych podzespołów m.in. elektroniki, sensorów, silników napędowych, czy elementów odpowiedzialnych za sprząkanie. Napęd oparty jest na silnikach prądu stałego Waveshare DCGM-3865-12V-EN-240RPM z enkoderem magnetycznym. Wybór silników kierowano rozmiarem i momentem obrotowym, z myślą o oszczędzaniu miejsca w obudowie i płynnym sterowaniu robotem. Na rysunku 6.1 został przedstawiony projekt gotowej konstrukcji mechanicznej.



Rysunek 6.1. Projekt konstrukcji mechanicznej

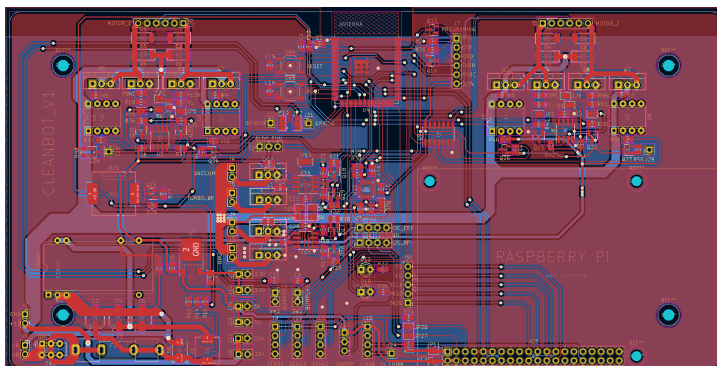
6.3.2. Elektronika

Schemat elektroniki został wykonany przy użyciu programu KiCAD i zawiera w sobie wszystkie niezbędne elementy potrzebne doysterowania robota oraz jego obsługi. Mikrokontroler użyty w projekcie 32-bitowy ESP32-S3. Jako źródło zasilania wykorzystano ogniwa 18650 z baterii laptopowych. Łącząc je odpowiednio po 3 szeregowo i 3 równoległe, uzyskano napięcie w okolicach 12 V. W celu dopasowania napięciowego z układami elektronicznymi wykonano układ regulacji napięcia na 3.3 V oraz 5 V. Aby możliwe było sterowanie prekością obrotową silników prądu stałego, zaprojektowano układ mostków H bazujący na tranzystorach MOSFET typu P i N. Schemat został przedstawiony na rysunku 6.2



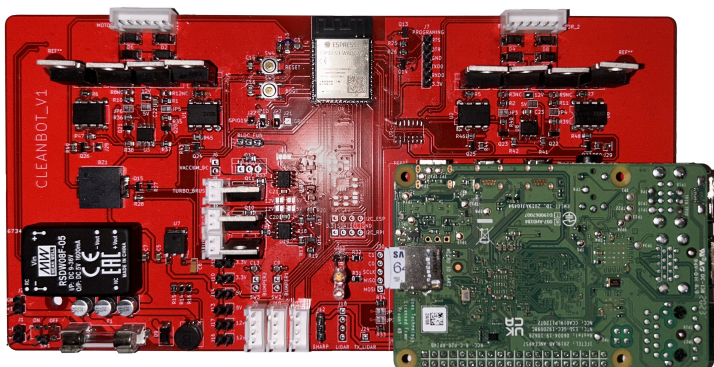
Rysunek 6.2. Schemat mostka H

Sterowanie periferiami odbywa się na podobnej zasadzie co sterowanie dolnymi kluczami w układach mostków. Na projekcie płytki PCB umieszczone zostały dodatkowo piny do podpięcia sensorów, oraz pozostałych periferii. Projekt płytki drukowanej przedstawiono na rysunku 6.3.



Rysunek 6.3. Projekt płytki drukowanej

Wykonana PCB została następnie polutowana i złożona. Zdjęcie złożonej płytki pokazano na rysunku 6.4.



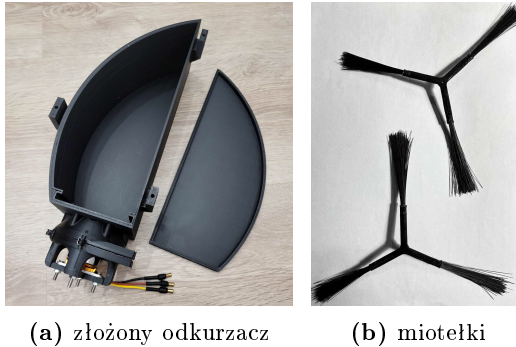
Rysunek 6.4. Zmontowana płytka PCB

6.3.3. Oprogramowanie

Oprogramowanie można podzielić na dwie sekcje: niskopoziomowe pod mikrokontroler, oraz na Raspberry Pi obsługujące ROS'a. Program na ESP32 napisany został w języku C++ przy użyciu framework'a PlatformIO. Jego głównymi funkcjami są: sterowanie mostkami H, obsługa sensorów HC-SR04, pomiar baterii, sterowanie periferiami, oraz komunikacja z ROS'em przy użyciu interfejsu UART i protokołu Publikuj-Subskrybuj. Natomiast na komputerze jednopłytkowym zainstalowany został system ubuntu 20.04 oraz ROS Noetic. Odpowiedzialny jest między innymi za obsługę kamery kinect, oraz konwersję odczytanych danych do postaci laserScan oraz komunikację z ESP32. Dzięki takiej konfiguracji, możliwe jest sterowanie oraz wizualizacji pracy robota z poziomu ROS'a.

6.3.4. Elementy sprzętające

Aby robot kwalifikował się jako sprzątający, potrzebuję niezbędnych elementów, takich jak: odkurzacz, miotelki, szczotki. W tym celu przy użyciu programu Fusion360 został zaprojektowany odkurzacz, składający się z turbiny i pojemnika na kurz oraz miotelki. Jednostka odkurzająca została przedstawiona na rysunkach 6.5a i 6.5b.



Turboszczotka użyta w robocie została pozyskana z recyklingu starego odkurzacza ręcznego i odpowiednio dopasowana do obudowy. Na rysunku 6.5 został przedstawiony złożony robot gotowy do użytkowania.



Rysunek 6.5. Wygląd złożonego robota

6.4. Uzyskane wyniki

W ramach uzyskanych wyników przeprowadzono szereg testów, mających na celu zweryfikowanie poprawności działania poszczególnych elementów robota oraz całego systemu. Poniżej podsumowano kluczowe wyniki uzyskane podczas przeprowadzonych testów.

6.4.1. Testy Płytki Elektronicznej

Po złożeniu płytki PCB przeprowadzono kompleksowe testy, sprawdzając poprawność działania poszczególnych elementów. Pomiar napięć na różnych punktach układu po-

twierdziły zgodność z założeniami projektowymi. Pomiar rezystancji na zasilaniu wyeliminował możliwość zwarcia. Testy sensoryczne z użyciem ultradźwiękowych czujników odległości potwierdziły ich poprawne działanie z dokładnością ± 1 cm. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w tabelach 6.1 oraz 6.2.

Tabela 6.1. Pomiary napięć

Punkt pomiaru	Napięcie zmierzone [V]
Bateria	11,80
12 V	12,06
5 V	4,97
3.3 V	3,31

Tabela 6.2. Dane odebrane z czujników

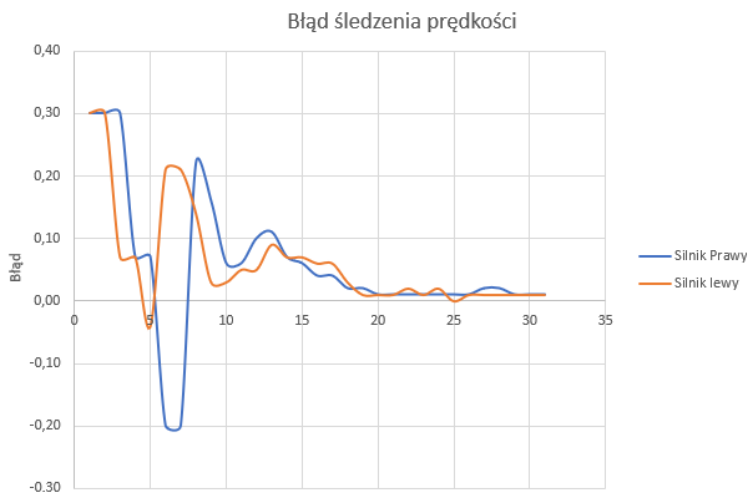
Lewy [cm]	Środkowy [cm]	Prawy [cm]
20	99	99
99	21	99
99	99	21
Drugi pomiar		
19	99	99
99	20	99
99	99	20

6.4.2. Testy Mostków H

Miały one na celu sprawdzenie poprawności sterowania silnikami. Poprzez test prędkości obrotowej w różnych scenariuszach udało się zidentyfikować i naprawić problem z footprintem tranzystorów P, co skutkowało wcześniejszym zwarcieniem. Po tej korekcie mostki H działały poprawnie.

6.4.3. Testy Sterowania Silnikami

W celu zweryfikowania poprawności działania sterowania silnikami z wykorzystaniem regulatora PID przeprowadzono szereg testów. Analiza wyników pozwoliła na optymalne dostrojenie parametrów regulatora PID, uzyskując zadowalający błąd śledzenia prędkości. Pomiar prędkości liniowej przy różnych zadanych wartościach potwierdził ogólną efektywność systemu. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 6.6.

**Rysunek 6.6.** Wykres błędów śledzenia prędkości

6.4.4. Testy Komunikacji z ROS-em

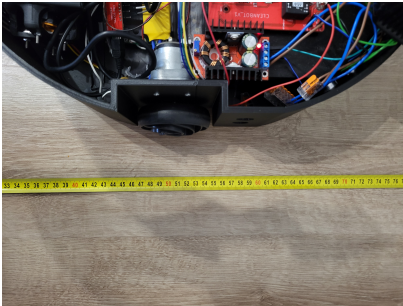
Sprawdzono poprawność komunikacji między robotem a Raspberry Pi z zainstalowanym ROS-em. Testy wykazały prawidłowe funkcjonowanie komunikacji, co potwierdziły komunikaty wyświetlane w terminalu.

6.4.5. Testy Kinecta

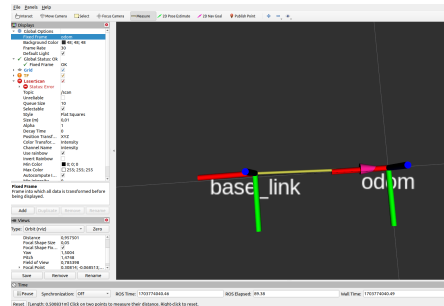
Przeprowadzono testy kamery Kinect, wykorzystując obraz z kamery głębi do stworzenia skanu laserowego. Wizualizacja danych w programie RViz potwierdziła poprawność działania kamery Kinect w kontekście lokalizacji robota.

6.4.6. Działanie Robotu

Ostatni etap obejmował weryfikację działania robota jako całości. Testy przemieszczenia robota na określoną odległość przy użyciu narzędzia `teleop_twist_keyboard` pozwoliły na porównanie danych odometrii z rzeczywistą odległością przebytą przez robota. Różnice te były rzędu 1 cm, co świadczy o skuteczności algorytmów odometrii i precyzji działania robota. Na poniższych rysunkach 6.7 i 6.8 przedstawiono wynik testu.



Rysunek 6.7. Rzeczywista odległość przebyta przez robota



Rysunek 6.8. Obliczona odległość przebyta przez robota

$$\text{Wartość zmierzona} \Rightarrow 0,508 \text{ [m]} \quad (6.3)$$

$$\text{Wartość obliczona} \Rightarrow 0,5008 \text{ [m]} \quad (6.4)$$

6.5. Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie oraz wykonanie prototypu robota usługowego umożliwiającego sprzątanie, co zostało wykonane. Powstała uniwersalna konstrukcja posiadająca elementy umożliwiające sprzątanie powierzchni. Zaprojektowano oraz wykonano kompleksowy sterownik, który ze względu na swoją uniwersalność, może być użyty w różnych typach robotów usługowych. Napisane zostało oprogramowanie, odpowiedzialne za sterowanie silnikami i pozostałymi peryferiami oraz co ważne pozwala na komunikację z systemem ROS zainstalowanym na Raspberry Pi.

Podejście modułowe do testowania pozwoliło dokładnie zidentyfikować ewentualne problemy i zoptymalizować działanie poszczególnych komponentów. Poprzez analizę wyników testów, można stwierdzić, że każdy z elementów robotycznej platformy spełnia swoje zadanie zgodnie z założeniami projektowymi.

W wyniku tych testów zostało potwierdzone, że osiągnięto założony cel pracy. Efektywne sterowanie silnikami, poprawna obsługa sensorów, a także komunikacja z systemem ROS są kluczowymi elementami, które wspólnie przyczyniają się do wszechstronności robota usługowego. Dzięki modularnej konstrukcji oraz elastycznemu oprogramowaniu robot jest gotowy do realizacji różnorodnych zadań, stanowiąc wszechstronne narzędzie w dziedzinie robotyki usługowej.

Konstrukcja projektowana podczas pracy została stworzona z myślą o wszechstronności i elastyczności, co sprawia, że może być dostosowana do różnorodnych zadań usługowych. Robot został wyposażony w elementy sprzątające, takie jak odkurzacz czy szczotki, co umożliwia skuteczne sprzątanie powierzchni. Ponadto kompleksowy sterownik opracowany podczas pracy stanowi centralny układ zarządzający robotem, zdolny do obsługi różnych typów napędów i peryferiów.

Zastosowanie platformy Raspberry Pi w roli kontrolera oraz integracja z systemem ROS (Robot Operating System) otwierają przed robotem szerokie możliwości komunikacji, planowania trajektorii, czy zdalnego sterowania. Dzięki temu robot nie tylko może wykonywać określone zadania sprzątania, ale także pełnić rolę badawczą czy edukacyjną w obszarze robotyki usługowej.

Podsumowując, stworzony robot usługowy jest wszechstronnym narzędziem, które może być dostosowane do wielu zastosowań. Jego elastyczność, efektywne sprzątanie oraz zdolność do współpracy z zaawansowanym systemem zarządzania robotami czynią go obiecującym projektem w dziedzinie robotyki usługowej.

Bibliografia

- [1] Woliński A., Projekt i budowa robota usługowego. Praca inżynierska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, 2024.

Opracowanie i optymalizacja wysokowydajnego wzmacniacza mocy wysokiej częstotliwości

mgr inż. Grzegorz Krupa
Advanced Applied Electronics

dr inż. Grzegorz Budzyń
Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki

W pracy skoncentrowano się na zaprojektowaniu, budowie i scharakteryzowaniu wysokiej mocy wzmacniacza częstotliwości radiowych przeznaczonego do pracy w zakresie fal krótkich obejmujących pasmo 1.8–30 MHz. Wzmacniacz uzyskał maksymalną moc wyjściową 600 W w trybie pracy ciągłej z maksymalną wydajnością 71.8% na częstotliwości 14.15 MHz.

W paśmie 1–60 MHz zbadano również sześć transformatorów opartych na różnych liniach długich oraz rdzeniach ferrytowych. Wybrane trzy transformatory zostały dodatkowo przetestowane w układzie wzmacniacza. Zmierzona została moc wyjściowa, wzmocnienie, harmoniczne, wydajność. W szczególności, badanie podkreśla znaczenie konstrukcji transformatora w eliminacji drugiej harmonicznej, z najlepszym zaobserwowanym zakresem dynamiki wolnym od harmonicznych wynoszącym 32 dBc dla drugiej harmonicznej. Ostateczna wersja wzmacniacza pracuje w klasie AB i jest w stanie dostarczyć więcej niż 500 W w zakresie od 3,6 do 30 MHz, z wydajnością dodanej mocy (PAE) od 56,7% do 69,96%. Szczytowa moc 600 W jest utrzymywana w zakresie od 5,4 do 18 MHz.

7.1. Cel i założenia

Mimo, że współczesne trendy telekomunikacyjne faworyzują szerokopasmowe modulacje i mikrofalowe częstotliwości, to ograniczenia propagacyjne tak wysokich częstotliwości często wymagają zastosowania stacji przekaźnikowych do komunikacji na duże odległości. Zakres fal krótkich umożliwia dalekosiężną komunikację bezpośrednio z punktu do punktu dzięki odbiciom fal EM od jonosfery [1]. Aby zapewnić niezawodną komunikację na odległości setek a nawet tysięcy kilometrów, system musi mieć odpowiedni budżet łącza. Oprócz anten o wysokim zysku, ważnym elementem takiego systemu jest wzmacniacz mocy. Choć rynek oferuje różne wzmacniacze o mocach przekraczających 400 W, w tym opcje oparte na tranzystorach lub lampach próżniowych, w pracy starano się zaadresować rosnącą potrzebę na wysokiej wydajności wzmacniacze które są w stanie pracować w całej

szerokości pasma bez potrzeby przestrajania obwodów wyjściowych. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

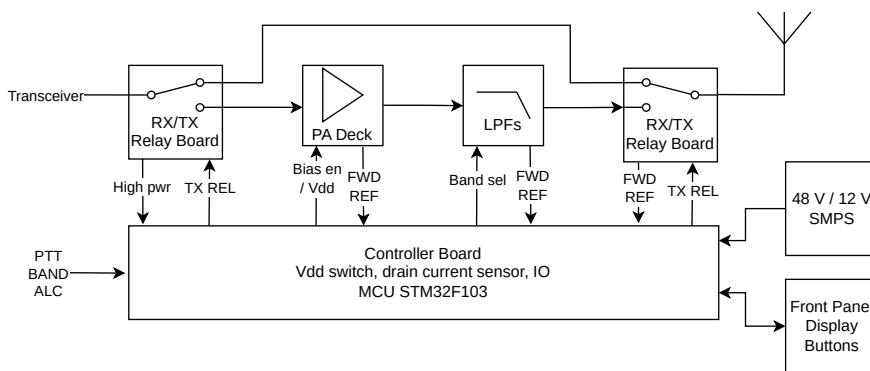
- zbadanie metod konstrukcji transformatorów szerokopasmowych,
- wykorzystanie nowoczesnych tranzystorów LDMOS [2],
- uzyskanie szczytowej mocy 600 W (57,78 dBm) w środkowej części fal krótkich,
- więcej niż 400 W w zakresie od 1,8 do 30 MHz,
- straty odbiciowe na wyjściu powinny wynosić mniej niż -15 dB w całym zakresie,
- nadajnik o mocy 10 W musi wysterować wzmacniacz do maksymalnej mocy,
- filtr dolnoprzepustowy musi ograniczyć harmoniczne do poziomu ≥ 50 dBc,
- wzmacniacz musi posiadać szereg zabezpieczeń przed wysokim WFS (Współczynnikiem Fali Stożącej), prądem tranzystorów końcowych, temperaturą.

7.2. Wstęp teoretyczny

Zaprojektowany wzmacniacz jest rozwiązaniem mieszczącym się w jednej obudowie, integrując zasilacz impulsowy, płytę wzmacniacza w.cz., kontroler, filtry dolnoprzepustowe, system przełączania nadawanie/odbiór oraz system chłodzenia.

7.2.1. Teoria pracy wzmacniacza

Wzmacniacz został podzielony na podsystemy, które przedstawiono na rysunku 7.1.



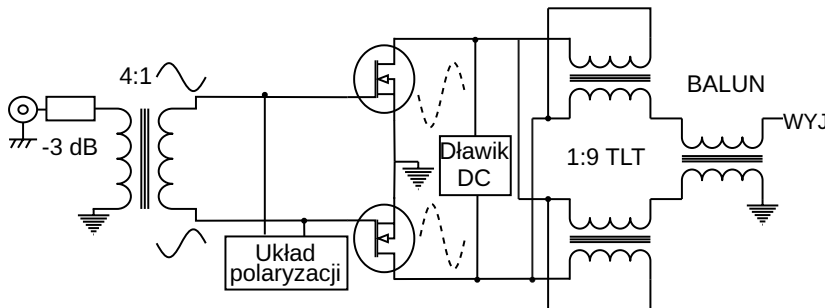
Rysunek 7.1. Diagram blokowy całego wzmacniacza

Aby umożliwić pracę z radionadajnikami, wzmacniacz posiada zestaw przekaźników elektromechanicznych które zmieniają tor anteny. W trybie nadawania sygnał z nadajnika jest kierowany do płyty wzmacniacza, która jest zasilana z linii 48 V DC. Kontroler, który stanowi osobną płytkę drukowaną, dostarcza 48 V do płyty wzmacniacza przez MOSFET co zapewnia cyfrową kontrolę nad włączaniem i wyłączaniem nadawania. Dodatkowo napięcie wykorzystywane przez zasilacz polaryzacji bramki może być również włączone i wyłączone przez kontroler. Prąd na linii 48 V jest mierzony sensorem ACS712, który wykorzystuje efekt Halla. Sygnał wyjściowy ze wzmacniacza jest filtrowany przez jeden z filtrów dolnoprzepustowych aby ograniczyć zawartość harmonicznych. Kontroler steruje rejestrem przesuwającym na płycie drukowanej z zestawem sześciu filtrów. Dodat-

kowo zarówno płyta wzmacniacza, jak i filtrów dolnoprzepustowych zawierają sprzęgacze kierunkowe, które mierzą moc padającą i odbitą zarówno za filtrami, jak i przed nimi. Takie rozwiązanie pozwala na oszacowanie strat w filtrze oraz w przypadku uszkodzenia filtru, możliwe jest wykrycie usterki i zabezpieczenie wzmacniacza. Moc wejściowa jest mierzona przez sprzęgacz znajdujący się na płytce z przekaźnikami nadawanie/odbieranie. Przetwornik analogowo-cyfrowy mikrokontrolera STM32 liczy średnią z każdego kanału aby zminimalizować wpływ szumów. W celu skorygowania nieliniowości sprzęgaczy i detektorów mocy, aplikuje on również krzywe kalibracji w celu większej precyzji odczytu. W celu zapewnienia dużej niezawodności i szybkiej reakcji na potencjalne zagrożenia dla wzmacniacza, kontroler wzmacniacza jest oparty na systemie czasu rzeczywistego FreeRTOS, a dla zmniejszenia obciążenia procesora pomiary z przetwornika ADC oraz interfejs wyświetlacza mają bezpośredni dostęp do pamięci (DMA).

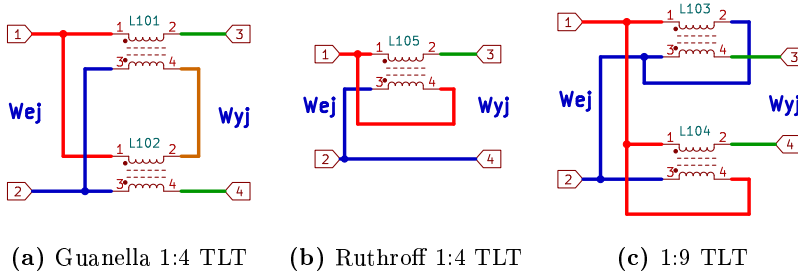
7.2.2. Dopasowanie impedancji oraz transformatory linii długiej

Aby zapewnić optymalną moc wyjściową wzmacniacza, impedancja wejścia oraz wyjścia musi być dopasowana do charakterystycznej impedancji 50Ω [3]. Ponieważ użyte tranzystory nie zawierają wewnętrznego układu dopasowania impedancji, zewnętrzny układ musiał zostać zaprojektowany.



Rysunek 7.2. Uproszczony schemat płyty wzmacniacza

Moduł impedancji wyjściowej tranzystorów LDMOS w układzie przeciw-swobodnym jest relatywnie mały (ok. $5,5 \Omega$ na $13,56 \text{ MHz}$) [4]. Najbliższy całkowity stosunek transformacji impedancji do 50Ω to 1:9. Taki stosunek może być stworzony przez konwencjonalny transformator który trzykrotnie podwyższy napięcie [5]. Celem tej pracy było zaprojektowanie i zbadanie sposobów na uzyskanie maksymalnej wydajności bez utraty szerokopasmowości, dlatego w stopniu wyjściowym zastosowano niezbalansowany transformator oparty na linii długiej (ang. *TLT* – *Transmission Line Transformer*) [6, 7]. Linia długa może być zaimplementowana zarówno przez użycie uzwojenia bifilarnego, jak i kabla koncentrycznego którego charakterystyka na potrzeby tego projektu jest niezależna od częstotliwości[8].



Rysunek 7.3. Schematy transformatorów

Transformator Guanelli 1:4 pozwala na bardzo szerokopasmową operację z minimalnymi stratami [9]. Rysunek 7.3a przedstawia transformator 1:4, w którym, gdy założymy takie same długości linii L1 oraz L2, sygnały na portach 3 oraz 4 mają takie same opóźnienie względem portów 1 oraz 2 [11]. Transformator Ruthroffa przedstawiony na rysunku 7.3b zmniejsza liczbę wymaganych dławików kosztem szerokopasmowości [10], która jest ograniczona przez nierówny czas propagacji, wciąż rozwiązanie takie potrafi być wystarczające dla większości wzmacniaczy pracujących w zakresie fal krótkich. Transformator 1:9 stanowi transformator trzeciego rzędu i może być skonstruowany z użyciem dwóch transformatorów Ruthroffa [7], przykład transformatora 1:9 przedstawiono na rysunku 7.3c.

7.2.3. Linia długa oraz cel badawczy pracy

W równaniu 7.1 przedstawiono zależność impedancji linii długiej transformatora od impedancji wejściowej oraz wyjściowej [6].

$$Z_0 = \sqrt{Z_{wej} \cdot Z_{wyj}} \quad (7.1)$$

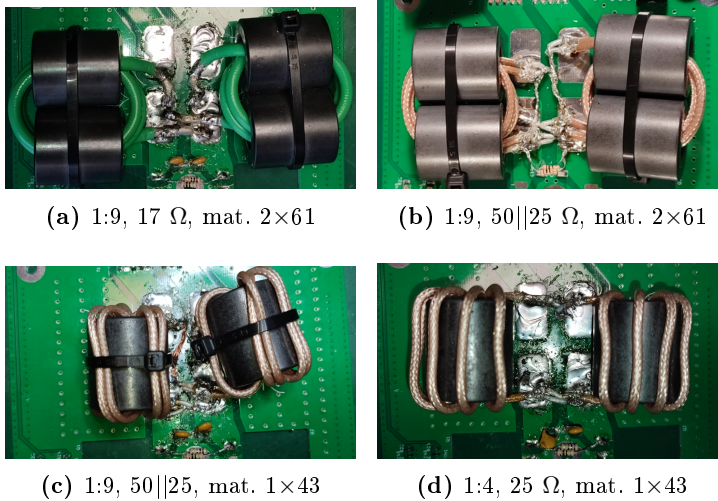
Użyty kabel koncentryczny musi zatem mieć impedancję charakterystyczną, która jest średnią geometryczną impedancji wejścia oraz wyjścia. Stanowi to problem, ponieważ dla impedancji 5,5 oraz 50 Ω linia musi mieć charakterystyczną impedancję ok. 17 Ω . Jest to nietypowa wartość którą oferują tylko specjalistyczne rozwiązania. Dlatego celem tej pracy był również pomiar improwizowanych transformatorów, w których jako linia długa posłużyły dwa kable koncentryczne o impedancjach 50 oraz 25 Ω połączone równolegle. Celem pracy było zatem scharakteryzowanie wybranych transformatorów zbudowanych z zastępczymi liniami długimi lub liniami z niepoprawną impedancją charakterystyczną i porównanie ich zarówno pod względem parametrów rozproszonych, jak i charakterystyki prawdziwego wzmacniacza.

7.3. Projekt i wykonanie

Szczególne uwagi została poświęcona na scharakteryzowanie wpływu konstrukcji transformatorów wyjściowych na pracę wzmacniacza. W tym celu zbudowano kilka transformatorów oraz specjalne stanowisko do pomiaru wzmacniacza.

7.3.1. Zbadane transformatory

Na rysunku 7.4 przedstawiono cztery podstawowe transformatory zbudowane w celu badań, szczegółową listę zbadanych konstrukcji przedstawiono w tabeli 7.1.



Rysunek 7.4. Cztery podstawowe TLT zbudowane w celu badań

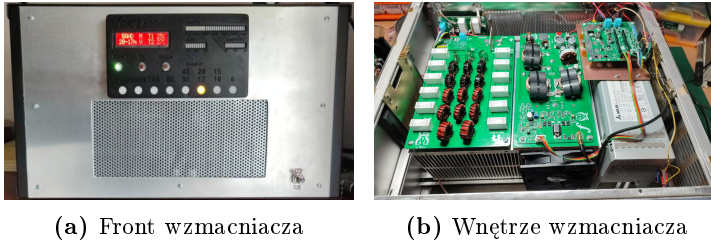
Tabela 7.1. Porównanie materiałów i sposobu konstrukcji sześciu transformatorów impedancji

TLT Nr	$\frac{Z_1}{Z_2}$	Z_0 [Ω]	Koncentryk	Zwoje	Materiał Rdzeń
1a, 1b	1:9	17	HF141-17-FEP	3, 2	61 / Fair-Rite 2661102002
2	1:9	17*	RG316-25-Flex RG316-50	3	61 / Fair-Rite 2661102002
3	1:9	17*	RG316-25-Flex RG316-50	4	43 / Fair-Rite 2643102002
4a, 4b	1:4, 1:9	25	RG316-25-Flex	5	43 / Fair-Rite 2643102002

Przed pomiarem wybranych transformatorów w prawdziwym wzmacniaczu, macierz parametrów rozproszonych dla każdego transformatora została zmierzona z użyciem analizatora wektorowego pracującego w paśmie 1–60 MHz.

7.3.2. Budowa wzmacniacza

Wzmacniacz został zbudowany w obudowie metalowej o wymiarach 450×400×250 mm. Elementy interfejsu użytkownika są zamontowane w ramce, która została wydrukowana. Priorytetem konstrukcji mechanicznej było zapewnienie możliwie jak najłatwiejszej naprawy oraz zapewnienie dobrego chłodzenia. Główna płyta wzmacniacza zawierająca tranzystory mocy i jest zamontowana na miedzianym rozpraszaczu ciepła, który pozwala na efektywny transfer ciepła do aluminiowego radiatora.



(a) Front wzmacniacza

(b) Wnętrze wzmacniacza

Rysunek 7.5. Zdjęcia wzmacniacza podczas budowy

Układ polaryzacji tranzystorów

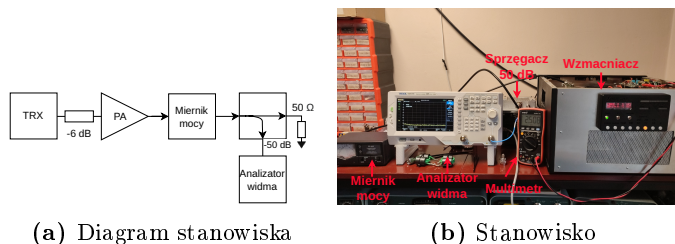
Układ polaryzacji tranzystorów znajduje się na głównej płycie wzmacniacza mocy, jego zadaniem jest dostarczenie napięcia dla bramek tranzystorów LDMOS, tak aby wzmacniacz pracował w klasie AB z odpowiednim prądem jałowym [12]. Ponieważ charakterystyka ta w półprzewodnikach jest zależna od temperatury, układ polaryzacji musi dostarczyć kompensację dla tego efektu. Ważnym aspektem pracy było zatem scharakteryzowanie wybranego układu i dostrojenie go w taki sposób, aby napięcie DC na bramkach malało o ok. 1,25 mV z każdym dodatkowym 1 °C [13].

Filtry dolnoprzepustowe

Wartości komponentów LC do filtrów wyjściowych zostały policzone wg [14], uzyskane filtry zostały następnie przetestowane w AWR Designer. Gotowa płytką z filtrami została następnie zmierzona przy użyciu analizatora wektorowego. Przekazniki filtrów są sterowane przez układy ULN2003 oraz 74HC595.

7.3.3. Stanowisko pomiarowe

Sygnal do wzmacniacza uzyskano z amatorskiej radiostacji Xiegu G90. Dla mocy poniżej 2 W w szeregu został włączony tłumik 6 dB w celu większej rozdzielczości pomiaru. W szeregu z wyjściem wzmacniacza został podłączony reflektometr, który mierzy moc padającą i odbitą. Moc RF została rozproszona w sztucznym obciążeniu, wewnątrz którego znalazł się też sprzęgacz -50 dB. Rysunek 7.6a przedstawia diagram układu pomiarowego, a rysunek 7.6b przedstawia zdjęcie stanowiska pomiarowego.



(a) Diagram stanowiska

(b) Stanowisko

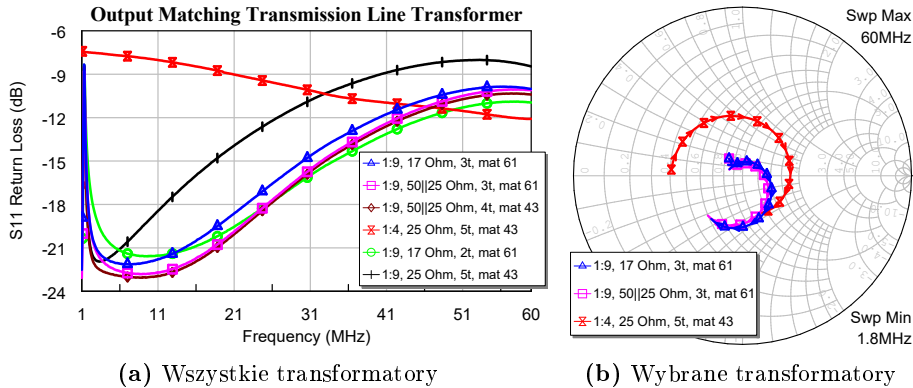
Rysunek 7.6. Zestaw pomiarowy wzmacniacza dużej mocy

7.4. Uzyskane wyniki

Ważnym aspektem pracy było zbadanie wpływu konstrukcji TLT na charakterystykę odbić oraz prawdziwą pracę wzmacniacza pod obciążeniem.

7.4.1. Pomiar parametrów rozproszonych małej mocy

Wszystkie sześć transformatorów zostało zmierzonych analizatorem wektorowym. Praca przedstawia również pomiar baluna, który transformuje zbalansowane wyjście.

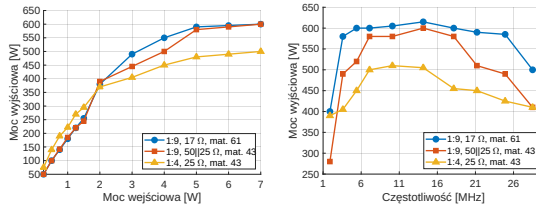


Rysunek 7.7. Pomiar transformatorów linii długiej

Na rysunku 7.7a przedstawiono pomiar strat powrotnych dla każdego transformatora, mniejsza wartość oznacza lepszy wynik. W puli badanych transformatorów znalazł się jeden transformator ze złą wartością charakterystycznej impedancji linii długiej oraz transformator z przekładnią 1:4 w celu ilustracji efektów źle dobranych konstrukcji. Na rysunku 7.7b przedstawiono złożoną impedancję trzech wybranych transformatorów w formie wykresu Smitha. Punkty bliżej środka ilustrują dobre dopasowanie impedancji. Widoczny jest również efekt dominacji pojemności pasozytniczej dla wysokich częstotliwości, praca przedstawia również metodę zminimalizowania tego efektu.

7.4.2. Pomiar całego wzmacniacza pod obciążeniem

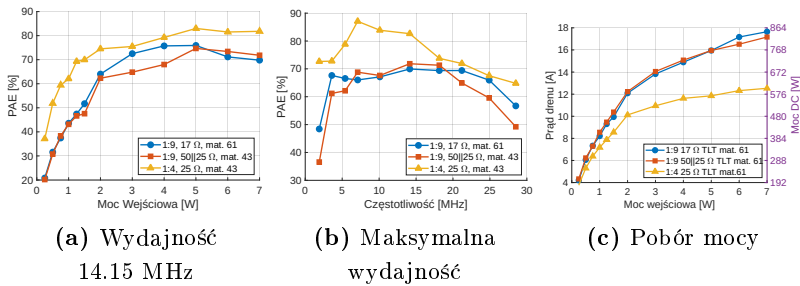
W tej części pomiarów trzy transformatory zostały wybrane do dalszych testów w kompletnym wzmacniaczu. Pierwszy transformator to książkowy przykład transformatora opartego na linii długiej (1a w tabeli 7.1), drugi transformator to improwizowana wersja (2 w tabeli 7.1), trzeci transformator to przykład transformatora ze źle dobraną przekładnią (4a w tabeli 7.1). Celem trzeciego transformatora była prezentacja efektów teorii maksymalnego transferu mocy oraz wysokiej wytrzymałości tranzystorów LDMOS na mniej niż optymalne dopasowanie impedancji na drenie. Praca przedstawia pomiary liniowości przeprowadzane na częstotliwościach 3,5 MHz, 14,14 MHz oraz 28,5 MHz, ekstrapolacja liniowego regionu pozwoliła na wyznaczenie poziomów kompresji wzmacniacza a w połączeniu z pomiarem trzeciej harmonicznej możliwe było oszacowanie punktu IP3 (Third Order Intercept Point).



(a) Liniowość na 14.15 MHz (b) Maksymalna moc

Rysunek 7.8. Pomiar mocy wyjściowej wzmacniacza

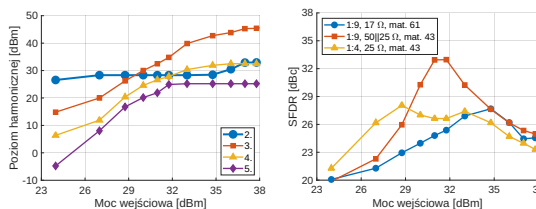
Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na energooszczędną elektronikę, praca przedstawia również wydajność oraz zapotrzebowanie prądowe wzmacniacza. Zamiast typowej wydajności drenu (η_D), która określa procent konwersji mocy DC do w.cz., użyto PAE (Power Added Efficiency), miara ta uwzględnia moc wejściową w.cz. potrzebną do wystawienia wzmacniacza, PAE jest zatem mniejszą wartością niż η_D .



(a) Wydajność 14.15 MHz (b) Maksymalna wydajność (c) Pobór mocy

Rysunek 7.9. Pomiar wydajności oraz poboru mocy wzmacniacza

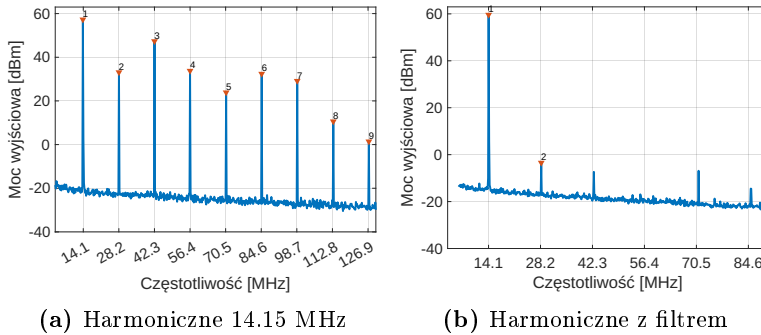
Wykorzystany układ tranzystorów pozwala również na stłumienie drugiej harmonicznej [15], dlatego kolejnym celem było zmierzenie poziomu harmonicznych dla każdego z trzech transformatorów. Aby zaprezentować ten efekt, zbadany został zakres dynamiki wolny od harmonicznych (SFDR – Spectral Free Dynamic Range).



(a) Poziom harmonicznych 14.15 MHz (b) Dynamika drugiej harmonicznej

Rysunek 7.10. Poziom pięciu harmonicznych sygnału 14,15 MHz oraz zakres dynamiki wolnej od drugiej harmonicznej dla różnych transformatorów

Tłumienie drugiej harmonicznej nie wystarcza, aby wzmacniacz spełniał normy emisji ITU [16], jednak projektowanie filtrów dla wzmacniacza, w którym efekt tłumienia drugiej harmonicznej jest obecny staje się znacznie prostsze. Użyty filtr nie wymaga wtedy dużej ilości sekcji, co redukuje koszty oraz straty mocy. Rysunek 7.11 pokazuje przykład spektrum bez filtra dolnoprzepustowego oraz spektrum z użytym filtrem. Rysunek 7.11a dobrze ilustruje zaletę użytej topologii, druga harmoniczna jest stłumiona o więcej niż 20 dB względem sygnału fundamentalnego, podczas gdy trzecia harmoniczna jest na poziomie 10 dBc.



Rysunek 7.11. Pomiar szerokiego spektrum wzmacniacza

Parametry wzmacniacza zostały porównane do innych publikacji w tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Porównanie pracy do powiązanych publikacji, „*” oznacza, że na wejściu badanego wzmacniacza znajdował się tłumik 3 dB

Ref.	Praca	[17]	[18]	[19]	[20]
Częstotliwość [MHz]	01.06.1930	22–24	27.12	lut.30	01.08.1951
Moc wyjściowa [W]	600	975	1380	1300	600
Wydajność [%]	69,96 (PAE)	66,5 (PAE)	74	81,4	70
Wzmocnienie [dB]	≥18*	36	24,72	29,1	21
S22 [dB]	≤-15	≤-15	-4,18	-	-
2. Harmoniczna [dBc]	24,07	24,1	30	17,21	-
3. Harmoniczna [dBc]	10,65	33,98	35	9,92	-

7.5. Podsumowanie

Praca przedstawiła wpływ metod konstrukcyjnych transformatorów linii długiej na parametry małej mocy transformatorów oraz parametry wzmacniacza w.cz. dużej mocy w paśmie kf. Badania udowodniły, że transformator linii długiej składający się z kombinacji dwóch równoległych łatwo dostępnych kabli koncentrycznych może faktycznie zastąpić transformator zbudowany z użyciem specjalnego kabla koncentrycznego jeśli zależy nam głównie na niskich odbiciach, co przedstawia rysunek 7.7a. Dla strat powrotnych często akceptowalną wartością jest -10 dB (WFS 1.9), co oznacza, że 10% mocy zostaje odbite do wzmacniacza. W tej pracy zastosowano bardziej rygorystyczną wartość -15 dB (WFS 1,43). W tej kategorii wszystkie poprawnie dobrane transformatory (w tym te improwizowane) uzyskały pasmo szersze niż 1,8–30 MHz co zadowala początkowe wymagania.

Transformator 1:9 ze źle dobraną impedancją charakterystyczną linii długiej pokazuje, że dla niskich częstotliwości, gdzie długość linii jest relatywnie bardzo mała względem długości fali wciąż możliwe jest dobre dopasowanie impedancji, jednak szerokość pasma jest znacznie pogorszona, potwierdzając słuszność równania 7.1. Pomiar wyjścia wzmacniacza pokazał, że improwizowany transformator jest w stanie zapewnić porównywalną moc oraz liniowość do książkowego transformatora dla środkowej częstotliwości pasma, jednak parametry wzmacniacza były znacznie gorsze dla skrajnych pasm wzmacniacza, gdy zainstalowany transformator był improwizowany. Rysunek 7.8b przedstawia stratę w szerokopasmowości, jaką niesie za sobą improwizowany transformator oraz zmianę w mocy wzmacniacza gdy zastosowany jest transformator o złej przekładni. Pomiar kompresji oraz maksymalnej mocy dla pracy ciągłej pokazały, że dla zachowania maksymalnej szerokopasmowości oraz nieznacznie wyższej mocy na środku pasma zalecane jest użycie specjalnego kabla koncentrycznego. Natomiast jeśli zależy nam na optymalizacji wzmacniacza na konkretne pasmo, użycie improwizowanego transformatora jest jak najbardziej uzasadnione. Rysunek 7.10 przedstawia poziom harmonicznej 32 dBc dla improwizowanego transformatora w regionie liniowym, podczas gdy książkowy transformator uzyskał 26 dBc. Oba transformatory uzyskały podobną wydajność PAE na poziomie 69% dla większości pasma kf, jednak książkowy transformator oferował wynik o ok 5% wyższy dla pasm 80, 12, 10 m oraz ponad 20% wyższy dla 160m. Wydajność na poziomie ponad 70% jest bardzo dobrym wynikiem dla wzmacniacza w tej klasie i jest porównywalna do konstrukcji wąskopasmowych [1]. Badania przedstawiły też interesujące aspekty transformatora 1:4. Wzmacniacz w takiej konfiguracji nie dostarczył maksymalnej mocy z tranzystorów, jednak jego wydajność była najwyższa, przekraczając nawet 80% w punkcie saturacji. Liniowość takiego rozwiązania może być problematyczna, dlatego praca przedstawiła też wstępne pomiary testami dwutonowymi. Testy te wykazały skuteczność pomiaru punktów kompresji 1 dB, które wynosiły ok. 36 dBm w zależności od użytego transformatora i pasma. Wstępne wyniki są obiecujące i przedstawiają poziom IMD3 porównywalny do komercyjnych rozwiązań.

Kompleksowy opis projektu i szereg pomiarów wykonanych na prawdziwym wzmacniaczu ma na celu przybliżenie przyszłym projektantom potencjalnych efektów związanych z transformatorami linii długiej we wzmacniaczach LDMOS. Wzmacniacze takie, jak wykazały powyższe pomiary, są atrakcyjnymi rozwiązaniami dla łączności dalekodystansowej.

Bibliografia

- [1] Yimin D.Z., Ammar A., Braham H., Target Altitude Estimation in Over-the-Horizon Radar. *IEEE Access* **2022**, *10*, s. 11260–11273.
- [2] Tobias E., *Lateral Power Transistors in Integrated Circuits*, wydanie pierwsze. Springer, Cham–Heidelberg–New York–Dordrecht–London, 2014.
- [3] Pozar D., *Microwave Engineering*, wydanie czwarte. John Wiley & Sons, Inc., University of Massachusetts at Amherst, United States of America, 2012.
- [4] Karta katalogowa MRF300 Rev. 2, 06/2019. Dostępny online: <https://www.nxp.com/products/radio-frequency/legacy-rf/legacy-rf-power/300-w-cw-over-1-8-250-mhz-50-v-wideband-rf-power-ldmos-transistor:MRF300AN> [dostęp: 28-07-2024].
- [5] Ji D., Yan H., Zheng W., Lefrak F., Setty R., *How RF transformers work and how they are measured*. Mini-Circuits, United States of America, 2015.

- [6] Trask C., Transmission Line Transformers: Theory, Design and Applications – Part 1. *High Frequency Electronics* **2005**, December, s. 46–52.
- [7] Trask C., Transmission Line Transformers: Theory, Design and Applications – Part 2. *High Frequency Electronics* **2006**, January, s. 26–30.
- [8] MCLEAN J., Coaxial versus Bifilar Transmission Lines as Con-stituents of Transmission-line Transformers and Baluns. IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility Signal/Power Integrity, Grand Rapids, MI, USA, 29 July 2023–04 August 2023, p. 425–430
- [9] Guanella G., New method of impedance matching in radio-frequency circuits. *The Brown Boveri Review* **1944**, September, s. 327–329.
- [10] Ruthroff L., Some broad-band transformers. *Proc. IRE* **1959**, *47*, s. 1337–1342.
- [11] Sevick, W.J., *Transmission Line Transformers Handbook*, wydanie pierwsze. Amidon Associates, Costa Mesa CA, USA, 1997, s. 1–4, 7–9, 33, 35.
- [12] Albulet M., *RF Power Amplifiers*, wydanie pierwsze, Noble Publishing, USA, 2001.
- [13] Rosu I., Bias Circuits for RF Devices, Dostępny online: https://www.qsl.net/va3iul/Bias/Bias_Circuits_for_RF_Devices.pdf [dostęp: 28-07-2024].
- [14] Hayward W., Campbell R., Larkin B., Filters and Impedance Matching Circuits. *WExperimental Methods in RF Design*; wydanie classic reprint, American Radio Relay League, Newington, CT USA. s. 3.1–3.5.
- [15] Yoshitaka N., Masaru S., Toshihiro O., Norikazu N., A 0.6–2.1-GHz Wideband GaN High-Power Amplifier Using Transmission-Line-Transformer-Based Differential-Mode Combiner With Second-Harmonic Suppression. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **2021**, *69*, s. 1675–1683.
- [16] RECOMMENDATION ITU-R SM.329-7, SPURIOUS EMISSIONS. Dostępny online: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.329-7-199707-S!!PDF-E.pdf [dostęp: 29.07.2024].
- [17] Majmuder C., Majmuder B., Ghosh B., A kW-range Solid-State Power Amplifier Design for OTH Radar's Transmitter Application. IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference, Ahmedabad, India, 11–14 grudnia 2023.
- [18] Telangi S., Khot S., Continuous Wave Solid State Power Amplifier For RF Heating System. International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology, Kottayam, India, 21–22 grudnia 2018.
- [19] NXP Semiconductors, QIU, R. BLF188XR 2–30 MHz 1000 W power amplifier Application lab report, Rev 1.0 March 2013. https://community.nxp.com/pwmxy87654/attachments/pwmxy87654/other/14020/1/BLF188XR_50V_1270W_CW_2-30MHz_CD-101-13.pdf [dostęp: 29-07-2024].
- [20] Razvan F., A 600W broadband HF amplifier using affordable LDMOS devices. Dostępny online: <https://qrpblog.com/2019/10/a-600w-broadband-hf-amplifier-using-affordable-l-dmos-devices/> [dostęp: 29-07-2024].

Analiza możliwości zaprojektowania szerokopasmowego przetwornika ultradźwiękowego do pomiarów transmisyjnych w tkankach miękkich

mgr inż. Janusz A. Domaradzki

Elektronika

prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Opieliński

Katedra Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów

Główce USG złożone są z wielu przetworników ultradźwiękowych, wybieranych ze względu na powtarzalność parametrów. Głowica ma zwiększone możliwości obrazowania przy lepszych wartościach czułości i szerokości pasma przenoszenia przetworników. Parametry te typowo sprawdza się podczas pomiarów prototypu przetwornika. Sprawdzane jest wtedy funkcjonowanie przetwornika z jego warstwami obciążającymi z przodu i tyłu. Konstrukcja prototypu może być jednak czasochłonna. W przypadku zaś nieobiecujących rezultatów pomiarów ilość koniecznych do wytworzenia prototypów zwiększa się. Potrzebne są więc narzędzia do analizy modelu konstrukcji przetwornika. Umożliwiłyby one wstępną analizę możliwości zaprojektowania przetwornika, korzystając z dostępnych na rynku materiałów, bez konieczności przygotowania prototypu. W artykule tym przedstawiono możliwości takiego narzędzia zaprogramowanego w języku Python, korzystającego z istniejącego modelu matematycznego, opisujących przetwornik – funkcji przenoszenia.

8.1. Cel i założenia

Celem pracy było wytworzenie narzędzia wspomagającego projektowanie przetworników ultradźwiękowych do budowy głowic USG. Ze względu na uzyskanie kompromisu między wydajnością przetwornika a kosztami jego produkcji takie narzędzie będzie użyteczne do uprzedniej weryfikacji projektu przetwornika.

Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- narzędzie ma umożliwiać analizę przetwornika zawierającego dwie warstwy dopasowujące impedancję akustyczną piezoceramiki do średniej impedancji tkanki,
- wykorzystany ma zostać model matematyczny – funkcja przenoszenia przetwornika,
- narzędzie ma umożliwiać zarówno dobór optymalnych parametrów warstw, jak i wprowadzanie ich przez użytkownika,

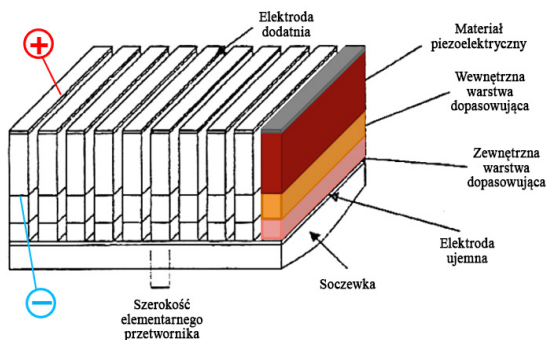
- analiza ma być umożliwiona w sposób wizualny oraz liczbowy,
- wykresy generowane przez program mają być zgodne z zawartymi w literaturze.

8.2. Wstęp teoretyczny

Praca podejmowała temat konstrukcji przetworników ultradźwiękowych do budowy ultrasonografów.

8.2.1. Głowice USG

Ultrasonografy to urządzenia powszechnie stosowane w diagnostyce medycznej do bezpiecznej i nieinwazyjnej wizualizacji wnętrza żywego ciała ludzkiego. Składają się z wielu elementarnych przetworników ultradźwiękowych w postaci płytek piezoceramicznych. Selekcja płytek odbywa się ze względu na powtarzalność ich parametrów elektromechanicznych. Płytki mocowane obok siebie zalewane są z tyłu warstwą tłumiącą i pokrywane z przodu kilkoma warstwami dopasowującymi. Mogą też być zaopatrzone w soczewkę, która dodatkowo skupia wiązkę fali ultradźwiękowej. Schemat głowicy zaprezentowano na rysunku 8.1 [1].



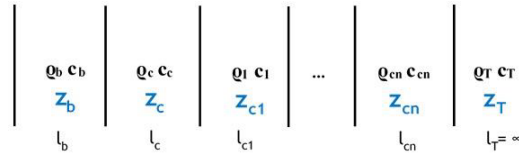
Rysunek 8.1. Rysunek konstrukcyjny głowicy USG

Najistotniejszymi parametrami przetworników przeznaczonych do budowy głowic USG są szerokość pasma przenoszenia przetwornika i jego czułość. Czułość określa minimalny poziom sygnału odbitego, który może odebrać przetwornik do poprawnego zobrazowania. Szerokość pasma wpływa na rozdzielczość przetwornika – im większa, tym przetwornik jest w stanie zobrazować dwa obiekty występujące bliżej siebie. Parametry te muszą zostać poddane weryfikacji, gdyż od nich zależą możliwości obrazowania ultrasonografu [2].

8.2.2. Funkcja przenoszenia przetwornika

Zachowanie się przetwornika, złożonego z układu kilku ściśle ze sobą połączonych warstw, zaprezentowanego na rysunku 8.2, może być opisane za pomocą *funkcji przenoszenia*. Jest to model matematyczny złożony z równań różniczkowych, przekształconych za pomocą

transformaty Fouriera w dziedzinę częstotliwości. Obliczając moduł funkcji przenoszenia, można pozyskać charakterystykę do obliczenia szerokości pasma przetwornika [3–5].



Rysunek 8.2. Model wielowarstwowego przetwornika ultradźwiękowego [4]

Istotnymi wielkościami wpływającymi na funkcję przenoszenia są współczynnik odbicia β oraz opóźnienie fali τ . Współczynnik odbicia, przedstawiony wzorem (8.1), opisuje jaką część fali zostanie odbita na granicy między ośrodkami, w przetworniku będącymi warstwami. Przy prostopadłym padaniu fali współczynnik odbicia zależy wyłącznie od impedancji ośrodka Z_1 , z którego pada fala, oraz impedancji ośrodka Z_2 , do którego przenika pozostała, nieodbita część fali [6].

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (8.1)$$

Opóźnienie fali, opisane równaniem (8.2), występuje podczas rozchodzenia się fali w ośrodku. Wpływa na nią prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w danym ośrodku c oraz grubość warstwy d , będąc drogą, jaką fala ma do przebycia [6].

$$\tau = \frac{d}{c} \quad (8.2)$$

Postać funkcji przenoszenia zależna jest od ilości warstw, z jakiej składa się przetwornik. Zależność (8.3) prezentuje funkcję przenoszenia dla przetwornika z dwoma warstwami dopasowującymi [5].

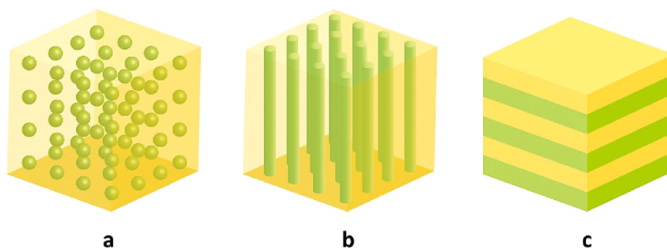
$$\begin{aligned} K_{C3}(j\omega) &= \frac{1}{j\omega} \frac{h}{Z_C + Z_{C1}} (1 - \beta_{C2})(1 - \beta_{C3}) \frac{Q_{C3}(j\omega)}{R_{C3}(j\omega)} \\ Q_{C3}(j\omega) &= e^{-j\omega(\tau_1 + \tau_2)} - (1 + \beta_b)e^{-j\omega(\tau + \tau_1 + \tau_2)} \\ &\quad + \beta_b e^{-j\omega(2\tau + \tau_1 + \tau_2)} \\ R_{C3}(j\omega) &= 1 + \beta_b \beta_{C1} e^{-j2\omega\tau} + \beta_{C1} \beta_{C2} e^{-j2\omega 2\tau_1} \\ &\quad + \beta_{C2} \beta_{C3} e^{-j2\omega\tau_2} + \beta_b \beta_{C2} e^{-j2\omega(\tau + \tau_1)} \\ &\quad + \beta_{C1} \beta_{C3} e^{-j2\omega(\tau_1 + \tau_2)} + \beta_b \beta_{C1} \beta_{C2} \beta_{C3} e^{-j2\omega(\tau + \tau_2)} \\ &\quad + \beta_b \beta_{C3} e^{-j2\omega(\tau + \tau_1 + \tau_2)} \end{aligned} \quad (8.3)$$

8.2.3. Możliwości zwiększania szerokości pasma przenoszenia przetwornika

Na szerokość pasma przenoszenia wpływa dobroć przetwornika piezoceramicznego. Jest ona stosunkiem impedancji przetwornika do sumy obciążeń przetwornika na przedniej

i tylnej jego warstwie. Im mniejsza dobroć, tym szersze będzie pasmo przenoszenia przetwornika. Wobec tego, na szerokość pasma przenoszenia można wpływać ingerując w impedancje akustyczne otaczające przetwornik [3, 7].

Impedancję przetwornika można zmniejszyć przez stosowanie konstrukcji kompozytovej, łączącej zalety ceramiki polikrystalicznej *PZT* oraz pasywnego polimeru. Ceramika polikrystaliczna odpowiada za zjawisko piezoelektryczne, umożliwiające przetwornikowi drgania. Polimer odpowiada za obniżenie impedancji akustycznej całego materiału. Sposób łączenia materiałów ma istotny wpływ na falę promieniowaną do ośrodka i jest określony dwoma cyframi *a – b*. Pierwsza z cyfr określa ilość kierunków rozchodzenia się fali w piezoceramice, a druga – w polimerze. Przykładowe konstrukcje kompozytowe prezentuje rysunek nr 8.3. Konstrukcja kompozytowa ma impedancję akustyczną bliższą impedancji tkanki. Wciąż jednak znacząco od niej odbiega [7–10].



Rysunek 8.3. Przykładowe konstrukcje kompozytowe: a – 0-3, b – 1-3, c – 2-2

Przetwornik można też obciążać warstwami z jego przodu i tyłu. Muszą się one różnić impedancjami akustycznymi od impedancji przetwornika w mniejszym stopniu od badanego ośrodka. Warstwa umieszczona z tyłu nazywa się *warstwą tłumiącą*, warstwa umieszczona z przodu nosi nazwę *warstwy dopasowującej*.

Warstwa tłumiąca wpływa na współczynnik odbicia między tylną powierzchnią przetwornika, a ośrodkiem obciążającym tę powierzchnię. Wprowadzenie jej powoduje straty w transmisji przetwornika – zmniejszona zostaje wartość funkcji przenoszenia dla częstotliwości rezonansowej. Poprawie ulega kształt funkcji przenoszenia oraz szerokość jej pasma, na skutek zmniejszenia dobroci przetwornika [3, 5, 11].

Warstwa dopasowująca musi mieć impedancję akustyczną zawartą w przedziale otaczających ją ośrodków. W układzie przetwornika występują wtedy dwie granice między ośrodkami. Współczynniki odbicia między tymi granicami są mniejsze od współczynnika między samym przetwornikiem a tkanką. Zwiększenie obciążenia z przodu obniża też dobroć przetwornika. Poszerzone zostaje jego pasmo przenoszenia, bez spadku sprawności przetwornika. Warstw dopasowujących można stosować kilka, o różnych impedancjach akustycznych i grubościach [3].

Do doboru impedancji akustycznych warstw dopasowujących można stosować odpowiednie kryteria optymalizacyjne. Kryterium Chebysheva, DeSiletsa i Soqueta, zaprezentowane odpowiednio wzorami (8.4)–(8.6). Wzory te służą do obliczania impedancji pierwszej warstwy dopasowującej. Każdy kolejny zestaw warstw oblicza się rekurencyjnie, wykorzystując uprzednio obliczony [4, 5].

$$Z_{C1} = \sqrt{Z_C Z_T} \quad (8.4)$$

$$Z_{C1} = \sqrt[3]{Z_C Z_T^2} \quad (8.5)$$

$$Z_{C1} = \sqrt[3]{2Z_C Z_T^2} \quad (8.6)$$

Materiały o pożądanej impedancji akustycznej są problematyczne do wytworzenia. Dlatego też charakterystykę funkcji przenoszenia można kształtować za pomocą zmian grubości warstw. Kryterium optymalnej grubości warstwy to *kryterium ćwierćfalowe*. Dla tego kryterium warstwy mają charakter rezonansowy. Modyfikacja grubości, wykrzywiając funkcję przenoszenia, pozwala otrzymać szersze pasmo przenoszenia [3, 12, 13].

8.3. Projekt i wykonanie

W ramach opracowanego programu napisane zostały funkcje umożliwiające obliczanie funkcji przenoszenia modelowanego przetwornika, wykreślanie wykresów modułu tej funkcji oraz obliczanie szerokości pasma przenoszenia.

Program został napisany w języku Python. Korzysta on z bibliotek *NumPy* oraz *Matplotlib*. Pierwsza z nich ułatwia działanie na dużej ilości danych, a druga – umożliwia rysowanie wykresów w oparciu o tablice danych.

W programie skupiono się na jego funkcjonalności. Nie posiada on więc jeszcze interfejsu graficznego. Parametry do modelowania przetwornika wprowadzane są na obecnym etapie ręcznie, za pomocą konsoli. Menu programu prezentuje rysunek 8.4.

```

Wykres został wyświetlony
----- MENU -----
1. Impedancja ośrodka badawczego Zt: 427.0 Rayl
2. Impedancja Przetwornika Zc: 3000000.0 Rayl
3. Obciążenie warstwą tylną Zb: 0 Rayl
4. Częstotliwość pobudzenia f0: 6000000 Hz
5. Kryterium: Chebyshev
6. Model: 2 warstwy dopasowujące
7. Wyznacz warstwy dopasowujące
Przetwornik Z: [0, 3000000.0, 1842671.4617806992, 6951.863240786734, 427.0]
8. Grubości warstw dopasowujących d: [0.25, 0.25]
9. Wyznacz funkcję
Szerokości pasma: B = [27.9593] %
10. Wyświetl wykres
11. Zakres dziedziny f: +- 3000000.0 Hz
12. Wyjście
Wybierz opcję: 

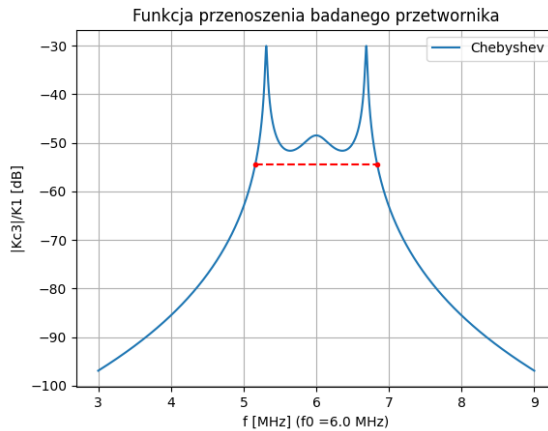
```

Rysunek 8.4. Widok menu programu napisanego w ramach pracy

Program umożliwia modyfikację ilości warstw dopasowujących, impedancji związanych z przetwornikiem (warstwy tylnej, przetwornika, warstw przednich i ośrodka), grubości warstw dopasowujących, częstotliwości środkowej przetwornika oraz zakresu dziedziny funkcji przenoszenia. Gdy wszystkie wymagane parametry zostaną wprowadzone, możliwe staje się obliczenie funkcji przenoszenia przetwornika.

Po obliczeniu funkcji przenoszenia program umożliwia wykreślenie wykresu jej modułu. Przykładowy wykres prezentuje rysunek 8.5. Oś pozioma reprezentuje częstotliwość w skali MHz wraz z oznaczoną częstotliwością środkową. Oś pionowa reprezentuje moduł funkcji przenoszenia, unormowany do maksimum transmisji przetwornika do ośrodka.

Poza charakterystyką funkcji zawiera też zaznaczoną szerokość pasma przenoszenia, za pomocą czerwonej, przerywanej linii. Poprawność generowanych wykresów weryfikowana była w oparciu o literaturę.



Rysunek 8.5. Przykładowy wykres generowany przez opracowany program

8.4. Uzyskane wyniki

Przygotowany program wykorzystano do weryfikacji parametrów głowicy rektalnej, produkowanej przez firmę DRAMIŃSKI S.A. Porównane zostały wyniki obliczeń w programie z rzeczywistymi pomiarami, dokonanymi przez firmę. Ponadto zbadany został wpływ sposobu łączenia warstw przetwornika na jego funkcję przenoszenia.

8.4.1. Weryfikacja parametrów głowicy rektalnej

W tabeli 8.1 zaprezentowane zostały parametry przetworników wytarzanych do głowic firmy Dрамиński S.A.

Tabela 8.1. Parametry elementów przetwornika wytwarzanego w firmie DRAMIŃSKI S.A.

Material	Prędkość akustyczna [m/s]	Gęstość [g/cm ³]	Impedancja akustyczna [MRayl]
Ceramika 3302HD	4040	7.87	31.7
Kompozyt	3005	5.02	15.1
1 warstwa	2765	1.96	5.42
2 warstwa	2520	1.17	2.9
warstwa tłumiąca	1960	2.8	5.48

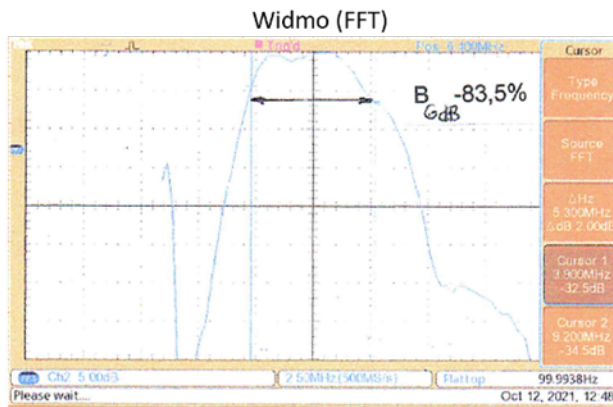
Pozostałe parametry przetwornika to:

- grubość przetwornika – 230 μm ,
- grubość pierwszej warstwy dopasowującej – 89 μm ,
- grubość drugiej warstwy dopasowującej – 70 μm .

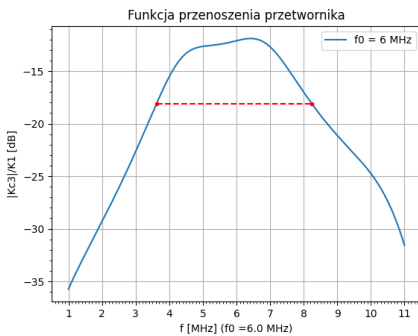
Firma w wyniku pomiarów otrzymała kształt funkcji przenoszenia, zaprezentowany na rysunku 8.6. W programie z tych samych parametrów uzyskano funkcje przenoszenia zaprezentowane na rysunku 8.8. Rezultaty uzyskane przez firmę zestawiono z wynikami obliczeń w programie w tabeli 8.2.

Tabela 8.2. Porównanie uzyskanych w wyniku pomiarów z obliczeniami w programie

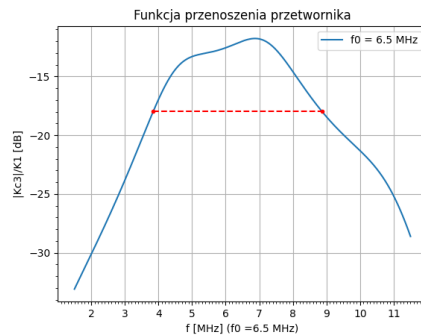
Źródło wyników	Częstotliwość środkowa f_0 [MHz]	Szerokość pasma B [%]
Pomiary firmy	6	80.92
Obliczenia w programie	6	77.09
Obliczenia w programie	6.5	77.33



Rysunek 8.6. Funkcja przenoszenia uzyskana przez firmę w wyniku pomiarów



Rysunek 8.7. Funkcja przenoszenia całego przetwornika o częstotliwości środkowej $f_0 = 6$ MHz



Rysunek 8.8. Funkcja przenoszenia całego przetwornika o częstotliwości środkowej $f_0 = 6.5$ MHz

8.4.2. Badania wpływu łączenia warstw przetwornika

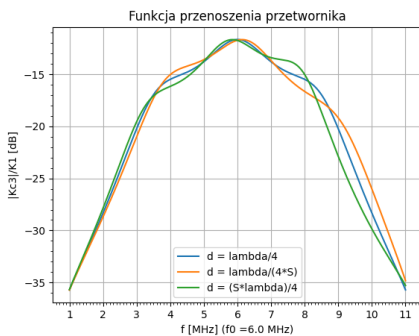
Badanie przeprowadzono dla danych impedancji przetwornika i warstw zawartych w tabeli nr 8.1. Grubości warstw modyfikowane były w oparciu o współczynnik empiryczny

kleju S . Przyjęto założenie, że klej nie wpływa na impedancje akustyczne warstw. Porównania funkcji przenoszenia ze względu na sposób ich łączenia z warstwami dokonano dla trzech przypadków. Pierwszy z nich to sytuacja, gdy łączna grubość kleju i warstwy jest równa $d = \lambda/4$. Drugi – gdy warstwa jest idealnie sprzężona, a więc grubość jej zostaje pomniejszona o współczynnik empiryczny kleju i wynosi $d = \lambda/(4 \times S)$. Trzeci, gdy warstwa o grubości $\lambda/4$ zostaje klejona do przetwornika, całkowita grubość warstwy zostaje powiększona o współczynnik empiryczny kleju i wynosi $d = \lambda/4 \times S$.

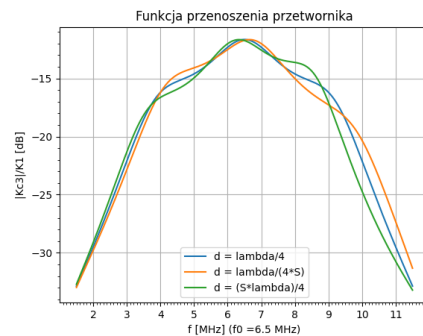
Uzyskane szerokości pasma przenoszenia zaprezentowano w tabeli 8.3 a wykresy funkcji przenoszenia na rysunkach 8.9 i 8.10.

Tabela 8.3. Szerokości pasm przenoszenia dla różnych grubości warstw dopasowujących uzyskanych w wyniku ich łączenia

Grubość warstw	B_6 MHz [%]	$B_{6.5}$ MHz [%]
$\lambda/4$	87.69263333	87.69263077
$\lambda/(4 \times S)$	84.8823	84.8823
$(\lambda \times S)/4$	84.628975	84.62897692



Rysunek 8.9. Wpływ sposobu łączenia warstw na funkcję przenoszenia przetwornika kompozytowego dla częstotliwości środkowej $f_0 = 6$ MHz



Rysunek 8.10. Wpływ sposobu łączenia warstw na funkcję przenoszenia przetwornika kompozytowego dla częstotliwości środkowej $f_0 = 6.5$ MHz

8.5. Podsumowanie

Celem pracy było wykonanie narzędzia wspomagającego analizę możliwości zaprojektowania przetworników ultradźwiękowych o pożądanym paśmie przenoszenia, przez weryfikację odpowiedniego doboru ich parametrów.

Do napisania programu wykorzystano język *Python*. W programie do analizy modelu wykorzystano funkcję przenoszenia. Poprawność działania napisanego programu zweryfikowano w oparciu o literaturę. Za pomocą tak opracowanego narzędzia zostały przeprowadzone badania na podstawie danych rzeczywistych projektów przetworników ultradźwiękowych.

W pierwszym z badań porównane zostały funkcje przenoszenia uzyskane w wyniku obliczeń dokonanych w napisanym programie z funkcją uzyskaną przez firmę DRAMIŃSKI S.A. w wyniku pomiarów. Weryfikacji dokonano dla dwóch częstotliwości środkowych, gdyż grubość płytki piezoceramicznej wskazywała na częstotliwość 6.5 MHz, różniącą się od tej uzyskanej w wyniku pomiarów o 0.5 MHz. Różnica ta nie wniosła jednak znaczącej zmiany w szerokości funkcji przenoszenia. W tabeli 8.2 można zauważyć, iż wynosi ona mniej niż 1 p.p. Z punktu widzenia szerokości pasma wybór częstotliwości środkowej nie jest zatem bardzo znaczący.

Funkcja przenoszenia dla częstotliwości $f_0 = 6$ MHz ma bardziej płaski charakter, niż dla $f_0 = 6.5$ MHz. Może to być zatem powód wyboru takiej częstotliwości przez firmę. Wykres na rysunku nr 8.6 wskazuje na zastosowanie przetwornika o częstotliwości rezonansowej 6.5 MHz. Kształtem obie funkcje są zbliżone do uzyskanej w wyniku pomiarów.

Szerokości pasm przenoszenia uzyskane w wyniku obliczeń w programie różnią się od szerokości pomiarowej o kilka punktów procentowych. Kształty funkcji są do siebie zbliżone, jednak nie pokrywają się w całości. Różnice w szerokościach mogą wynikać zarówno z błędów pomiarowych, jak i niepewności obliczeń w programie. Opracowany program nie jest zatem narzędziem idealnym. Może ukazywać przybliżony przebieg zachowania się przetwornika.

Na funkcję przenoszenia mogą wpływać też praktyczne działania, jak chociażby sposób łączenia warstw przetworników. Wpływa on głównie na grubości warstw. Im lepiej są one sprzężone, tym mniej strat wystąpi na granicy między warstwami.

Kształty wykresów dla częstotliwości środkowych 6 MHz i 6.5 MHz, widoczne na rysunkach 8.9 i 8.10, są niemalże identyczne. Potwierdzają to szerokości pasm przenoszenia zawarte w tabeli 8.3. Różnice między nimi występują rzędu 10^{-6} p.p. Przy stosowaniu kryterium ćwierćfalowego częstotliwość środkowa nie wpływa znacząco na funkcję przenoszenia przetwornika.

Sposób łączenia warstw ma wpływ na funkcję przenoszenia. Im mniejsza grubość warstw, tym rośnie poziom funkcji przenoszenia dla niższych częstotliwości od środkowej, maleje zaś dla większych od niej. Przeciwnie się dzieje przy zwiększaniu grubości warstw.

Funkcja ma najszersze pasmo przenoszenia dla grubości warstwy i kleju równej ćwierci fali. Dla pozostałych przypadków maleje o około 3 p.p. Warstwy dopasowujące należy zatem wytwarzać w taki sposób, aby po połączeniu z klejem dawały łączną grubość zbliżoną do kryterium ćwierćfalowego. Uzyskuje się wtedy najlepszą szerokość pasma przenoszenia.

Cel pracy magisterskiej został zrealizowany. Wytworzone narzędzie pozwala analizować wpływ różnych parametrów na zachowanie przetworników ultradźwiękowych. Program będzie dalej rozwijany, celem poprawy jego funkcjonalności.

Bibliografia

- [1] Celmer M., Opiełiński K.J., Badania przesłuchów w komercyjnych głowicach USG.
- [2] Moran C.M., A Comparison of the Imaging Performance of High Resolution Ultrasound Scanners for Preclinical Imaging, *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2011, Vol. 37, s. 493–501, <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2010.11.010> [dostęp: 21.05.2024].
- [3] Salamon R., Systemy Hydrolokacyjne, Gdańsk: GTN 2006, ISBN 83-97359-98-X.

-
- [4] Gudra T., Banasiak D., Multiparameter Analysis of the Ultrasonic Transducer Transfer Function Using a Genetic Algorithm, *Appl. Sci.* **2022**, 12(11), 5325, <https://doi.org/10.3390/app12115325> [dostęp: 01.03.2024].
- [5] Gudra T., Opieliński K. J., Influence of acoustic impedance of multilayer acoustic systems on the transfer function of ultrasonic airborne transducers, *Ultrasonics*, 40(1–8), **2002**, s. 457–463.
- [6] Talarczyk E., *Podstawy techniki ultradźwięków*, Wydanie drugie zmienione, Wrocław, 1990.
- [7] Rhee S., Materials for Acoustic Matching in Ultrasound Transducers, **2001 IEEE Ultrasonics Symposium** – 1055, [dostęp: 12.04.2024].
- [8] Gururaja T. R., Schulze W., Piezoelectric Composite Materials for Ultrasonic Transducer Applications. Part I: Resonant Modes of Vibration of PZT Rod-Polymer Composites, *IEEE Transactions on sonics and ultrasonics*, Vol. su-32. No. 4, **1985**, s. 481–498.
- [9] Qin H., Design, preparation and electromechanical characteristics analysis of piezoelectric 1-3 type composites with sandwich polymer structures, *Sensors & Actuators: A. Physical* 366, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115024> [dostęp: 15.06.2024].
- [10] Narita F., Fox M., A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications, *Adv. Eng. Mater.*, **2018**, 20, <https://doi.org/10.1002/adem.201700743> [dostęp: 18.06.2024].
- [11] Lee S., A quarter-wavelength vibration mode transducer using clamped boundary backing layer, *ACEM'12*, **2012**, s. 1634–1639.
- [12] Opieliński K. J., Gudra T., Influence of acoustic impedance of multilayer acoustic systems on the transfer function of ultrasonic airborne transducers, *Ultrasonics*, 40(1–8), **2002**, s. 465–469.
- [13] Cugnet B., Influence of the quarter wave matching layers on the response of bar transducers, *IEEE Ultrasonics Symposium*, **2000**, s. 1135–1138.

Optymalizacja efektywności wysokiej mocy rezonansowego przetwornika LLC

mgr inż. Jakub Zatoń
Elektronika

dr inż. Grzegorz Budzyń
Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki

Niniejsza praca koncentruje się na zbadaniu możliwości różnych metod prostowania stosowanych w przetwornicach DC/DC. Analizowany układ opiera się na rezonansowym obwodzie LLC (induktor–induktor–kondensator), który pozwala na osiągnięcie wyjątkowo wysokiej sprawności, redukując do minimum rozpraszanie ciepła. W celu uzyskania najlepszej wydajności przeprowadzono optymalizację, obejmującą analizę i porównanie wpływu prostowania synchronicznego i pasywnego na skuteczność obwodu. Praca przedstawia wyniki dla różnych konfiguracji obwodów przetwornicy. Zbadano zachowanie układu przy zastosowaniu tranzystorów typu NMOS, montowanych w technologii powierzchniowej oraz przewlekanej, a także standardowych diod prostowniczych. Uzyskane wyniki pokazują, że przetwornica DC/DC oparta na obwodzie rezonansowym LLC znacząco zwiększa ogólną sprawność systemu. Prostowanie pasywne zapewnia 94,65% sprawności, natomiast zastosowanie aktywnej metody pozwala zwiększyć ją do 96,33%.

9.1. Cel i założenia

Biorąc pod uwagę kwestie środowiskowe oraz duże zapotrzebowanie na wdrażanie odnawialnych źródeł energii, konwersja mocy staje się coraz ważniejsza. Wdrażanie przetwornic opierających się na podejściu rezonansowym, pozwala na minimalizowanie strat związanych z przekształcaniem mocy do minimum, co idealnie wpisuje się w definicję proekologiczności. Ponadto układy rezonansowe, między innymi LLC (induktor–induktor–kondensator) oraz LCC (induktor–kondensator–kondensator), cieszą się dziś dużym zainteresowaniem ze względu na pracę w trybie miękkiego przełączania, możliwość pracy dwukierunkowej, a także na możliwość implementacji licznych topologii [1].

Zakres pracy obejmuje szeroki temat procedury projektowania układu przetwornicy LLC. W pracy w szczegółowy sposób przedstawiono zasadę działania urządzenia, obliczenia niezbędne do implementacji projektu oraz samą implementację. Celem pracy było

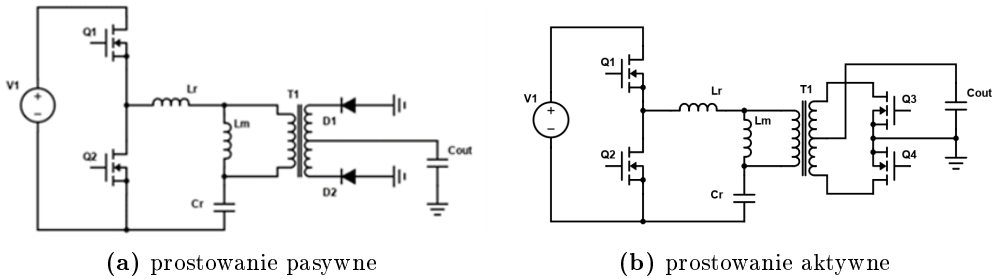
przeprowadzenie dogłębnej analizy możliwości obwodu rezonansowego oraz wskazanie najsłabszych elementów systemu, w celu jego optymalizacji, tak aby osiągnąć możliwie najwyższą sprawność. Optymalizacja obejmuje w szczególności pętlę sprzężenia zwrotnego, czas propagacji oraz przełączania sygnałów. Co więcej, praca zawiera porównanie metod prostowania (pasywnego i synchronicznego) dla strony wtórnej systemu. Porównane zostały różne tranzystory NMOS, z uwzględnieniem różnych parametrów elektrycznych takich jak pojemność bramki, czy czas powrotu diody wbudowanej w stan zaporowy. Badanie poszczególnych konfiguracji miało na celu określenie krzywych profilu sprawności dla konkretnych poziomów napięcia wejściowego względem obciążenia wyjściowego. Analiza zebranych danych pozwoliła stwierdzić, która z badanych konfiguracji zapewnia najlepszą wydajność, a także sporządzić listę problemów kluczowych dla optymalizacji przetwornicy rezonansowej LLC.

Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- przygotowanie przeglądu literatury dotyczącej realizowanego projektu,
- przygotowanie przeglądu rynkowego dostępnych tego typu urządzeń i ich implementacji,
- przygotowanie obliczeń na podstawie zgromadzonych materiałów oraz wymagań projektowych,
- stworzenie schematu elektrycznego urządzenia,
- stworzenie symulacji przygotowanego układu i jego walidacja,
- przygotowanie projektu transformatora (w tym wybór karkasu, rdzenia oraz rodzaju uzwojeń),
- projekt obwodu drukowanego stanowiącego platformę testowo-pomiarową (płytką PCB),
- uruchomienie prototypu urządzenia,
- walidacja poprawności działania urządzenia wraz ze wstępnymi pomiarami,
- testy zachowania różnych komponentów oraz rodzajów prostowania wraz z finalnymi pomiarami wydajności,
- pomiary termowizyjne w celu wykrycia słabych punktów systemu.

9.2. Wstęp teoretyczny

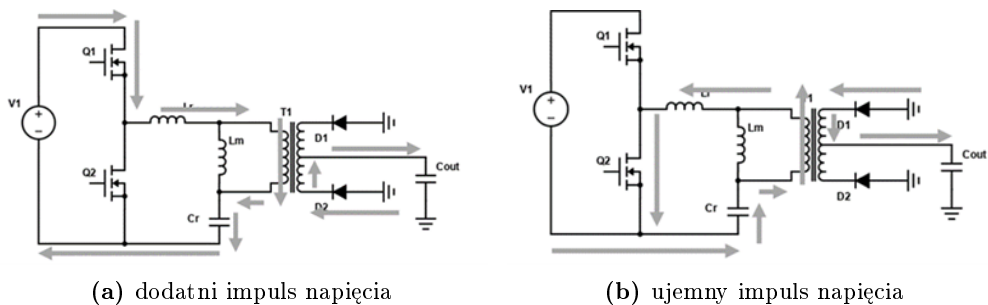
Obwód LLC (rysunek 9.1) jest modyfikacją szeregowego, rezonansowego konwertera LC (induktor–kondensator). Dławik rezonansowy L_r i kondensator C_r tworzą obwód rezonansowy, który jest połączony szeregowo z obciążeniem [2]. W tym układzie szeregowy obwód rezonansowy i obciążenie działają jak dzielnik napięcia – jego impedancja zmienia się w zależności od częstotliwości napięcia wejściowego (rysunek 9.7). Wadą układu LC są wysokie prądy powrotne, spowodowane wyłączeniem przy wysokich wartościach prądu [2]. Aby rozwiązać powyższe problemy, wprowadza się pewną modyfikację, polegającą na dodaniu dodatkowego dławika równoległe do uzwojenia pierwotnego transformatora. Ta konfiguracja to tak zwany przekształtnik LLC. Główną zaletą tego rozwiązania jest możliwość uzyskania przełączania przy zerowym napięciu (ZVS) w całym zakresie pracy, z niemal zerowym przełączaniem prądu (ZCS) [3].



Rysunek 9.1. Przetwornica rezonansowa LLC w topologii półmostkowej z dodatkowym dławikiem umieszczonym równolegle do uzwojenia pierwotnego i transformatorem z odczepem centralnym

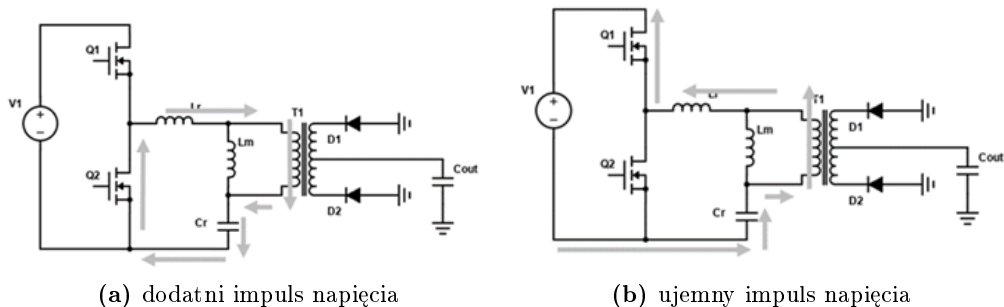
9.2.1. Zasada działania

Podczas cyklu przełączania występują dwa główne etapy: dostarczanie mocy (rysunek 9.2) oraz tryb swobodnego biegu (ang. *freewheeling effect*) – rysunek 9.3 [4]. W każdym cyklu, moc jest dostarczana dwukrotnie – raz podczas dodatniego impulsu napięcia, a drugi raz podczas ujemnego. W każdej połowie cyklu napięcie na dławiku magnesującym (oraz na uzwojeniu pierwotnym) jest odbitym napięciem wyjściowym, co powoduje kolejno ładowanie i rozładowywanie prądu magnesującego. Prąd przepływający przez pierwotną stronę transformatora stanowi różnicę między prądem rezonansowym a prądem magnesującym.



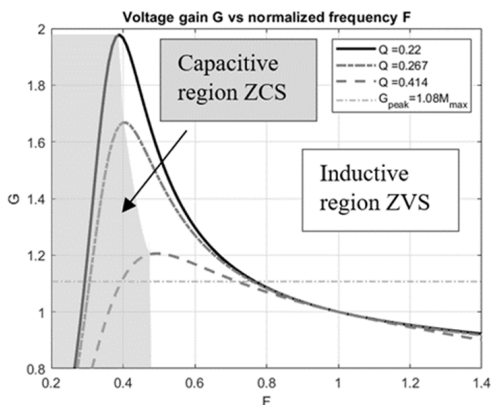
Rysunek 9.2. Poglądowy schemat cyklu dostarczania energii

Swobodny bieg (*freewheeling*) (rysunek 9.3) zachodzi tuż po zakończeniu przekazywania energii i występuje tylko przy częstotliwości przełączania niższej niż częstotliwość rezonansowa, z wykorzystaniem diod wbudowanych w tranzystory. Umożliwia to, aby prąd rezonansowy wyrównał się z prądem magnesującym, co sprawia, że prąd w uzwojeniu wtórnym spada do zera. W wyniku tego prostownik po stronie wtórnej zostaje odłączony, a dławik magnesujący może wejść w rezonans z elementami L_r i C_r . Częstotliwość tego rezonansu jest zawsze niższa niż pierwotna [5, 6].



Rysunek 9.3. Poglądowy schemat cyklu swobodnego biegu

Przetwornica LLC powinna pracować w obszarze indukcyjnym (gdzie impedancja wejściowa ma charakter indukcyjny), co powoduje, że prąd opóźnia się względem napięcia [7]. Osiąga się to przez ustawienie punktu pracy systemu na podstawie krzywej wzmocnienia napięcia (rysunek 9.4), w zależności od znormalizowanej częstotliwości przełączania przetwornicy.



Rysunek 9.4. Krzywa wzmocnienia napięcia w zależności od znormalizowanej częstotliwości przełączania wraz z zaznaczonymi obszarami pracy

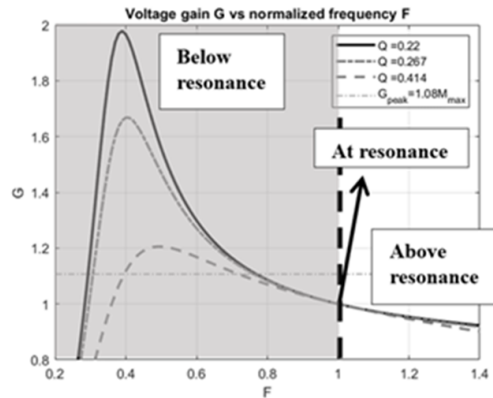
System może pracować przy różnych częstotliwościach: poniżej, na poziomie lub powyżej pożądanej częstotliwości rezonansowej (rysunek 9.5) [8].

Przy częstotliwości rezonansowej system działa najefektywniej, ponieważ częstotliwość przełączania pokrywa się z częstotliwością rezonansową. W każdej połowce cyklu dochodzi do pełnego przekazania energii. Na końcu tej fazy prąd cewki L_r osiąga poziom prądu magnesującego tylko na krótki (niezbędny) czas, zwany czasem martwym (*dead time*).

Powyżej częstotliwości rezonansowej, energia zmagazynowana w obwodzie rezonansowym nie jest przekazywana na wyjście w całości. Wyższa częstotliwość przełączania przerywa każdy półcykl rezonansowy, zanim ten zostanie zakończony, co zwiększa straty podczas przełączania i prowadzi do tzw. twardej komutacji diod.

Poniżej częstotliwości rezonansowej, pełny cykl rezonansowy kończy się w każdej połowie cyklu przełączania. Prąd w dławiku rezonansowym osiąga poziom prądu magnesującego

jącego i utrzymuje się w tym stanie aż do następnej fazy. W tym przypadku wzrastają straty przewodzenia z powodu efektu swobodnego biegu (*freewheeling*), który powoduje cyrkulację energii w układzie.



Rysunek 9.5. Krzywa wzmocnienia napięcia w zależności od znormalizowanej częstotliwości przełączania wraz z zaznaczonymi obszarami pracy względem częstotliwości przełączania

9.2.2. Prostowanie synchroniczne

Koncepcja prostowania synchronicznego jest kluczowa dla osiągnięcia wysokiej efektywności i wymaga odpowiedniego zaprojektowania. Czas przełączania tranzystorów pierwotnych i wtórnych musi być starannie dostosowany, ponieważ prawidłowe przełączenie wpływa nie tylko na efektywność, ale także na bezpieczeństwo urządzenia. Istotne jest, aby stan włączenia tranzystorów wtórnych pokrywał się z czasem włączenia tranzystorów pierwotnych. W przeciwnym razie może dojść do aktywacji niewłaściwej pary kluczy, co skutkuje zwarcieniem wyjścia do masy. Schemat układu aktywnego prostowania z wykorzystaniem tranzystorów NMOS (rysunek 9.3b).

Aby zapewnić odpowiedni schemat sterowania i skompensować wpływ opóźnienia propagacji, gwarantując bezpieczeństwo całego urządzenia, należy uwzględnić kilka parametrów:

- **czas włączenia** – maksymalny czas przewodzenia tranzystorów prostujących,
- **opóźnienie włączenia** – opóźnienie między włączeniem tranzystorów pierwotnych i prostujących – istotne dla napięć powyżej rezonansu, w przypadku których przetwornice pracują w trybie ciągłego przewodzenia,
- **opóźnienie wyłączenia** – opóźnienie wyłączenia kluczy prostujących.

9.2.3. Opis matematyczny

Aby wyznaczyć równanie wzmocnienia napięcia dla rozważanego systemu i określić parametry układu, konieczna jest analiza matematyczna. Ze względu na nieliniowe charakterystyki przetwornicy oraz częstotliwość przełączania bliską rezonansowej nie można zastosować standardowego podejścia uśredniającego, znanego z przetwornic PWM. Rozwiązaniem tego problemu jest metoda Przybliżenia Pierwszej Harmonicznej (*First Harmonic Approximation* – FHA), w której wejściowy sygnał prostokątny zostaje uproszczo-

ny. Dalej jest on reprezentowany wyłącznie przez jego pierwszą składową harmoniczną (rysunek 9.6). Dzięki temu można w odpowiedni sposób opisać zależność między sygnałem prostokątnym na wejściu a sygnałem sinusoidalnym na wyjściu, uzyskując funkcję przejściową systemu, obejmującą równania zespolone [9].

Na podstawie ogólnej reprezentacji szeregu Fouriera dla fali prostokątnej [10], napięcie opisane jest wzorem (9.1).

$$v_s(t) = \frac{4}{\pi} \cdot V_0 \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_0 t) \quad (9.1)$$

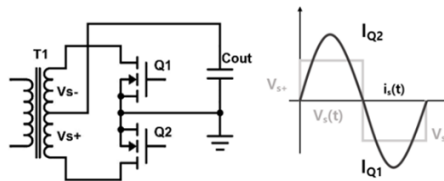
gdzie V_s to napięcie prostokątne na wejściu, a V_0 to nominalne napięcie wyjściowe. W związku z tym podstawowa składowa $v_s(t)$ przedstawiona jest równaniem (9.2) [11].

$$v_{0FHA}(t) = \frac{4}{\pi} \cdot V_0 \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (9.2)$$

Ponieważ prąd jest już przedstawiony jako przebieg sinusoidalny, wystarczy wziąć pod uwagę jedynie jego wartość średnią, wyrażoną wzorem (9.3).

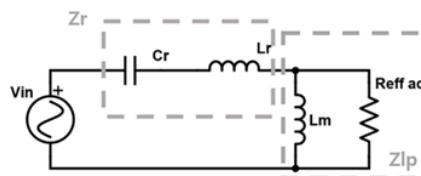
$$I_0 = \frac{2}{\pi} \cdot I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{s1RMS} \quad (9.3)$$

gdzie I_{s1} to wartość szczytowa wyprostowanej fali sinusoidalnej. Zatem prąd wyjściowy stanowi wartość średnią, wynikającą z równania całkowego oraz wartości skutecznej (*Root Mean Square*).



Rysunek 9.6. Schemat poglądowy układu prostownika pełnokresowego

Wiedząc, że napięcie i prąd są w fazie, możliwe jest wyznaczenie efektywnego obciążenia, jakie stanowi prostownik dla obwodu przełączającego, znajdującego się po stronie pierwotnej. To pozwala uprościć analizowany system, który jest opisany przez układ zastępczy (rysunek 9.7).



Rysunek 9.7. Układ zastępczy przetwornicy LLC z zaznaczoną impedancją rezonansową (Z_r) oraz równoległą (Z_{lp})

Funkcja przejściowa systemu opisana jest wzorem (9.4).

$$M(\omega) = \frac{Z_{lp}(\omega)}{Z_{lp}(\omega) + Z_r(\omega)} \quad (9.4)$$

Funkcję napięciowego wzmocnienia M , można także przedstawić w zależności od parametru Q oraz znormalizowanej częstotliwości F układu (równania (9.5) oraz (9.6)).

$$M(F, Q) = \frac{F^2(m-1)}{(F^2m-1) + jF(F^2-1)(m-1)Q} \quad (9.5)$$

$$G(F, Q) = \sqrt{\text{Re}(M(F, Q))^2 + \text{Im}(M(F, Q))^2} \quad (9.6)$$

Ponieważ komponenty obwodu rezonansowego mają kluczowe znaczenie dla wydajności systemu, muszą być zoptymalizowane na wstępnym etapie projektowania. W tym celu wprowadza się parametr m , który jest stosunkiem indukcyjności obwodu rezonansowego (równanie (9.7)). Odpowiada on za zakres użytecznych częstotliwości roboczych, a także ogólną efektywność układu, wpływając na straty przewodzenia [5].

$$m = \frac{L_m + L_r}{L_r} \quad (9.7)$$

Dodatkowo, w celu wyznaczenia wartości elementów pasywnych układu, niezbędna jest analiza wykresów funkcji przejściowej systemu dla różnych wartości parametru Q . Należy wyznaczyć krzywą, której szczyt osiąga 108% obliczonego maksymalnego wzmocnienia G_{peak} (równanie (9.6)) [12, 13]. Następnym krokiem jest obliczenie elementów układu rezonansowego opisanych równaniami (9.8)–(9.10) [13].

$$C_r = \frac{1}{2\pi \cdot Q \cdot f_r \cdot \text{Re}f_f} \quad (9.8)$$

$$L_r = \frac{1}{(2\pi \cdot f_r)^2 C_r} \quad (9.9)$$

$$L_m = (m-1) \cdot L_r \quad (9.10)$$

9.3. Projekt i wykonanie

Projekt układu należy podzielić na kilka sekcji obejmujących stworzenie schematu na podstawie założeń i obliczeń, przygotowanie prototypu płytki PCB oraz symulacje układu w celu jego walidacji.

9.3.1. Założenia elektryczne

Z powodu ograniczeń przestrzennych cały projekt powinien być kompaktowy, co uniemożliwia zastosowanie dużych komponentów, w tym celu konieczne jest zwiększenie częstotliwości przełączania, która została ustalona na około 200 kHz. Główna funkcjonalność rozważanej przetwornicy polega na przekształceniu napięcia DC z zakresu 310–370 V na 40 V DC, przy dostarczaniu mocy rzędu 650 W. Bazując na powyższych założeniach,

dokonano niezbędnych obliczeń oraz wyboru elementów przełączających (tabela 9.1). Dodatkowo przygotowano projekt transformatora z odczepem centralnym.

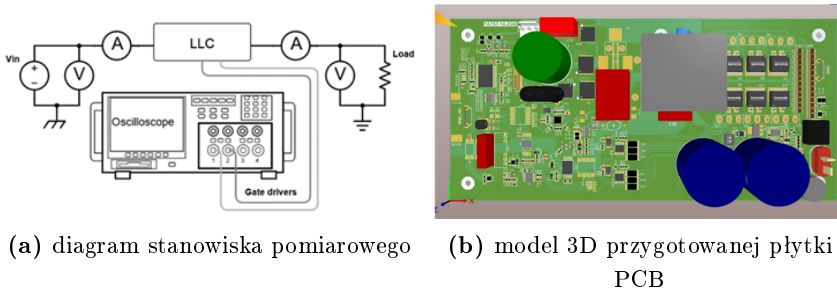
Tabela 9.1. Założenia projektowe

Parametr	Wielkość
Napięcie wejściowe	320 V
Napięcie/prąd wyjściowy	40 V/16 A
Moc wyjściowa	650 W
Częstotliwość rezonansowa	180 kHz
Lr/Lm/Cr	15 μ H/100 μ H/66 nF
Tranzystory przełączające	GAN080-650EBE
Diody prostujące	FEP30DP
Tranzystory prostujące	RCJ510N25/ IRFP4332
Rdzeń/karkas/przekładnia transformatora	PC96/PQ35 \times 35/4

9.3.2. Projekt PCB

Projekt obwodu drukowanego (PCB) wykonany został w taki sposób, aby w jak największym stopniu ułatwić przeprowadzenie testów oraz pomiarów. Z tego powodu layout przewiduje jednostronny montaż elementów z uwzględnieniem różnych footprintów dla testowanych komponentów (tj. kluczy i diod prostujących), tak aby móc użyć elementów montowanych w technologii powierzchniowej oraz przewlekanej, na jednym prototypie, w zależności od potrzeb (rysunek 9.8).

Dodatkowo, ze względu na wysokie napięcie znajdujące się po stronie pierwotnej układu, zastosowano izolację galwaniczną oraz optoelektroniczną między stroną pierwotną a wtórną.



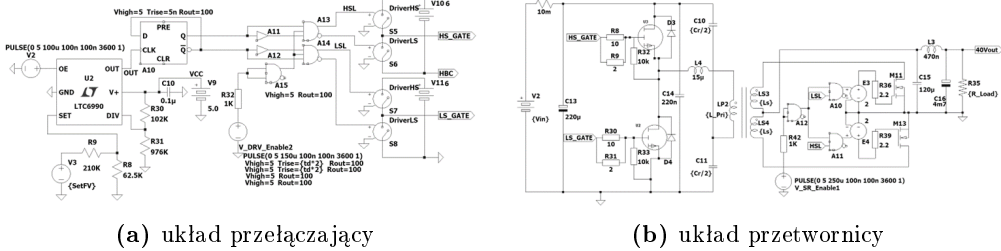
Rysunek 9.8. Platforma testowa przetwornicy LLC

9.4. Symulacja

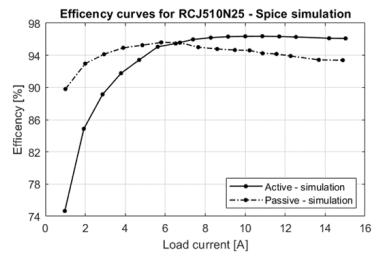
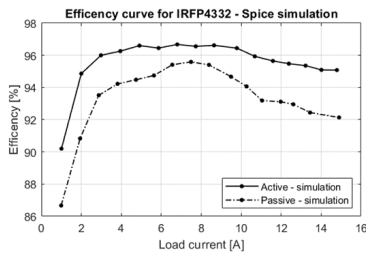
W celu weryfikacji zachowania projektowanego urządzenia, przygotowano symulację wdrażanego prototypu, w oparciu o oprogramowanie typu SPICE (rysunek 9.9). Dokonano pomiarów wydajności urządzenia w zależności od napięcia wejściowego, używanych komponentów oraz rodzaju prostowania.

Wyniki symulacji wskazują, że ogólny poziom efektywności przetwornika powinien przekroczyć 94% (rysunki 9.10 i 9.11). Dodatkowo kształt krzywych wydajności jest za-

chowany i pokrywa się z teoretycznymi przewidywaniami [12]. Przy niskim obciążeniu wydajność przetwornika jest znacznie gorsza – nawet 20 p.p. spadku efektywności (rysunek 9.10b). W przypadku porównania prostowania synchronicznego z pasywnym, prostowanie synchroniczne (*Synchronous Rectification* – SR) pozwala osiągnąć dodatkowe 2 p.p. efektywności (rysunek 9.10).



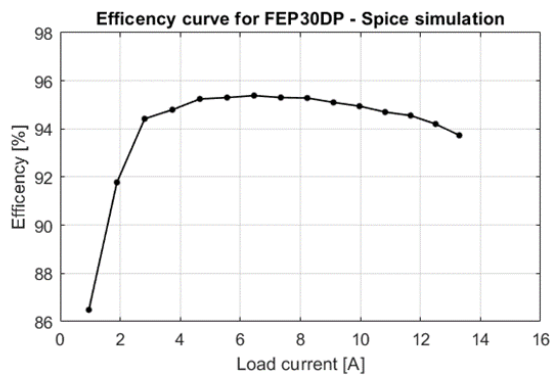
Rysunek 9.9. Schemat układu użytego w symulacji SPICE



(a) tranzystory IRFP4332

(b) tranzystory RCJ510N25

Rysunek 9.10. Zasymulowane krzywe sprawności



Rysunek 9.11. Zasymulowana krzywa sprawności dla diod prostowniczych FEP30DP

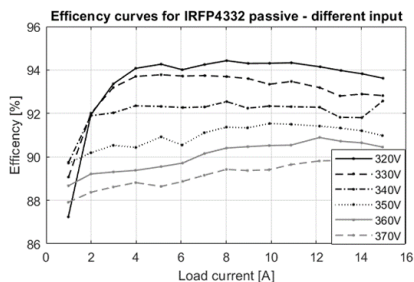
9.5. Uzyskane wyniki

Jak pokazują uzyskane wyniki, prostowanie synchroniczne pozwoliło zwiększyć efektywność przetwornicy o około 2 p.p., osiągając nawet 96,33%, przy analizie nominalnego napięcia wejściowego (rysunki 9.12 oraz 9.13). Porównując rzeczywiste pomiary (przeprowadzone zgodnie z konfiguracją przedstawioną na diagramie – rysunek 9.8a) z wynikami symulacji, ogólne rezultaty wydajności przy średnim i pełnym obciążeniu są zbliżone (rysunek 9.10). Jednak wyniki symulacji dla niskiego obciążenia z użyciem tranzystora RCJ510N25 różnią się od rzeczywistych rezultatów, sugerując, że model symulacyjny użytego tranzystora nie jest reprezentatywny w tym zakresie.

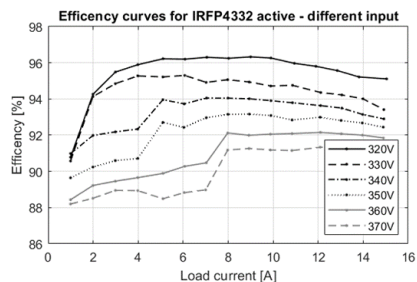
Pomiary sprawności dla pasywnego prostowania (uzyskanego przez odłączenie sygnałów sterujących bramkami) w szerokim zakresie napięć wejściowych pokazują, że w miarę zwiększania napięcia względem nominalnej wartości 320 V, sprawność znacznie spada. Wyjaśnia się to silną zależnością między pasywnym prostowaniem a jakością rezonansu. Dla napięcia 370 V, najwyższa uzyskana sprawność przy użyciu diod wbudowanych wynosiła 89,83% przy pełnym obciążeniu (rysunek 9.11). Najgorszą sprawność dla tego napięcia uzyskano używając diod tranzystora RCJ510N25 przy obciążeniu równym 1 A, tj. 82,91% (rysunek 9.10a). Dla porównania, w przypadku diod FEP30DP sprawność na tym poziomie przekraczała 92%.

Analiza wyników pokazuje, że ogólna sprawność z wykorzystaniem prostowania synchronicznego znacznie się poprawiła w porównaniu do konfiguracji pasywnej. Jest to szczególnie widoczne przy obciążeniu na poziomie 50%. Maksymalna sprawność wynosząca 96,1% (RCJ510N25) i 96,33% (IRFP4332) została osiągnięta dla napięcia wejściowego 320 V (rysunki 9.12b oraz 9.13b). Podobnie jak w przypadku prostowania pasywnego (rysunki 9.12a oraz 9.13a), profile sprawności dla napięcia wejściowego powyżej nominalnej wartości spadają.

Porównując oba tranzystory pod kątem parametrów elektrycznych, RCJ510N25, mający większą rezystancję kanału $R_{ds(on)}$ i pojemność wejściową [14, 15], uzyskał nieco gorszą sprawność – dokładnie o 0,23 p.p. Oznacza to, że rezystancja kanału i pojemność bramki mają wpływ na sprawność, jednak jest on marginalny.

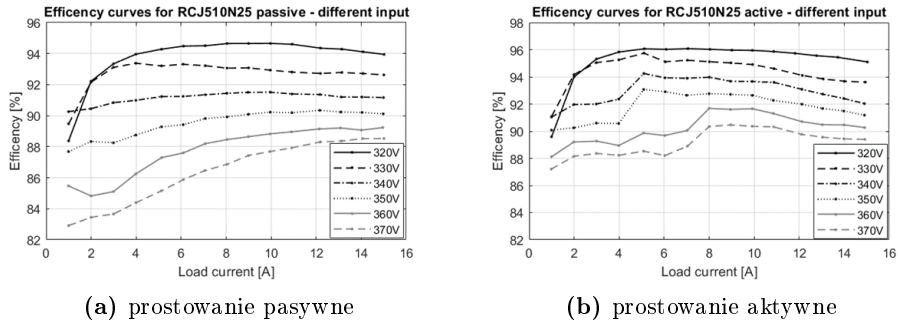


(a) prostowanie pasywne



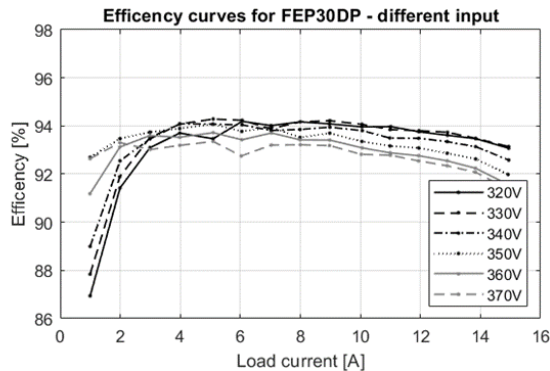
(b) prostowanie aktywne

Rysunek 9.12. Zmierzone krzywe sprawności tranzystorów IRFP4332



Rysunek 9.13. Zmierzone krzywe sprawności tranzystorów RCJ510N25

Otrzymane krzywe sprawności dla diod prostowniczych są bardzo spójne i utrzymują zbliżoną wydajność w całym zakresie prądu obciążenia, osiągając maksymalne wartości na poziomie 94% (rysunek 9.14). Przy pracy z małym obciążeniem widoczny jest spadek sprawności, nawet do 86% przy najmniejszym napięciu wejściowym. Im wyższe napięcie wejściowe, tym lepsza wydajność przetwornicy podczas pracy przy niskim obciążeniu.



Rysunek 9.14. Zmierzone krzywe sprawności dla diod prostowniczych FEP30DP

9.6. Podsumowanie

Ogólna wydajność badanych konfiguracji przetwornicy LLC znacząco przewyższa efektywność dostępną dla klasycznych przetwornic PWM. Nawet w najgorszym scenariuszu, który występuje przy pracy z niskim obciążeniem i wysokim napięciu wejściowym (tj. gdy przetwornica pracuje powyżej częstotliwości rezonansowej), sprawność systemu wynosi około 83% – rysunek 9.13a.

Niezależnie od metody prostowania (aktywnego czy pasywnego), sprawność przy nominalnych warunkach (320 V napięcia wejściowego), utrzymuje się na poziomie około 94% (rysunki 9.12 oraz 9.13) co jest doskonałym wynikiem w porównaniu do klasycznych rozwiązań.

Pasywne prostowanie działa znacznie lepiej, gdy stosuje się diody dedykowane do tego celu. Diody FEP30DP zapewniają porównywalną wydajność dla wszystkich rozważanych opcji napięcia wejściowego i utrzymują zbliżoną efektywność w całym zakresie prądów

obciążenia (rysunek 9.14). To sprawia, że takie przetwornice są bardziej odporne na odchylenia napięcia wejściowego i działanie poza optymalnymi warunkami. Diody wbudowane w tranzystory są zaprojektowane do radzenia sobie z tzw. efektem swobodnego biegu (*freewheeling effect*), co pozwala na redukcję liczby zewnętrznych komponentów niezbędnych do prawidłowego działania systemu. Zazwyczaj jednak ich parametry elektryczne, takie jak spadek napięcia w kierunku przewodzenia czy czas powrotu diody w stan zaporowy, są gorsze niż w przypadku dedykowanych diod prostowniczych.

Prostowanie synchroniczne zwiększa efektywność przetwornicy o około 2 p.p. przy nominalnych warunkach pracy. Analizując różne konfiguracje oraz charakterystyki elektryczne tranzystorów, widać, że parametry takie jak rezystancja kanału oraz pojemność i ładunek bramki (im niższe, tym lepsze), rzeczywiście poprawiają ogólną wydajność, ale jedynie o ułamek procenta.

Dla aplikacji wysokiej mocy, gdzie wydajność nie jest parametrem krytycznym, można zrezygnować z prostowania synchronicznego w przetwornicy LLC i zastosować dedykowane diody, takie jak FEP30DP. Eliminuje to konieczność użycia dodatkowych sterowników i izolatorów, co znacząco zmniejsza poziom skomplikowania całego układu, jednocześnie zachowując przyzwoitą sprawność na poziomie około 94 %.

Dodatkową zaletą przetwornicy LLC z aktywnym prostowaniem realizowanym przy wykorzystaniu kluczy typu MOSFET (z wbudowanymi diodami), jest to, że nawet w przypadku usterki systemu sterującego aktywnym prostowaniem, układ nadal pozostaje sprawny.

Bibliografia

- [1] Y. Wei, Q. Luo, H.A. Mantooth, LLC and CLLC Resonant Converters Based DC Transformers (DCXs): Characteristics, Issues, and Solutions. *Cpss Transactions On Power Electronics And Applications* **2021**, 6, s. 332–348.
- [2] Bo Yang, Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System. Rozprawa Doktorska, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Stany Zjednoczone Ameryki, 2003.
- [3] Cheng Chun-An, Chen Hung-Wen, Chang En-Chih, Yen Chun-Hsien, Lin Kun-Jheng, Efficiency study for a 150 W LLC resonant converter. Power Electronics and Drive Systems, Taipei, Taiwan, 2–5 listopada 2009, s. 1261–1265.
- [4] A. Zhaksylyk, Implementation of a Phase Shifted Full bridge DC-DC ZVS converter with peak current mode control, Praca Magisterska, Universidad de Oviedo, Oviedo, Hiszpania, 2019.
- [5] Adrien Prévost, Romain Delpoux, Vincent Léchappé, Kostas Latoufis, Xavier Brun, Experimental Comparison of Passive and Synchronous Rectification on a Locally Manufactured Small Wind Turbine. 6th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Zouk Mosbeh, France, 5–7 lipca 2023.
- [6] T. Hudson, Understanding LLC Operation (Part I): Power Switches and Resonant Tank. Monolithic Power Systems, 2024, Article A-0028, Rev. 1.0.
- [7] M. Ivankovic, J.M. Hancock, AN_201709_PL52_029 Part I: LLC calculator. Infineon, 2017.
- [8] Hangseok Choi, Application Note AN-4151, Half-Bridge LLC Resonant Converter Design Using FSFR-Series Fairchild Power Switch (FPS™). Fairchild, 2007.

- [9] Ma Jianguang; Wei Xueye; Hu Liang; JIA, Investigation on optimal parameter selection for LLC half-bridge resonant converter based on FHA. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2018, 26, s. 895–905.
- [10] B. Kanmani, Fourier Series: Square-wave. Dostępny online: https://bmsce.ac.in/Content/TE/Fourier_Series__Square-wave.pdf [dostęp: 10.03.2024].
- [11] S. De Simone, C. Adragna, C. Spini, G. Gattavari, Design-oriented steady-state analysis of LLC resonant converters based on FHA, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Taormina, Italy, 23–26 maja 2006.
- [12] F. Di Domenico, A. Steiner, AN_1801_PL52_1801_180456 Design of a 600 W half-bridge LLC converter using 600 V CoolMOS CFD7. Infineon, 2018.
- [13] Liu Jianwei, Li Dong, Application Note: Design Guide for LLC Converter with ICE2HS01G. Infineon Technologies Asia Pacific, 2011.
- [14] ROHM Semiconductor, Datasheet RCJ510N25 rev. B, 2016.
- [15] International IOR Rectifier, Datasheet IRFP4332PbF PD-97100B, 2009.

Technology for Human – Manipulator communication using gestures

mgr inż. Sebastian Koryl

Control Engineering and Robotics – Embedded Robotics

dr inż. Katarzyna Zadarnowska

Department of Cybernetics and Robotics

This thesis details the implementation and experimental verification of a gesture-based communication system designed to control a UR3 manipulator. The study explores various technologies crucial for developing this system, including Time of Flight cameras and advanced hand recognition algorithms. Utilizing the Intel RealSense D435 stereo camera and the MediaPipe framework, the study successfully integrates real-time hand tracking and gesture recognition technologies to interpret human gestures and convert them into actionable commands for a UR3 robotic arm. Built on the Robot Operating System (ROS), the system architecture provides communication between the gesture recognition software and the robotic manipulator. Through conducted tests, the system demonstrated its capability to interpret human gestures and translate them into precise manipulative actions. The results confirm the effectiveness of gesture-based interfaces in enhancing interaction between humans and robots.

10.1. Introduction

Advancements in human-computer interaction (HCI) technologies emphasize the need for more intuitive communication methods. As computers become more common in daily life, traditional devices like keyboards and mice may no longer be sufficient due to their limitations in speed and expressiveness. Hand gestures offer a natural and promising alternative, mirroring the non-verbal communication humans use daily.

Early approaches to gesture recognition involved mechanical devices like sensor-equipped gloves [1], but these were often restrictive. The shift to vision-based techniques, using cameras to capture gestures without physical contact, marked significant progress. These methods rely on computer vision to interpret hand movements, but accurately modeling these complex gestures remains challenging.

Researchers have explored various models and camera types, including depth-sensing and RGB cameras, to enhance gesture recognition [2]. While each approach has its pros

and cons, ongoing improvements in vision technology are making gesture-based HCI more feasible and engaging.

10.2. Objectives

The objective of this thesis is to analyse and review commercially available camera devices and selected hand gesture recognition methods. The focus is on identifying techniques suitable for manipulator motion planning and experimentally evaluating the selected methods.

The scope of this thesis includes specific tasks:

1. Analysis of commercially available sensor devices, along with their respective software interfaces.
2. Review of selected hand gesture recognition methods.
3. Implementation of a chosen gesture recognition method for manipulator control.

10.3. Camera devices and related software

Selecting the right camera for scene capture requires careful consideration of factors like depth, complexity, lighting, and environmental challenges. This chapter explores different camera technologies and their associated software.

10.3.1. Time-of-Flight cameras

Time-of-Flight (ToF) cameras measure the time light takes to travel to an object and back, calculating distances based on the speed of light [3].

There are two primary methods: direct time measurement and indirect calculation using amplitude-modulated continuous-wave (AMCW) or pulse-based systems. AMCW ToF systems, such as the Azure Kinect [4], are cost-effective but prone to errors like motion artifacts [5]. Pulse-based ToF cameras, using SPADs [6] for high-resolution depth imaging, are found in devices like the GSFL-16K Flash LIDAR [7].

10.3.2. RGB cameras

RGB cameras capture color images using a 3D array of red, green, and blue values. These sensors are widely available, ranging from low-cost web cameras to high-end devices [8]. However, they require external lighting for optimal performance, and their effectiveness decreases in low-light environments.

10.3.3. Stereo cameras

Stereo cameras use a technique called stereoscopy to estimate depth in captured images. They estimate depth using two aligned cameras with a known baseline. By calculating the disparity between images, the distance to an object can be measured [9]. The formula

for the distance calculation is presented in equation (10.1).

$$z = \frac{b \cdot f}{d}, \quad (10.1)$$

where:

z – the distance between the camera and the object,

b – the baseline,

f – the focal length of camera lenses,

d – the disparity.

The output of a stereo camera is typically a depth map, where each pixel has a value that represents the distance from the camera to the corresponding point in the scene.

Some models, like the Intel RealSense D435, incorporate infrared sensors for improved depth accuracy in various lighting conditions [10]. Others, such as the Zed 2i, include an IMU for motion tracking, enhancing applications in robotics and autonomous navigation [11].

10.3.4. Software environment

Vision system manufacturers provide Software Development Kits (SDKs) to unlock device potential. The Azure Kinect SDK [12] enables body tracking using machine learning, while the ZED SDK [13] supports large-scale 3D mapping for robots and drones. The Intel RealSense SDK [14] offers a versatile environment for programming languages like Python and C++, facilitating applications like facial recognition [15].

10.4. Hand gesture recognition technology

Gesture recognition has transformed human – computer interaction by enabling intuitive, contactless engagement with digital systems.

This chapter covers various gesture recognition methods, focusing on sensor-augmented and vision-based techniques for capturing complex hand movements, along with software solutions used to implement these technologies.

10.4.1. Sensor-augmented methods

Sensor-augmented methods use wearable devices, like sensor-equipped gloves [16], to track hand movements and finger flexions. Sensors like strain gauges and accelerometers provide data on hand orientation and motion, which is processed to reduce noise and extract features such as peak values and velocities. These features are then used by machine learning models to classify different gestures in real time [17].

10.4.2. Vision-based methods

Vision-based methods use cameras to capture hand gestures without physical contact. These methods rely on different hand models, illustrated in Figure 10.1, which offer various advantages depending on the gesture complexity and application.

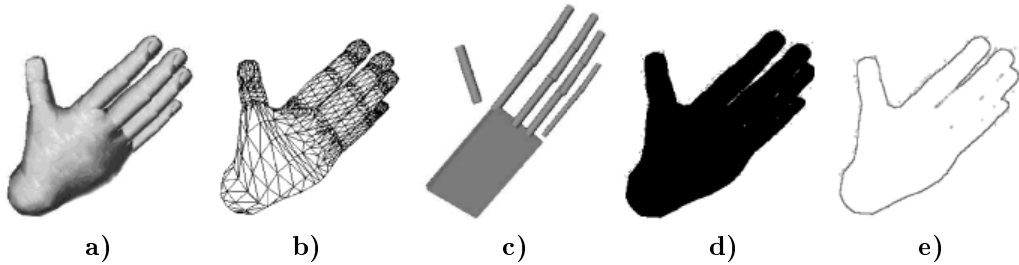


Figure 10.1. Hand models: a) 3D textured volumetric model, b) 3D wireframe volumetric model, c) 3D skeletal model, d) Binary silhouette, e) Contour [18]

Appearance-based models

These models focus on the hand's visual traits, treating it as a 2D object (Figure 10.1d and e). They are effective for simple, predefined gestures but struggle with dynamic movements due to their lack of depth information.

Volumetric models

3D volumetric models (Figure 10.1a and b) use depth data to capture detailed hand movements in three dimensions. While more accurate, they require significant computational power.

Skeletal models

Skeletal models (Figure 10.1c) abstract the hand into a joint and bone structure, ideal for tracking detailed finger movements and handling dynamic gestures. They are particularly useful for applications like sign language translation and virtual reality interactions.

10.4.3. Software environments

Several software solutions facilitate gesture recognition development. Ultraleap [19] offers hardware and SDKs for touchless interfaces, while ManoMotion [20] enables gesture tracking on mobile devices using 2D cameras. MediaPipe [21], developed by Google, provides a versatile machine learning framework for hand and gesture tracking across platforms.

10.5. Intel RealSense D435

The Intel RealSense D435 stereo camera was selected for capturing scenes due to its robust depth-sensing capabilities and the extensive software tools available for configuration and optimization.

This chapter explains the camera's sensor layout and describes what parameters of the device were configured to optimize performance in specific environmental conditions.

10.5.1. Sensors

The Intel RealSense D435 is equipped with multiple sensors that enable precise depth measurement and imaging. Figure 10.2 shows the arrangement of these sensors on the camera [22].

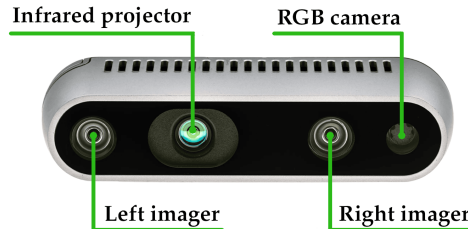


Figure 10.2. Sensors of Intel RealSense D435

- **Infrared Projector** – The infrared projector emits infrared patterns that are reflected back to the camera. The reflected patterns are used to measure depth through infrared imaging.
- **Left and Right Imagers** – These are stereo imagers that capture depth data. The data from these imagers are processed to create a depth map, detailing the distance of objects from the camera.
- **RGB camera** – The RGB camera captures high-resolution color images. It can work in conjunction with depth data to provide textured 3D visualizations.

10.5.2. Camera configuration

Properly configuring the camera's parameters is essential for optimizing data quality and ensuring reliable performance. The Depth Quality Tool [24], included in Intel RealSense SDK 2.0 [14], was used to view and calibrate depth images in real-time, making it easier to achieve precise tuning [23].

The main configuration parameters are as follows:

- **Exposure Time** – Controls the duration for which the camera sensor is exposed to light. A longer exposure time allows more light to reach the sensor, which is useful in low-light environments but may result in motion blur if objects move during the exposure period.
- **Laser Power** – Adjusts the intensity of the infrared light projected by the camera. Higher laser power improves depth perception in darker environments or at longer distances, but can cause reflections or saturation in brightly lit areas.
- **Depth Scale** – A conversion factor that translates the raw depth data captured by the camera into real-world units, typically meters. This ensures the depth measurements correspond accurately to the physical distances of objects from the camera.
- **Stream Resolution and Frame Rate** – Specifies the resolution of the image captured by the camera and the number of frames captured per second (frame rate).

Higher resolutions provide more detail, while higher frame rates allow smoother motion tracking, but both increase the computational load.

- **Data Formats** – Defines the structure of the image data. The 16-bit z16 format is used for depth images to store precise depth values, while the BGR 8-bit format is standard for color images, storing the intensity of blue, green, and red channels for each pixel.

10.6. MediaPipe

The chosen solution for implementing a hand detection algorithm in this project was the MediaPipe framework [21], selected for its comprehensive, ready-to-use solutions and its support for the Python programming language.

This chapter introduces the MediaPipe framework and details the configuration of its implementation, specifically focusing on its capabilities for hand landmark detection and gesture recognition.

10.6.1. Hand data processing

For human hand data extraction, MediaPipe offers two primary solutions: the hand landmark detection task [25] and the gesture recognition task [26].

The hand landmark detection task is powered by a machine learning model trained to identify and track 21 distinct hand landmarks in 3D space from single-frame images. This model processes video input frame-by-frame, detecting and predicting the positions of key hand joints in real-time. These landmarks cover crucial points along the fingers and palm, as illustrated in Figure 10.3.

The gesture recognition task builds on the data provided by the landmark detection model. By analyzing the spatial configurations of the identified landmarks, this task classifies various hand gestures into predefined categories. Machine learning techniques evaluate the relative positions and movements of the landmarks over time, enabling the system to recognize both static and dynamic gestures.

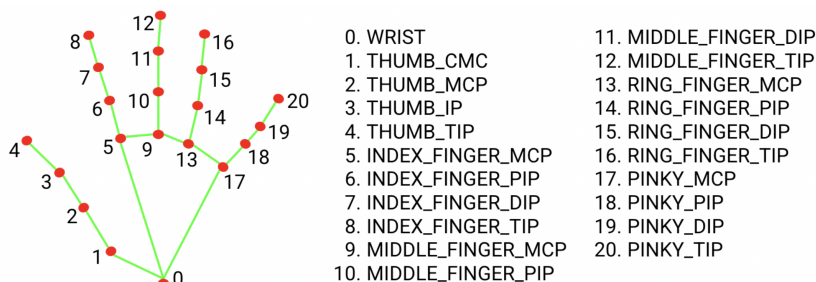


Figure 10.3. List of hand landmarks detected by the algorithm

10.6.2. Task configuration

The configuration of tasks within the MediaPipe framework is crucial for optimizing the performance of the hand landmark detection and gesture recognition models.

The main task configuration parameters are as follows:

- **Number of Hands** – This parameter specifies the maximum number of hands the model should detect and track simultaneously.
- **Model Path** – Specifies the location of the pre-trained machine learning model used for gesture recognition. The model used in this project [27] categorizes a set of basic static hand gestures.
- **Running Mode** – This parameter is set to `LIVE_STREAM`, configuring the model for real-time video stream processing.
- **Confidence Thresholds** – These thresholds control the model’s certainty in detecting and tracking hand landmarks.

10.7. Application of hand and gesture recognition for manipulator control

Experiments were conducted using a laboratory setup as shown in Figure 10.4.

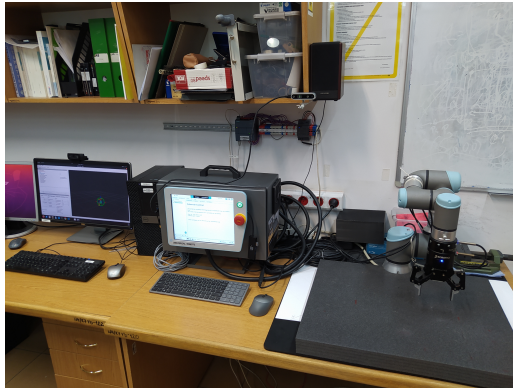


Figure 10.4. Setup in the laboratory

The goal of the manipulator is to pick up a small block and move it to a different location in its workspace, fully controlled by hand movements and gestures. This system enables real-time control where the manipulator mimics the user’s hand motion, and its gripper responds to static hand gestures. This chapter elaborates on the technical aspects of the implementation.

10.7.1. General Hardware Architecture

The laboratory setup consists of the following hardware components:

Intel RealSense D435 – A stereo camera used to capture the user’s hand. It transmits depth images to a PC via USB.

Personal Computer – A Linux Ubuntu 20.04 system responsible for processing the images, recognizing hand movements and gestures, and sending control commands to the manipulator.

UR3 Controlbox – The control center of the UR3 manipulator, responsible for executing commands, providing power, and ensuring safety.

UR3 Teach Pendant – A graphical interface connected to the controlbox for configuration and programming of the manipulator.

UR3 Manipulator – A robotic arm with 6 rotary joints and equipped with a Robotiq 2F-85 gripper.

10.7.2. Software Architecture

The software for this application is developed using the Robot Operating System (ROS) [28], a framework for robot application development that allows different processes (nodes) to communicate via topics. The system is structured into two main ROS nodes: the **Camera Image Processor** and the **Robot Controller**. Their activity flow is illustrated in the UML diagram in Figure 10.5.

10.7.3. Camera Image Processor Node

This node is responsible for acquiring and processing camera images. Its main tasks are:

- Capture and preprocess images from the camera.
- Extract hand coordinates and gestures from the processed images.
- Publish the processed data on ROS topics for other nodes to access.

Image Acquisition and Preprocessing

When the node starts, the Intel RealSense SDK is used to configure and initiate the camera for image capture. The camera settings, described in subsection 10.5.2. such as depth and RGB image parameters, are tuned. The program enters a loop, continuously capturing aligned BGR and depth images, which are horizontally flipped to mirror the user's movements. The BGR images are converted to RGB format for gesture recognition.

Hand Landmarks and Gesture Recognition

The captured images are processed to detect hand gestures and landmarks. The wrist coordinates are extracted from the image and scaled according to the camera's resolution. A further transformation adjusts these coordinates to fit within the predefined workspace boundaries, ensuring the coordinates are mapped correctly for manipulator control.

The camera workspace coordinates are then scaled to the manipulator workspace, ensuring the manipulator only operates within a safe area, and preventing movements beyond these limits. The final coordinates are published on the `/coordinates` topic.

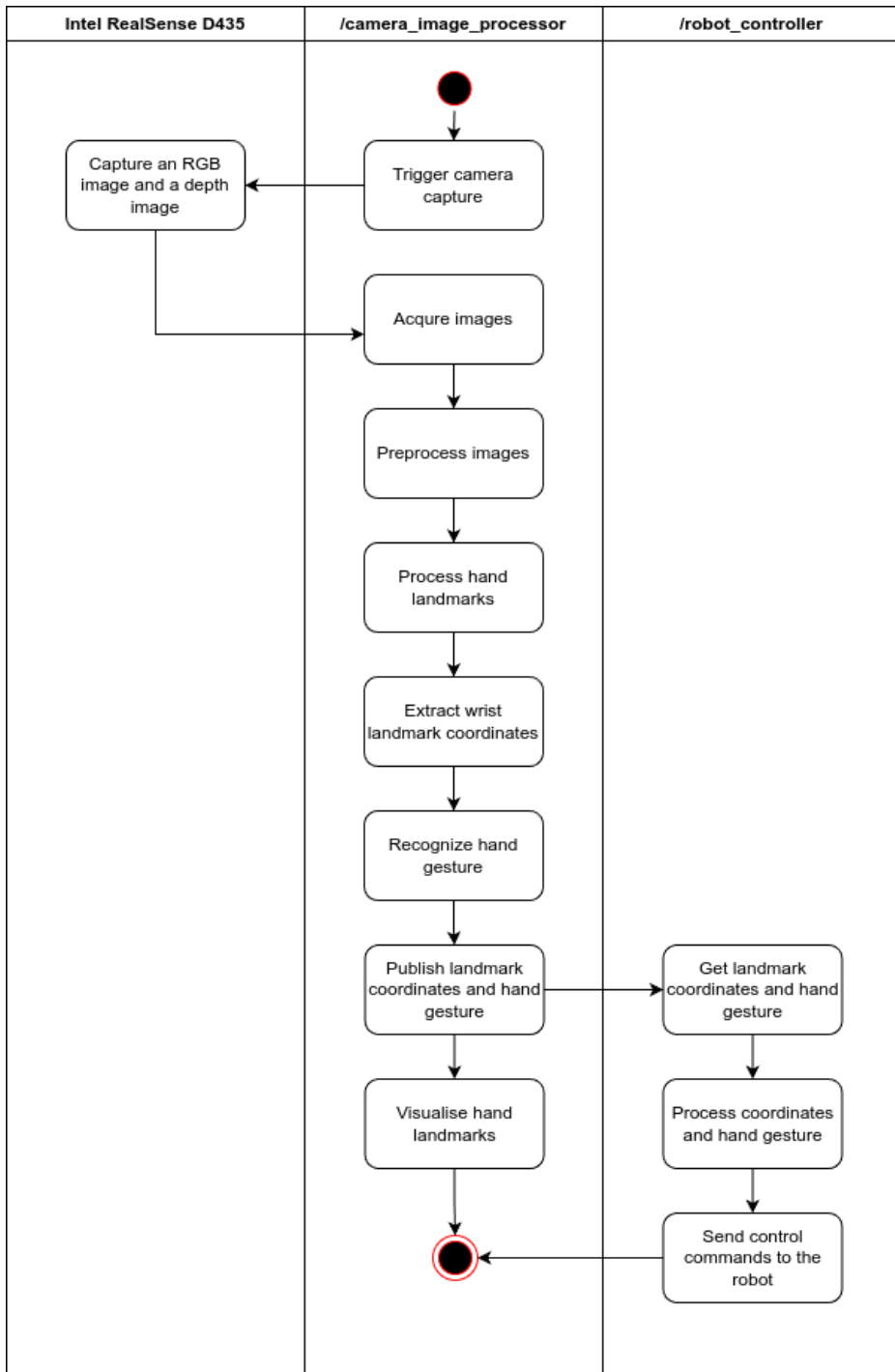


Figure 10.5. UML activity diagram

10.7.4. Robot Controller Node

This node handles the control of the UR3 manipulator. It subscribes to the topics for hand coordinates and gestures, processes the data, and sends commands to the manipulator to perform the required movements and gripper actions. Its main functions are:

- Retrieve the hand coordinates and gesture data.
- Control the movement of the manipulator's effector based on the hand coordinates.
- Control the gripper based on the detected hand gestures.

Node initialization

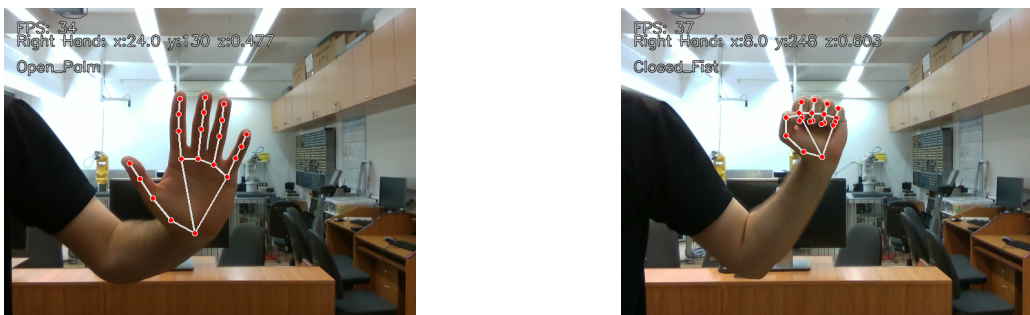
Using the MoveIt library [29], the node initializes its connection to the UR3 manipulator. It subscribes to the `/coordinates` and `/gestures` topics to receive updated hand data and prepares for publishing gripper control commands.

Coordinate data processing

The node processes the hand coordinates to calculate a target position for the manipulator's effector. The transformation rotates the received coordinates so the workspace is positioned correctly relative to the manipulator. The manipulator then moves towards the target pose if the distance is within an acceptable range. This prevents small, unnecessary movements and ensures smooth transitions between poses.

Gesture data processing

The node interprets the hand gestures to control the gripper's actions. Based on the gesture, such as an open palm to open the gripper or a closed fist to close it, the appropriate command is published for execution. Figure 10.6 illustrates the two gestures used for gripper control.



(a)

(b)

Figure 10.6. Gestures actuating the gripper: (a) an open palm, (b) a closed fist

10.7.5. ROS node communication

The communication flow between the nodes is illustrated in Figure 10.7. The Camera Image Processor node acts as the data source, while the Robot Controller node acts as the command executor.

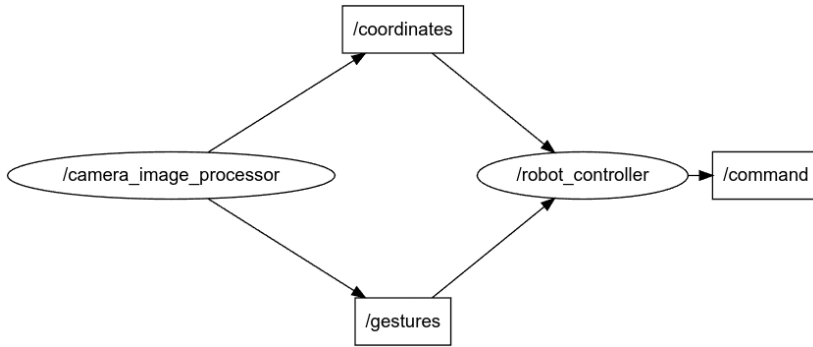


Figure 10.7. Graph of implemented ROS nodes and topics

Two publisher threads are responsible for broadcasting hand coordinates and gesture data to respective topics, ensuring the `Robot Controller` node receives updated data.

10.8. System validation and test results

Figure 10.8 shows the testing setup. A green block was placed in the manipulator workspace, and the camera was positioned to capture hand movements.

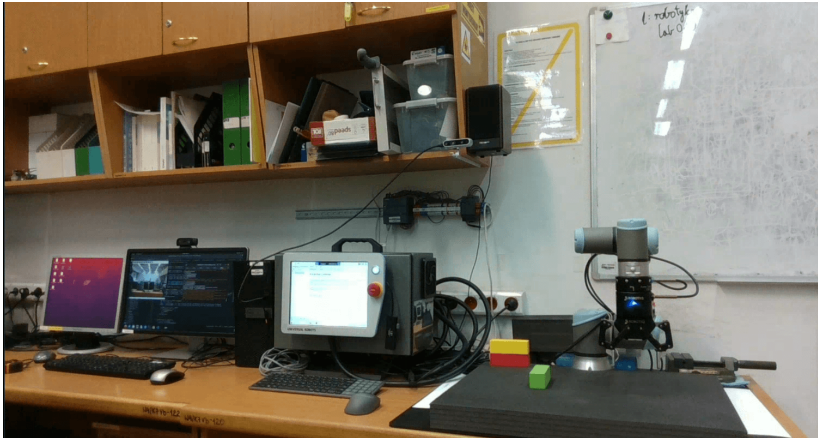


Figure 10.8. Laboratory testing setup

The system successfully tracked hand movements, converted camera coordinates to manipulator workspace coordinates, and actuated the gripper based on gestures. The effector's trajectory and position error are depicted in Figure 10.9, demonstrating the accuracy and responsiveness of the system.

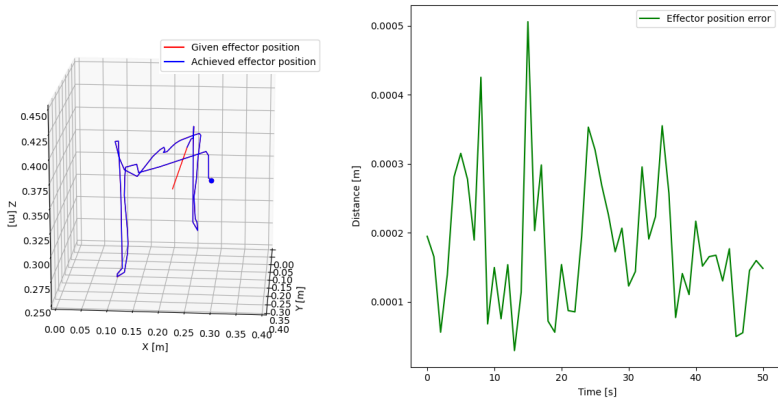


Figure 10.9. Effector trajectory (left) and effector position error in time (right)

Figure 10.10 presents images from a recorded test, illustrating the manipulator following hand movements and reacting to gestures in real-time.

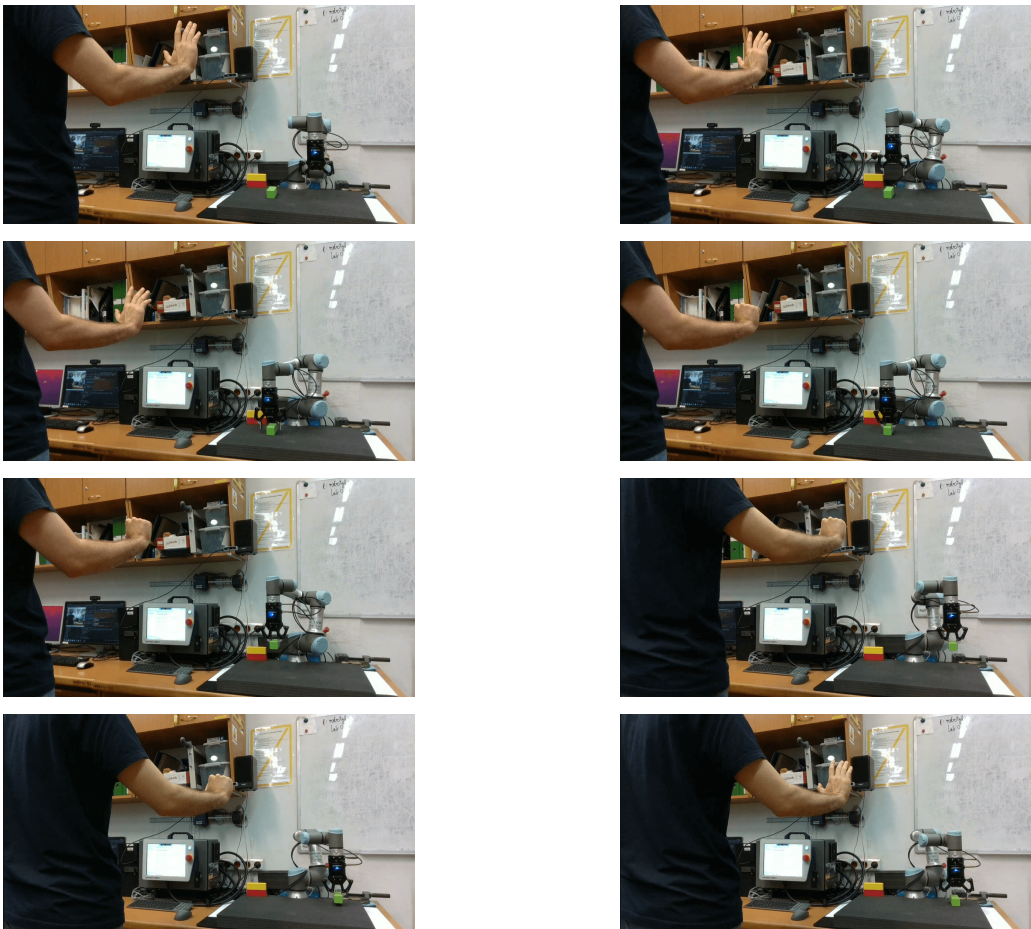


Figure 10.10. A set of frames of a recorded experiment

10.9. Summary

The introduced goals were fulfilled successfully. An analysis of scene capturing devices and gesture recognition technologies was addressed. Extensive experimentation using the Intel RealSense D435 camera and MediaPipe framework were conducted, culminating in a viable method for manipulator control via gesture recognition, which was detailed and tested.

Throughout the thesis, the Intel RealSense D435 was evaluated and deemed highly effective for indoor use, although it encountered performance issues under intense lighting. The software development kit associated with the camera proved invaluable, despite some documentation gaps that necessitated a deeper examination of the source code.

The MediaPipe framework has proven to be adequate for hand detection and gesture recognition tasks. Its ability to process real-time video streams with high accuracy and minimal latency ensured that hand gestures were captured and interpreted accurately, enabling dynamic and responsive interactions with the manipulator.

10.10. Future work

The developed system is set to be presented on a conference as an example of an interface that facilitates interaction between humans and robots. The system will be further developed, in order to make the system more controllable and more intuitive to a newly introduced user. The scope of the future developmental work includes:

- Expanding the system to facilitate manipulator control using two hands simultaneously,
- Implementing instructions to handle the orientation of the effector,
- A visual feedback on workspace boundaries.

Bibliography

- [1] Laura Dipietro, Angelo M. Sabatini, and Paolo Dario, “A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* **38.4** (2008), pp. 461–482.
- [2] Munir Oudah, Ali Al-Naji, and Javaan Chahl, “Hand Gesture Recognition Based on Computer Vision: A Review of Techniques”. *Journal of Imaging* **6.8** (2020). Available online: <https://www.mdpi.com/2313-433X/6/8/73>.
- [3] Alvaro Lopez Paredes, Qiang Song, and Miguel Heredia Conde, “Performance Evaluation of State-of-the-Art High-Resolution Time-of-Flight Cameras”. *IEEE Sensors Journal* **23.12** (2023), pp. 13711–13727.
- [4] Microsoft, Azure Kinect DK. Available online: <https://www.microsoft.com/en-us/d/azure-kinect-dk/8pp5vxdm9nhq?activetab=pivot:overviewtab>.
- [5] Micha Feigin et al., “Modeling “wiggling” as a multi-path interference problem in AMCW ToF imaging”. *Optics Express* **23** (July 2015), pp. 19213–19225.
- [6] S. Bellisai et al., “Indirect time-of-flight 3D ranging based on SPADs”. In: *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX*. Ed. by Manijeh Razeghi, Eric Tournie, and Gail J. Brown. Vol. 8268. International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2012, p. 82681C. Available online: <https://doi.org/10.1117/12.908222>.
- [7] Advanced Scientific Concepts, GSFL-16K 3D Flash LIDAR camera. Available online: https://asc3d.com/gsfl_16k/.

-
- [8] Junwoo Lee and Bummo Ahn, “Real-Time Human Action Recognition with a Low-Cost RGB Camera and Mobile Robot Platform”. *Sensors* **20.10** (2020). Available online: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2886>.
- [9] Remo Sala, Silvio Giancola, and Matteo Valenti, *A Survey on 3D Cameras: Metrological Comparison of Time-of-Flight, Structured-Light and Active Stereoscopy Technologies*. Springer, Cham, 2018.
- [10] Dina Satybaldina, Gulziya Kalymova, and Natalya Glazyrina, “Application Development for Hand Gestures Recognition with Using a Depth Camera”. In: *Databases and Information Systems*. Ed. by Tarmo Robal et al. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 55–67.
- [11] Vladimir Tadic, “Study on Automatic Electric Vehicle Charging Socket Detection Using ZED 2i Depth Sensor”. *Electronics* **12.4** (2023). Available online: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/4/912>.
- [12] Microsoft, Azure Kinect DK Documentation. Available online: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/kinect-dk/?source=recommendations>.
- [13] Stereolabs, ZED SDK 4.1. Available online: <https://github.com/stereolabs/zed-sdk>.
- [14] Intel, Intel RealSense SDK 2.0. Available online: <https://github.com/IntelRealSense/librealsense>.
- [15] James Purnama et al., “The Intel Realsense Depth-Camera Performance for Real-Time Customer Satisfaction Analysis using Facial Expression Detection”. *Journal of Physics: Conference Series* **1175.1** (Mar. 2019), p. 012076. Available online: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1175/1/012076>.
- [16] Joseph DelPreto et al., “A Wearable Smart Glove and Its Application of Pose and Gesture Detection to Sign Language Classification”. *IEEE Robotics and Automation Letters* **7.4** (2022), pp. 10589–10596.
- [17] Yongfeng Dong, Jielong Liu, and Wenjie Yan, “Dynamic Hand Gesture Recognition Based on Signals From Specialized Data Glove and Deep Learning Algorithms”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **70** (2021), pp. 1–14.
- [18] V.I. Pavlovic, R. Sharma, and T.S. Huang, “Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: a review”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **19.7** (1997), pp. 677–695.
- [19] UltraLeap. Available online: <https://www.ultraleap.com/>.
- [20] ManoMotion, Mobile AR. Available online: <https://www.manomotion.com/mobile-ar/>.
- [21] Google, MediaPipe Framework. Available online: <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/framework>.
- [22] Intel, Intel RealSense D400 Series Product Family Datasheet. Revision 018, March 2024. Available online: <https://dev.intelrealsense.com/docs/intel-realsense-d400-series-product-family-datasheet>.
- [23] Intel, Depth Quality Tool. Available online: <https://github.com/IntelRealSense/librealsense/tree/master/tools/depth-quality>.
- [24] Anders Grunnet-Jepsen, John N. Sweetser, and John Woodfill, “Tuning depth cameras for best performance”. Available online: <https://dev.intelrealsense.com/docs/tuning-depth-cameras-for-best-performance>.
- [25] Google, MediaPipe Hand Landmarks Detection. Available online: https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker.
- [26] Google, MediaPipe Gesture Recognition. Available online: https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/gesture_recognizer.
- [27] Google, MediaPipe Hand Gesture Classification model card. Available online: https://storage.googleapis.com/mediapipe-assets/gesture_recognizer/model_card_hand_gesture_classification_wlth_fairenness_2022.pdf.
- [28] ROS, Robot Operating System. Available online: <https://ros.org/>.
- [29] MoveIt, Motion Planning Framework. Available online: <https://moveit.ros.org/>.

Wydział Elektryczny

System do wspomagania centrowania kominów termicznych podczas lotów szybowcowych

inż. Dominik Ciechomski

Elektromechanika

dr inż. Krystian Krawczyk

Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

System do wspomagania centrowania kominów termicznych ma ułatwić pilotowi wykorzystanie własności powietrza podczas lotów szybowcowych. Komin termiczny cechuje się dużą różnorodnością i ciężko jest od razu zrozumieć, jaki on mógłby mieć kształt. Badając rozkład temperatur na skrzydłach, można określić, czy szybowiec znajduje się w centrum komina. Jeżeli różnica dąży do zera, oznacza to, że płatek znajduje się w środku ciepłej masy powietrza i wraz z tym w pełni korzysta z panujących warunków. Do badania wykorzystano 3 pary czujników temperatury w celu zapewnienia ciągłości pomiaru. Rejestrowano również pozycje za pomocą modułu GPS oraz micro SD w celu zapisu. Pozwalało to odtworzyć trasę i porównać z aplikacją mobilną LK8000, która również rejestrowała lot. Badanie wykazało, że podczas wchodzenia w komin termiczny różnica temperatur rośnie, co wskazuje, że na długości skrzydeł, wynoszącej w tym przypadku 15 m, możliwe jest wykrycie dwóch różnych mas powietrza.

11.1. Cel i założenia

Celem pracy jest opracowanie i uruchomienie systemu do wspomagania centrowania kominów termicznych podczas lotów szybowcowych na bazie czujników temperatury. Zakres pracy obejmuje zapoznanie z problematyką lotów szybowcowych, m.in.:

- poznanie zależności rozkładu temperatur we wznoszącej się masie ciepłego powietrza
- upracowanie systemu pomiaru temperatury na płatowcu,
- zaprojektowanie układu do analizy danych,
- praktyczna realizacja systemu oraz wykonanie pomiarów testowych,
- dyskusja uzyskanych wyników.

11.2. Wstęp teoretyczny

Szybowiec to statek powietrzny, który nie posiada żadnej jednostki napędowej. Cechuje go lekka konstrukcja, najczęściej wykonany jest z laminatu, a niegdyś z drewna. Wykorzystując odpowiednie warunki pogodowe, pozwala na utrzymanie się w powietrzu przez wiele godzin i przelecenie kilkuset kilometrów. Stąd też bardzo ważna jest umiejętność pilota czytania, jakie aktualnie panują warunki w powietrzu i do czego mogą prowadzić. Stała obserwacja pozwala na wybór odpowiedniej trasy, gdzie nagrzane powietrze będzie się rozpręczać i tworzyć kominy termiczne. Do określenia potencjalnych noszeń w przypadku pogody bezchmurnej można się posłużyć tak zwanym albedo, czyli opisem procentowej lub skalowanej od 0 do 10 zdolności odbijania światła przez daną powierzchnię. Wraz z większym odbijaniem promieni słonecznych mniejsza jest temperatura podłoża, a co za tym idzie – słabsze są prądy wznoszące. Jeśli na niebie są chmury cumulus, czyli wynik końcowy komina termicznego, to można po przez obserwacje stwierdzić, gdzie mniej więcej może występować noszenie. Do pomocy w poszukiwaniu noszeń służy urządzenie zwane wariometrem, które, badając ciśnienie statyczne i całkowite, informuje użytkownika o aktualnym wznoszeniu czy też opadaniu szybowca [1].

11.3. Projekt i wykonanie

Urządzenie powinno cechować się szybkim czasem reakcji, czułymi czujnikami temperatury, modułem GPS do badania aktualnej pozycji oraz modułem do zapisu danych dla dalszej analizy.

Ponieważ zmiany w powietrzu mogą zachodzić szybko, to ważna jest ciągłość pomiarów. Dlatego użyto 3 par czujników (MCP9808, HTU21d, DS18B20), które niezależnie badały temperaturę podczas lotu. Dokładność czujników wahała się między $0,25^{\circ}\text{C}$ a $0,5^{\circ}\text{C}$. Ponieważ dwie pary czujników komunikowały się za pomocą magistrali I²C, należało użyć dodatkowo multiplexera TCA9548A, który pozwalał nadać czujnikom różny adres. Użyty moduł GPS to NEO-6M. [1–3]

Gotowy układ został zamontowany w kokpicie za siedzeniem pilota. Przewody przelozono przez otwory techniczne, które znajdują się pod siedzeniem. Po wyprowadzeniu przewodów na zewnątrz zostały przeciągnięte wzdłuż krawędzi spływu do końcówek skrzydeł. Zdjęcia fizycznej realizacji przedstawiono na rysunkach 11.1 i 11.2.

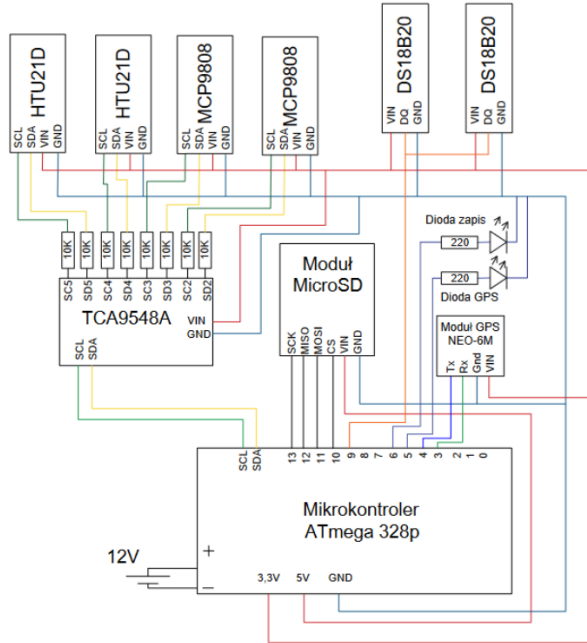


Rysunek 11.1. Przeprowadzone przewody pod skrzydłem



Rysunek 11.2. Podczepiony czujnik temperatury

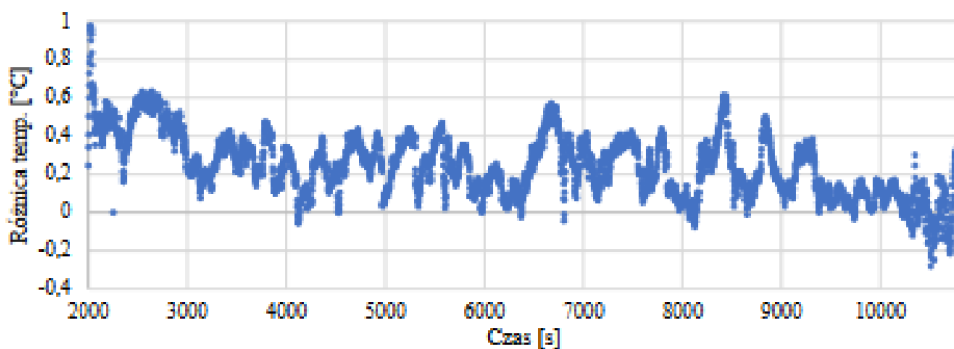
Schemat połączeń modułu pomiarowego przedstawiono na rysunku 11.3.



Rysunek 11.3. Schemat połączeń modułu pomiarowego

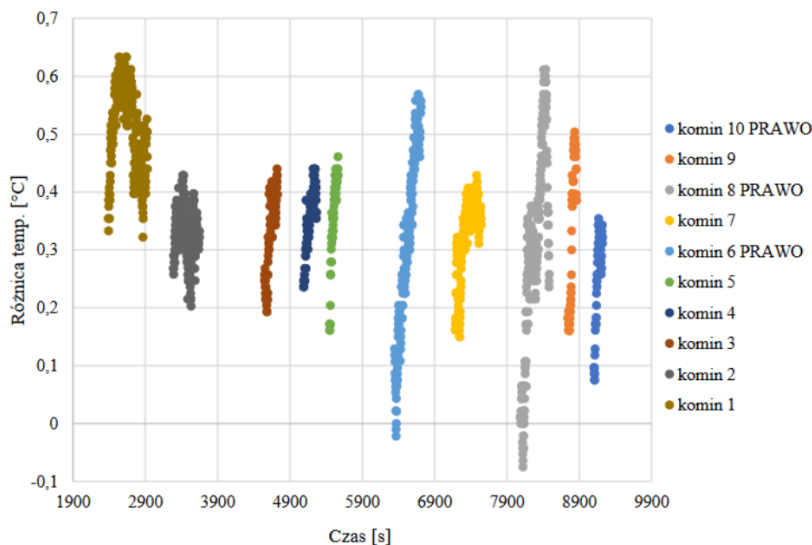
11.4. Uzyskane wyniki

Po zamontowaniu modułu i gotowości do startu, aparatura wzniosła się w powietrze i badała temperaturę przez 2,5 h. Po wylądowaniu wyniki zostały eksportowane do programu Excel w celu analizy. Na początku należało sprawdzić, czy zgadzają się pomiary wysokości. Dokonano tego, porównując uzyskane wyniki z aplikacją mobilną LK8000. Po uzyskaniu zgodnych wartości następnym krokiem było sprawdzenie różnic temperatur między skrzydłami (rysunek 11.4).

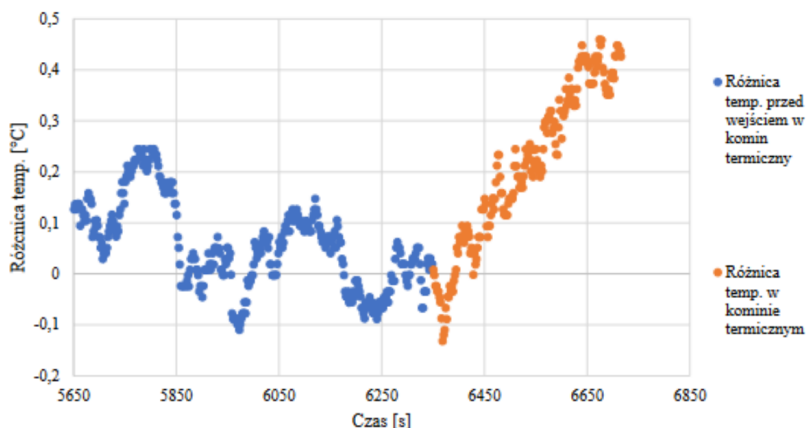


Rysunek 11.4. Wykres różnicy temperatur dla czujnika HTU21d

Ponieważ powietrze podczas lotu jest niestabilne, to występują różne podmuchy przez cały czas i wynikiem tego są stałe odchyłki temperatury między czujnikami. W celu sprawdzenia tezy, czy istnieje większa różnica podczas wejścia w komin termiczny, dokonano podziału charakterystyki na momenty wejścia w komin i przybliżono jeden z nich (rysunki 11.5 oraz 11.6).



Rysunek 11.5. Podział charakterystyki na momenty kiedy szybowiec znajdował się w kominie termicznym



Rysunek 11.6. Charakterystyka momentu przed i po wejściu w komin termiczny

Jak można zauważyć, temperatura po wejściu w komin zaczyna stale wzrastać, co potwierdza tezę, że możliwe jest wykrycie komina termicznego przez czujniki temperatury na skrzydłach.

11.5. Podsumowanie

Loty szybowcowe cechują się dobrym wykorzystaniem panujących obecnie warunków. Bardzo ważne jest, by stale analizować zmieniającą się pogodę i przewidywać możliwy rozwój sytuacji. Wykorzystane do badania czujniki wykazały, że możliwe jest zaobserwowanie przechodzenia z jednej masy ciepłego powietrza w drugą. Z powodu ciągłych prądów opadających i noszących część otrzymanych wyników może być w postaci szumu (rysunek 11.4). W celu potwierdzenia, że przy wejściu w komin jest większa zmiana temperatur, należało podzielić zapis całego lotu na momenty, kiedy pojawiały się noszenia (rysunek 11.5). W ten sposób można określić, że temperatura, dla której występowało noszenie mieściła się w zakresie od $0,25^{\circ}\text{C}$ do $0,45^{\circ}\text{C}$. Projekt został wykonany dla szybowca o rozpiętości 15 m. Z powodów bezpieczeństwa dystans między czujnikami wyniósł 11 m. Można domniemać, że w przypadku szybowców z większą rozpiętością różnice między skrzydłami będą wpływały na wzrost różnicy temperatur i pilot będzie mógł dokonywać poprawek, które usprawnią wykorzystywanie kominów termicznych.

Bibliografia

- [1] Szybowiec. Dostępny online: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Szybowiec> [dostęp: 13-10-2024].
- [2] Microchip MCP9808 Datasheet. Dostępny online: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/470721/MICR-CHIP/MCP9808/486/1/MCP9808.html> [dostęp: 13-10-2024].
- [3] TEC HTU21D Datasheet. Dostępny online: <https://html.alldatasheet.com/html-%20pdf/880699/TEC/HTU21D/53/1/HTU21D.html> [dostęp: 13-10-2024].
- [4] Dallas DS18B20 Datasheet. Dostępny online: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/58557/DALLAS/DS18B20/181/1/DS18B20.html> [dostęp: 13-10-2024].

Dydaktyczny model robota typu SCARA

inż. Bartosz Piotr Habas
Automatyka Przemysłowa

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

Celem pracy było zaprojektowanie i zbudowanie edukacyjnego robota SCARA, który potrafi precyzyjnie wykonywać zaprogramowane ruchy. Robot został stworzony przy użyciu technologii druku 3D, a do napędu zastosowano silniki krokowe, co zapewnia dokładną kontrolę nad ruchami. Główne sterowanie odbywa się za pomocą sterownika NX1P2-1140DT1, a obsługa robota jest wspierana przez oprogramowanie w środowisku Sysmac Studio z wizualizacją na panelu HMI. Testy laboratoryjne potwierdziły, że robot działa zgodnie z założeniami, zapewniając precyzyjność ruchów i stabilność chwytaka. Zbudowany robot ma przede wszystkim służyć jako dydaktyczny model dla studentów Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej.

12.1. Cel i założenia

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie dydaktycznego modelu robota typu SCARA, pracującego z wybranym sterownikiem PLC. Układ sterujący robota powinien umożliwić wykonywanie powtarzalnych sekwencji ruchów, uprzednio zaprogramowanych przez operatora. Zakres pracy obejmował:

- przegląd istniejących rozwiązań technicznych w zakresie budowy i sterowania robotów,
- zaprojektowanie i wykonanie konstrukcji mechanicznej robota,
- dobór podzespołów i wykonanie konstrukcji mechanicznej robota,
- zaprojektowanie i zbudowanie elektronicznego sterownika robota,
- opracowanie programu dla mikrokontrolera sterującego pracą robota,
- wykonanie testów działania robota na stanowisku laboratoryjnym.

12.2. Wstęp teoretyczny

Roboty są urządzeniami technicznymi zaprojektowanymi do wykonywania manipulacyjnych zadań, które naśladują działania człowieka. Robot przemysłowy to wielofunkcyjny

manipulator, który za pomocą zaprogramowanych ruchów przenosi materiały, części lub narzędzia, realizując różnorodne zadania w procesach produkcyjnych. Roboty przemysłowe dzielą się na stacjonarne, które pracują w jednym, stałym miejscu, oraz mobilne, które mogą przemieszczać się w obrębie swojego środowiska.

Roboty stacjonarne można podzielić na konstrukcje szeregowe i równoległe. Roboty o strukturze szeregowej składają się z ciągłego łańcucha segmentów połączonych ze sobą sekwencyjnie. Każdy segment odpowiada za określony ruch, a całość manipulatora działa w sposób podobny do ludzkich kończyn, co sprawia, że są idealne do zadań takich jak montaż czy spawanie. Z kolei roboty o strukturze równoległej posiadają kilka niezależnie sterowanych ramion, co pozwala im na jednoczesne wykonywanie różnych, precyzyjnych ruchów.

Do rodziny robotów stacjonarnych zalicza się roboty SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Jest to jeden z najczęściej wykorzystywanych typów robotów przemysłowych. Ich konstrukcja jest prostsza niż w przypadku robotów przegubowych, co znacząco ułatwia proces programowania. SCARA posiada dwa napędy obrotowe, które odpowiadają za ruchy w poziomie, oraz jeden napęd liniowy, który umożliwia ruch w pionie. Ich przestrzeń robocza ma kształt walca z wydrążonym środkiem, co pozwala na szybkie i precyzyjne wykonywanie zadań w ograniczonym obszarze. Dzięki tej strukturze roboty SCARA są wyjątkowo efektywne w zadaniach takich jak montaż, pakowanie, sortowanie czy precyzyjne dozowanie materiałów [4]. Roboty SCARA łączą w sobie szybkość i precyzję, co czyni je idealnym wyborem w branżach wymagających dużej powtarzalności działań. Popularność tego typu robotów rośnie z uwagi na ich prostą konstrukcję, łatwość w programowaniu oraz wszechstronność zastosowań w przemyśle produkcyjnym [1].

W przypadku robota SCARA jak i pozostałych robotów kluczowym elementem jest napęd, który jest odpowiedzialny za ich mobilność, precyzję i efektywność. Każdy napęd składa się z kilku komponentów:

- zasilacza dostarczającego energię do silnika,
- łańcucha kinematycznego przekształcającego i przekazującego ruch przez przekładnię, paski i łożyska,
- układu sterowania kontrolującego parametry ruchu,
- silnika, przekształcającego energię elektryczną w mechaniczną.

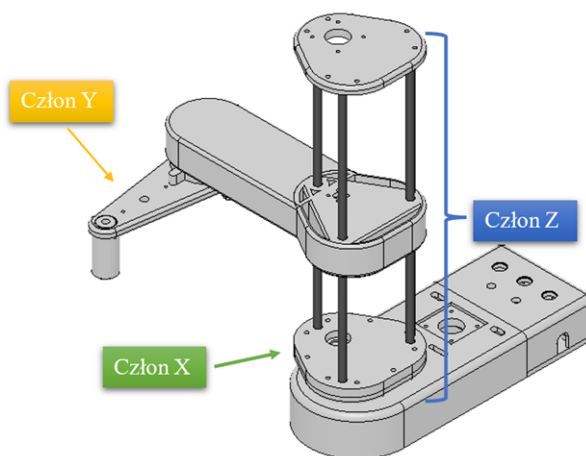
Cały układ napędowy ma za zadanie uruchomienie i podtrzymanie ruchu, zapewnienie odpowiednich parametrów kinematycznych i dokładności, niezbędnej do precyzyjnego pozycjonowania ramion robota. Istotnym elementem jest wspomniany układ sterowania, czyli sterowniki PLC odpowiadające właśnie za automatyzację procesów przemysłowych [3]. Dzięki mikroprocesorowym jednostkom, sterowniki te umożliwiają kontrolę maszyn i urządzeń, przetwarzając instrukcje programu w czasie rzeczywistym. PLC, działając w cyklu skanowania, odczytują dane z czujników, przetwarzają je i sterują wyjściami, co pozwala na precyzyjne zarządzanie ruchami napędów. Sterowniki PLC mogą być rozszerzane o dodatkowe moduły, takie jak moduły kontroli ruchów, które pośredniczą między sterownikiem a napędami. Umożliwia to przekazywanie sygnałów sterujących do silników, co jest niezbędne w złożonych operacjach przemysłowych, takich jak precyzyjne pozycjonowanie elementów ruchomych. Dzięki temu PLC skutecznie zarządza ruchami układów napędowych, realizując złożone zadania w sposób efektywny i niezawodny [3].

12.3. Projekt i wykonanie

Projekt dydaktycznego robota typu SCARA został podzielony na część projektową, produkcyjną oraz programistyczną. Do projektowania części użyto oprogramowania Fusion360, które umożliwiło tworzenie rysunków technicznych i modelowanie 3D. Części robota wydrukowano za pomocą drukarki Elegoo Neptune 3 PRO z użyciem biodegradowalnego materiału PLA, charakteryzującego się dobrymi właściwościami mechanicznymi. Oprogramowanie robota stworzono w aplikacji Sysmac Studio firmy OMRON, co pozwoliło na kompleksową kontrolę nad działaniem urządzenia.

12.3.1. Konstrukcja mechaniczna

Proces tworzenia części robota SCARA składał się z trzech głównych etapów: tworzenia szkiców 2D, modelowania obiektów w 3D oraz produkcji części za pomocą druku 3D. Na etapie szkicu określano liczbę i wymiary elementów, uwzględniając miejsca na śruby, łożyska i silniki. Dla poszczególnych elementów należało wziąć pod uwagę zwiększenie ich obwodów o 0,1–0,4 mm w celu bezproblemowego dopasowania do obiektów łączonych. W modelowaniu 3D zadbano o bezpieczeństwo, eliminując ostre krawędzie. Proces druku 3D, będący końcowym etapem tworzenia części robota SCARA, wymagał starannego doboru parametrów, które bezpośrednio wpływały na jakość i wytrzymałość finalnych elementów. Każda część, w zależności od złożoności, wymagała starannych i przetestowanych ustawień druku, takich jak prędkość, wysokość warstw czy wypełnienie. Złożone detale wymagały większej precyzji, co często wydłużało czas produkcji. Najdłuższy czas druku jednej części wyniósł 16 godzin i 47 minut. Ze względu na przestrzeń poruszania się robota, konstrukcja została podzielona na człon X, Y oraz Z jak przedstawiono na rysunku 12.1.

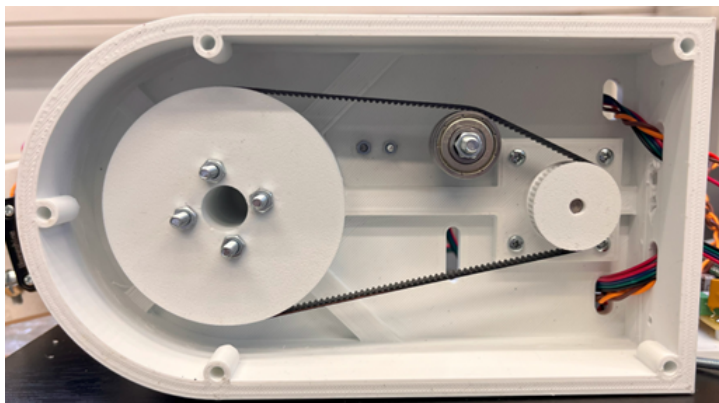


Rysunek 12.1. Widok w przestrzeni trójwymiarowej robota dydaktycznego typu SCARA

12.3.2. Układ napędowy robota

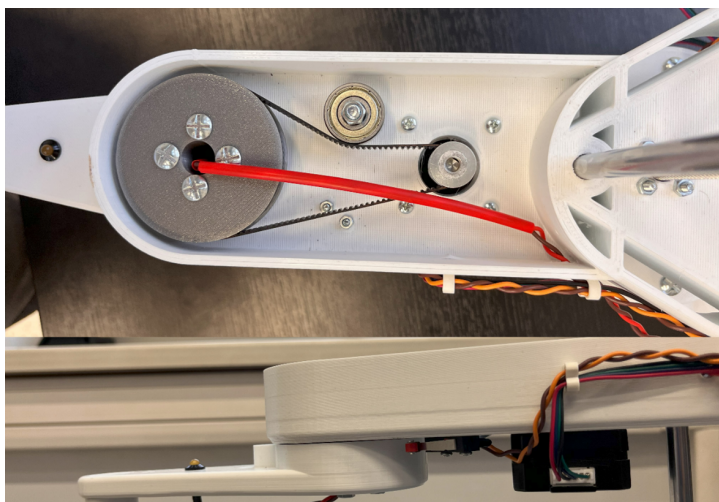
W modelu robota typu SCARA znajdują się trzy układy napędowe dla ruchów w osiach X, Y i Z. Każdy napęd zasilany jest napięciem +24 V i sterowany przez sterowniki krokowe

A4988. Układ napędowy osi X (rysunek 12.2) znajduje się w bazie robota i składa się z silnika krokowego NEMA17, zębatki napędu 45T GT2, paska zębatego GT2 (400 mm), koła pasowego 120T GT2 oraz tulejki naciągającej. Przekładnia ma stosunek 1:2,6 i jest bezpośrednio powiązana z podstawą osi Z .



Rysunek 12.2. Układ napędowy członu X

Układ napędowy osi Y (rysunek 12.3) zawiera silnik krokowy NEMA17, zębatkę napędu 20T GT2, pasek GT2 (300 mm), koło pasowe 92T GT2 oraz tulejkę naciągającą. Przekładnia ma stosunek 1:4,6 i odpowiada za ruch końcowego ramienia robota.



Rysunek 12.3. Układ napędowy członu Y

Układ napędowy osi Z (rysunek 12.4) składa się z silnika krokowego NEMA17, sprzęgła 5 mm/8 mm, śruby trapezowej TR8x8 (280 mm), nakrętki kasującej luz oraz pokrywki członu Z , które umożliwiają precyzyjne sterowanie ruchem osi Z .



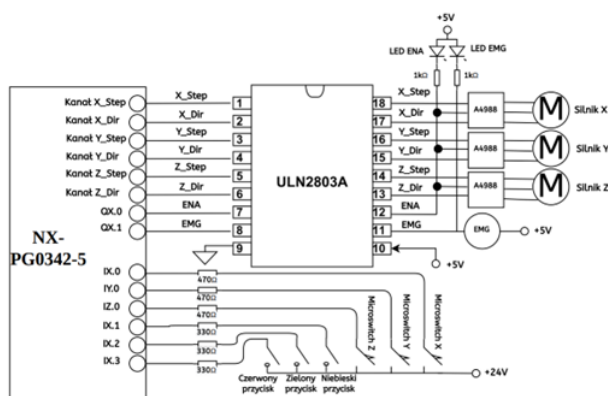
Rysunek 12.4. Układ napędowy członu Z

12.3.3. Sterownik elektryczny robota

Do sterowania robotem SCARA wybrano sterownik PLC firmy OMRON, znanej z zaawansowanych rozwiązań spełniających wymogi Przemysłu 4.0. Głównym sterownikiem systemu jest model NX1P2-1140DT1, który umożliwia synchronizowane sterowanie urządzeniami i obsługę sygnałów wchodzących oraz wychodzących w jednym zintegrowanym środowisku programistycznym. Sterownik ten jest kompaktowy i łatwy do rozbudowy o dodatkowe moduły. W układzie sterowania robotem dodano moduł NX-PG0342-5, który pełni funkcję pośrednika między sterownikiem a silnikami krokowymi. Moduł pozycjonujący odbiera i przetwarza sygnały sterujące, które decydują o ruchu silników krokowych w zakresie kierunku, szybkości i precyzji obrotu. W sterowaniu wykorzystano trzy silniki krokowe NEMA17 – dwa modele MINEBEA-17PM-K940 do członów X i Z oraz model 17HS4023 do członu Y.

Sygnały sterujące dla silników krokowych przekazywane są z modułu pozycjonującego NX-PG0342-5 do sterowników A4988 za pośrednictwem układu ULN2803 (rysunek 12.5). Sterowniki A4988 pozwalają na prace w różnych trybach mikrokroków, co zwiększa precyzję i płynność ruchów. ULN2803 to ośmiokanałowy układ Darlingtona, który pełni funkcję mostka między sygnałami sterującymi STEP i DIR a silnikami krokowymi. Każdy z kanałów wyposażony jest w diodę ochronną, która zabezpiecza przed przepięciami, co jest ważne dla stabilności układu. ULN2803 obsługuje sygnały X_Step, X_Dir oraz ENA, które przekazywane są do odpowiednich pinów sterowników A4988 i decydują o krokach i kierunku obrotu silników krokowych. Dodatkowo układ elektroniczny zarządza sygnałami ENA (umożliwiającymi uruchomienie silników) oraz EMG (odpowiedzialnymi za aktywowanie elektromagnesu). Te sygnały są sygnalizowane diodami LED, które wskazują aktywność systemu. Układ jest zasilany napięciem 5 V oraz 24 V, a napięcie dla

silników jest stabilizowane kondensatorami, aby zminimalizować zakłócenia wynikające z nagłych zmian prędkości lub kierunku obrotu silników. Sterowanie sygnałami wejściowymi odbywa się za pomocą przycisków i krańcówek (X, Y, Z), zasilanych napięciem 24 V. Zielony przycisk służy do włączania układu, niebieski ustawia pozycję startową na podstawie odczytów z krańcówek, a czerwony odpowiada za awaryjne zatrzymanie robota. Dzięki precyzyjnej integracji wszystkich elementów, układ elektroniczny zapewnia pełną kontrolę nad ruchami robota oraz bezpieczeństwo jego działania.



Rysunek 12.5. Podglądowy schemat elektryczny układu sterowania

12.3.4. Program sterujący robota

Do zaprogramowania dydaktycznego modelu robota SCARA wykorzystano środowisko programistyczne Sysmac Studio, dostarczone przez firmę OMRON. Podstawą funkcjonowania robota było zaprogramowanie trajektorii ruchu, prędkości oraz przyspieszeń dla poszczególnych osi robota, co było możliwe dzięki narzędziom kontroli ruchu dostępnym w aplikacji. Przed rozpoczęciem programowania konieczna była konfiguracja topologii sieciowej i rozszerzenie funkcjonalności sterownika NX1P2-1140DT1 o moduł NX-PG0342-5, który zwiększył liczbę kanałów wyjściowych i wejściowych. Każdą z osi X, Y i Z należało skonfigurować indywidualnie w ramach ustawień Motion Control Setup. Na początku zdefiniowano porty wyjściowe sygnałów sterujących:

- oś X: Kanał X_Step oraz Kanał X_Dir,
- oś Y: Kanał Y_Step oraz Kanał Y_Dir,
- oś Z: Kanał Z_Step oraz Kanał Z_Dir.

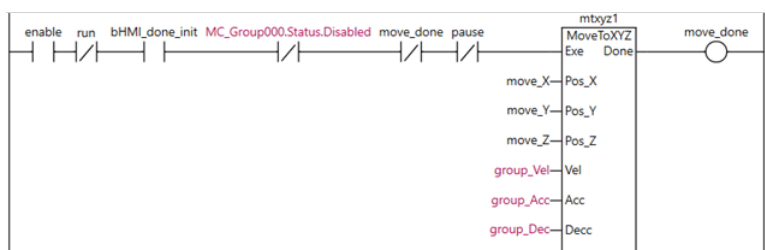
Następnie skonfigurowano przeliczanie jednostek fizycznych na jednostki programowe, przy czym dla osi X i Y, które odpowiadają za ruch obrotowy, wybrano jednostki w stopniach, a dla osi Z (ruch liniowy) – w milimetrach. Konfiguracja mikroroku sterowników A4988, na których połączenie pinów MS1, MS2, MS3 ustalono na wartość 1/16, pozwoliła uzyskać 3200 pulsów na jeden pełny obrót wału silnika. W związku z tym, przy jednym pełnym obrocie wału silnika uzyskano przesunięcie członów o:

- oś X: 135°,
- oś Y: 80°,
- oś Z: 8 mm.

W kolejnym kroku skonfigurowano funkcje pozycjonowania robota czyli funkcje Homing. Pozycja referencyjna została zdefiniowana dla każdej osi. Proces Homing rozpoczął się od wyboru odpowiedniej metody zerowania osi przy użyciu sygnału z krańcówki. Następnie dla każdej osi określono parametry dotyczące kierunku ruchu, prędkości początkowej, prędkości podejścia, przyspieszenia, hamowania oraz zrywu. Parametry Homing są następujące:

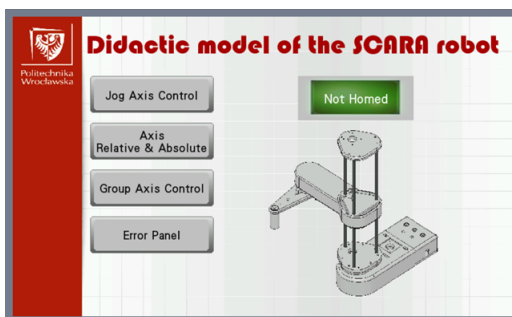
- oś X: Prędkość $15^\circ/\text{s}$, przyspieszenie $60^\circ/\text{s}^2$, hamowanie $720^\circ/\text{s}^2$.
- oś Y: Prędkość $30^\circ/\text{s}$, przyspieszenie $360^\circ/\text{s}^2$, hamowanie $720^\circ/\text{s}^2$.
- oś Z: Prędkość 10 mm/s , przyspieszenie 30 mm/s^2 , hamowanie 720 mm/s^2 .

Program sterujący pracą robota SCARA został napisany w języku drabinkowym (Ladder Diagram), a do zaimplementowania bardziej zaawansowanych funkcji użyto języka Structured Text (ST). Program umożliwia sterowanie robotem w trójwymiarowej przestrzeni, z naciskiem na niezależne sterowanie każdą z osi oraz programowanie sekwencji ruchów za pomocą panelu operatorskiego HMI. Aktywacja programu sterującego następuje po naciśnięciu zielonego przycisku, co sygnalizowane jest przez zaświecenie zielonej diody LED. Niebieski przycisk odpowiedzialny jest za pozycjonowanie wszystkich osi robota, a czerwony przycisk umożliwia natychmiastowe przerwanie wszelkich czynności robota. Po wykonanym pozycjonowaniu system robota jest odblokowany i gotowy do swobodnego sterowania. Program umożliwia ruch osiami robota w trybie JOG, Absolute oraz Relative. Dodatkowo jest możliwość synchronicznego sterowania robotem, lecz w tym celu należy załączyć zdefiniowaną grupę osi. Gdy grupa osi jest załączona nie ma możliwości sterowania za pomocą pojedynczej osi. Aby wrócić do tego stanu potrzebna jest dezaktywacji grupy osi. Najistotniejszą funkcją robot jest zdolność do wykonania powtarzalnych sekwencji ruchu. Należy pierw zdefiniować wybraną pozycję każdego członu robota oraz stan elektromagnesu. Zmienna określająca pozycję osi X, Y, Z oraz stan elektromagnesu jest zapisywana w tablicy, a na podstawie tych danych tworzony jest blok funkcyjny, który steruje sekwencyjnym ruchem robota (rysunek 12.6). Dodatkowo możliwe jest wywołanie zapisanych pozycji i bezpośrednie przemieszczenie się do wybranego położenia.



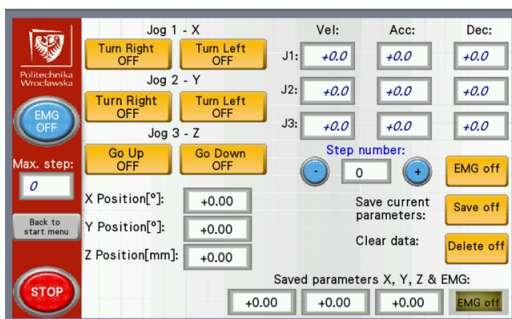
Rysunek 12.6. Fragment programu sterującego sekwencją ruchu robota

Użytkownik może obsługiwać robota za pomocą panelu operatorskiego NB7W-TW01B połączonego ze sterownikiem PLC za pomocą Ethernetu. Panel umożliwia interakcje z robotem, monitorowanie parametrów oraz kontrole jego funkcjonalności. Przy uruchomieniu panelu, pojawia się okno startowe (rysunek 12.7), gdzie operator nie może przejść do innych opcji, dopóki nie zostanie wykonane pozycjonowanie osi. Po zakończeniu pozycjonowania, zielona lampka sygnalizuje gotowość systemu.



Rysunek 12.7. Okno startowe programu robota na panelu operatorskim NB7W-TW01B

W panelu Jog Axis Control (rysunek 12.8) operator może sterować każdą osią robota, dostosowując prędkość, przyspieszenie i hamowanie. Program pozwala na definiowanie współrzędnych do sekwencyjnego ruchu, a każdą zmianę zapisuje się lub usuwa za pomocą przycisków Save i Delete. Funkcja EMG załącza elektromagnes na czas wykonania danego kroku.



Rysunek 12.8. Okno Jog Axis Control na panelu operatorskim NB7W-TW01B

W panelu Axis Relative & Absolute (rysunek 12.9) możliwe jest sterowanie osiami w trybie względnym lub bezwzględnym, wpisując żądane kroki lub pozycje.



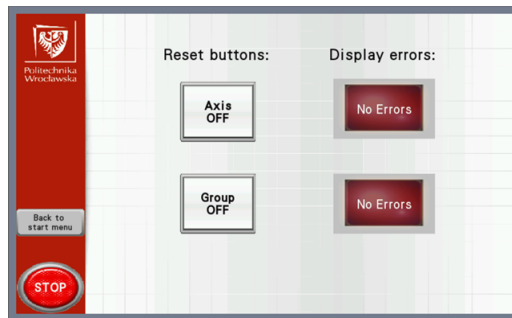
Rysunek 12.9. Okno Axis Relative & Absolute na panelu operatorskim NB7W-TW01B

Panel Group Axis Control (rysunek 12.10) umożliwia uruchomienie zaprogramowanej sekwencji ruchów, po wcześniejszej aktywacji grupy osi. Użytkownik może dostosować parametry ruchu przed inicjacją sekwencji.



Rysunek 12.10. Okno Group Axis Control na panelu operatorskim NB7W-TW01B

Ekran Error Panel (rysunek 12.11) pozwala na resetowanie błędów systemowych powstałych podczas sterowania osiami.



Rysunek 12.11. Okno Error Panel na panelu operatorskim NB7W-TW01

12.4. Uzyskane wyniki

Przeprowadzone serie testów dydaktycznego robota typu SCARA były realizowane w trybie pracy „Axis Relative” i „Absolute”, a uzyskane wyniki są następujące:

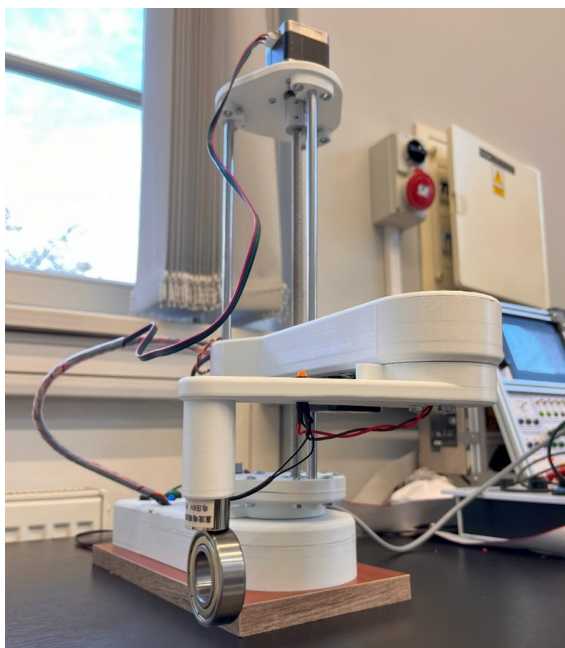
- robot bez problemów wykonuje ruchy w pełnym zakresie, a jego konstrukcja nie zawiera żadnych elementów, które mogłyby go ograniczać,
- robot precyzyjnie przemieszcza się do wyznaczonych punktów. Płynność ruchów zależy od ustawień prędkości, przyspieszenia i hamowania, które mogą być inne dla różnych osi:
 - oś *X*: Dla płynnych ruchów wymagane jest minimum $10^\circ/\text{s}$ prędkości. Optymalne przyspieszenie to między 25° a $100^\circ/\text{s}^2$, a hamowanie między 20° a $170^\circ/\text{s}^2$,
 - oś *Y*: Ruchy są płynne już przy minimalnej prędkości. Zalecane przyspieszenie i hamowanie to minimum $10^\circ/\text{s}^2$,
 - oś *Z*: Wymaga szczególnej uwagi przy prędkościach od 10 do 25 mm/s. Przy większych prędkościach silnik może nie być w stanie nadążać. Zalecane wartości przyspieszenia to min. $10 \text{ mm}/\text{s}^2$, a hamowania min. $15 \text{ mm}/\text{s}^2$.
- robot został zintegrowany z taśmociągiem i uczestniczył w procesie sortowania kapsli na podstawie koloru (rysunek 12.12). Operacje obejmowały pobranie kapsla, bez-

pieczny manewr nad pojemnikiem, odłożenie elementu i powrót do pozycji startowej. Wszystkie operacje przebiegły bezbłędnie, potwierdzając gotowość robota do dalszej pracy w warunkach laboratoryjnych,



Rysunek 12.12. Proces sortowania z użyciem dydaktycznego modelu robota typu SCARA

- robot bez problemu przynosił kapsle, śruby i nakrętki. Testowano także podniesienie większych przedmiotów, jak silnik krokowy i łożysko kulkowe, które ważyły odpowiednio 80 g i 185 g. Robot bez trudu przyniósł oba objekty (rysunek 12.13),



Rysunek 12.13. Dydaktyczny model robota typu SCARA podczas testowania udźwigu chwytaka za pomocą 80-gramowego łożyska kulkowego

- dydaktyczny model robota typu SCARA jest w pełni sprawny i gotowy do dalszego użytkowania.

12.5. Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie i stworzenie edukacyjnego modelu robota SCARA, który potrafiłby dokładnie wykonywać wcześniej zaprogramowane ruchy zgodnie z oczekiwaniami operatora. W ramach projektu zbudowano robota, korzystając z nowoczesnych rozwiązań w zakresie konstrukcji, sterowania elektronicznego i oprogramowania.

Robot został wykonany w technologii druku 3D, co pozwoliło na uzyskanie precyzyjnej i trwałej struktury. Silniki krokowe zostały zastosowane do napędu trzech osi, co zapewnia dokładną kontrolę nad ruchem. Główne sterowanie robotem odbywa się za pomocą zaawansowanego sterownika NX1P2-1140DT1, który jest kluczowy dla sprawnego zarządzania jego operacjami.

Opracowano również kompleksowy program w środowisku Sysmac Studio do obsługi robota. W jego skład wchodzi wizualizacja na panelu HMI, która umożliwia programowanie sekwencji ruchów, sterowanie poszczególnymi osiami oraz monitorowanie stanu robota.

Przeprowadzone testy w laboratorium wykazały, że robot działa zgodnie z założeniami projektu. Ruchy były precyzyjne, chwytak z elektromagnesem stabilny, a ogólna wydajność systemu spełniła oczekiwania. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wszystkie cele projektowe zostały zrealizowane.

Zbudowany robot stanowi nowoczesne narzędzie dydaktyczne, które może być wykorzystywane przez studentów do nauki praktycznych umiejętności w dziedzinie robotyki. Dzięki swojej funkcjonalności, precyzji i łatwości obsługi, będzie idealnym wsparciem w prowadzeniu zajęć laboratoryjnych, umożliwiając studentom eksperymentowanie i rozwijanie umiejętności związanych z robotami SCARA.

Bibliografia

- [1] Honczarenko J., *Roboty przemysłowe, Budowa i zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, Polska, 2004.
- [2] Kosmol J., *Napędy Mechatroniczne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, Polska, 2013.
- [3] Pawlak M., *Sterowniki Programowalne*, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska, 2010.
- [4] Skowron M., *Materiały wykładowe Napędy Robotów i Obrabiarek*, Politechnika Wroclawska, 2023.

Zastosowanie robota ramieniowego do procesu automatycznego pozycjonowania elementów

inż. Jakub Głogowski

Automatyka Przemysłowa

dr hab. inż. Marcin Wolkiewicz

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Głównym założeniem pracy dyplomowej było opracowanie procesu automatycznego pozycjonowania główki pasa bezpieczeństwa za pomocą robota ramieniowego oraz aplikacji MATLAB z wykorzystaniem standardowej kamery internetowej zamiast specjalistycznej kamery przemysłowej wykorzystującej oprogramowanie producenta. Badano, czy możliwe jest osiągnięcie tej samej precyzji określania współrzędnych oraz podobnego czasu działania dla standardowej kamery internetowej. Część programistyczną rozpoczęto od realizacji rozpoznawania obiektu w aplikacji MATLAB. Zajęto się obróbką otrzymanego zdjęcia, której celem było osiągnięcie jak najbardziej precyzyjnych współrzędnych przenoszonego obiektu. Kolejnym krokiem było opracowanie programu w aplikacji RT Toolbox odbierającego obliczone współrzędne oraz realizującego proces automatycznego pozycjonowania elementu poza obszarem roboczym. Następnie weryfikowano eksperymentalnie poprawność działań obu programów oraz wprowadzano stosowne poprawki aby osiągnąć zadowalające efekty. Testowano szybkość działania oraz precyzję uzyskiwanych współrzędnych. Po wielu testach osiągnięto zamierzone parametry działania. Potwierdzono, że możliwe jest zastąpienie kamer przemysłowych tańszymi kamerami pod warunkiem poprawnego własnego oprogramowania.

13.1. Cel i założenia

Głównym założeniem realizowanej pracy dyplomowej było opracowanie procesu automatycznego pozycjonowania główki pasa bezpieczeństwa za pomocą robota ramieniowego oraz aplikacji MATLAB z wykorzystaniem standardowej kamery internetowej zamiast specjalistycznej kamery przemysłowej wykorzystującej oprogramowanie producenta. Badano czy możliwe jest osiągnięcie tej samej precyzji określania współrzędnych oraz tego samego czasu działania zdecydowanie mniejszym kosztem. Zakres prac obejmował:

- zapoznanie się z możliwościami robotów ramieniowych na stanowiskach dostępnych w laboratorium,

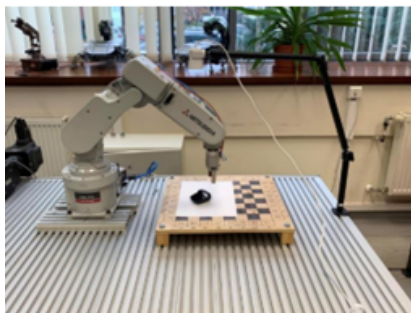
- przygotowanie stanowiska laboratoryjnego do wykonania procesu automatycznego pozycjonowania elementów,
- opracowanie w programie RT Toolbox procesu pozycjonowania,
- opracowanie w programie MATLAB programu wykonującego rozpoznanie elementów na podstawie obrazu z kamery,
- weryfikację eksperymentalną opracowanych programów,
- redakcję pracy dyplomowej.

13.2. Wstęp teoretyczny

Mechanizm wykorzystywanych obecnie pasów bezpieczeństwa składa się z czterech podstawowych elementów: zwijacza, zamka, pasa z klamrą oraz napinacza. Zwijacz to szpula, na którą nawijany jest pas bezpieczeństwa montowany wraz ze sprężyną. Jest ona naciągana w momencie zapinania pasa przez kierowcę wraz z kręceniem się szpuli. W chwili uderzenia swobodnie leżące kulki w mechanizmie blokują możliwość dalszego rozwijania pasa. Zamek pasa bezpieczeństwa to miejsce, gdzie wpinana jest klamra. Składa się z dwóch plastikowych elementów połączonych na zasadzie zatrzasków. Pas bezpieczeństwa wykonany jest z tworzywa sztucznego, takiego jak poliester. [1] Wykorzystywane obecnie pasy bezpieczeństwa posiadają trzy punkty mocowania do karoserii pojazdu: miejsce zapinania pasów oraz dwa punkty łączenia na słupku bocznym pojazdu. Na etapie produkcji pasy poddawane są próbom obciążeniowym aby spełnić rygorystyczne warunki bezpieczeństwa. Napinacz jest elementem systemu odpowiedzialnym za jak najszybsze przyciągnięcie ciała człowieka do fotela przez zaciśnięcia pasów bezpieczeństwa. Występują dwa rodzaje napinaczy – mechaniczne oraz pirotechniczne. Kluczowym elementem zwiększającym bezpieczeństwo podróżujących jest ogranicznik napięcia znajdujący się w napinaczu. Ma on za zadanie poluzować pas w przypadku, gdy wartości graniczne siły nacisku ciała na pas są przekroczone. Poluzowanie pasów jest konieczne, aby ciało miało możliwość na wyhamowanie podczas kontaktu z poduszką powietrzną [2].

13.3. Projekt i wykonanie

W celu realizacji pracy dyplomowej skorzystano z Laboratorium Automatyki Przemysłowej. Działa ono w ramach Katedry Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych.

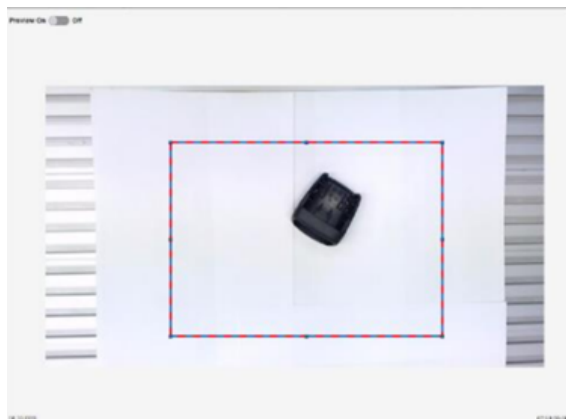


Rysunek 13.1. Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne (rysunek 13.1) składało się z: robota ramieniowego firmy Mitsubishi, chwytaka pneumatycznego zamontowanego na ramieniu robota, kamery internetowej firmy Logitech wraz ze statywem, główki pasa bezpieczeństwa.

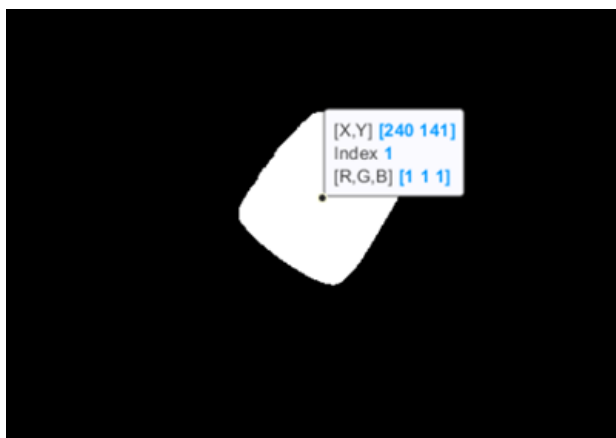
13.3.1. Program MATLAB

Głównym założeniem aplikacji jest umożliwienie współpracy między kamerą a robotem. Polega ono na zapisaniu obrazu z kamery, odpowiedniej jego analizie umożliwiającej uzyskanie współrzędnych X , Y oraz kąta obrotu przenieszonego przedmiotu w stosunku do osi X . Następnie na wysłaniu uzyskanych informacji za pomocą połączenia TCP/IP do sterownika robota ramieniowego. Rozpoczęcie współpracy programu oraz wykorzystywanej kamery polega na skorzystaniu z rozszerzenia Image Acquisition Toolbox. Służy ono między innymi do ustalenia obszaru roboczego wykonywanego zdjęcia, tzn. obszaru, który będzie poddawany analizie (rysunek 13.2).



Rysunek 13.2. Podgląd w czasie rzeczywistym z wykorzystywanej kamery

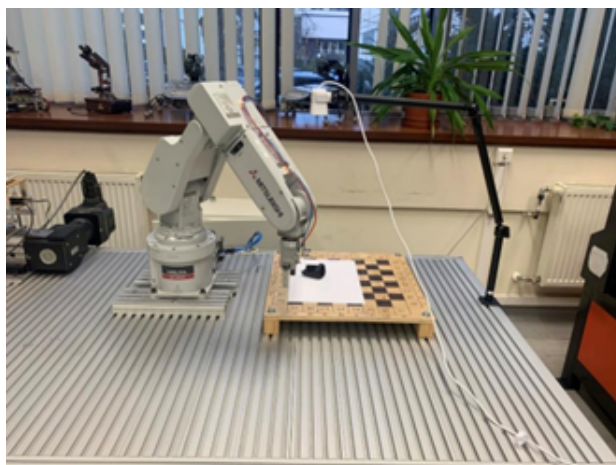
Kolejnym rozszerzeniem wykorzystywanym w pracy dyplomowej jest Image Processing Toolbox umożliwiający między innymi zapisywanie wykonanych fotografii oraz jego wyświetlanie. W celu poprawnej obróbki otrzymanego zdjęcia z kamery konieczna jest konwersja kolorów na obraz czarno-biały. Umożliwia to łatwiejsze rozpoznanie położenia przenieszonego przedmiotu. Koniecznym elementem analizy zdjęć jest filtr medianowy pomagający wyeliminować ze zdjęcia wszelkie niedoskonałości. Polega on na przyjmowaniu wartości binarnych na podstawie przyjętej mediany wartości otaczających go pikseli. Najważniejszym jednak krokiem tej aplikacji jest uzyskanie współrzędnych rzeczywistych na podstawie zdjęcia. Szukane informacje to współrzędna Y , współrzędna X , środek masy obiektu oraz kąt o jaki jest obrócony przedmiot w stosunku do osi X . Do poprawnego działania robota ramieniowego konieczne jest przeliczenie otrzymanych współrzędnych z wartości wyrażanych w pikselach na wartości wyrażane w milimetrach. Rozmiar zdjęcia to 468×326 pikseli a pola roboczego 297×210 mm. Po odpowiednim przeliczeniu tych wartości dane pokrywają się z rzeczywistym ułożeniem przedmiotu w obszarze roboczym i po zmianie na typ danych „string” są gotowe do wysłania do sterownika robota za pomocą protokołu TCP/IP (rysunek 13.3).



Rysunek 13.3. Obraz końcowy

13.3.2. Program RT Toolbox

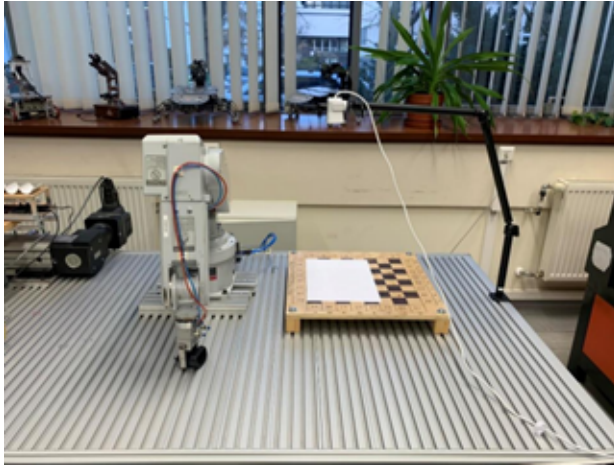
Głównym założeniem aplikacji jest odebranie opracowanych współrzędnych z programu MATLAB oraz realizacja przeniesienia elementu w ściśle określone miejsce poza obszarem roboczym. Składa się on z dwóch części: komunikacji z programem MATLAB oraz właściwego programu pozycjonowania. Komunikacja z komputerem opiera się na skonfigurowaniu wykorzystywanych portów w ustawieniach programu oraz odpowiednim wywołaniu ich w programie wgrywanym do robota. Język używany do pisania programu dla robota to Melfa-Basic V. Program rozpoczyna się od ustawienia robota w pozycji bazowej (rysunek 13.4).



Rysunek 13.4. Ustawienia robota w pozycji bazowej

Po osiągnięciu pozycji bazowej i naciśnięciu przycisku rozpoczynającego wykonanie aplikacji w programie MATLAB następuje wczytanie danych do programu robota. Robot po odczytaniu danych ustawia chwytak pionowo nad przenoszonym elementem. Następnym krokiem jest dostosowanie kąta obrotu chwytaka. W tym przypadku porusza się tylko

jedna oś robota (J6). Pobranie elementu oraz jego podniesienie za pomocą chwytaka pneumatycznego odbywa się w linii pionowej w stosunku do obszaru roboczego, aby uniknąć błędów związanych z uderzeniem chwytaka w przenoszony element. Końcowo element jest odkładany poza obszarem roboczym, a robot wraca do pozycji bazowej w oczekiwaniu na kolejny element (rysunek 13.5).



Rysunek 13.5. Odłożenie przenoszonego przedmiotu

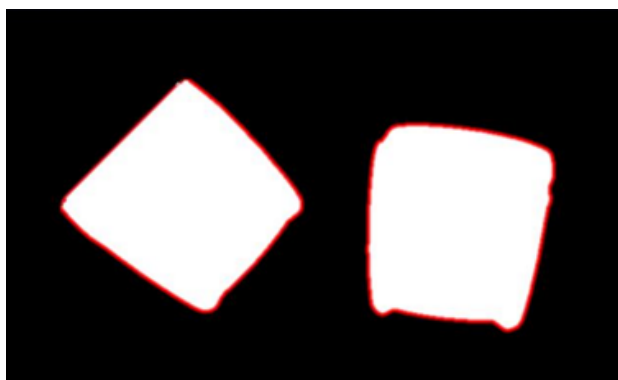
13.4. Uzyskane wyniki

Celem pracy było zaprojektowanie systemu wizyjnego na stanowisku laboratoryjnym z robotem ramieniowym oraz opracowanie procesu automatycznego pozycjonowania elementów. Założenia projektu udało się zrealizować. Rozpoczęto od ustalenia obszaru roboczego. Należało dopasować go do zasięgu ramienia robota oraz umiejscowienia kamery. Statyw kamery umieszczono pionowo nad obszarem roboczym aby wyeliminować niepożądane elementy na zdjęciu, takie jak cienie. Kamera internetowa firmy Logitech posiada wystarczające parametry do prawidłowego działania programu. Proces tworzenia aplikacji MATLAB przebiegł bezproblemowo. Najwięcej czasu poświęcono na korelacji współrzędnych robota oraz kamery. Wymagało to wielu testów oraz zmian ustawień w celu osiągnięcia zadowalających efektów. Program w sterowniku robota zrealizowano z dbałością o odpowiednią precyzję pozycjonowania ramienia robota oraz powtarzalność odczytu położenia przenoszonego elementu. Możliwe jest osiągnięcie zbliżonych efektów, zastępując profesjonalne kamery przemysłowe standardowymi kamerami internetowymi z własnym oprogramowaniem.

13.5. Podsumowanie

Projekt zrealizowano w ten sposób, aby możliwy był jego dalszy rozwój. Proces technologiczny pozycjonowania wykonano dla jednej główki pasa bezpieczeństwa, jednak kamera oraz program MATLAB są w stanie rozpoznawać kilka elementów na jednym obrazie po

niewielkich poprawkach w aplikacji (rysunek 13.6). Wymagane byłoby dodanie fragmentu kodu odpowiadającego za śledzenie krawędzi danych elementów oraz rozpoznawanie ich liczby.



Rysunek 13.6. Dwa elementy w obszarze roboczym

Dalszy rozwój zależy od kierunku, w jakim miałyby być ulepszone programy. Aby obsługiwać kilka elementów na jednym zdjęciu należałoby również zmodyfikować program robota o wczytywanie danych dla wielu punktów. Pole do poprawy po większej ilości testów pozostaje również w kwestii prędkości działania robota oraz programu MATLAB. Zrealizowano te programy w ten sposób, aby osiągnąć pewność działania oraz odpowiednią precyzję. Przyspieszenie procesu technologicznego mogłoby zostać zrealizowane przez zmniejszenie opóźnień umieszczonych w programie robota oraz przez optymalizację programu MATLAB. Dodatkowym usprawnieniem mógłby być proces ustawiania ramienia robota wykonywany jednocześnie z określonym obrotem chwytaka.

Bibliografia

- [1] Pasy bezpieczeństwa. Historia, zasady zapinania, aktualne mandaty. Dostępny online: <https://motofakty.pl/pasy-bezpieczenstwa-historia-zasady-zapinania-aktualne-mandaty/ar/c4-16270921> [dostęp: 05-01-2024].
- [2] Napinacz pasa bezpieczeństwa. Dostępny online: https://pl.wikipedia.org/wiki/Napinacz_pasa_bezpiecze%C5%84stwa [dostęp: 06-01-2024].

System automatycznego napełniania butelek wykorzystujący sterownik X20 firmy B&R

inż. Wojciech Dąbrowicki

Automatyka Przemysłowa

dr hab. inż. Piotr Serkies

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Projekt opiera się na systemach rzeczywistych linii produkcyjnych. Jest to pomniejszone odwzorowanie sterowane za pomocą sterownika X20 firmy B&R. W skład makiety wchodzi: dwa serwosilniki, serwo modelarskie, pompa, elektrozawór. Makietą zawiera w sobie stacje: podawania butelek, napełniania, zakręcania oraz wydawania. Sterowanie odbywa się przy użyciu rozszerzeń sterownika wraz z zaprogramowaną maszyną stanów kolejnych kroków procesu napełniania butelek. Projekt umożliwi pokazanie oraz praktyczne zastosowanie posiadanej wiedzy do zaprogramowania podstawowej linii produkcyjnej jak i problemów, które można napotkać podczas tworzenia. Tematem kluczowym jest: automatyzacja, proces produkcyjny, PLC, sterowanie linią produkcyjną.

14.1. Cel i założenia

Celem podejmowanym w pracy było opracowanie koncepcji i wykonanie modelu laboratoryjnego stanowiska do automatycznego zakręcania butelek. Ssterowanie odbędzie się z wykorzystaniem sterownika PLC X20 i serwonapędu ACOPOS firmy B&R. W zakres pracy wchodzi:

- zapoznanie się z budową i programowaniem sterowników X20 i serwonapędów ACOPOS,
- opracowanie koncepcji modelu laboratoryjnego układu do automatycznego zakręcania nakrętek,
- opracowanie modelu elektrycznego,
- opracowanie programu sterującego i testy całego systemu,
- redakcja pracy.

14.2. Wstęp teoretyczny

Automatyzacja przemysłowa, zapoczątkowana w XVII wieku, przekształciła przemysł przez zastąpienie tradycyjnej pracy ludzkiej maszynami sterowanymi za pomocą układów mechanicznych i elektronicznych. Przełomem było wprowadzenie systemów opartych na sprzężeniu zwrotnym, czyli pomiarami oraz dostosowaniem procesu do aktualnego stanu, co pozwoliło na stworzenie efektywnych procesów produkcyjnych. W XX wieku technologia ta rozwinęła się na tyle, że powstały nowoczesne fabryki z taśmami produkcyjnymi sterowanymi komputerowo. Wraz z tym rozwojem narodziła się potrzeba stosowania urządzeń takich jak sterowniki PLC (ang. *Programmable Logic Controllers*), które sterują procesami produkcyjnymi w sposób zautomatyzowany, minimalizując udział człowieka.

14.3. Projekt i wykonanie

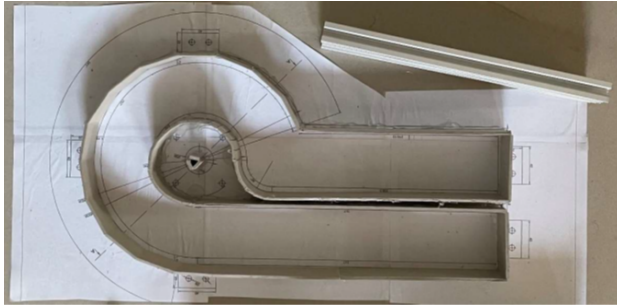
Pierwsza makieta zainspirowana została filmem „Automatic Bottle Filling & Capping Machine Using PLC” stworzonym przez Nevon Project [1], w którym można było znaleźć wiele aspektów oraz podstawowych informacji potrzebnych do realizacji projektu. Zostały one w dalszej fazie zmodyfikowane bądź całkowicie zmienione. Niemożliwym było także użycie większej liczby silników niż 2, gdyż moduł obsługujący serwomechanizmy posiada jedynie 2 wejścia.

W znacznym stopniu utrudniło to stworzenie makiety, ponieważ niemożliwym było podawania butelek oraz ich odbieranie za pomocą taśm. Problemem okazało się także jednolite i działające rozwiązanie nakładania nakrętek w taki sposób, aby nie spadały, nie były krzywo nakręcane. Opuszczanie mechanizmu nakręcania opierało się także na hydraulice, która wymagałaby dodatkowych silników, siłowników, zbiornika wyrównawczego i wiele więcej. W celu stworzenia pracy kompaktowej, gdyż o taką zostałem poproszony, niemożliwym było zastosowanie takiego rozwiązania. Głównym zadaniem projektu było nalewanie oraz zakręcanie butelek, przez co skłonienie się w stronę sprężyn pozwoliło na eliminację elektronicznych części, jednak wymagało większego przemyślenia związanego z mechaniką projektu. Praca nie wymagała pakowania wielu butelek jednocześnie, gdyż pokazywała jedynie podstawy związane z linią produkcyjną oraz problemami związanymi z jej tworzeniem.

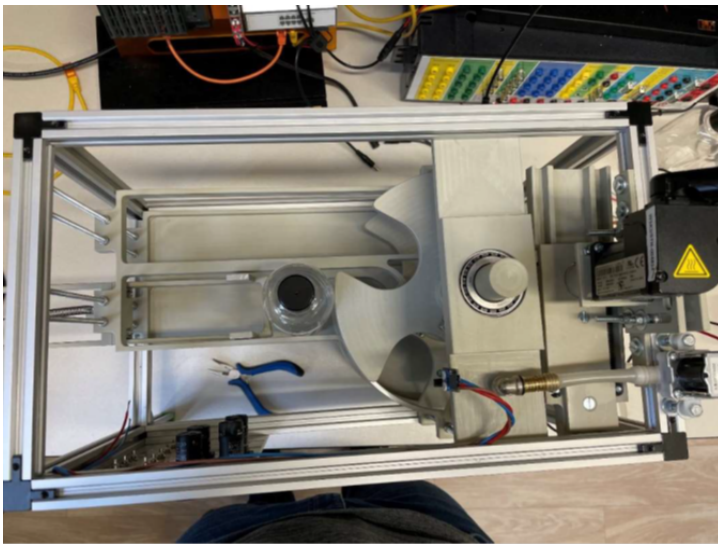
14.3.1. Budowa

Proces tworzenia prototypu jest jednym z ważniejszych elementów podczas tworzenia poprawnego rozwiązania. Czasami umożliwiającym, na jego podstawie wykrycie błędów albo poprawę poprawności działania. Pierwszy prototyp wykonany został z 3-mm kartonu, z którego stworzono ścianki, podstawę oraz mechanizm obrotowy. Po wykonaniu makiety, sprawdzono jakość wprowadzania butelek oraz ich wysuwania (rysunek 14.1).

Makieta w końcowej wersji wyglądała jak przedstawiono na rysunku 14.2.



Rysunek 14.1. Zdjęcie przedstawiające prototyp potrzebny do sprawdzenia poprawności działania makiety



Rysunek 14.2. Zdjęcie od góry stworzonej makiety

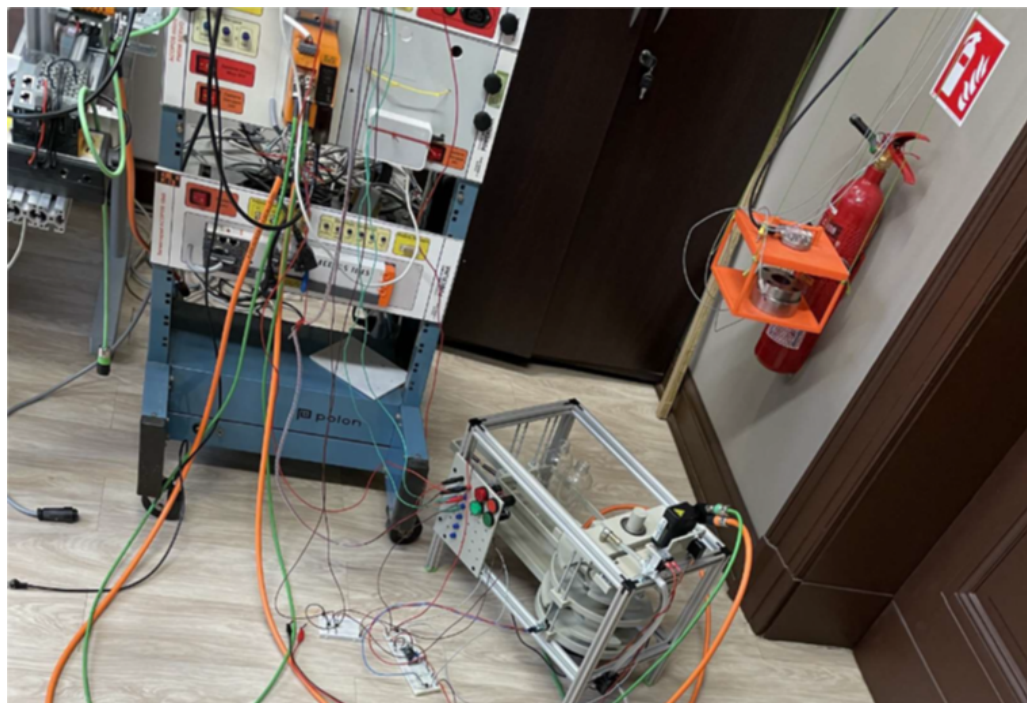
14.3.2. Zasada działania

W pierwszej części pracy makiety włączane są wszystkie silniki oraz ustalane są ich pozycje „home”, które mogą zostać ustalone gdziekolwiek, gdyż nigdy nie będzie potrzebne odnoszenia się do nich, a jest to wymagane do obrotu silników. Po ustawieniu podstawowych wartości następuje proces produkcji składający się z:

- umieszczenia butelki w mechanizmie podawania,
- pobrania butelki mechanizmu rewolwerowego,
- przesunięcia butelki do pozycji napełniania, wraz ze sprawdzeniem poprawności jej pobrania przez czujnik podczerwieni,
- napełnienia butelki,
- przesunięcia do pozycji nakręcania,
- nakręcenia nakrętki na butelkę,
- wydania zakręconej i napełnionej butelki na tor poboczny.

14.4. Podsumowanie

Ostateczny model makiety przeszedł wiele modyfikacji od założonego planu, był to proces długi, pozwalający na nauczenie się rozwiązywania problemów związanych z mechaniką, elektroniką, a także programowaniem. Na rysunku 14.3 widoczne jest ukończone stanowisko wraz z połączeniem do sterownika PLC oraz układem elektronicznym.



Rysunek 14.3. Zdjęcie ostatecznego skończonego projektu wraz z jego podłączeniami

Makieta umożliwia proste ćwiczenie zaprogramowania linii produkcyjnej, przybliżając proces automatyzacji w fabrykach. Atutem jest możliwość rozszerzenia stanowiska o dodatkowe segmenty dzięki pełnej regulacji wszystkich elementów oraz miejsce umożliwiające dodanie rozszerzeń. Jako pojemnik do napełniania mogą być używane szklanki, puszki, butelki 0,5 l, butelki 0,3 l oraz plastikowe. Cel i zakres pracy został zrealizowany do końca, makieta może w przyszłości zostać przerobiona lub zaprogramowana w inny sposób. Umożliwia zapoznanie się z biblioteką mappMotion, konfiguracją modułów, mapowaniem wejść I/O, modułem sygnału PWM, diagnostyką: watch, logger, SDM.

Bibliografia

- [1] Youtube. Dostępny online: <https://www.youtube.com/watch?v=JdXzMI1PXcs> [dostęp: 08-10-2024].

Sterownik napędu agregatu chłodniczego

mgr inż. Michał Bukało

Automatyka Przemysłowa

dr inż. Piotr Derugo

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

W pracy skupiono się na zaprojektowaniu, wykonaniu i zbadaniu kluczowych urządzeń wchodzących w skład systemu chłodzenia stosowanego przy produkcji wina. Na początkowych etapach dokonano przeglądu obecnie istniejących rozwiązań i na ich podstawie oraz doświadczeń autora przystąpiono do wykonywania projektu. W skład systemu wchodzi dwa zasadnicze rodzaje urządzeń: regulator temperatury i sterownik agregatu chłodzącego. Urządzenia te zostaną zaprojektowane w sposób pozwalający na ograniczenie uwagi użytkownika przez przesyłanie informacji w sieci oraz automatyczny dobór parametrów pracy. Innym elementem systemu na jakim skupiono uwagę jest sterowanie pompą obiegową za pomocą przemiennika częstotliwości, mające na celu zmniejszenie wydajności pompy przy małej liczbie chłodzonych zbiorników tym samym ograniczając zużycie energii.

15.1. Cel i założenia

Celem niniejszej pracy jest zaprojektowanie, wykonanie oraz przebadanie sterownika napędu agregatu chłodzącego ciecz w kadzi. W dalszej części proponowane rozwiązanie należy rozwinąć o możliwości budowy systemu złożonego z większej liczby urządzeń pracujących w lokalnej, dedykowanej sieci oraz przystosować do sterowania urządzeniami niezbędnymi do realizacji systemu chłodzenia. Stworzony w ramach pracy sterownik powinien zapewnić komfortową kontrolę parametrów zadanych na podstawie zmiennych procesowych, a w szczególności temperatury cieczy w kadzi. Istotnym aspektem jest stworzenie czytelnego interfejsu odpornego na błędy użytkownika. W części badawczej należy porównać aktualne rozwiązanie z rozwiązaniem proponowanym. Główne zadania projektowe obejmowały kilka istotnych etapów:

- przyjęcie założeń w kwestii przeznaczenia projektowanego urządzenia,
- analiza rynku oraz potrzeb użytkowników,
- zaplanowanie ogólnej koncepcji projektowanego rozwiązania,
- wykonanie schematu ideowego, zaprojektowanie i wykonanie obwodu drukowanego,

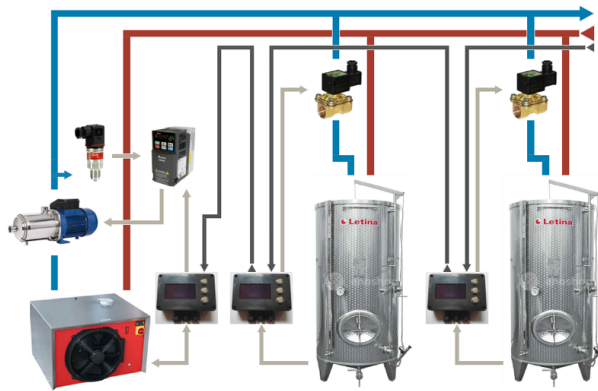
- uruchomienie układu, przeprowadzenie pierwszych testów, programowanie mikrokontrolera,
- modyfikacje projektu i wykonanie drugiego egzemplarza sterownika,
- wykonanie badań, analiza działania,
- budowa i testy napędu pompy obiegu cieczy chłodzącej.

Podsumowując, praca miała na celu stworzenie możliwie funkcjonalnego i niezawodnego sterownika stanowiącego element systemu chłodzenia, który odpowiada na potrzeby precyzyjnej regulacji temperatury w procesach przemysłowych, przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa użytkownika oraz minimalizacji kosztów eksploatacyjnych przez efektywne zarządzanie energią. Projekt ukierunkowano na zastosowanie przy produkcji wina. Biorąc pod uwagę fakt, iż niemal w każdej gałęzi przemysłu spożywczego występuje potrzeba kontroli temperatury, można przypuszczać, że każde z zastosowań będzie charakteryzowało się innymi wymaganiami stawianymi systemowi kontrolującemu oraz inną specyfiką produkcji. Projektowanie urządzenia uniwersalnego w ogólnym przypadku jest istotnym utrudnieniem z uwagi na konieczność spełnienia wymogów z różnych segmentów przemysłu. W związku z tym zawężono obszar potencjalnych odbiorców do producentów wina. Takie podejście ułatwia poznanie oczekiwań odbiorców w stosunku do urządzenia. Przy ograniczonym zakresie tematycznym łatwiej jest też zrozumieć specyfikę produkcji oraz wymagania, jakie rozwiązanie tego typu powinno spełniać.

15.2. Wstęp teoretyczny

Kontrola temperatury na różnych etapach produkcji wina ma znaczący wpływ na kształt końcowego produktu. Na szczególną uwagę zasługuje tutaj etap fermentacji, gdyż ma on kluczowy wpływ na walory smakowe i zapachowe wina. Już prawie 200 lat temu opisano, iż „temperatura jest jednym z zewnętrznych czynników, które mają największy wpływ na proces fermentacji”, w związku z tym potrzeba regulacji temperatury jest tutaj uzasadniona.

Bazując na istniejących rozwiązaniach oraz doświadczeniach autora, zarówno w zakresie pracy z odbiorcami takich systemów chłodzenia, jak i ich budowie, zaproponowano ideę działania i wykonania systemu pozwalającego na kontrole urządzeń i elementów wykonawczych odpowiedzialnych za chłodzenie wina na różnych etapach jego produkcji. System chłodzenia, w którym role sterowania mają realizować projektowane urządzenia przedstawiono na rysunku 15.1. Centralnym elementem jest tutaj agregat chłodzący, który pracuje jako generator wody lodowej z wbudowanym zbiornikiem buforowym. Schłodzona ciecz (wodny roztwór glikolu propylenowego) jest pobierana przez pompę i podawana do instalacji hydraulicznej, do której podłączone są płaszcze chłodzące zbiorników. Każdy z tych płaszczy po stronie zasilającej ma zainstalowany elektrozawór, tak aby możliwe było sterowanie przepływem cieczy przez niego. Regulatory temperatury będące przedmiotem pracy dyplomowej dokonują pomiaru temperatury cieczy w zbiorniku i na podstawie wprowadzonych parametrów oraz wyników pomiaru sterują przepływem cieczy przez płaszczy chłodzący. Dla funkcjonowania systemu potrzebne jest też zaprojektowanie regulatora sterującego pracą agregatu chłodzącego, który w sposób analogiczny powinien sterować temperaturą cieczy w zbiorniku buforowym oraz pracą pompy obiegowej.



Rysunek 15.1. Schemat funkcjonalny systemu

Parametry pracy sterownika agregatu będą obliczane w sposób automatyczny na podstawie ustawień wprowadzonych przez użytkownika do regulatorów temperatury przy zbiornikach. Do tego celu niezbędne jest zapewnienie komunikacji między sterownikami. Kolejnym elementem, na jakim skupia się praca, jest sterowanie pompą obiegu cieczy za pomocą przemiennika częstotliwości nakierowane na stabilizację ciśnienia w instalacji na zadanym poziomie. Konieczność taka wynika z chęci ograniczenia zużycia energii przez napęd pompy bez wpływu na wydajność całego systemu. Ponieważ liczba otwartych zaworów stale się zmienia, mamy do czynienia z instalacją o zmiennym przepływie, zachodzi zatem potrzeba regulacji wydajności pompy tak, aby nie doszło do wzrostu ciśnienia ponad wartość dopuszczalną dla płaszczy chłodzących. Proponuje się zatem zastosowanie przemiennika częstotliwości, który będzie sterował częstotliwością napięcia zasilania silnika w taki sposób, aby utrzymać ciśnienie na zadanym poziomie.

15.3. Projekt i wykonanie

Pracę rozpoczęto od budowy regulatora temperatury dla zbiornika, który z perspektywy użytkownika jest elementem najistotniejszym, na nim będą dokonywane zmiany parametrów oraz z niego będą odczytywane wartości. Początkowe działania obejmowały wybór kluczowych elementów, takich jak: metoda pomiaru temperatury, rodzaj wyświetlacza, sposób komunikacji między urządzeniami oraz mikrokontroler będący w stanie obsłużyć wybrane wcześniej peryferia. Projekt sterownika agregatu chłodzącego wykonano jako modyfikację regulatora temperatury, głównie w zakresie liczby i konfiguracji wejść/wyjść urządzenia oraz jego oprogramowania. Jako oddzielne zagadnienie zrealizowano budowę napędu pompy obiegowej. Do celów badawczych wykonano makietę, która miała umożliwić badanie zaproponowanego rozwiązania i potwierdzenie bądź zaprzeczenie jego słuszności przez przeprowadzenie stosownych badań.

15.3.1. Regulator temperatury zbiornika

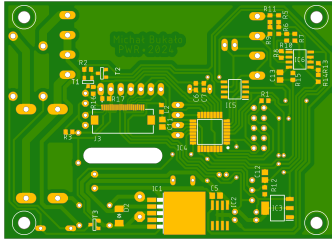
Na etapie rozważań podjęto decyzję, iż zastosowany zostanie wyświetlacz OLED, jednokolorowy o rozdzielczości 128×64 piksele. Przy wyborze brano pod uwagę zarówno

aspekt estetyczny, jak i możliwości przedstawiania rozmaitych treści oraz trwałość wyświetlacza deklarowaną przez producenta. Pomiar temperatury będzie dokonywany za pośrednictwem czujnika platynowego Pt500, jego rezystancja będzie przetwarzana na napięcie przez niezrównoważony mostek Wheatstone'a, którego wyjście wzmocnione przez układ wzmacniacza różnicowego zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym będzie podane na przetwornika analogowy/cyfrowy mikrokontrolera. W dalszej części analizowano możliwości komunikacji między urządzeniami. Układ pracy urządzeń narzuca topologię magistrali, a zatem nasuwa się zastosowanie komunikacji za pomocą RS485 lub protokołu CAN. Ostatecznie podjęto decyzję o zastosowaniu na cele testów magistrali CAN. Przy wyborze mikrokontrolera kierowano się przede wszystkim wymaganiami stawianymi przez wymienione wcześniej urządzenia peryferyjne oraz dostępnością i ceną. Przy uwzględnieniu tych kryteriów zdecydowano się na zastosowanie mikrokontrolera Atmega 32M1, który w odróżnieniu od popularnych mikrokontrolerów z tej serii posiada zintegrowany kontroler CAN.

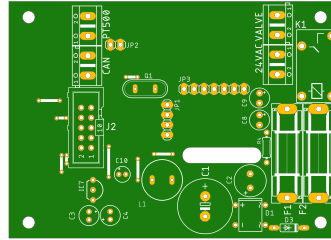
Mając już sprecyzowaną budowę urządzenia, przystąpiono do wykonywania schematu ideowego, posłużono się tutaj środowiskiem Autodesk Eagle, które pozwala w prosty sposób utworzyć projekt PCB na podstawie schematu ideowego. Wykonując schemat ideowy, intensywnie wykorzystywano dokumentacje techniczne stosowanych układów. Projekt rozpoczęto od sekcji zasilania zapewniającej napięcia: +12 V, +5 V oraz +3,3 V. Dalej skupiono się na układzie pomiaru rezystancji czujnika temperatury, komunikacji z wyświetlaczem oraz podłączeniu mikrokontrolera.

Po przygotowaniu i sprawdzeniu schematu ideowego przystąpiono do opracowywania projektu obwodu drukowanego. Projekt rozpoczęto od wykonania prototypowej obudowy i umieszczeniu w niej wyświetlacza, dzięki czemu możliwe było precyzyjne określenie położenia złącza taśmy wyświetlacza. Zdecydowano się tutaj na nietypowy zabieg, gdyż złącze umieszczono po przeciwnej stronie obwodu niż wyświetlacz. Przez to konieczne było wykonanie otworu, przez który będzie można przełożyć taśmę. Elementy przewlekane, które zajmują dużo miejsca rozłożono tak, aby nie kolidowały z umieszczonymi w obudowie przyciskami, a złącza śrubowe wyprowadzono w miejscu, gdzie zapewnią wygodne podłączenie przewodów.

Na rysunku 15.2 przedstawiono ukończony projekt obwodu drukowanego. Ścieżki stanowiące połączenia znajdują się na stronie dolnej, tam też przewidziano elementy przeznaczone do montażu powierzchniowego (ang. SMD, *surface-mount technology*). Na stronie górnej przewidziano miejsce na elementy dedykowane do montażu przewlekane (ang. THT, *Through-Hole Technology*). Zdecydowano się na takie niestandardowe połączenie dwóch wymienionych sposobów montażu elementów z uwagi na jednostronne wykonanie obwodu drukowanego. Decyzję o ułożeniu elementów podjęto ze świadomością, iż do celów produkcji zautomatyzowanej będzie konieczne wykonanie drugiego projektu obwodu drukowanego. Zaznaczyć należy, że głównym celem wykonywania tak zaprojektowanego obwodu było sprawdzenie słuszności schematu ideowego, przetestowanie działania zaplanowanych funkcji oraz wykonanie badań. W związku z tym istnieje duże prawdopodobieństwo, że projekt zawiera elementy wymagające udoskonalenia, co i tak wymusi konieczność wykonania zmian.



(a) strona dolna (druku)

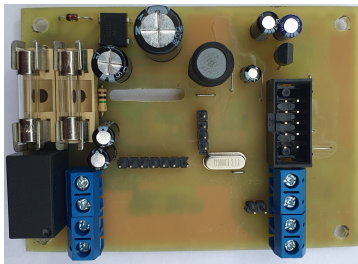


(b) strona górna

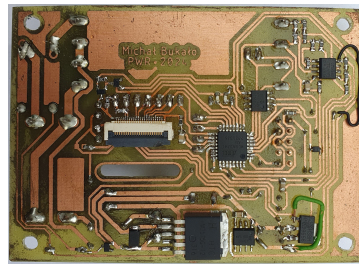
Rysunek 15.2. Projekt obwodu drukowanego

Niezwłocznie po zakończeniu prac nad projektem rozpoczęto wykonywanie prototypowego obwodu drukowanego i montażu elementów. Te montowano blokami funkcjonalnymi począwszy od układu zasilania i skończywszy na montażu mikrokontrolera. Po zamontowaniu danej grupy testowano jej funkcjonowanie, w ten sposób wykryto kilka błędów wynikających przede wszystkim z błędnego doboru wyprowadzeń elementów na etapie projektowania. Błędy te na bieżąco naprawiano i kontynuowano pracę.

Na rysunku 15.3 pokazano wykonany obwód drukowany po zmontowaniu. Poza drobnymi błędami w połączeniach układ na tym etapie pracował zgodnie z oczekiwaniami. Ostatnim etapem wykonywania projektu tego urządzenia było napisanie programu dla mikrokontrolera. Po tym urządzenie zostało poddane testom. Na rysunku 15.4 pokazano wygląd ukończonego urządzenia. Wartość środkowa to temperatura odczytana z czujnika. Wartość dolna jest wartością zadaną, może być modyfikowana przez użytkownika w określonym zakresie. Do obsługi przewidziano trzy przyciski: zwiększ, zmniejsz i zatwierdź.



(a) widok z góry

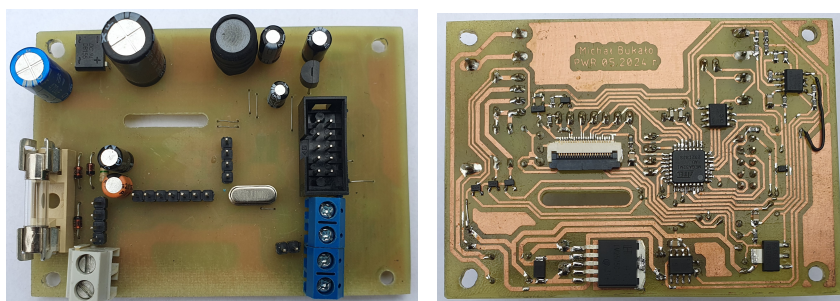


(b) widok z dołu

Rysunek 15.3. Zmontowany obwód drukowany regulatora temperatury zbiornika**Rysunek 15.4.** Przedni panel prototypowego regulatora temperatury

15.3.2. Sterownik agregatu chłodzącego

Drugim urządzeniem niezbędnym do budowy zaplanowanego systemu, jest sterownik odpowiadający za sterowanie pracą agregatu chłodzącego, czyli urządzenie regulujące temperaturę cieczy w obiegu płaszczy chłodzących. Dodatkowo przewiduje się tutaj wyjście sterujące przemiennikiem częstotliwości sprzęgniętym z pompą obiegową. W ogólnym przypadku niezbędne będzie wykonanie wejść monitorujących czujniki obecne w urządzeniu chłodzącym. Jednak na cele prototypowe nie zakłada się wykorzystania takich wejść, w związku z czym nie będą one obecne na projekcie. Projekty tego sterownika wykonano na podstawie wykonanego wcześniej regulatora temperatury. Bez zmian pozostało podłączenie wyświetlacza, pomiar temperatury i komunikacja za pośrednictwem CAN. Dostosowano jedynie liczbę wyjść, którą zwiększono do trzech i w związku z niewielką ilością miejsca w obudowie i znacznymi rozmiarami przekaźników o stosownym prądzie znamionowym umieszczono je poza obudowę na oddzielnym obwodzie drukowanym. Końcowe efekty prac przedstawiono na rysunku 15.5.



(a) widok z góry

(b) widok z dołu

Rysunek 15.5. Sterownik agregatu chłodzącego

Podobnie jak wcześniej, na zakończenie opracowano program mikrokontrolera będący modyfikacją programu regulatora temperatury.

15.3.3. Stabilizacja ciśnienia w instalacji hydraulicznej

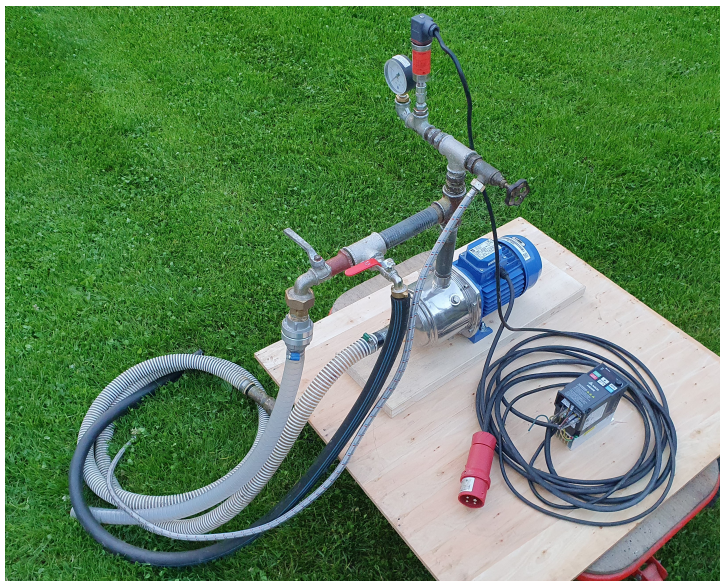
Innym poruszonym w pracy zagadnieniem jest sterowanie wydajnością pompy obiegowej mającej na celu utrzymanie ciśnienia w instalacji na zadanym poziomie. Ciśnienie służy tutaj jako pośrednia informacja o liczbie otwartych zbiorników, dzięki czemu daje możliwość zmniejszenia obrotów pompy przy niewielkiej liczbie chłodzonych zbiorników. Dodatkowo należy zaznaczyć, iż odczyt ciśnienia jest niewrażliwy na zmiany lepkości pompowanej cieczy. W przypadku pracy z roztworami glikolowymi jest to aspekt istotny. Zatem podejrzewa się, że sterowanie na podstawie charakterystyki określającej prędkość obrotową pompy na podstawie liczby otwartych elektrozaworów da gorsze rezultaty niż sterowanie nakierowane na stabilizację ciśnienia.

Dla sprawdzenia słuszności koncepcji regulacji wydajności pompy na bazie ciśnienia w instalacji wykonano prototypowy układ zawierający wszystkie istotne elementy, jak rzeczywista instalacja hydrauliczna. Dobór elementów rozpoczęto od pompy. Wykorzystano

pompe wielostopniową EBARA Matrix 3-4T/0.65 Q6BEG, ponieważ zgodnie z doświadczeniem autora jest ona jednym z chętniej wybieranych modeli w instalacjach średniej wielkości. Znając dokładne parametry silnika pompy, przystąpiono do wyboru przemiennika częstotliwości. Ostatnim elementem systemu jest przetwornik ciśnienia. Posiadając niezbędne elementy, przystąpiono do budowy makiety pozwalającej na przetestowanie koncepcji regulacji wydajności pompy w opisany sposób. Wykonano następujące podłączenie pompy:

- na króćcu ssawnym umieszczono wąż zakończony zaworem zwrotnym z sitkiem,
- na króćcu tłocznym wykonano kilka rozgałęzień, podłączono tam przetwornik ciśnienia i manometr oraz trzy zawory o różnych średnicach wewnętrznych.

Taki zestaw zaworów miał zapewnić możliwość symulacji zmiennego przepływu instalacji powodowanego przez zmieniającą się liczbę otwartych elektrozaworów. Makiety złożoną z wymienionych wcześniej elementów przedstawiono na rysunku 15.6. Wszystkie cztery węże umieszczono w jednym naczyniu z wodą. Ponieważ pompy tego typu nie mają zdolności samozasysających, układ napełniono przed jego uruchomieniem. Podłączono przemiennik częstotliwości do zasilania, przed tym umieszczając go w bezpiecznej odległości od wody, po czym przystąpiono do jego konfiguracji. Dokonano modyfikacji szeregu parametrów, która miała na celu przede wszystkim uruchomienie regulatora PID, który jako sygnał sprzężenia zwrotnego przyjmie odczyt z przetwornika ciśnienia oraz wartość wyjściową poda jako zadaną częstotliwość dla falownika.



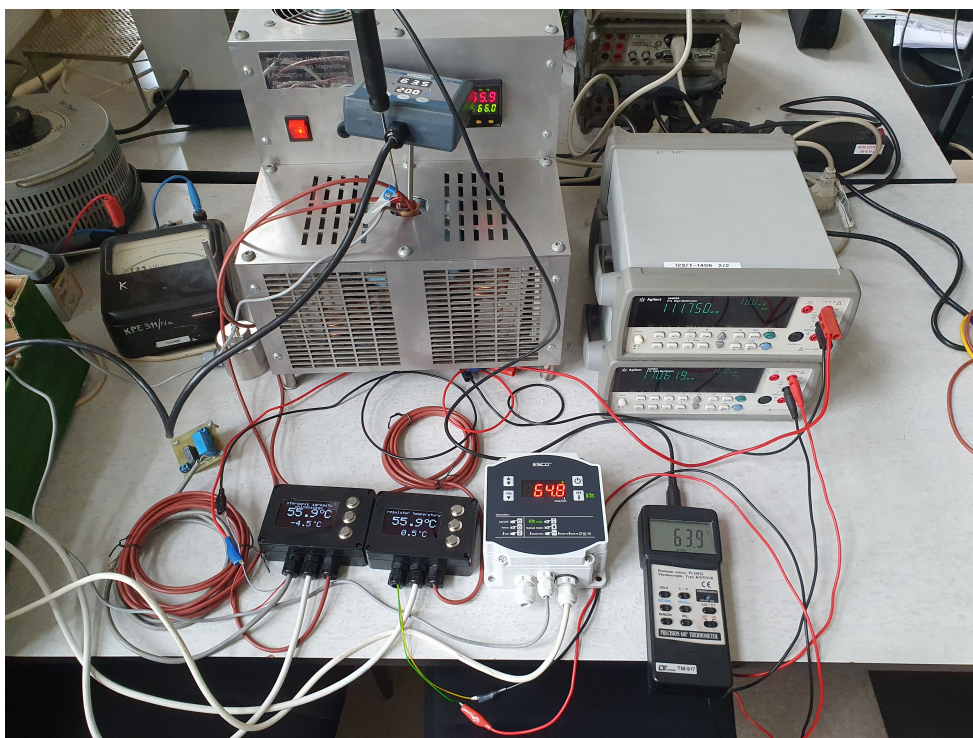
Rysunek 15.6. Makieta instalacji hydraulicznej o zmiennym przepływie

Układ po zmontowaniu i empirycznym doborze parametrów regulatora funkcjonował zgodnie z założeniami. Otwarcie wszystkich zaworów powodowało wzrost prędkości obrotowej silnika, tym samym zwiększając wydajność pompy. Analogicznie zamknięcie powodowało zmniejszenie prędkości obrotowej. Całościowo działanie układu w pełni spełniało pierwotne założenia i było w pełni satysfakcjonujące.

15.4. Uzyskane wyniki

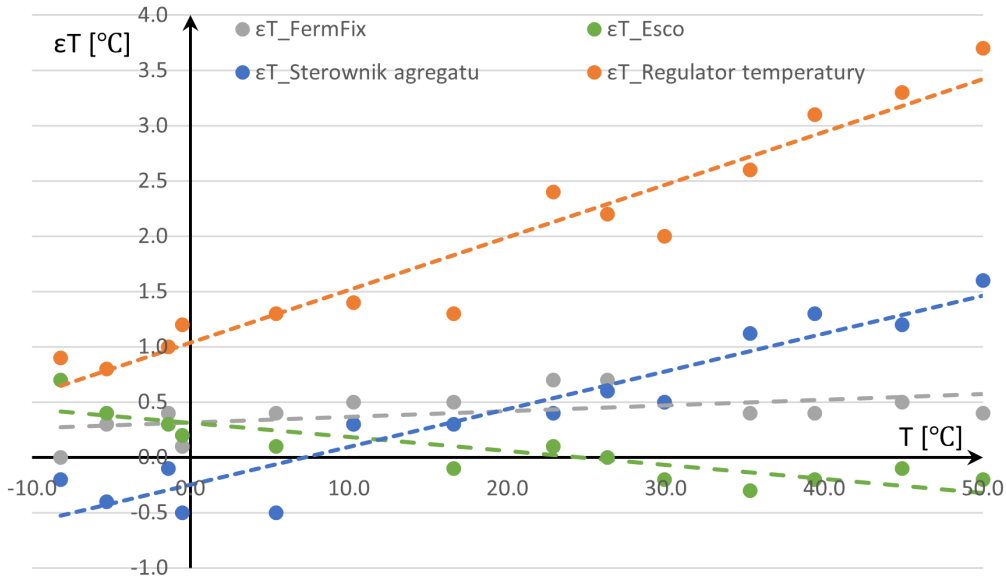
Badając działanie wykonanych modeli, uwagę zwracano na ogólne spełnienie oczekiwań w stosunku do urządzenia, jego przejrzystość i responsywność. W celu zapewnienia poprawnej regulacji temperatury niezbędne jest posiadanie wartości zmierzonej możliwie zbliżonej do wartości rzeczywistej. Mając już wykonane i sprawdzone dwa egzemplarze sterowników wykonano badanie mające na celu wskazać dokładność, z jaką jest mierzona temperatura. W tym celu odczyt z wykonanych urządzeń porównywano z termometrem wzorcowym oraz wykreślono przebieg błędu bezwzględnego temperatury. Dodatkowo wykonane urządzenia porównano z urządzeniami pełniącymi analogiczne funkcje, dostępnymi na rynku oraz stosowanymi w instalacjach chłodniczych.

Badanie odbyło się na stanowisku laboratoryjnym (rysunek 15.7), wyposażonym w przyrząd ze „studzienką”, w której możliwe jest regulowanie temperatury. W studzience umieszczono pięć czujników temperatury i dodatkowo zalano ją płynem niezamarzającym w celu wyrównania temperatur między nimi.



Rysunek 15.7. Stanowisko laboratoryjne przygotowane do przeprowadzenia porównawczego badania niepewności pomiaru temperatury

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 15.8. Zauważyć można, iż rozwiązania dostępne na rynku charakteryzują się mniejszą niepewnością pomiaru niż opisane w niniejszej pracy. Zwracając uwagę na utrzymujący się trend rosnącego błędu pomiaru, podejrzewa się, iż jest on związany z błędami konstrukcyjnymi, które po krótkiej analizie można bez problemu naprawić.



Rysunek 15.8. Przebieg błędów bezwzględnych pomiaru temperatury dla różnych regulatorów

15.5. Podsumowanie

Proces projektowania i budowy nawet pojedynczego urządzenia jest czynnością złożoną i wieloetapową. Zaprojektowanie systemu bazującego na większej liczbie urządzeń dodatkowo komplikuje postawione zadanie. Złożoność zadania pozwala jednak na dokładniejsze zapoznanie się z problemem oraz stałe poszerzanie wiedzy i umiejętności. Wykonując opisane tutaj pierwsze prototypy urządzeń, spotkano się z podstawowymi problemami, które w miarę możliwości usuwano na bieżąco. Dobrą praktyką okazuje się wykonywanie prototypu, jego wnikliwe badanie oraz nanoszenie poprawek. Zauważono, iż liczba prototypów niezbędnych do wykonania przed uzyskaniem w pełni zadowalającego efektu końcowego jest odwrotnie proporcjonalna do doświadczenia osoby pracującej nad projektem.

Projektując urządzenie, które prawdopodobnie będzie obsługiwane przez osoby nie mające specjalistycznej wiedzy technicznej, powinno się szczególną uwagę zwrócić na konstrukcję i funkcjonowanie interfejsu użytkownika. Oczywiście mile widziana jest estetyczna szata graficzna, jednak kwestią najistotniejszą jest tutaj odporność na błędy. Dodatkowo odpowiednio organizując sposób obsługi, możliwe jest zapewnienie większego komfortu oraz wygody użytkownika. Pozytywne wspomnienia związane z funkcjonowaniem takiego systemu mogą korzystnie wpłynąć na szanse jego sprzedaży. Aspektem, jaki nie był brany pod uwagę na etapie wykonywania i badania prototypu, jest ogólnie pojęty wygląd urządzeń. Produkt końcowy musi wyglądać nowocześnie i dobrze wpasowywać się w miejsce instalacji – winiarnię. Miejsce to często ma charakter prezencyjny, w związku z czym elementy umieszczone z przodu zbiornika, takie jak regulatory temperatury, wyjątkowo szybko zwracają uwagę odwiedzających.

Za kwestię najistotniejszą z technicznego punktu widzenia uznaje się tutaj bezawaryjne działanie oraz informowanie o wystąpieniu sytuacji awaryjnych. Nadmierne wychłodze-

nie bądź ogrzanie produktu znajdującego się w zbiorniku jest niedopuszczalne. W ogólnym przypadku trudno przewidzieć, kiedy dany element systemu ulegnie uszkodzeniu, jednak podchodząc starannie do wykonania projektu, można prawdopodobieństwo wystąpienia istotnej awarii ograniczyć. Ważny tutaj jest wybór odpowiedniego dostawcy części, tak aby mieć pewność co do ich jakości i pochodzenia.

Podsumowując, uzyskane efekty uznaje się za w pełni zadowalające. Wykonano dwa urządzenia zdolne do realizacji założonych zadań. Pomiar temperatury jest elementem wymagającym poprawy, po wstępnej analizie zlokalizowano prawdopodobne źródło niepewności pomiaru. Wprowadzenie zmian mających na celu poprawę dokładności pomiaru nie wymaga dużych nakładów pracy. Obsługa wyświetlacza OLED przebiega zgodnie z oczekiwaniami. Powinno się tutaj przewidzieć indywidualny zestaw czcionek dedykowany do wyświetlania znaków w oczekiwanym rozmiarze. Zastosowany algorytm obsługi przycisków sprawuje się bezbłędnie, można przeprowadzić w jego obszarze konsultacje skupione na charakterystyce działania określającej zachowanie w zależności od długości wciśnięcia. Komunikacja między wykonanymi urządzeniami za pośrednictwem sieci CAN działa prawidłowo. Wskazane jest zoptymalizowanie jej pod kątem obsługi dużej liczby urządzeń oraz komunikacji dwukierunkowej. Ponadto wskazane jest zapewnienie możliwości edycji parametrów pracy danego urządzenia za pośrednictwem odpowiedniego polecenia przesłanego przez sieć CAN. Możliwość takiej zmiany dotyczyć powinna przede wszystkim temperatury zadanej oraz trybu pracy.

Szeregowe zwarcie łukowe w instalacji elektrycznej niskiego napięcia

mgr inż. Kamila Żabicka
Elektrotechnika

dr inż. Michał Czosnyka
Katedra Energoelektryki

Celem pracy było zbadanie parametrów fizycznych i elektrycznych wpływających na rozwój szeregowego zwarcia łukowego oraz ilość energii wydzielanej w miejscu zwarcia w niskonapięciowych przewodach i kablach zasilających. Zrealizowano eksperymenty laboratoryjne na różnych rodzajach przewodów i przy różnych wartościach prądu, aby ocenić ich wpływ na iskrzenie. Wyniki badań wykazały, że przewód YDY jest najbardziej odporny na zwarcia łukowe, a OW wykazuje największe ryzyko pożarowe. Badania także wskazują, że zwarcia łukowe przy niskich prądach poniżej 2,5 A są niebezpieczne, co podważa założenia producentów detektorów AFDD.

16.1. Cel i założenia

Głównym celem było zrozumienie mechanizmów, które prowadzą do powstania i rozprzestrzeniania się zwarcia łukowego oraz określenie czynników, które mogą wpłynąć na jego intensywność i skutki, takie jak zagrożenie pożarem. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- przegląd literaturowy dotyczący zagadnienia,
- opracowanie technologii pomiaru, dobór urządzeń pomiarowych,
- przygotowanie próbek kablowych,
- badania laboratoryjne,
- ocena i analiza wyników badań,
- redakcja pracy.

16.2. Wstęp teoretyczny

Zwarcie to nieprzewidziane połączenie dwóch lub więcej punktów w systemie elektroenergetycznym, które w normalnych warunkach mają różne napięcia (punktem może być też ziemia). Zwarcie może powstać zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio [1].

16.2.1. Zwarcie łukowe (pośrednie)

Zwarcia łukowe (ang. *arc fault*) to zwarcia, w których między przewodami niezamierzenie tworzy się łuk elektryczny. Inaczej nazywane są również iskrzeniem (ang. *arcing*) [2]. Przykłady zwarcia przedstawiono na rysunku 16.1.



Rysunek 16.1. Przykładowe zwarcia łukowe

Zwarcia tego typu są zjawiskiem niebezpiecznym, lecz wciąż nie do końca zbadanym. Mogą one stanowić zagrożenie pożarowe, ponieważ w trakcie jego trwania wydzielona została duża temperatura oraz energia. Ze względu na złożoność zjawiska samego łuku elektrycznego wykrywanie tego typu zwarcia jest skomplikowane.

16.2.2. Rodzaje zwarcia łukowych

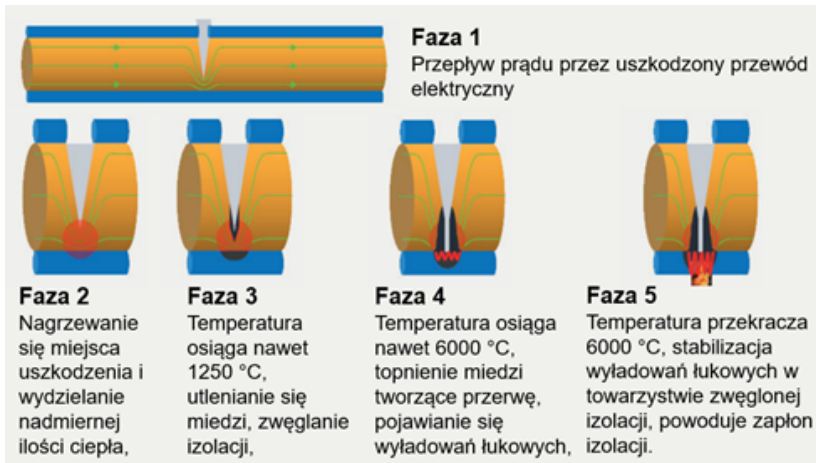
Istnieją dwa rodzaje zwarcia łukowych: szeregowe zwarcia łukowe oraz równoległe zwarcia łukowe. W równoległym zwarciu łukowym prąd łukowy przepływa między aktywnymi przewodnikami (zwykle izolowanymi) równoległe z obciążeniem obwodów. Mogą być spowodowane np. awarią izolacji lub obecnością przewodzącego zabrudzenia między przewodnikami linii. Zwarcia te można podzielić na:

- zwarcie faza–neutralny lub faza–faza,
- zwarcie faza–przewód ochronny/ziemia.

Przy szeregowym zwarciu łukowym prąd łukowy przepływa przez obciążenie (obciążenia) obwodu przez częściowe nacięcie lub przerwanie przewodu. Tego typu zwarcia są cięższe do wykrycia niż zwarcia równoległe. Najczęściej wynikają z uszkodzenia przewodu przez wygięcie, przecięcie, nacięcie lub przegryzienie przez zwierzęta.

16.2.3. Rozwój wyładowania łukowego w instalacji niskiego napięcia

Rozwój zwarcia szeregowego można przedstawić na przykładzie zwężenia w przewodzie w wyniku uszkodzenia. Prąd przepływający przez uszkodzenie nagrzewa przewód w miejscu zwężenia. Wzrost temperatury powoduje utlenianie się miedzi, a co za tym idzie – zwiększenie rezystancji przewodu. Wyższa rezystancja sprawia jeszcze większy wzrost temperatury i w końcu zwęglenie izolacji. Gaz w otoczeniu zaczyna się jonizować, po czym zaczynają pojawiać się iskrzenia. W ostatniej fazie wyładowania łukowe stabilizują się i powodują zapłon. Proces został przedstawiony na rysunku 16.2 [4].



Rysunek 16.2. Etapy powstawania łuku elektrycznego podczas szeregowego zwarcia łukowego [4]

16.3. Projekt i wykonanie

W części badawczej wykonano eksperymenty na próbkach kablowych, różniących się rodzajem przewodów oraz wartością prądu, aby ocenić ich wpływ na rozwój zwarcia łukowego.

Opracowując proces badań, zapoznano się z normą IEC 62606 dotyczącą detektorów AFDD oraz innymi pracami, w których konieczne było wytworzenie stabilnego zwarcia łukowego. Na ich podstawie zdecydowano przygotować dwuprzewodowe próbki. Wybrano trzy rodzaje przewodów sprawdzenia: YDY, OMY, OW. Są to przewody występujące w instalacjach niskiego napięcia w instalacjach budynkowych. Różnią się między sobą materiałem, z którego wykonano izolację lub rodzajem żyły.

Bazując na znajomości etapów rozwoju szeregowego zwarcia łukowego, próbki zostały przygotowane tak, aby móc badać rozwój zwarcia w 4 i 5 fazie, czyli zostały nacięte i zwęglone przy wykorzystaniu wysokiego napięcia.

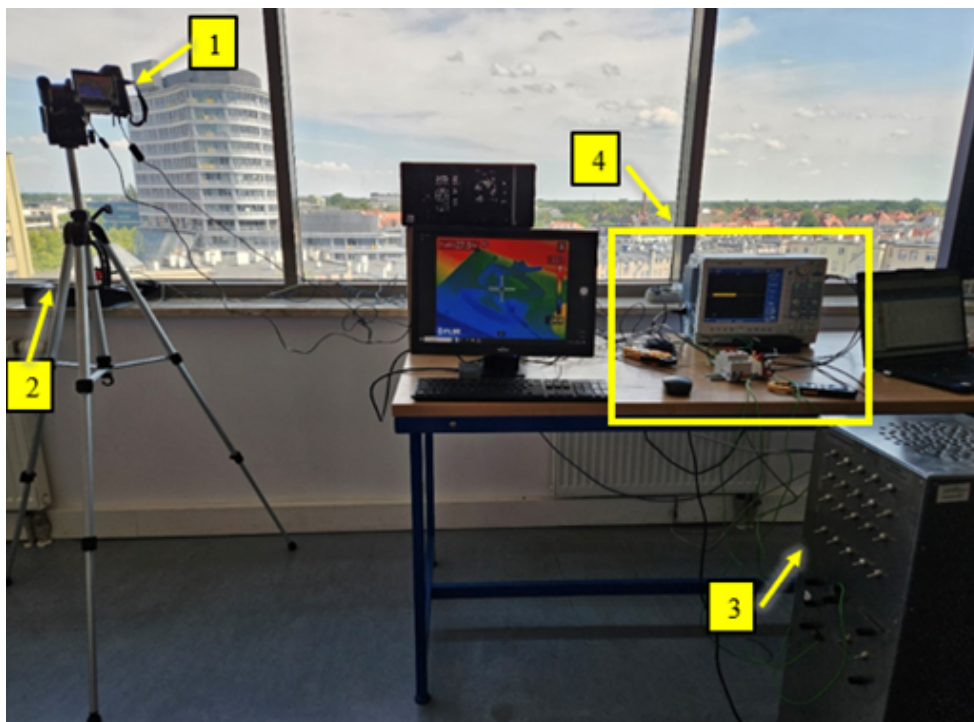
Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie, jaki wpływ na powstałe zwarcie łukowe mają rodzaj przewodu oraz zadany prąd. Prąd dobrano tak, aby móc zbadać reakcję poniżej i powyżej 2,5 A (czyli progu, poniżej którego AFDD nie działa) – 1 i 3 A oraz aby móc sprawdzić wpływ wielkości prądu na rozwój zjawiska (wartości w stosunku 1 do 2) – 5 i 10 A.

Dobór prądu do konkretnych próbek pokierowano wartością rezystancji izolacji próbek zmierzonej po zwęgleniu. Wykonano to tak, aby możliwe było porównanie próbek o zbliżonej wartości rezystancji izolacji, jak również przeanalizowanie wpływu również tego parametru na rozwój zjawiska.

W trakcie badań rejestrowano pomiary przebiegów prądu i napięcia zwarcia, temperatury próbki oraz obserwację reakcji.

Do przeprowadzenia badań stworzono stanowisko (rysunek 16.3) umożliwiające bezpieczne inicjowanie zapłonu łuku elektrycznego w próbkach kablowych. Do obciążenia układu wykorzystano dekadę rezystorową. Próbka została umiejscowiona na ceramicznych

podkładkach ze względu na występowanie wysokich temperatur. Układ został zabezpieczony detektorem AFDD, a na koniec został on wymieniony na wyłącznik nadprądowy w celu zbadania próbek, w których AFDD wykrył iskrzenie i rozłączył układ. Podłączono również dodatkowe cęgi prądowe w celu kontroli zadanego prądu. Pomiar temperatury realizowano dzięki wykorzystaniu kamery termowizyjnej podłączonej do komputera w celu zapisu nagrań. Oscyloskopem rejestrowano przebieg prądu (za pomocą cęgów prądowych) oraz napięcia (za pomocą sondy pomiarowej) w miejscu iskrzenia.



Rysunek 16.3. Stanowisko testowe: 1 – kamera termowizyjna, 2 – umiejscowienie próbki i rejestratora wideo, 3 – dekada rezystorowa, 4 – urządzenia zabezpieczające oraz pomiarowe

16.4. Uzyskane wyniki

Wyniki badań wykazały, że niektóre rodzaje przewodów są bardziej podatne na powstawanie łuku elektrycznego, a detektory AFDD skutecznie wykrywają zwarcia, przyczyniając się do zwiększenia bezpieczeństwa instalacji. Wyniki przeprowadzonych badań zebrano i przeanalizowano pod różnymi względami. Poniżej przedstawiono sposób analizy oraz jej wnioski.

Analizując wyniki, zauważono, że najczęstszą reakcją było małe, krótkie iskrzenie. Prawie wszystkie próbki rodzaju YDY (29/30) reagowały w ten sposób. Nie wystąpiły tam większe iskrzenia czy płomień. Duża część próbek rodzaju OMY (23/33) również reagowała małym, krótkim iskrzeniem. Mocne, dłuższe iskrzenia wystąpiły w większości dla prądu 1 A (6/7). Płomień wystąpił głównie dla próbek rodzaju OW (18/20), podobnie jak zadziałanie AFDD. Urządzenie nie zadziałało ani razu przy prądzie 1 A.

Z powyższych obserwacji można wywnioskować, że iskrzenie jest najbardziej intensywne dla niskiego prądu (poniżej zakresu działania detektora AFDD). Najbardziej odporny na mocne iskrzenie i płomień okazał się przewód YDY. Przewód OW wykazuje największą podatność na rozwój zwarcia łukowego. Najprawdopodobniej wynika to z materiału izolacji tego przewodu.

Przeprowadzono również szczegółową analizę określającą wpływ na rozwój szeregowego zwarcia łukowego poniższych parametrów:

- rodzaj przewodu,
- prąd zadany,
- rezystancja izolacji uszkodzonego przewodu.

Analiza przebiegów pozwoliła zauważyć, że szeregowe zwarcia łukowe powodują spadek napięcia w chwili wzrostu prądu. Specyfika tej charakterystyki ma wpływ na sposób wykrywania tego typu zwarc.

Analizując wyniki zauważono, że istotny wpływ ma rodzaj przewodu. Przewody typu YDY wykazały największą odporność na poważne uszkodzenia. Czyni je to najbezpieczniejszymi spośród badanych typów. Przewody OMY prezentują umiarkowane ryzyko, z dużą liczbą zarówno małych iskrzeń, jak i mocniejszych zwarc. Natomiast przewody OW okazały się najbardziej podatne na zwarcia łukowe i zapalenie się, co stwarza największe ryzyko pożarowe. Wynika z tego, że izolacja gumowa jest dużo bardziej podatna na palenie się niż izolacja z polwinitu, jednak wymaga dłuższego iskrzenia do zapłonu.

Kolejnym czynnikiem, którego wpływ zbadano był prąd zadany. Badania wykazały, że czas zwarcia był krótszy wraz ze zwiększeniem prądu zadanego. Większy prąd powodował szybszą degradację próbki, a tym samym przerwę w obwodzie i przerwanie zwarcia. Zależność ta pokazuje, że zwarcia przy wartości prądu 1 A były największym zagrożeniem pożarowym. Ze względu na to dalszy rozwój zabezpieczeń przeciwko zwarciom łukowym powinien skupiać się również na zwarcach przy niskich prądach.

Zestawienie uzyskanych wyników badań przedstawiono w tabeli 16.1.

Zauważono również, że detektor iskrzenia nie wykrył większości z badanych zwarc dla prądów 3, 5 i 10 A (działanie niezgodne z założeniami producenta). Nie wykrył również żadnego zwarcia dla prądu 1 A (działanie zgodne z założeniami producenta).

Badania wykazały, że założenie producenta o braku konieczności zabezpieczenia układu przed zwarciami łukowymi przy prądzie poniżej 2,5 A jest błędne, ponieważ zwarcia poniżej tej wartości są również niebezpieczne.

Kluczowy wpływ miała też rezystancja izolacji przewodu, czyli stopień jej uszkodzenia. Szeregowe zwarcie łukowe zachodzi, jeżeli rezystancja izolacji jest odpowiednio niska (w zależności od rodzaju przewodu, są to różne wartości). Uszkodzenia izolacji prowadziły do zwiększonego ryzyka iskrzenia i płomieni, co wskazuje na konieczność regularnej kontroli stanu izolacji w instalacjach elektrycznych.

Tabela 16.1. Zestawienie wyników badań ukazujące ilość wystąpień reakcji w zależności od rodzaju przewodu oraz prądu zadanego

Reakcja	Prąd zadany [A]	Rodzaj przewodu			Suma wystąpień
		OMY	OW	YDY	
Brak	1	0	0	0	0
	3	1	0	0	1
	5	0	1	0	1
	10	0	0	1	1
Małe, krótkie iskrzenie	1	6	1	8	15
	3	5	0	8	13
	5	6	3	7	16
	10	6	4	6	16
Mocne, dłuższe iskrzenie	1	3	3	0	6
	3	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
	10	1	0	0	1
Płomień	1	0	5	0	5
	3	1	5	0	6
	5	1	5	0	6
	10	0	3	0	3
Zadziałanie AFDD	1	0	0	0	0
	3	1	1	0	2
	5	1	5	0	6
	10	1	2	0	3
Suma wystąpień		33	38	30	101

16.5. Podsumowanie

Szeregowe zwarcia łukowe w instalacjach niskiego napięcia są istotnym zagadnieniem w obecnych czasach ze względu na zagrożenie pożarowe, a jednocześnie niewystarczająca zbadanie zagadnienia i jego właściwości.

Praca dotyczyła badania rozwoju szeregowego zwarcia łukowego w przewodach niskonapięciowych oraz energii wydzielanej w trakcie tego procesu. Celem było zrozumienie mechanizmów prowadzących do powstawania zwarć oraz ocena wpływu różnych parametrów, takich jak rodzaj przewodu, wartość prądu oraz stan izolacji.

W ramach badań laboratoryjnych przygotowano próbki kablowe, które następnie poddano testom na specjalnym stanowisku testowym. Przeprowadzone badania pozwoliły zgłębić ten temat i wyciągnąć istotne wnioski o zachowaniu się szeregowego zwarcia łukowego oraz wpływu niektórych czynników.

Wyniki wykazały, że przewody YDY są najodporniejsze na uszkodzenia, a OW najbardziej podatne na rozwój zwarcia i ryzyko pożaru. Zauważono również, że zwarcia przy wartości prądu 1 A były największym zagrożeniem pożarowym. Detektory AFDD natomiast nie wykrywają większości zwarć przy prądach poniżej 2,5 A, co wskazuje na konieczność poprawy zabezpieczeń dla niskoprądowych zwarć.

W pracy tej przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań szeregowych zwarć łukowych w instalacjach niskiego napięcia, które pozwalają wytyczyć kierunek kolejnych badań tego zjawiska.

Bibliografia

- [1] Pijarski P., Kacejko P., Machowski J., Smolarczyk A., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Polska, 2022.
- [2] Norma IEC 62606:2013. General requirements for arc fault detection devices, 2013.
- [3] Siemens Sp. z o. o., *5SM6 AFDD – zgodne z normami, sprawdzone zabezpieczenie*, 2016.
- [4] Siemens Sp. z o. o., *5SM6 AFD units*, 2016.

Możliwości wykorzystania spektrum wyższych częstotliwości w prądzie silnika indukcyjnego do wykrywania jego uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych

mgr inż. Dawid Smolarek
Elektrotechnika

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

W pracy magisterskiej przeanalizowano możliwości zastosowania analizy sygnatury elektrycznej ESA (ang. *Electrical Signature Analysis*) w diagnostyce uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych w średnich oraz dużych silnikach indukcyjnych. W pracy przeprowadzono również studia literaturowe dotyczące ochrony silników WN przed zakłóceniami. Szczegółowo zbadano zabezpieczenie Multilin 869 firmy General Electric, oceniając jego skuteczność w wykrywaniu uszkodzeń oraz wpływ algorytmu ESA na możliwości wcześniejszego reagowania na niezgodne z normalnym stanem pracy silnika. Zostały również przebadane inne kryteria zabezpieczeniowe zabezpieczenia Multilin 869, które są standardowo używane w tego typu zabezpieczeniach. Wyniki wykazały, że zastosowanie kryterium ESA umożliwiło znaczną poprawę w precyzji wykrywania problemów, co przyczynia się do zwiększenia niezawodności systemów napędowych i umożliwi wcześniejsze wykrywanie usterek – tzw. strategia proaktywna utrzymania ruchu elektrycznego.

17.1. Cel i założenia

Celem pracy była ocena dostępnych na rynku rozwiązań diagnostyki silnika indukcyjnego, opartych na analizie spektrum wyższych częstotliwości (ESA) w jego prądzie. Główne założenia projektowe realizowanej pracy to:

- studia literaturowe dotyczące realizacji diagnostyki uszkodzeń mechanicznych i elektrycznych w oparciu o analizę spektrum wyższych częstotliwości w sygnale prądowym,
- ocenę możliwości i skuteczności proponowanych rozwiązań na bazie dostępnych publikacji,

- zapoznanie się z rozwiązaniem ESA oferowanym przez General Electric w urządzeniu Multilin 869 dostępnym na uczelni i przedstawienie w pracy szczegółów rozwiązania,
- odczyt, analizę i interpretację pozyskanych danych z wdrożonej aplikacji w wybranym obiekcie,
- wykonanie badań eksperymentalnych ESA zaimplementowanego w Multilin 869 wraz z analizą uzyskanych wyników.

Praca miała charakter eksperymentalny (eksperyment rzeczywisty) i była związana ze współpracą z przemysłem – z firmą General Electric (GE) z siedzibą w Wałbrzychu.

17.2. Wstęp teoretyczny

Analiza ESA jest opatentowaną przez firmę General Electric metodą kompleksowej diagnostyki uszkodzeń silnika. Jest to metoda wykorzystująca analizę sygnatury prądu silnika MCSA (ang. *Motor Current Signature Analysis*) oraz analizę sygnatury mocy chwilowej IPSA (ang. *Instantaneous power signature analysis*). W zależności od aktualnych parametrów pracy, jak np. obciążenia silnika, kryterium korzysta z analizy MCSA lub IPSA [1–4]. Pomiar FFT (ang. *Fast Fourier Transformation*) prądu w odpowiednim paśmie częstotliwości pozwala przeanalizować składowe częstotliwościowe [5, 6]. Kiedy wirnik ulega uszkodzeniu, w widmie tego prądu można zaobserwować pojawienie się charakterystycznych częstotliwości, co można matematycznie opisać za pomocą wzoru (17.1).

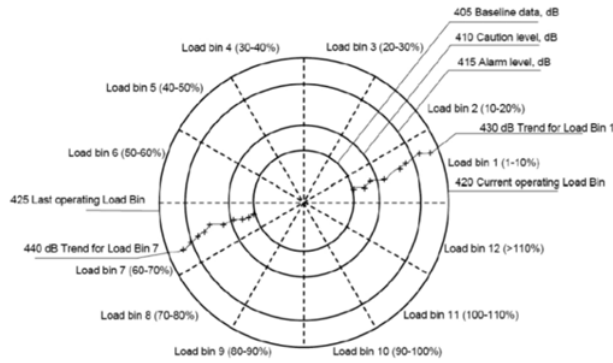
$$f_p = (1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \cdot f_s \quad (17.1)$$

gdzie:

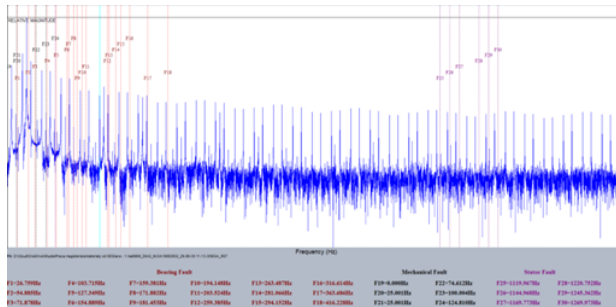
- f_s – częstotliwość sieciowa,
- s – poślizg,
- k – kolejna liczba całkowita licząc od 1, która przedstawia kolejne harmoniczne. Największą amplitudę osiąga przy $k = 1$.

Wyznaczanie częstotliwości harmonicznych oraz ich amplitud jest utrudnione przez zmienne obciążenie silnika (poślizg silnika). Dlatego aby zapewnić, że prąd ma stały przebieg, należy utrzymać obciążenie na stałym poziomie podczas zbierania próbek pomiarowych. Z tego powodu algorytm ESA generuje wykresy kołowe (rysunek 17.1), które przedstawiają graficznie historię zmian amplitudy wyższych harmonicznych odpowiadających za konkretny rodzaj uszkodzenia. Koło uwzględnia trzy poziomy dB: wartość bazową dB odpowiadającą wartości k , gdzie zaobserwowano największą zmianę w dB, oraz ustawienia poziomów, które stanowią promienie okręgów odpowiadających strefom – bazową, ostrzegawczą i alarmową. Koło to jest podzielone na 12 równych sekcji, każda obejmuje 30 stopni obwodu, odpowiadając każdemu przedziałowi obciążenia. Dla każdego typu uszkodzenia jest tworzone osobne koło ESA – predykcji uszkodzeń łożysk, uszkodzeń mechanicznych oraz uszkodzeń stojana silnika [6–8].

Dla każdego typu uszkodzeń są wyznaczane nowe markery uszkodzeń (rysunek 17.2) – są to wskaźniki wyższych częstotliwości dla konkretnego rodzaju uszkodzenia silnika. Kryterium ESA samodzielnie uczy się diagnozowanego urządzenia, alarmuje o nieprawidłowościach w działaniu silnika i prezentuje dane w sposób przystępny i zrozumiały dla elektryków zajmujących się jego eksploatacją [6–8].



Rysunek 17.1. Stan silnika przedstawiony wizualnie w formacie wykresu kołowego



Rysunek 17.2. Wykres funkcji amplitudy względem częstotliwości kryterium ESA wyższych harmonicznych wyznaczonych przez zabezpieczenie z zaznaczonymi markerami uszkodzeń

17.3. Projekt i wykonanie

Badania eksperymentalne przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia Omicron CMC 356, które jest zaawansowanym narzędziem do testowania zabezpieczeń elektroenergetycznych (rysunek 17.3). Omicron CMC 356 umożliwił symulację różnych scenariuszy pracy i awarii silnika indukcyjnego, co pozwoliło na dokładną weryfikację działania kryteriów zabezpieczeniowych zabezpieczenia Multilin 869. Tester posiada prądowe oraz napięciowe kanały wyjściowe, za pomocą których można regulować w sposób ciągły amplitudę, przesunięcia fazowe oraz częstotliwości prądów i napięć. Zostały przebadane następujące kryteria zabezpieczeniowe:

- kryterium podnapięciowe oraz nadnapięciowe,
- kryterium przeciążeniowe oraz zwarciove,
- zabezpieczenie od asymetrii zasilania,
- kryterium zwarciove, podprądowe oraz nad/podczęstotliwościowe.



Rysunek 17.3. Zdjęcie stanowiska pomiarowego do badania kryteriów zabezpieczeniowych zabezpieczenia Multilin 869: 1 – laptop z oprogramowaniem EnerVista służący do programowania zabezpieczenia, 2 – zabezpieczenie Multilin 869, 3 – uniwersalny tester przekaźników OMICRON CMC 356 wraz z laptopem z zainstalowanym oprogramowaniem Test Universe, które służy to sterowania pracą testera

W pracy przeprowadzona została krytyczna analiza trzech wybranych zabezpieczeń silnikowych:

- GE Multilin 869,
- Schneider Electric MiCOM P211,
- Siemens SIPROTEC 7SK82.

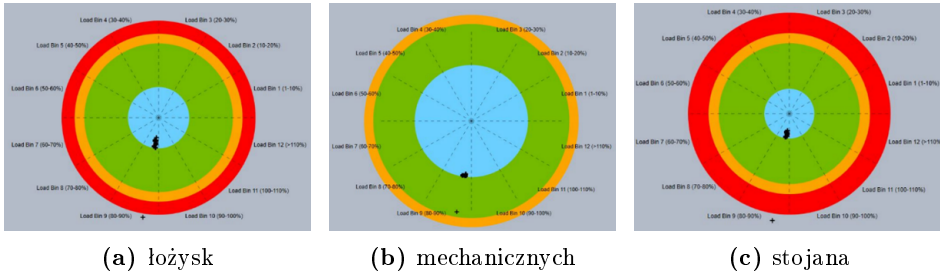
Każde z tych zabezpieczeń jest szeroko stosowane w przemyśle do ochrony i monitorowania pracy silników elektrycznych. Analiza obejmuje opis funkcjonalności każdego zabezpieczenia oraz porównanie ich pod kątem specyfikacji, funkcji ochronnych i dodatkowych możliwości [9–11].

Następnym zagadnieniem poruszonym w pracy było odczyt, analiza i interpretacja pozyskanych danych z wdrożonej aplikacji w przemyśle. We współpracy z oddziałem firmy General Electric w Wałbrzychu udało się pozyskać dane z wdrożonych zabezpieczeń w zakładzie przemysłowym. Omówiono jak dane te są gromadzone, jakie informacje są rejestrowane oraz jakie metody analityczne zostały zastosowane do ich interpretacji.

17.4. Uzyskane wyniki

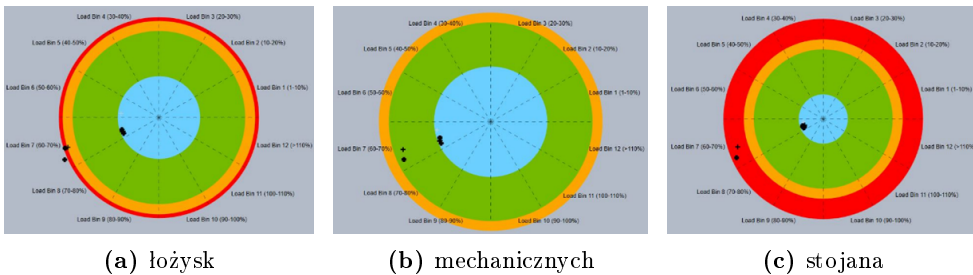
Zostały przeanalizowane przypadki zastosowania ESA w dwóch silnikach. Pierwszy przypadek pokazuje wykresy kołowe obrazujące proces uczenia się algorytmu ESA. Każdy rodzaj uszkodzenia ma własny wykres (rysunek 17.4). Mimo że ogólne pomiary wykazują prawidłowe wyniki, odchylenia w kilku punktach dotyczących charakterystyk predykcji łożysk i stojana wskazują na konieczność dalszej obserwacji. Wszystkie trzy charakterystyki (łożysk, mechaniczna i stojana) pokazują prawidłowe pomiary bazowe, co sugeruje, że nauka algorytmu ESA dla tego silnika przebiegła w sposób prawidłowy i pozwalający na prawidłowe zadziałanie w sytuacji zagrożenia wynikającego z uszkodzeń elektrycznych bądź mechanicznych silnika. Można również zaobserwować, że wszystkie punkty znajdują się na jednej ćwiartce charakterystyki, określającą poziom obciążenia silnika między 80%

a 90% obciążenia znamionowego. Oznacza to, że silnik po zaimplementowaniu algorytmu ESA działał jedynie w tym zakresie obciążenia. W przypadku zmiany obciążenia konieczna jest ponowna nauka stanu silnika przez algorytm ESA dla nowej wartości obciążenia.



Rysunek 17.4. Charakterystyki predykcji uszkodzeń

W przypadku drugiego z analizowanych silników (rysunek 17.5) można zaobserwować, że algorytm również prawidłowo dokonał pomiaru wartości bazowych, a więc zakończył z powodzeniem etap „nauki” zachowania się silnika. Analiza danych wskazuje, że mimo kilku odchyżeń w pomiarach łożysk i stojana zmiany te były chwilowe i nie sugerują rozwijających się problemów w prawidłowym działaniu silnika. Wykresy sugerują, że doszło prawdopodobnie do pobudzenia algorytmu ESA na skutek dynamicznych zmian obciążenia, które miały wpływ na wał silnika. Pobudzenie ESA było krótkotrwałe, co sugeruje, że zmiany dynamiczne miały charakter chwilowy. Można również zaobserwować, że tak jak w przypadku pierwszego analizowanego silnika mamy do czynienia z pracą tylko w jednym zakresie obciążenia wynoszącym między 60% a 70% obciążenia znamionowego [12].



Rysunek 17.5. Charakterystyki predykcji uszkodzeń

Podczas krytycznej analizy trzech wybranych zabezpieczeń silnikowych GE Multilin 869, Schneider Electric MiCOM P211 oraz Siemens SIPROTEC 7SK82 dokonano analizy funkcjonalności każdego zabezpieczenia oraz porównano je pod kątem specyfikacji, funkcji ochronnych i dodatkowych możliwości, co zaprezentowano w tabeli 17.1.

Można zauważyć, że wszystkie najważniejsze funkcje zabezpieczeniowe, takie jak ochrona termiczna, zwarciova oraz podstawowe kryteria związane z ochroną silników elektrycznych wysokiego napięcia można znaleźć w każdym z omawianych zabezpieczeń. Głównym czynnikiem rozróżniającym zabezpieczenia jest możliwość zaawansowanej diagnostyki i różnego rodzaju funkcji predykcyjnych oraz proaktywnych, wpływających na

zwiększenie skuteczności działania strategii utrzymania ruchu. Zabezpieczenie Multilin 869 oraz SIPROTEC 7SK82 pod względem diagnostyki oraz funkcji prewencyjnych wypadają bardzo dobrze, zabezpieczenie firmy General Electric ma przewagę nad zabezpieczeniem firmy Siemens jedynie w postaci kryterium ESA oraz możliwości generowania automatycznych raportów o stanie technicznym silnika [13].

Tabela 17.1. Tabela porównawcza funkcjonalności omawianych zabezpieczeń

Funkcje	Multilin 869	MiCOM P211	SIPROTEC 7SK82
Ochrona przeciążeniowa	Tak	Tak	Tak
Zabezpieczenie przed zwarciami	Tak	Tak	Tak
Monitorowanie prądu	Tak	Tak	Tak
Ochrona termiczna	Tak	Tak	Tak
Obsługa zdalna	Tak	Tak	Tak
Automatyczne ponowne załączanie	Tak	Tak	Tak
Rejestracja zdarzeń	Tak	Tak	Tak
Komunikacja	IEC 61850, Modbus RTU, DNP3	Modbus RTU	IEC 61850, Modbus TCP, DNP3
Funkcje kontroli i sterowania	Zaawansowane	Podstawowe	Zaawansowane
Funkcje diagnostyczne	Zaawansowane	Podstawowe	Zaawansowane
Analiza zakłóceń	Zaawansowana	Podstawowa	Zaawansowana
Zarządzanie energią	Tak	Nie	Tak
Kryterium ESA	Tak	Nie	Nie

Podczas badań eksperymentalnych przeprowadzono szereg testów kryteriów zabezpieczeniowych zaimplementowanych w zabezpieczeniu Multilin 869 przy użyciu testera OMICRON CMC 869. Ustalono czas własny zabezpieczenia na około 23 ms, co jest istotne dla precyzyjnych nastaw oraz selektywności zabezpieczeń. Zbadano również współczynnik powrotu, który różni się w zależności od kryterium: dla podnapięciowego wynosi 1,02, dla nadnapięciowego wynosi 0,97, dla zwarciovego 0,96, a dla podprądowego 1,06. Wyniki te zgadzają się z wartościami katalogowymi producenta, z wyjątkiem kryteriów nad- i podczęstotliwościowych, gdzie współczynnik powrotu wyniósł 1, co wynika z dużej dokładności zabezpieczenia i ograniczeń testera. Ważnym elementem badań było także ręczne obliczenie kryterium asymetrii prądowej, co jest istotne, gdyż każdy producent w inny sposób definiuje oraz wylicza współczynnik asymetrii.

17.5. Podsumowanie

W pracy przeprowadzono szczegółową analizę oraz badania zabezpieczeń silników indukcyjnych, skupiając się na zabezpieczeniu Multilin 869. Celem badań było zrozumienie i ocena skuteczności różnych kryteriów zabezpieczeniowych w ochronie silników przed uszkodzeniami wynikającymi z nienormalnych stanów pracy. Przede wszystkim metody ESA i MCSA stanowią efektywne narzędzia do wczesnego wykrywania zarówno elektrycznych, jak i mechanicznych uszkodzeń. Obie te metody pozwalają na identyfikację

problemów jeszcze przed wystąpieniem poważniejszych awarii, co ma kluczowe znaczenie dla utrzymania ciągłości pracy w przemyśle. Zastosowanie zaawansowanej diagnostyki, takiej jak analiza prądów, napięć oraz pomiar temperatury, jest kluczowe w celu wprowadzenia w sposób skuteczny oraz dokładny strategii proaktywnej utrzymania ruchu dla zakładów przemysłowych. Multilin 869 wykorzystuje te techniki do monitorowania stanu silnika i generowania raportów diagnostycznych. Automatyczne raporty, takie jak „Health Report”, są niezwykle użyteczne, gdyż dostarczają szczegółowych informacji o stanie silnika, umożliwiając wczesne wykrywanie potencjalnych problemów i podejmowanie odpowiednich działań zapobiegawczych.

Analiza porównawcza dostępnych na rynku zabezpieczeń silnikowych, takich jak Multilin 869, MiCOM P211 i SIPROTEC 7SK82, pozwala na wyłonienie najbardziej optymalnych rozwiązań w kontekście specyficznych potrzeb przemysłowych. Przeprowadzona analiza porównawcza wykazała, że każde z trzech analizowanych zabezpieczeń ma swoje unikalne zalety i jest optymalne w różnych kontekstach aplikacyjnych. Wybór odpowiedniego zabezpieczenia silnikowego powinien być uzależniony od specyficznych wymagań aplikacji, takich jak potrzeba zaawansowanej diagnostyki, prostoty obsługi czy też możliwości integracyjnych. Każde z analizowanych zabezpieczeń ma swoje silne strony, które mogą zdecydować o potencjalnym wyborze przez użytkownika.

Podsumowując, badania nad kryterium ESA w zabezpieczeniu Multilin 869 firmy General Electric dostarczyły istotnej wiedzy na temat prewencji uszkodzeń, co może poprawić bezpieczeństwo i niezawodność pracy silników. Zastosowanie zaawansowanych technik diagnostycznych i ochronnych minimalizuje ryzyko awarii i optymalizuje pracę silników w różnych warunkach. Dalszy rozwój zabezpieczeń może jeszcze bardziej zwiększyć ich skuteczność, jest to szczególnie ważne w kontekście rosnących wymagań przemysłowych i konieczności adaptacji do nowych systemów napędowych.

Bibliografia

- [1] Sobolewski A., Znaczenie harmoniczných żłbkowych w diagnostyce uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego *Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej* **2006**, 4(40).
- [2] Dehina W., Boumehraz M., Kratz F., Diagnosis and Comparison between Stator Current Analysis and Vibration Analysis of Static Eccentricity Faults in The Induction Motor *The 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, 25–27 September **2019**, Elazig, Turkey.
- [3] Wildi T., *Electrical machines, drives, and power systems*; Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2006.
- [4] Horowitz S., Phadke A., *Power system relaying third edition*; John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, England, 2008.
- [5] Kowalski C., Kanior W., Ocena skuteczności analiz FFT, STFT i falkowej w wykrywaniu uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* **2007**, 60.
- [6] Juszczak A., Diagnostyka silników wykorzystująca wielkości pomiarowe aparatury zabezpieczeniowej, *Czasopismo Napędy i Sterowanie* **2018**, 20(9).
- [7] Juszczak A., Multilin 896 zabezpieczenie silnika z zaawansowaną diagnostyką predykcyjną, Prezentacja rozwiązania firmy General Electric, 2022.
- [8] General Electric, 869 Electrical Signature Analysis (ESA), GE Proprietary Information-Class III (Confidential), 2023.

- [9] Multilin™ 869 Comprehensive Motor Protection and Management for Medium and Large Motors, General Electric Company, 140905 v1, 2014.
- [10] Siemens, SIPROTEC 7SK82, Zabezpieczenie silnika, 2018.
- [11] Schneider Electric, MiCOM P211, Zabezpieczenie Silników Trójfazowych, Zakład Automatyki i Systemów Elektroenergetycznych, Świebodzice.
- [12] GE Grid Solution, Multilin 8 Series Applying Electrical Signature Analysis in 869 for Motor M&D Application Note, GE Publication Number: GET-20060, 2018.
- [13] Camachi B., Chenaru O., Ichim L., Popescu D., A practical approach to IEC 61850 standard for automation, protection and control of substations. *9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, **2017**, Targoviste, Romania.

Zastosowanie sztucznej inteligencji w procesie sortowania przedmiotów z wykorzystaniem robota przemysłowego

mgr inż. Igor Powązka
Automatyka Przemysłowa

dr inż. Paweł Ewert
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Projekt dotyczył stworzenia programu sortującego przedmioty przy wykorzystaniu robotów przemysłowych i sztucznej inteligencji. Celem było opracowanie aplikacji, która umożliwiłaby sortowanie elementów na podstawie liczby widocznej na ich powierzchni. System składał się z dwóch robotów przemysłowych, kamery internetowej, komputera oraz środowisk programistycznych MATLAB i RT Toolbox 3. Kamera służyła do wykonywania zdjęć obiektów, a oprogramowanie MATLAB z wytrenowaną konwolucyjną siecią neuronalną analizowało obrazy i klasyfikowało obiekty. Roboty przemysłowe sortowały obiekty zgodnie z otrzymanymi instrukcjami. Wyniki przeprowadzonych testów potwierdziły skuteczność opracowanego systemu. Napisany program był w stanie poprawnie rozpoznawać liczbę na obiektach i sortować przedmioty z wysoką dokładnością.

18.1. Cel i założenia

Celem pracy była analiza możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji w procesie sortowania przy wykorzystaniu robotów przemysłowych. Głównym założeniem projektu było stworzenie programu wykorzystującego środowiska MATLAB, RT Toolbox 3 oraz dwa roboty przemysłowe, który umożliwiał sortowanie przedmiotów pod względem liczby występującej na nich. Zakres pracy obejmował:

- dostosowanie stanowiska laboratoryjnego do potrzeb opracowanego procesu sortowania,
- stworzenie komunikacji między robotami,
- napisanie w środowisku MATLAB programu do wykonywania i rozdzielania zdjęć oraz skanowania kodów kreskowych,
- wytrenowanie w środowisku MATLAB sieci CNN umożliwiającej odczytanie cyfr na sortowanych elementach,

- przygotowanie w środowisku RT ToolBox3 programów sterujących pracą robotów,
- weryfikację eksperymentalną opracowanego algorytmu sortowania.

18.2. Wstęp teoretyczny

Robotyka to dziedzina nauki i technologii skupiająca się na projektowaniu robotów, mechanice, kontroli i kwestiach społeczno-ekonomicznych. Dzieli się na działy: ogólny, teoretyczny, przemysłowy i mobilny [1].

Robot to maszyna, która może wykonywać zadania automatycznie, z wieloma stopniami swobody, naśladując ludzkie ruchy. Roboty przemysłowe wykonują zadania manipulacyjne i lokomocyjne, podczas gdy roboty mobilne wykonują funkcje lokomocyjne. Manipulatory naśladują ruchy górnej części ciała człowieka [1–3].

Podział robotów ze względu na strukturę kinematyczną (rysunek 18.1) ma na celu klasyfikację maszyn na podstawie sposobu łączenia par kinematycznych. Struktura szeregowo oznacza, że przeguby połączone są w otwarty łańcuch kinematyczny, a struktura równoległa połączona jest w zamknięty łańcuch kinematyczny [1].



Rysunek 18.1. Klasyfikacja robotów przemysłowych ze względu na strukturę kinematyczną [1]

Roboty antropomorficzne ze względu na swoją budowę, która jest podobna do ramienia człowieka, potocznie nazywane są robotami ramieniowymi. Charakteryzują się konstrukcją, która składa się z samych przegubów obrotowych. Najczęściej posiadają pięć lub sześć przegubów. Przestrzenią roboczą robotów przegubowych jest niepełna kula. Jest to najpopularniejszy typ robotów wykorzystywanych w przemyśle [1, 3].

Roboty SCARA mają dwie osie obrotowe i jedną oś przyrządkową, a powierzchnia robocza tego typu robotów jest zbliżona do walca. Roboty typu SCARA są najczęściej stosowane do zadań wymagających dużej dokładności [3].

Rozwój sztucznej inteligencji rozpoczął się w podobnym czasie co rozwój robotyki, w latach pięćdziesiątych dwudziestego wieku. Początkowo był spokojny i głównie ograniczał się do konstruowania nowych algorytmów, ale wraz z rozwojem techniki komputerowej zwiększył swoje tempo. Aktualnie sztuczna inteligencja coraz częściej pojawia się w życiu wszystkich ludzi [4].

Sztuczna inteligencja dzięki posiadaniu możliwości do adaptacji pozwoliła robotom przemysłowym na zwiększenie ich możliwości przez bardziej autonomiczną pracę. Jednym z przykładów zastosowania sztucznej inteligencji w robotyce jest zaimplementowanie systemu wizyjnego, którego celem jest rozpoznawanie różnych obiektów w otoczeniu robota. Posiadając tę informację robot jest w stanie wykonywać takie prace, jak: kontrola jakości, sortowanie lub manipulowanie przedmiotami będącymi w ruchu. Posiadanie obrazów z kamer może również zostać wykorzystane do zaplanowania ruchów robota w celu uniknięcia kontaktu z występującą przeszkodą [5].

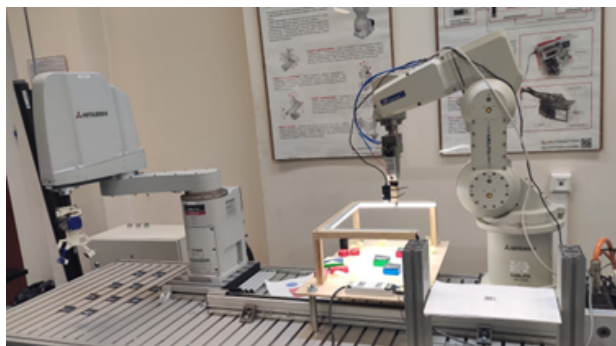
Podstawowym elementem inteligentnych robotów są różnego typu czujniki. Mogą to być kamery, czujniki dotyku, czujniki odległości i inne. Pomagają one robotom na zobrazowanie środowiska pracy w celu adaptacji do zmieniających się warunków. Zebrane dane są analizowane i przetwarzane przez zainstalowany procesor. Zastosowanie sztucznej inteligencji jest jedną z części przetwarzania danych, gdzie robot jest w stanie podejmować własne decyzje, które są zgodne z algorytmem sterowania [6].

18.3. Projekt i wykonanie

Stanowisko laboratoryjne (rysunek 18.2) zostało zbudowane w taki sposób, aby móc przeprowadzić proces sortowania elementów przy wykorzystaniu sieci neuronowej. Zadanie to można zrealizować dzięki wymianie informacji między wszystkimi jego elementami składowymi. W skład stanowiska wchodzi:

- robot RV-3SB z chwytakiem pneumatycznym, do którego przymocowana jest kamera służąca jako czujnik wizyjny oraz elektromagnes trzymający, potrzebny do manipulowania sortowanymi elementami. Zadaniem robota RV-3SB jest przenoszenie kamery w wymagane miejsca oraz podnoszenie i odkładanie sortowanych elementów;
- robot RH-6FH, którego zadaniem jest pobieranie elementów z osi liniowej oraz odkładanie ich w miejsca docelowe;
- kontroler CR2B-574 służy do sterowania pracą robota RV-3SB. Odpowiada za przechowywanie i realizację stworzonych programów. Za jego pomocą steruje się sygnałami wyjściowymi służącymi między innymi do komunikacji z robotem RH-6FH, sterowania pracą osi liniowej i aktywowania elektromagnesu;
- kontroler CR750-Q wykorzystywany jest do sterowania ruchem robota RH-6FH i przechowywania jego programu. Sterownik otrzymuje od robota RV-3SB sygnał oznaczający rozpoczęcie pracy;
- panele operatorskie R46TB i R56TB służą do sterowania pracą robotów;
- kamera internetowa A4Tech PK-910H używana jest jako system wizyjny robota RV-3SB. Współpracuje z oprogramowaniem MATLAB w celu robienia zdjęć sortowanym elementom i skanowania kodów kreskowych;
- elektromagnes trzymający używany jest do przenoszenia sortowanych elementów;

- oś liniowa służy do transportu sortowanych elementów między robotem RV-3SB a robotem RH-6FH;
- sterownik PLC SIMATIC S7-300 odpowiada za sterowanie pracą osi liniowej;
- komputer PC używany jest do obsługi programów MATLAB i RT ToolBox3.



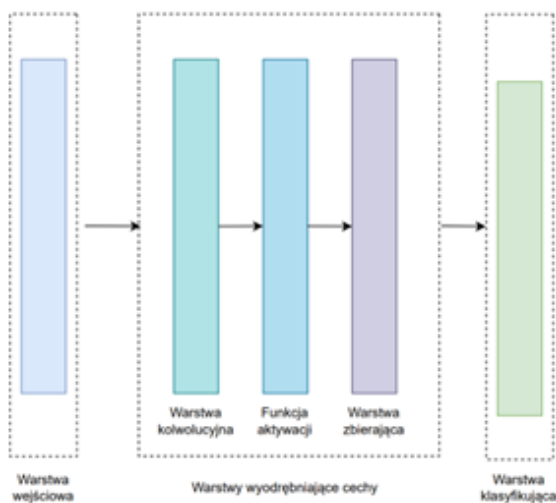
Rysunek 18.2. Stanowisko laboratoryjne

18.3.1. Konwolucyjna sieć neuronowa w oprogramowaniu MATLAB

Konwolucyjna sieć neuronowa została stworzona w środowisku MATLAB przy wykorzystaniu biblioteki Deep Learning Toolbox [7] i składa się z trzech głównych obszarów:

- warstwy wejściowej,
- warstwy wyodrębniającej charakterystyczne cechy,
- warstwy służącej do klasyfikacji danych.

Do konstrukcji warstwy służącej do wyodrębniania danych stosuje się warstwę konwolucyjną, funkcję aktywacji i warstwę zbierającą [8]. Na rysunku 18.3 przedstawiona została przykładowa architektura sieci CNN (ang. *Convolutional Neural Networks*).



Rysunek 18.3. Struktura konwolucyjnej sieci neuronowej

Stworzona konwolucyjna sieć neuronowa składa się z czterech warstw konwolucyjnych, w których liczba filtrów w kolejnych warstwach wynosi odpowiednio 12, 24, 48, 96. Taka struktura sieci pozwoliła na osiągnięcie prawie 98,97% dokładności klasyfikacji przy 17 sekundach trwania procesu uczenia się sieci. Podczas testu przeprowadzonego na stanowisku laboratoryjnym opracowana struktura sieci CNN poprawnie rozpoznała wszystkie testowane elementy podlegające sortowaniu.

18.3.2. Realizacja programu do sortowania elementów w oprogramowaniu MATLAB

Program stworzony w oprogramowaniu MATLAB odpowiada za rozpoznawanie cyfr sortowanych elementów, odczytywanie ich koordynat, skanowanie kodów kreskowych oraz za komunikację z kontrolerem CR2B-574.

W pierwszym kroku działania programu nawiązywana jest komunikacja szeregową z kontrolerem CR2B-574. Następnie przy wykorzystaniu polecenia „webcam” tworzony jest nowy obiekt zawierający i uruchamiający kamerę. W kolejnym kroku następuje skanowanie kodu kreskowego przy wykorzystaniu kamery internetowej. Procedura realizowana jest w pętli, wykorzystując polecenie „readBarcode”, a skanowanie trwa do momentu aż odczytana zostanie cyfra z zakresu od 0 do 9. Następnie w celu wykonania zdjęcia ramie robota transportuje kamerę nad elementy podlegające sortowaniu (rysunek 18.4). Grafiki są filtrowane, a następnie rozdzielane (rysunek 18.5).



Rysunek 18.4. Zdjęcie sortowanych elementów



Rysunek 18.5. Grafiki po rozdzieleniu

Rozdzielone grafiki podawane są na wejście sieci neuronowej, która odczytuje znajdujące się na nich cyfry. Następnie wyświetlana jest grafika (rysunek 18.6) z wyznaczonymi koordynatami środka oraz odczytaną cyfrą.



Rysunek 18.6. Grafika po wykonanej analizie

W końcowej fazie programu wszystkie odczytane dane są zapisywane w macierzy, a następnie przesyłane do kontrolera CR2B-574.

18.3.3. Sterowanie ruchami robotów w oprogramowaniu RT ToolBox3

Program robota RV-3SB odpowiada za manipulowanie ruchem kamery, transport elementów oraz komunikację z robotem RH-6FH, środowiskiem MATLAB oraz sterownikiem PLC SIMATIC S7-300. W pierwszej części programu ramię robota ustawia kamerę w pozycji skanowania kodu kreskowego, a następnie kamera transportowana jest w miejsce wykonywania zdjęć elementów podlegających sortowaniu. Po wykonaniu i analizie zdjęć robot RV-3SB, przy wykorzystaniu elektromagnesu, pobiera przedmiot i odkłada go na oś liniową. W momencie, kiedy oś liniowa osiągnie żądane położenie wysyłana jest informacja do kontrolera CR750-Q mówiąca o możliwości rozpoczęcia pracy robota RH-6FH. Zadaniem robota RH-6FH jest pobranie elementu z osi liniowej, a następnie odłożenie przedmiotu w wyznaczone miejsce. Robot otrzymuje od kontrolera CR2B-574 informację o możliwości rozpoczęcia pracy, a także współrzędne przedmiotu, który będzie pobierany.

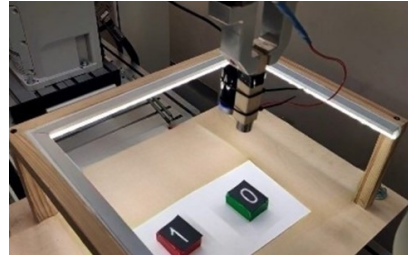
18.4. Uzyskane wyniki

Do weryfikacji eksperymentalnej wykorzystane zostały dwa elementy podlegające sortowaniu – drewniany klocek z numerem 0 i z numerem 1 oraz roboty RV-3SB, RH-6FH i systemem wizyjnym z zaimplementowaną w środowisku MATLAB siecią neuronową. Cały proces weryfikacji eksperymentalnej opracowanej aplikacji został omówiony i przedstawiony na rysunkach 18.7–18.12.

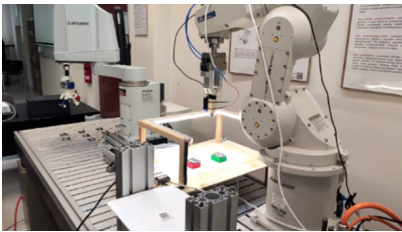
W pierwszym kroku uruchamiane są wszystkie programy (rysunek 18.7): program w środowisku MATLAB oraz programy w środowisku RT ToolBox3 odpowiadające za pracę robotów RV-3SB i RH-6FH. Na początku działania projektu roboty przesuwiają się do swoich pozycji bazowych (rysunek 18.8). W kolejnym kroku robot RV-3SB przemieszcza się do pozycji skanowania kodów kreskowych (rysunek 18.9). Oprogramowanie MATLAB wykonuje zdjęcia kodów do momentu, aż kod kreskowy posiadający informację o cyfrze ze zbioru 0–9 zostanie rozpoznany. W momencie, kiedy kod kreskowy zostanie prawidłowo zeskanowany, robot RV-3SB wykonuje ruch nad stanowisko z elementami podlegającymi sortowaniu (rysunek 18.10). Oprogramowanie MATLAB wykonuje zdjęcia elementów, identyfikuje ich numer i wyznacza współrzędne położenia elementów. Następnie element jest pobierany i transportowany na oś liniową. Robot RH-6FH pobiera transportowany element z osi liniowej (rysunek 18.11) i zaczyna jego transport do wyznaczonego miejsca odłożenia. W chwili czasowej, kiedy RH-6FH rozpoczyna swoją pracę, robot RV-3SB wznowia swój program (skanuje nowy kod kreskowy i wykonuje zdjęcia elementom podlegającym sortowaniu). W ostatnim kroku cyklu robot RH-6FH odkłada element w wyznaczone miejsce (rysunek 18.12).



Rysunek 18.7. Uruchomienie programów



Rysunek 18.10. Robot RV-3SB w pozycji robienia zdjęć elementów podlegających sortowaniu



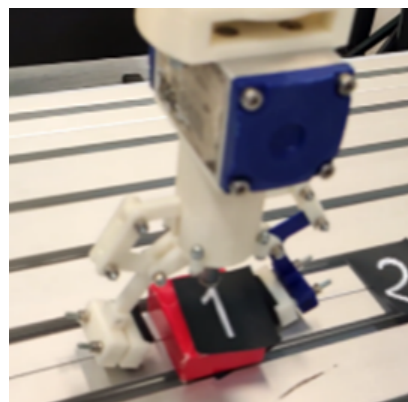
Rysunek 18.8. Roboty ustawione w pozycjach bazowych



Rysunek 18.11. Robot RH-6FH pobierający element



Rysunek 18.9. Robot RV-3SB w pozycji skanowania kodu kreskowego



Rysunek 18.12. Robot RH-6FH odkładający element

18.5. Podsumowanie

Celem projektu było wykonanie programu, który umożliwi sortowanie elementów z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i robota przemysłowego. Kryterium sortowania były liczby z zakresu od zera do dziewięciu.

Najważniejszymi elementami stanowiska laboratoryjnego były dwa roboty przemysłowe Mitsubishi Electric, RV-3SB i RH-6FH, komputer PC, oś liniowa ze sterownikiem PLC, system wizyjny bazujący na kamerze internetowej, elektromagnes i elementy podlegające sortowaniu. Robot RV-3SB manipulował ruchem kamery internetowej, przynosił na oś liniową sortowane przedmioty, podczas gdy RH-6FH odbierał przedmioty z osi liniowej i umieszczał je w wyznaczonych miejscach. Sterownik CR2B-574 sterował pracą programu sortującego, sterował pracą robota RV-3SB, za pomocą komunikacji szeregowej sterował pracą programu napisanego w środowisku MATLAB, a za pomocą komunikacji Ethernet mógł komunikować się z robotem RH-6FH. Wykorzystując sygnały cyfrowe i moduł przekaźnikowy, zrealizowane zostało połączenie ze sterownikiem S7-300, który sterował pracą osi liniowej. W oprogramowaniu MATLAB napisany został program odpowiadający za pracę niskobudżetowego systemu wizyjnego.

Sztuczna inteligencja stosowana w robotyce ma znaczący wpływ na możliwości pracy robotów przemysłowych. Stosowanie uczenia maszynowego powoduje, że roboty są w stanie podejmować własne decyzje i adaptować się do zmiennych warunków środowiskowych. Zastosowanie głębokiego uczenia w aplikacjach systemów wizyjnych pozwala na implementację w robotach zmysłu widzenia, co znacząco rozszerza ich zastosowania.

Stworzony program sortujący dobrze poradził sobie z wyznaczonym celem, co oznacza, że cały proces sortowania może zostać przeprowadzony w sposób szybszy i dokładniejszy niż w przypadku, gdy te zadania byłyby realizowane przez ludzi. Szybkość rozwoju robotyki i sztucznej inteligencji wskazuje na to, że coraz więcej takich rozwiązań będzie pojawiało się w przemyśle. Pozwoli to na zwiększenie efektywności produkcji, a także odciążenie pracowników od wykonywania ciężkich i monotonicznych prac.

Bibliografia

- [1] Honczarenko J., *Roboty przemysłowe Budowa i zastosowanie*, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, Polska, 2004.
- [2] Zdanowicz R., *Podstawy robotyki*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, Polska, 2012.
- [3] Tomasz Buratowski, Teoria robotyki. Dostępny online: <https://robotyka.pl/teoria/teoria-robotyki> [dostęp: 30-09-2024].
- [4] Historia sztucznej inteligencji. Dostępny online: <https://www.deeptechology.ai/historia-sztucznej-inteligencji> [dostęp: 30-09-2024].
- [5] Artificial Intelligence in Robotics. Dostępny online: <https://www.geeksforgeeks.org/artificial-intelligence-in-robotics/> [dostęp: 30-09-2024].
- [6] The Top Artificial Intelligence Robots You Should Know About. Dostępny online: <https://www.linkedin.com/pulse/top-artificial-intelligence-robots> [dostęp: 30-09-2024].
- [7] MathWorks. Dostępny online: <https://uk.mathworks.com/> [dostęp: 30-09-2024].
- [8] Patterson J., Gibson A., *Deep Learning Praktyczne wprowadzenie*, Wydawnictwo HELION, 2018.

Wydział
Informatyki i Telekomunikacji

Projekt systemu do pomiaru jakości powietrza z komunikacją BT

inż. Paweł Bogdan

Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Jarosław Emilianowicz

Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki

Problem nieustannie pogarszającej się jakości powietrza w obecnych czasach staje się coraz bardziej zauważalny. Negatywny wpływ przebywania w środowisku o złej jakości powietrza został potwierdzony szeregiem prac naukowych. W związku z tym istnieje potrzeba stworzenia skutecznego, bezpiecznego, wysoce dostępnego, intuicyjnego oraz taniego systemu pomiaru jakości powietrza przeznaczonego do użycia przez ludność cywilną. W ramach niniejszej pracy scharakteryzowano występujący problem oraz dokonano przeglądu rozwiązań obecnych na rynku, na podstawie których wyciągnięto wnioski dotyczące oczekiwań konsumentów wobec systemów pomiaru i monitoringu jakości powietrza. W kontekście tych oczekiwań oraz możliwości przedstawiono obszerny projekt systemu pomiaru szeregu poszczególnych parametrów jakości powietrza. Projekt ten obejmuje zarówno część sprzętową, wraz z omówieniem poszczególnych komponentów, platformy i schematem elektronicznym konstrukcji, jak i część programową dotyczącą algorytmów sterujących pracą urządzenia. W ramach systemu znalazła się aplikacja na urządzenia z systemem Android, która również, jak i komunikacja z wykorzystaniem protokołu Bluetooth między aplikacją i urządzeniem, została omówiona w niniejszej pracy. Postanowiono skupić się również na kwestiach bezpieczeństwa w szerokim kontekście obejmującym bezpieczeństwo logów systemowych, bezpieczeństwo komunikacji Bluetooth oraz bezpieczeństwo procesu nawiązywania połączenia. Projekt został podparty wykonanym prototypem wraz z jego testami oraz kosztorysem. Praca zakończona jest omówieniem wniosków wynikających zarówno z problemu jakości powietrza, przedstawionego projektu, jak i zbudowanego na jego podstawie prototypu.

19.1. Cel i założenia

Celem pracy dyplomowej było stworzenie projektu skutecznego, bezpiecznego i taniego urządzenia umożliwiającego monitorowanie jakości powietrza. Projekt oparty został na platformie ESP32 oraz szeregu czujników. Zarządzanie oraz odczyt danych pomiarowych

odbywać się ma w oparciu o komunikację Bluetooth między urządzeniem oraz telefonem komórkowym wyposażonym w system Android, ze szczególnym uwzględnieniem bezpieczeństwa danych realizowanego przez mechanizmy uwierzytelniania oraz szyfrowania. Główne założenia projektowe podzielone zostały między stację pogodową oraz aplikację na urządzenia wyposażone w system Android. Główne założenia projektowe stacji pogodowej:

- oparcie na module ESP-WROOM-32,
- zdolność do autonomicznej pracy z wykorzystaniem zasilania bateryjnego,
- zdolność do wykonywania pomiarów następujących parametrów jakości powietrza: temperatura, wilgotność, indeks ciepła, obecność gazów łatwopalnych, pył stężony PM1, PM2.5, PM10, ciśnienie atmosferyczne, wysokość nad poziomem morza, poziom głośności otoczenia,
- zdolność do przedstawiania wyników pomiarów w skali Celsjusza oraz Farenheita, zgodnie z preferencjami użytkownika,
- zdolność do cyklicznego wywoływania pomiarów,
- zdolność do wymuszonego wykonywania pomiarów,
- zdolność do przechowywania wyników pomiarów na karcie SD,
- zdolność do sygnalizacji stanów pracy za pomocą diod LED,
- zdolność do komunikacji z wykorzystaniem protokołu Bluetooth,
- zdolność do przechowywania logów systemowych na karcie SD,
- zdolność do zachowania bezpieczeństwa przez szyfrowanie komunikacji BT, szyfrowanie logów systemowych oraz proces uwierzytelniania urządzenia,
- zdolność do transmisji zaległych danych pomiarowych w przypadku nawiązania połączenia z aplikacją.

Główne założenia projektowe aplikacji:

- zdolność do działania na szerokim spektrum urządzeń wyposażonych w system Android,
- zdolność do komunikacji z wykorzystaniem protokołu Bluetooth,
- zdolność do zapytania użytkownika o pozwolenia na dostęp do modułu Bluetooth w przypadku braku pozwolenia w systemie,
- zdolność do włączenia modułu Bluetooth z poziomu aplikacji,
- zdolność do nawiązania połączenia ze stacją pogodową z poziomu aplikacji,
- zdolność do ustawienia preferencji użytkownika,
- zdolność do odbioru i prezentacji obecnych oraz historycznych danych pomiarowych,
- zdolność do wymuszenia wykonania pomiarów przez stację pogodową,
- przystępny dla użytkownika interfejs graficzny.

19.2. Wstęp teoretyczny

W ciągu ostatnich dziesięcioleci naukowcy obserwują niepodważalny, a zarazem niepokojący trend coraz to szybciej pogarszającej się jakości powietrza na obszarze całego globu [1]. Należy również zauważyć, że postęp techniczny, mimo szerokich korzyści, potrafi zarówno znajdować rozwiązania obecnych problemów środowiskowych lecz także generuje nowe, nieznane dotąd źródła zanieczyszczeń. Problem ten szczególnie uwidacznia się na

terenach miejskich [2]. Liczne badania naukowe dowodzą obecności wpływu narażenia na oddychanie powietrzem niskiej jakości na zdrowie ludzi. Przeprowadzane na szeroką skalę badania epidemiologiczne potwierdzają związek między poziomem jakości powietrza, a częstością występowania chorób. Związek ten ujawnia się głównie w postaci zwiększonego ryzyka chorób układu oddechowego, takich jak astma, przewlekła obturacyjna choroba płuc (POChP), pylica czy też ogólnie zwiększona podatność na zakażenia. Długotrwałe przebywanie w środowisku charakteryzującym się niską jakością powietrza wiąże się również ze zwiększonym ryzykiem chorób sercowo-naczyniowych [3].

19.3. Projekt i wykonanie

Zasadniczą częścią pracy była prezentacja projektu stacji pogodowej oraz aplikacji. Projekt stacji objął zarówno część sprzętową, w której zawarto charakterystyki dobranych komponentów oraz schemat elektroniczny urządzenia, i część programową tłumaczącą algorytmy zarządzające działaniem urządzenia.

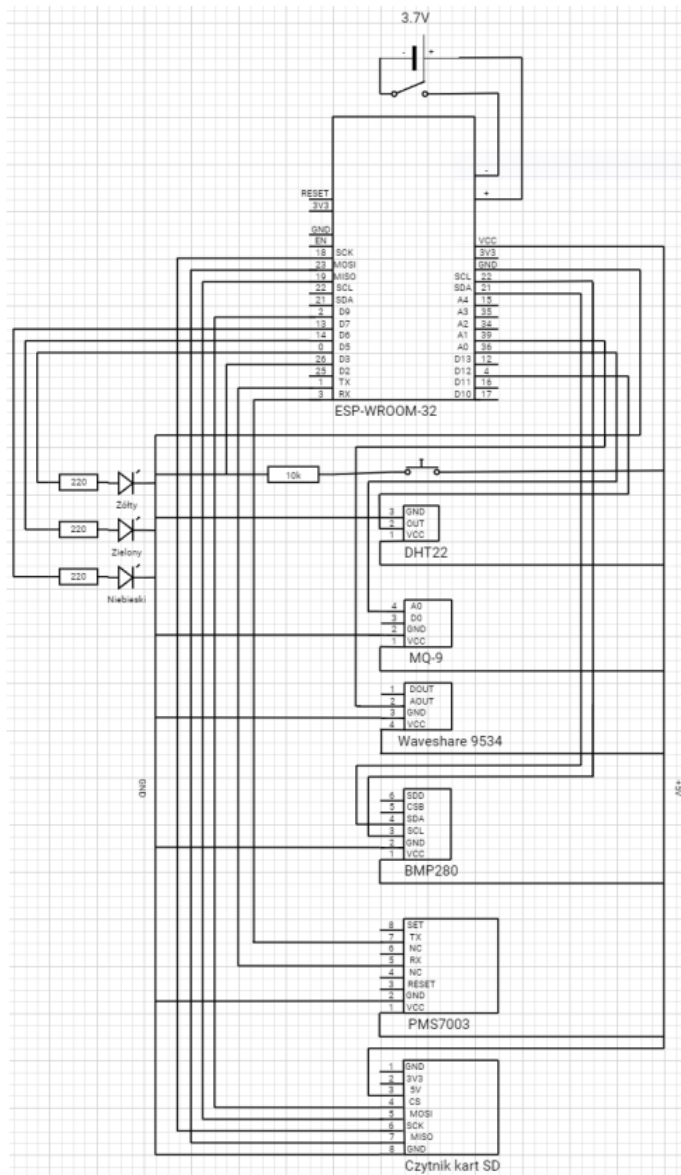
19.3.1. Analiza rynku oraz przegląd istniejących konstrukcji

Obecnie dostępne na rynku rozwiązania w zakresie monitorowania jakości powietrza cechują się szeroką różnorodnością zarówno w kwestii ceny, jak i oferowanych możliwości. Należy jednakże zauważyć, iż urządzenia oferujące monitorowanie szerokiego spektrum parametrów cechują się kosztem wykraczającym poza możliwości biedniejszej części społeczeństwa. Na podstawie analizy wyodrębniono najważniejsze cechy determinujące sukces komercyjny konstrukcji.

19.3.2. Część sprzętowa stacji pogodowej

Zgodnie z wymaganiami sprzętowa budowa stacji pogodowej opiera się ona na module ESP-WROOM-32 oraz szeregu czujników umożliwiających pomiar zdefiniowanych parametrów powietrza. Praca zawiera szczegółowe charakterystyki poszczególnych jej komponentów. W niniejszym streszczeniu skupiono się jedynie na holistycznym przedstawieniu konstrukcji, bez zagłębiania się w szczegóły poszczególnych komponentów.

Na rysunku 19.1 przedstawiono schemat elektroniczny stacji pogodowej. Uwzględniono na nim wszystkie komponenty potrzebne do jego wykonania, pozwalające na wypełnienie stawianych przed nim wymagań.

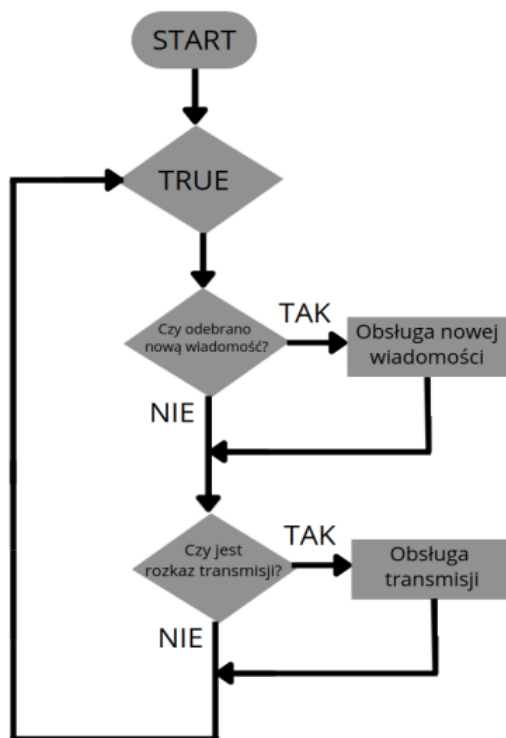


Rysunek 19.1. Schemat elektroniczny stacji pogodowej

19.3.3. Projekt programu stacji pogodowej

Część programowa stacji pogodowej zawiera zarówno omówienie wybranej technologii, jak i sposobu jej użycia. Do realizacji programu wybrano język Arduino, co podyktowane było szeroką dostępnością bibliotek współpracujących z przewidzianymi komponentami. Miejsce znalazło również szerokie omówienie konfiguracji środowiska oraz wgrywania programu do pamięci mikroprocesora. Dzięki temu czytelnik pracy, będzie posiadała instrukcję wystarczającą do samodzielnego wykonania prototypu. Logikę działania poszczególnych

części składowych programu stacji pogodowej, do których można zaliczyć między innymi pętlę pomiarową, obsługę komunikacji BT, czy też cykliczne wywoływanie pomiarów, przedstawiono na dużej ilości schematów blokowych, których przykład zaprezentowano na rysunku 19.2.



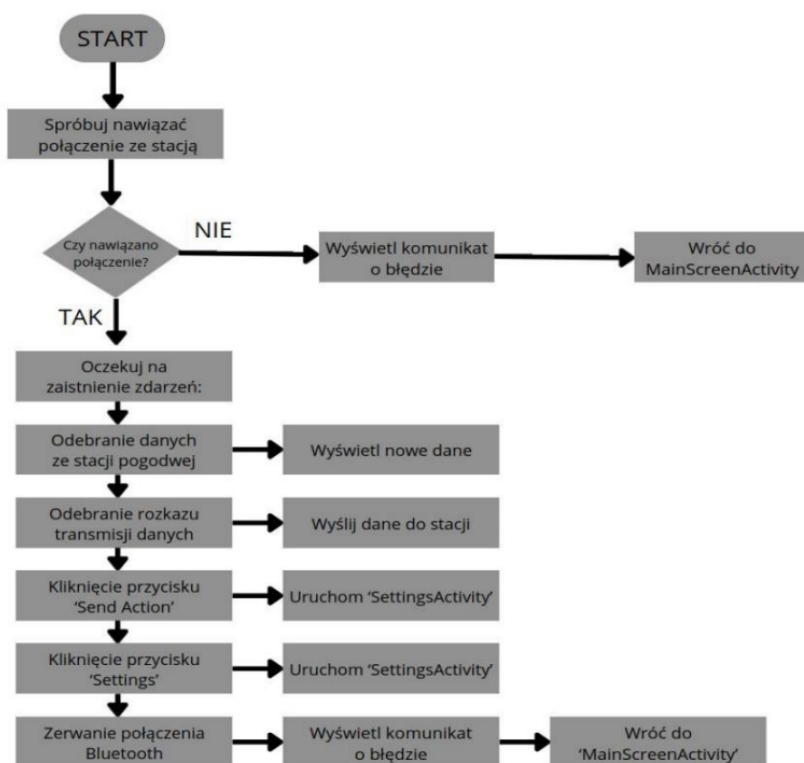
Rysunek 19.2. Schemat blokowy algorytmu obsługi Bluetooth

Duży nacisk położono również na kwestię bezpieczeństwa. W pracy inżynierskiej zawarto poszczególne podrozdziały omawiające poszczególne aspekty bezpieczeństwa, do których należy zaliczyć bezpieczeństwo logów systemowych, realizowane przez przechowywanie ich jedynie w formie zaszyfrowanej algorytmem AES z wykorzystaniem klucza kryptograficznego stacji, bezpieczeństwo transmisji danych, realizowane również przez szyfrowanie, oraz bezpieczeństwo procesu nawiązywania połączenia Bluetooth. W obrębie nawiązywania połączenia zaprezentowano autorski algorytmu uwierzytelniania, polegający zarówno na hasle, jak i kluczu kryptograficznym. Algorytm ten składa się z trzech kroków, z których pierwszy jest inicjowany przez aplikację, która wysyła do stacji hasło. W przypadku jego poprawności stacja oczekuje na przesłanie wiadomości wstępnej, której odszyfrowania podejmuje próbę. W przypadku powodzenia wysyłana ona komunikat zwrotny do aplikacji, która również próbuje ją odszyfrować. Praca inżynierska zawiera pełniejszy opis poszczególnych kwestii bezpieczeństwa.

19.3.4. Projekt programu aplikacji mobilnej

Część ta jest podobna do części programowej stacji pogodowej. Wprowadzono w niej zastosowane technologie, wytłumaczono ich wybór oraz przeprowadzono czytelnika przez proces konfiguracji oraz wgrzywania programu na dowolny telefon wyposażony w system Android, spełniający minimalne wymagania aplikacji.

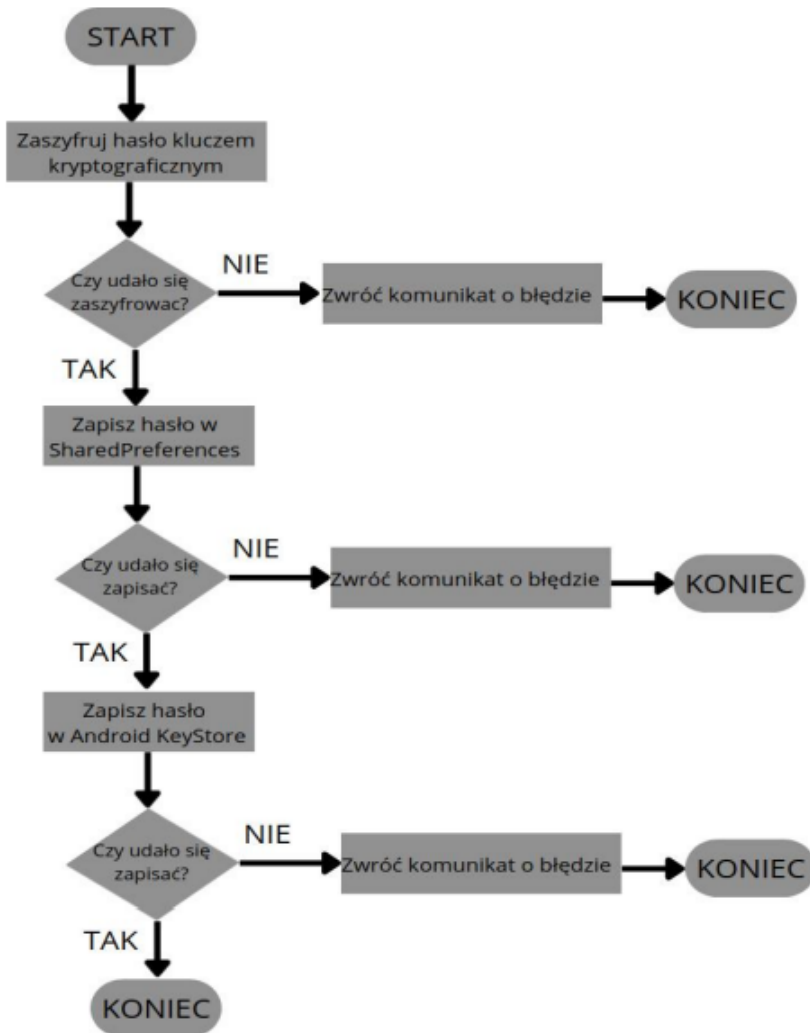
Aplikacja mobilna oparta jest o język Java oraz framework Android. Poszczególne podrozdziały pracy inżynierskiej tłumaczyły elementy projektu oraz konkretną ich logikę. Przedstawiono dogłębną logikę programu w sposób, zarówno tłumaczący korzystanie z aplikacji, jak i działanie programu. Głównym elementem są „Activities”, które stanowią poszczególne ekrany widoczne przez użytkownika. W postaci schematów blokowych przedstawiono logikę ich komunikacji, oraz pełnione przez nie funkcję. Rysunek 19.3 stanowi przykład takiego schematu.



Rysunek 19.3. Schemat blokowy WeatherStationActivity

W przypadku aplikacji mobilnej również pochyłono się nad kwestiami bezpieczeństwa. Oprócz kwestii omówionych w części poświęconej stacji pogodowej występuje tu również problem bezpiecznego przechowywania hasła oraz klucza kryptograficznego. Postanowiono wykorzystać tutaj funkcję systemu operacyjnego Android. Hasło przechowywane jest w obszarze SharedPreferences, klucz kryptograficzny natomiast w KeyStorage. Zastosowanie tych obszarów zapewnia bezpieczeństwo przechowywanych danych oraz zabezpiecza jest przed dostępem spoza aplikacji, co gwarantuje system operacyjny Android. Zastosowanie

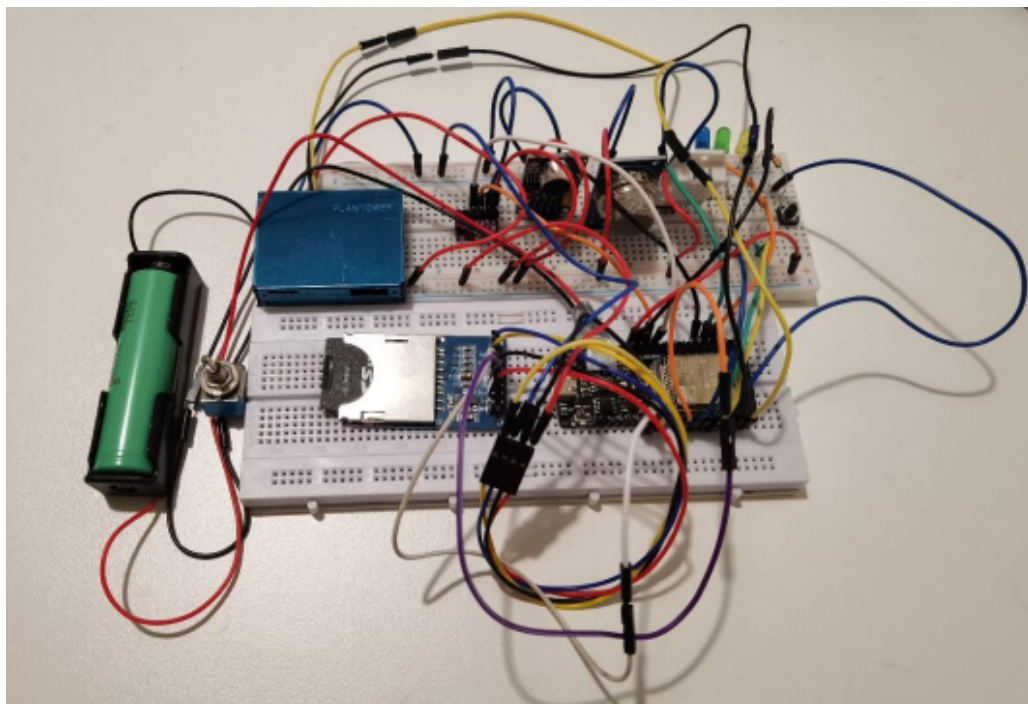
wanie tych obszarów wymaga specjalnego sposobu zarówno odczytywania tych danych, jak i ich zapisywania. Zostały one przedstawione na schematach blokowych, z czego przykładowy zobrazowany jest na rysunku 19.4.



Rysunek 19.4. Schemat blokowy zapisywania hasła oraz klucza kryptograficznego

19.3.5. Wykonanie prototypu

Dla zobrazowania koncepcji przedstawionej w projekcie zbudowano prototyp urządzenia. Prototyp był zdolny do realizacji zdecydowanej większości wymagań stawianych opisywanemu urządzeniu. Jednakże postanowiono nie wykonywać obudowy. Urządzenie zbudowane było na płytce stykowej, gdyż celem prototypu nie był test wytrzymałości fizycznej urządzenia. Głównym celem budowy prototypu była weryfikacja wymagań w zakresie funkcjonalności monitoringu parametrów jakości powietrza. Na rysunku 19.5 przedstawiono prototyp gotowy do testów.



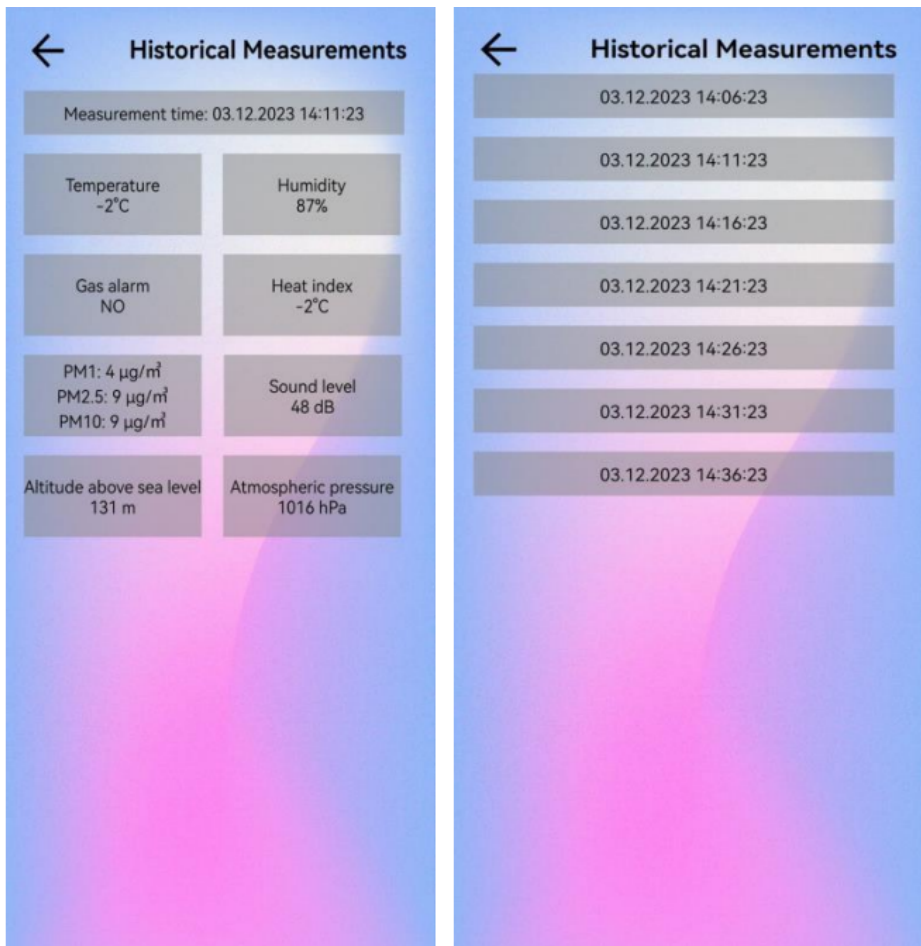
Rysunek 19.5. Prototyp stacji pogodowej wchodzącej w skład systemu pomiaru jakości powietrza

Ostatnimi etapami budowy prototypu systemu pomiaru jakości powietrza było wgranie programu zarówno do pamięci stacji pogodowej, jak i na telefon komórkowy.

19.4. Uzyskane wyniki

Testy urządzenia przeprowadzono w dniach 28 listopada–5 grudnia 2023 roku na balkonie bloku mieszkalnego zlokalizowanego w dzielnicy Jagodno miasta Wrocław. Balkon zlokalizowany jest przeciwnie do głównej drogi. Stacja pogodowa położona była na drewnianym stole. W przypadku opadów śniegu zakrywana była folią w sposób mający jak najmniejszy wpływ na wyniki pomiarów. Należy tutaj zauważyć, że podatność na złe warunki atmosferyczne jest wyłącznie cechą prototypu, gdyż nie zdecydowano się wykonać obudowy urządzenia. Celem przeprowadzonych testów nie była wytrzymałość fizyczna urządzenia, lecz poprawność działania systemu, ze szczególnym uwzględnieniem bezpieczeństwa transmisji oraz przechowywanych danych.

Testy obejmowały wszystkie wymagania i założenia wymienione w pracy. Z uwagi na ograniczone miejsce w pracy inżynierskiej umieszczono jedynie proces testów podstawowego działania aplikacji. Jako potwierdzenie poprawnego działania poszczególnych etapów wstawiano zrzuty ekranu aplikacji mobilnej, których przykład widoczny jest na rysunku 19.6.



Rysunek 19.6. Ekran historii pomiarów podczas testów z pięciominutowym interwałem

Podczas testów urządzenia nie stwierdzono żadnych anormalnych sytuacji. Nie odnotowano zaniku połączenia, błędów szyfrowania, czy błędnych danych pomiarowych. Tym samym stwierdzono, że wykonany prototyp spełnia stawiane mu wymagania.

19.5. Podsumowanie

Celem pracy było opracowanie projektu systemu pomiaru jakości powietrza z wykorzystaniem komunikacji Bluetooth. W tym celu scharakteryzowano występujący problem złej jakości powietrza oraz zbadano rynek określając preferencje konsumentów. Na ich podstawie zaprezentowano koncepcję stacji pogodowej współpracującej z aplikacją przeznaczoną na urządzenia z systemem Android.

Zasadniczą częścią pracy była prezentacja projektu stacji pogodowej oraz aplikacji. Projekt stacji objął zarówno część sprzętową, w której zawarto charakterystyki dobrych komponentów oraz schemat elektroniczny urządzenia, jak i część programową, tłumaczącą algorytmy zarządzające działaniem urządzenia. Starano się postawić spory nacisk

na kwestie związane z bezpieczeństwem. W pracy zidentyfikowano obszary potencjalnie narażone na incydenty bezpieczeństwa i na ich podstawie zaprojektowano system, aby odznaczał się możliwie najlepszą relacją cena:jakość. W związku z tym zadbano zarówno o bezpieczeństwo logów systemowych, uwierzytelniania urządzenia, jak i komunikacji z wykorzystaniem protokołu Bluetooth.

Przedstawione projekty zostały podparte wykonanym prototypem. Na jego podstawie przeprowadzono testy systemu, zakończone sukcesem i wypełnieniem stawianych mu wymagań. Podsumowane zostały również koszty. Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że zaprezentowany projekt systemu posiadać wiele pożądaných przez konsumentów cech, co w połączeniu z atrakcyjną ceną mogłoby przynieść komercyjny sukces tej konstrukcji. Przedstawiony projekt jest otwarty na ulepszenia, modyfikację oraz jego dalszy rozwój. Wśród potencjalnych możliwości rozbudowy systemu należy wziąć pod uwagę możliwość dodania centralnej bazy danych zrzeszającej poszczególne urządzenia. Skutkiem takiego rozwiązania byłby znaczący wzrost świadomości ludzi na temat aktualnych parametrów powietrza, gdyż nie musieliby oni posiadać urządzenia by z poziomu aplikacji zobaczyć warunki panujące w okolicy, zmierzone przez stację pogodową należącą do któregoś z sąsiadów.

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiony system wypełnia stawiane przed nim wymagania, również pod względem bezpieczeństwa. Tym samym wypełniony został cel i założenia pracy.

Bibliografia

- [1] Kinney P., Climate Change, Air Quality, and Human Health. *American Journal of Preventive Medicine* **2008**, *35(5)*, s. 459–467.
- [2] Fenger J., Urban air quality. *Atmospheric Environment* **1999**, *33(29)*, s. 4877–4900.
- [3] Wakefield S., Elliott S., Cole D., Eyles J., Environmental risk and (re)action: air quality, health, and civic involvement in an urban industrial neighbourhood. *Health & Place* **2001**, *7(3)*.

Określanie jakości obrazów oka na potrzeby algorytmów wykrywania tęczówki

inż. Bartosz Kozłowski
Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo
Katedra Podstaw Informatyki Politechniki Wrocławskiej

W pracy dyplomowej zaproponowano rozwiązanie problemu zapewnienia odpowiedniej jakości danych wejściowych dla systemu biometrycznego wykrywania tęczówki. W tym celu stworzono paczkę oprogramowania w języku Python, umożliwiającą określanie i klasyfikowanie jakości obrazów na podstawie dziesięciu znormalizowanych współczynników, takich jak ostrość obrazu czy kontrast między tęczówką a źrenicą. Każdy z tych współczynników, wraz z sugerowanymi miarami jakości, został zdefiniowany zgodnie z normą ISO/IEC 29794-6:2015, która standaryzuje miary i metody określania jakości obrazów tęczówki oka. Proponowany system cechuje się pełną modułowością, umożliwiając użytkownikowi elastyczne dostosowanie analizowanych współczynników do ich potrzeb. Rozwiązanie to może znaleźć zastosowanie zarówno w środowisku naukowym, jak i komercyjnym, jako bezpłatna alternatywa lub uzupełnienie dla dostępnych rozwiązań komercyjnych na rynku.

20.1. Cel i założenia

Celem przewodnim pracy było opracowanie rozwiązania umożliwiającego ocenę jakości danych na wejściu do systemu biometrycznego wykrywania tęczówki, bazującego na zaleceniach normy ISO/IEC 29794-6:2015. Realizacja pracy opierała się na:

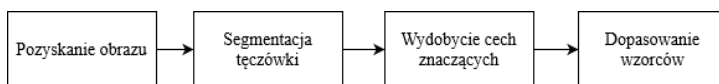
- stworzeniu kompleksowego systemu, umożliwiającego ocenę jakości obrazów tęczówki oka w kontekście systemu biometrycznego,
- uwzględnieniu dziesięciu współczynników jakości obrazów tęczówki zawartych w normie ISO/IEC 29794-6:2015, które zostały określone w niej jako wymagane,
- zapewnieniu modularności i prostoty implementacji proponowanego systemu jako części większych systemów biometrycznych wykrywania tęczówki.

20.2. Wstęp teoretyczny

Proponowane w pracy rozwiązanie ma na celu zaadresowanie problemów związanych z jakością obrazów w systemach biometrycznych wykrywania tęczówki i odnosi się do normy ISO/IEC 29794-6:2015 w celu uzyskania unormowanych miar i ich wartości. Niniejszy rozdział ma na celu wprowadzenie czytelnika do kluczowych dla projektu zagadnień.

20.2.1. System biometryczny wykrywania tęczówki

System biometryczny operuje na danych biometrycznych, czyli danych fizycznych, chemicznych lub behawioralnych pozwalających na określenie tożsamości danej jednostki [1]. System biometryczny wykrywania tęczówki wykorzystuje w tym celu tęczówkę oka, będącą jedną z najskuteczniejszych i najdokładniejszych modalności biometrycznych [3].



Rysunek 20.1. Schemat blokowy etapów podstawowego procesu rozpoznawania tęczówki

Rozpoznawanie tęczówki to proces złożony, składający się z czterech głównych etapów, jak przedstawiono na rysunku 20.1. W etapie pozyskiwania obrazu, dokonywany jest skan tęczówki w zakresie bliskiej podczerwieni lub światła widzialnego. W etapie segmentacji, obszar tęczówki jest wydzielany ze skanu uzyskanego w poprzednim etapie. Etap wydobycia cech znaczących obejmuje normalizację obrazu obszaru tęczówki oraz ekstrakcję i kodowanie kluczowych danych obrazu. W ostatnim etapie, wzorce te porównywane są z innymi, zebranymi w bazie wzorców systemu. Na podstawie tego porównania system może dokonać decyzji odnośnie deklarowanej tożsamości.

Prezentowany w pracy projekt zajmuje miejsce w tym procesie między etapem segmentacji a etapem wydobycia cech znaczących, wykorzystując dane uzyskane w wyniku segmentacji w celu oceny i potencjalnego odrzucenia próbki niskiej jakości przed poddaniem jej kosztownym pod względem wydajności algorytmom wydobycia istotnych cech.

20.2.2. Norma ISO/IEC 29794-6:2015

Norma ISO/IEC 29794-6:2015 jest dokumentem opracowanym przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną, definiującym metody i miary pozwalające na ocenę jakości obrazów tęczówki w kontekście systemów biometrycznych [2]. Norma ta opisuje szesnaście różnych współczynników jakości obrazów tęczówki wraz z metodami ich obliczania, w tym dziesięć wymaganych, które są obliczane na podstawie pojedynczego obrazu, trzy zalecane, również obliczane na podstawie pojedynczego obrazu oraz trzy obliczane na podstawie pary obrazów, przedstawiających każde z oczu. W ramach pracy skupiono się na implementacji dziesięciu wymaganych współczynników, obliczanych na podstawie pojedynczego obrazu, które zostały szerzej opisane w podrozdziale 20.3.2..

Dla większości współczynników, norma opisuje algorytmy umożliwiające ich obliczenie oraz progi określające, kiedy miary współczynnika spełniają założenia normy, a kiedy jakość obrazu pod względem tego współczynnika jest niewystarczająca. Wyjątkiem

są współczynniki okrągłości granicy źrenicy oraz ostrości, które nie posiadają unormowanych progów jakości. Dla tych współczynników, na potrzeby programu, progi zostały zdefiniowane przez autora na podstawie treści normy oraz własnych obserwacji. Implementacja programu umożliwi również określenie niestandardowych wartości miar wszystkich współczynników przez użytkownika oraz ich wyłączenie.

20.3. Projekt i wykonanie

W ramach pracy została stworzona aplikacja konsolowa umożliwiająca automatyczne określanie poziomu jakości obrazu tęczówki na podstawie wybranych, standaryzowanych współczynników. Podczas działania aplikacja oblicza wartości dla każdego z testowanych współczynników oraz opcjonalnie klasyfikuje je jako spełniające lub niespełniające zdefiniowanych progów.

Program został w całości napisany w języku Python z wykorzystaniem darmowej biblioteki OpenCV, NumPy oraz SciPy, i jest kompatybilny z wszystkimi platformami obsługującymi język Python wraz z wymienionymi bibliotekami.

Do stworzenia samodzielnego pakietu oprogramowania, który działa w systemach operacyjnych z rodziny Microsoft Windows, wykorzystano bibliotekę PyInstaller, eliminując potrzebę instalacji środowiska języka Python przez użytkownika przed uruchomieniem programu.

W kolejnych podpunktach tego rozdziału opisane zostaną interfejsy dostępne dla użytkownika, implementacja modułów standaryzowanych współczynników jakości oraz mechanizm konfiguracji programu.

20.3.1. Interfejsy użytkownika

Aplikacja może być uruchomiona z poziomu wiersza poleceń lub interfejsu graficznego systemu, korzystając z dostarczonego pliku binarnego (.exe), lub bezpośrednio z poziomu wiersza poleceń, jeśli uruchamiany jest skrypt języka Python (.py).

Po uruchomieniu, program nie wymaga interakcji użytkownika – jego działanie zależy wyłącznie od konfiguracji zawartej w zewnętrznym pliku tekstowym. Dzięki temu uruchamiany program może być wywoływany przez inne procesy systemowe bez potrzeby ingerencji użytkownika, co umożliwia zautomatyzowanie jego działania i integrację z istniejącymi systemami biometrycznymi.

W celu ułatwienia integracji, aplikacja oferuje możliwość wyboru formatu danych wejściowych i wyjściowych. Wymagane dane wejściowe różnią się w zależności od aktywnych modułów i obejmują od surowego obrazu tęczówki po parametry określające granice tęczówki i źrenicy lub maskę segmentacji.

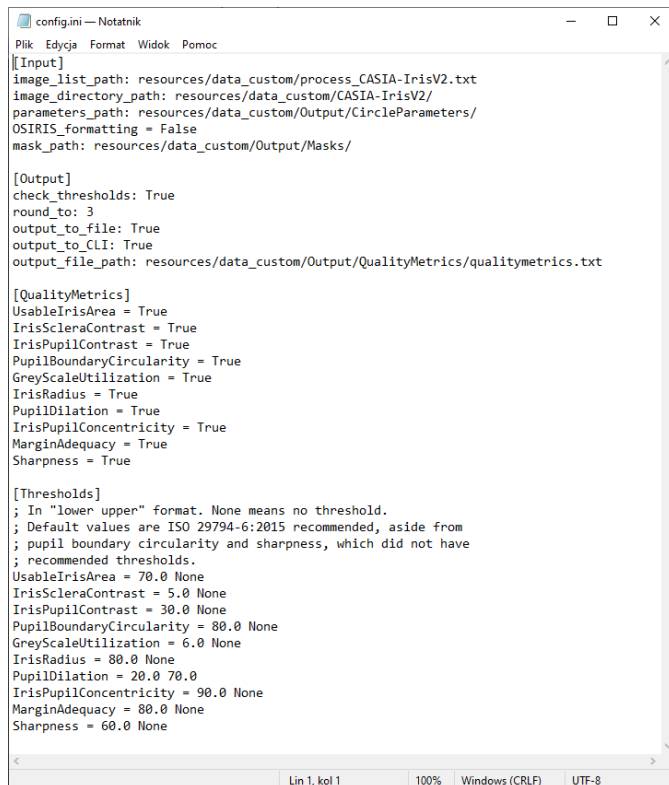
Dane wejściowe mogą być dostarczone w formacie proponowanym przez autora, minimalizującym liczbę obliczeń potrzebnych do przygotowania danych do przetwarzania, lub w formacie kompatybilnym z danymi wyjściowymi generowanymi przez narzędzie OSIRIS – darmową i modułową implementację oprogramowania systemu rozpoznawania tęczówki, powszechnie stosowaną w środowisku naukowym [4]. Dane wyjściowe mogą być prezentowane w formie czytelnej dla człowieka, wyświetlanej w oknie wiersza poleceń

(jak pokazano na rysunku 20.2), lub zapisywane do zewnętrznego pliku w formacie CSV (wartości oddzielone przecinkiem).

```
Starting quality metrics calculations.
Image: 0000_000
=====
Usable_Iris_Area      50.218      Within thresh: False
Iris_Sclera_Contrast 18.248      Within thresh: True
Iris_Pupil_Contrast  67.033     Within thresh: True
Pupil_Boundary_Circularity 96.661     Within thresh: True
Grey_Scale_Utilization 7.24       Within thresh: True
Iris_Radius          91.727     Within thresh: True
Pupil_Dilation       27.64      Within thresh: True
Iris_Pupil_Concentricity 89.827    Within thresh: False
Margin_Adequacy      100        Within thresh: True
Sharpness            82.052     Within thresh: True
=====
Execution ended after: 0.26939988136291504 seconds
Average time per image: 0.26939988136291504 seconds
Press the Enter key to continue: |
```

Rysunek 20.2. Przykładowe dane wypisywane przez aplikację do wiersza poleceń systemu Windows

Zawartość pliku konfiguracyjnego została przedstawiona na rysunku 20.3. Zawiera on listę ścieżek systemowych dla danych wejściowych i wyjściowych, przełączniki umożliwiające dostosowanie ich formatowania, listę przełączników dla poszczególnych modułów współczynników jakości oraz możliwe do zmiany przez użytkownika wartości progów dla każdego ze współczynników.



```
config.ini - Notatnik
Plik Edycja Format Widok Pomoc
[[Input]
image_list_path: resources/data_custom/process_CASIA-IrisV2.txt
image_directory_path: resources/data_custom/CASIA-IrisV2/
parameters_path: resources/data_custom/Output/CircleParameters/
OSIRIS_formatting = False
mask_path: resources/data_custom/Output/Masks/

[Output]
check_thresholds: True
round_to: 3
output_to_file: True
output_to_CLI: True
output_file_path: resources/data_custom/Output/QualityMetrics/qualitymetrics.txt

[QualityMetrics]
UsableIrisArea = True
IrisScleraContrast = True
IrisPupilContrast = True
PupilBoundaryCircularity = True
GreyScaleUtilization = True
IrisRadius = True
PupilDilation = True
IrisPupilConcentricity = True
MarginAdequacy = True
Sharpness = True

[Thresholds]
; In "lower upper" format. None means no threshold.
; Default values are ISO 29794-6:2015 recommended, aside from
; pupil boundary circularity and sharpness, which did not have
; recommended thresholds.
UsableIrisArea = 70.0 None
IrisScleraContrast = 5.0 None
IrisPupilContrast = 30.0 None
PupilBoundaryCircularity = 80.0 None
GreyScaleUtilization = 6.0 None
IrisRadius = 80.0 None
PupilDilation = 20.0 70.0
IrisPupilConcentricity = 90.0 None
MarginAdequacy = 80.0 None
Sharpness = 60.0 None
```

Rysunek 20.3. Zawartość pliku konfiguracyjnego w narzędziu Notatnik

Plik konfiguracyjny ładowany jest przez aplikację automatycznie, pod warunkiem, że znajduje się on w tym samym katalogu co plik wykonywalny (lub główny skrypt) programu. Taka forma konfiguracji pozwala na szybkie edytowanie konfiguracji programu, a także automatyzację tego procesu.

20.3.2. Moduły współczynników jakości

Centralną funkcjonalność aplikacji stanowią moduły współczynników jakości, które odpowiadają za obliczanie wartości poszczególnych metryk dla dostarczonych danych wejściowych. Każdy z tych współczynników został zaimplementowany zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie ISO/IEC 29794-6:2015.

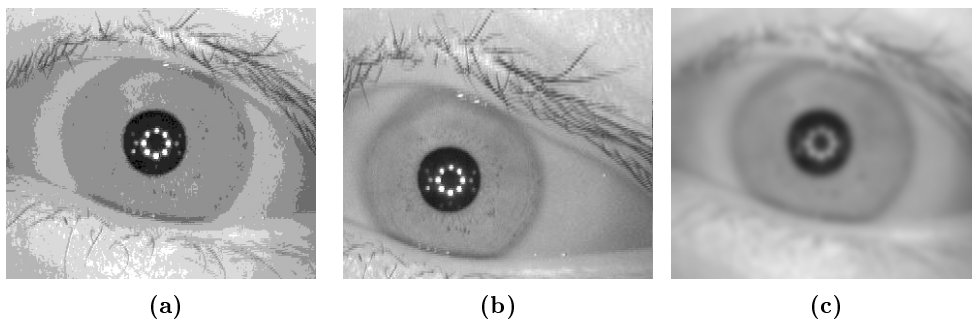
Aplikacja obejmuje dziesięć współczynników określonych w normie jako wymagane. Są to:

- obszar tęczy nadający się do użytku (ang. *usable iris area*),
- kontrast między tęczą a twardówką oka (ang. *iris-sclera contrast*),
- kontrast między tęczą a źrenicą (ang. *iris-pupil contrast*),
- okrągłość granicy źrenicy (ang. *pupil boundary circularity*),
- wykorzystanie skali szarości (ang. *grey scale utilization*),
- promień tęczy (ang. *iris radius*),
- rozszerzenie źrenicy (ang. *pupil dilation*),
- koncentryczność źrenicy i tęczy (ang. *iris-pupil concentricity*),
- poprawność marginesów (ang. *margin adequacy*),
- ostrość (ang. *sharpness*).

Każdy z zaimplementowanych modułów posiada progi określone w pliku konfiguracyjnym na podstawie normy ISO/IEC 29794-6. W przypadku braku zdefiniowanych progów dla poszczególnych współczynników w normie, ich wartości zostały ustalone empirycznie. Zarówno dolne, jak i górne progi dla każdego współczynnika mogą być ręcznie modyfikowane przez użytkownika. Ponadto każdy moduł może być indywidualnie włączany lub wyłączany z procesu działania programu przez zmianę odpowiednich parametrów w konfiguracji. Strukturalnie każdy z modułów został zaimplementowany jako oddzielny plik skryptowy języka Python. Wszystkie moduły importowane są do pliku głównego skryptu.

20.4. Uzyskane wyniki

W ramach pracy, działanie programu zostało przetestowane pod kątem poprawności funkcjonalności, wykorzystując ręcznie przygotowany zestaw obrazów, zawierający dane utworzone na podstawie obrazu ze zbioru CASIA-Iris-Interval, przekształconego w taki sposób, aby uwydatnić oddzielnie każdy z mierzonych współczynników. Przykładowe dane testowe zostały przedstawione na rysunkach od 20.4a do 20.4c. Przetestowana została również wydajność programu w kontekście przetwarzania obrazów różnej wielkości oraz wydajność każdego z modułów współczynników jakości implementowanych w programie. Wartości otrzymane dla kolejnych współczynników w porównaniu z ich wartościami bazowymi przedstawiono w tabeli 20.1. Zakres oraz progi każdej z miar różnią się między współczynnikami i nie są porównywalne między sobą.



Rysunek 20.4. Przykładowe, celowo zniekształcone dane testowe pod kątem:
 (a) wykorzystania skali szarości, (b) poprawności marginesów, (c) ostrości

Tabela 20.1. Wartości poszczególnych współczynników dla obrazu bazowego i jego przekształceń

Współczynnik	Wartość przed zniekształceniem	Wartość po zniekształceniu
Obszar tęczówki nadający się do użytku	88,4	58,7
Kontrast między tęczówką a twardówką oka	12,6	6,67
Kontrast między tęczówką a źrenicą	61,5	15,1
Okrągłość granicy źrenicy	95,6	70,7
Wykorzystanie skali szarości	6,9	0,0
Promień tęczówki	93,5	57,7
Rozszerzenie źrenicy	34,7	61,6
Koncentryczność źrenicy i tęczówki	95,1	85,6
Poprawność marginesów	100	32,8
Ostrość	99,5	17,0

Oprócz testów funkcjonalności, zbadano także wydajność programu w zależności od rozmiarów zadanych obrazów oraz włączonych modułów.

Tabela 20.2. Porównanie wydajności programu w zależności od rozmiaru obrazu

Zestaw danych	Wymiary obrazów	Średni czas przetwarzania jednego obrazu
CASIA-Iris-Degradation	640×480 px	311,545 ms
CASIA-Iris-Interval	320×280 px	109,334 ms

Przedstawione w tabeli 20.2 zostały wyniki testów dla pełnej egzekucji programu dla dwóch zestawów danych, CASIA-Iris-Degradation, zawierającego obrazy o wymiarach 640 na 480 pikseli, oraz CASIA-Iris-Interval, zawierającego obrazy o wymiarach 320 na 280 pikseli.

Tabela 20.3. Porównanie wydajności programu w zależności od modułu

Testowany moduł	Średni czas przetwarzania jednego obrazu	Średni czas działania modułu
Brak modułu	13,305 ms	-
Obszar tęczy nadający się do użytku	25,326 ms	12,021 ms
Kontrast między tęczą a twardówką	15,936 ms	2,631 ms
Kontrast między tęczą a źrenicą	19,509 ms	6,204 ms
Wykorzystanie skali szarości	18,863 ms	5,558 ms
Promień tęczy	15,766 ms	2,461 ms
Rozszerzenie źrenicy	14,753 ms	1,448 ms
Koncentryczność źrenicy i tęczy	14,824 ms	1,519 ms
Poprawność marginesów	18,023 ms	4,718 ms
Ostrość	78,284 ms	64,979 ms

W tabeli 20.3 przedstawiono natomiast wydajność programu w zależności od wykorzystywanych modułów. Testy wydajności modułów wykonywane były z wykorzystaniem obrazów o wymiarach 320 na 280 pikseli.

Z wyników można zaobserwować, że program jest zdolny do przetwarzania obrazów w czasie niemal rzeczywistym, pod warunkiem, że dane wejściowe są relatywnie niewielkich rozmiarów. Większość czasu działania programu jest wykorzystywana na obliczenia zawarte w module ostrości, który jest najbardziej kosztowny wydajnościowo. Jednak modularność programu pozwala na jego wyłączenie w przypadku, gdy użytkownik priorytetowo traktuje wydajność programu ponad pełne pokrycie wymagań normy.

20.5. Podsumowanie

Przedstawiona praca dyplomowa miała na celu adresowanie istotnego problemu zapewnienia odpowiedniej jakości danych na wejściu do systemów biometrycznych, koncentrując się na wykrywaniu tęczy. W tym kontekście, głównym celem było stworzenie aplikacji umożliwiającej automatyczne określenie poziomu jakości obrazów tęczy, zgodnie z normą ISO/IEC 29794-6:2015.

Realizacja projektu zaowocowała opracowaniem kompleksowego rozwiązania w postaci aplikacji konsolowej opartej na języku Python. Aplikacja zawiera dziesięć modułów współczynników jakości, opartych na zaleceniach zawartych w normie, takich jak moduł pozwalający na obliczenie obszaru tęczy nadającego się do użytku lub ostrości obrazu. Dzięki nim użytkownik może skutecznie ocenić jakość danych wejściowych przed ich przetwarzaniem przez dalsze etapy systemu biometrycznego. Aplikacja została zaprojektowana z myślą o pełnej modularności i elastyczności, co umożliwia łatwe dostosowanie oprogramowania do różnych wymagań użytkownika.

W wyniku przeprowadzonych testów funkcjonalności oraz wydajności aplikacji, potwierdzono jej skuteczność w przetwarzaniu obrazów tęczy w czasie zbliżonym do

rzeczywistego. Ponadto, analiza wydajności modułów współczynników pozwoliła na identyfikację obszarów o potencjalnie większym zapotrzebowaniu na optymalizację, takich jak moduł ostrości.

Podsumowując, opracowany projekt stanowi użyteczne narzędzie w dziedzinie biometrycznego wykrywania tęczówki, mogące być wykorzystane zarówno w środowisku naukowym, jak i komercyjnym. Możliwość dostosowania analizowanych współczynników oraz modularność aplikacji sprawiają, że może ona być łatwo integrowana z istniejącymi systemami biometrycznymi, co otwiera drogę do szerszego zastosowania w praktyce.

Bibliografia

- [1] Jain A., Flynn P., Ross A., *Handbook of Biometrics*, (Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [2] Secretary I.C., *Information technology-biometric sample quality – part 6: Iris image data*. 2015.
- [3] Li Y.h., Savvides, M., *Iris Recognition, Overview*, Springer US, Boston, MA, 2015.
- [4] Othman N., Dorizzi B., Garcia-Salicetti S., *Osiris: An open source iris recognition software*, Pattern Recognition Letters. 2016, tom 82, s. 124–131. An insight on eye biometrics.

Analiza wybranych systemów biometrii anulowalnej pod kątem nielinkowalności szablonów oraz wpływu na współczynniki FAR i FRR

Izabela Majchrowska

Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Wojciech Wodo

Katedra Podstaw Informatyki Politechniki Wrocławskiej

Wykorzystywanie danych biometrycznych w celach uwierzytelniających stało się bardzo popularne w ostatnich latach. Ze względu na niezmiennosc biometrii, ważnym aspektem jest odpowiednie jej zabezpieczenie przed kompromitacją. Biometria anulowalna jest jednym z rozwiązań mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa systemów biometrycznych. Za pomocą odpowiednich algorytmów, na podstawie jednej próbki biometrycznej, możliwe jest wygenerowanie wielu, niezależnych tożsamości. Tożsamości w przypadku kompromitacji mogą zostać usunięte i zastąpione nowymi. W niniejszej pracy zbadana została nielinkowalność (niezależność) szablonów wygenerowanych przez algorytmy Bloom Filter oraz Biohashing. Przeanalizowany został również wpływ zastosowania biometrii anulowalnej na statystyki błędów systemu biometrycznego – współczynniki FAR oraz FRR. W celu wykonania analizy zaimplementowana została symulacja trzech systemów – podstawowego oraz dwóch biometrii anulowalnej.

21.1. Cel i założenia

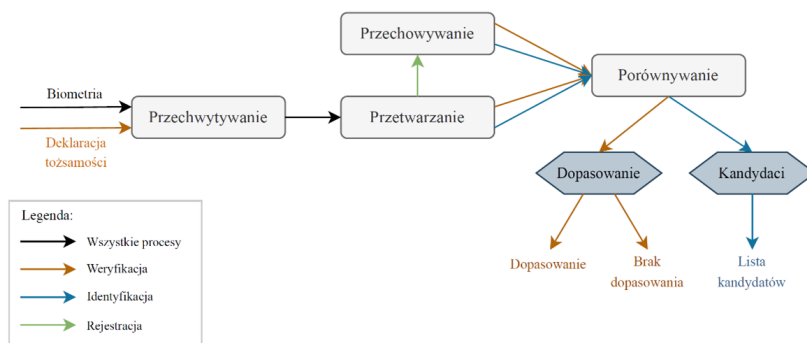
Praca stanowi analizę dwóch algorytmów biometrii anulowalnej pod kątem nielinkowalności szablonów biometrycznych oraz współczynników fałszywych odrzuceń (FRR) i fałszywych akceptacji (FAR). Zaimplementowano podstawowy system biometryczny, służący do ekstrakcji cech unikalnych oraz dwa algorytmy biometrii anulowalnej. Implementacja umożliwiła wygenerowanie odpowiednich wykresów zależności współczynników FAR oraz FRR, które wykorzystano do wskazania wpływu zastosowania algorytmów biometrii anulowanej na właściwości systemu biometrycznego. Poddano analizie jedną z głównych cech systemów biometrii anulowalnej, czyli nielinkowalność szablonów. Wykorzystując zaprojektowany system wygenerowano wiele tożsamości dla jednej osoby, które porównano ze

sobą nawzajem oraz z tożsamościami innych użytkowników. Na podstawie przyrównanych danych utworzono wykresy podobieństwa tożsamości, które wykorzystano do ewaluacji nielinkowalności. Dodatkowo, zbadano reakcje algorytmów na modyfikacje w próbce biometrycznej, takie jak: zmiana barwy, jasności, przysłonięcie fragmentu biometrii.

21.2. Wstęp teoretyczny

21.2.1. Podstawowy system biometryczny

Zadaniem podstawowego systemu biometrycznego jest odpowiednie przetworzenie próbki biometrycznej w taki sposób, aby możliwe było wytworzenie szablonu biometrycznego (rysunek 21.1).



Rysunek 21.1. Działanie podstawowego systemu biometrycznego

Sposób przetwarzania danych biometrycznych zależy od rodzaju wykorzystywanej biometrii. W pracy zdecydowano się na zastosowanie biometrii tęczywki oka, wykorzystując przetwarzanie zaprezentowane w artykule [1]. W celu wydobywania szablonu biometrycznego, zdjęcie tęczywki należy poddać następującym etapom:

1. Segmentacja – etap polegający na odpowiednim wydobyciu fragmentu zdjęcia zawierającego tęczywkę oka. W skład tego etapu wchodzi następujące kroki:
 - Przekształcenie obrazu w skali szarości,
 - Rozmycie Gaussowskie obrazu,
 - Detekcja krawędzi [2],
 - Lokalizacja źrenicy oraz tęczywki, wykorzystując transformatę Hough'a [3];
2. Normalizacja – etap polegający na przekształceniu obrazu tęczywki z formatu „pierścienia” na format prostokątny. Wykorzystywany jest w tym celu algorytm Rubber Sheet Model [4];
3. Ekstrakcja cech – odpowiednie przetworzenie obrazu w celu wydobywania cech szczególnych. Etap ten składa się z następujących kroków:
 - Algorytm DWT [5] – przepuszczenie obrazu tęczywki przez podwójny filtr dolnoprzepustowy,
 - Podział obrazu na bloki o wymiarach $N \times N$,

- Algorytm SVD [6] – wytworzenie macierzy diagonalnej wartości osobliwych dla każdego bloku oraz odczytanie pierwszej występującej w macierzy wartości.
- Porównywanie kolejnych wartości macierzy, wykorzystując zasadę:

```

if (i >= i+1):
    value = 1
else:
    value = 0

```

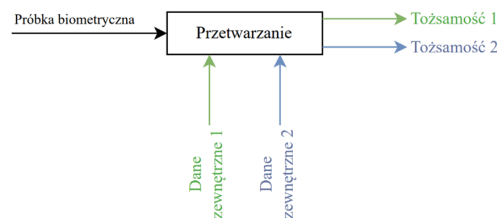
W celu porównania dwóch szablonów biometrycznych wykorzystywany jest dystans Hamminga [7], który określa ilość różniących się w dwóch macierzach pozycji.

21.2.2. Biometria anulowalna

Jednym z podstawowych problemów biometrii jest jej niezmienność. Dane biometryczne są na stałe powiązane z daną jednostką oraz nie mogą zostać zmodyfikowane. Stanowi to duży problem bezpieczeństwa, gdyż w przypadku skompromitowania danych biometrycznych, atakujący może uzyskać dostęp do danych oraz systemów chronionych daną biometrią. W przeciwieństwie do innych metod, np. haseł, biometria nie może zostać zmodyfikowana.

Najlepszym sposobem na przechowywanie szablonów biometrycznych mogłoby być ich hashowanie. Metoda ta jednak nie może zostać wykorzystana, gdyż najmniejsza modyfikacja wejścia, utworzy zupełnie inną, niezależną wartość skrótu. Dane biometryczne podczas skanowania będą się minimalnie różnić od wzorca znajdującego się w bazie danych, ze względu na m.in. inne oświetlenie, czy kąt skanowania, co spowoduje wygenerowanie zupełnie różnej wartości skrótu. Dlatego, hashowanie danych biometrycznych uniemożliwiłoby prawidłową weryfikację.

W celu rozwiązania powyższych problemów, powstała koncepcja biometrii anulowalnej. Polega ona na dodatkowym przetwarzaniu szablonu biometrycznego algorytmami uzależnionymi od danych zewnętrznych (rysunek 21.2). Dane te powodują, iż przy każdej ich zmianie, algorytm zachowuje się inaczej. Zmieniając dane zewnętrzne, możliwe jest wygenerowanie wielu różnych wyjść – tożsamości. Oznacza to, że w przypadku kompromitacji możliwe jest usunięcie oraz wygenerowanie nowej tożsamości, przez zmianę danej zewnętrznej. Tożsamości wygenerowane algorytmami biometrii anulowalnej powinny charakteryzować się nielinkowością. Oznacza to, że posiadając wiele tożsamości, wytworzonych na podstawie jednej próbki biometrycznej, niemożliwe jest określenie, że należą one do jednej osoby.



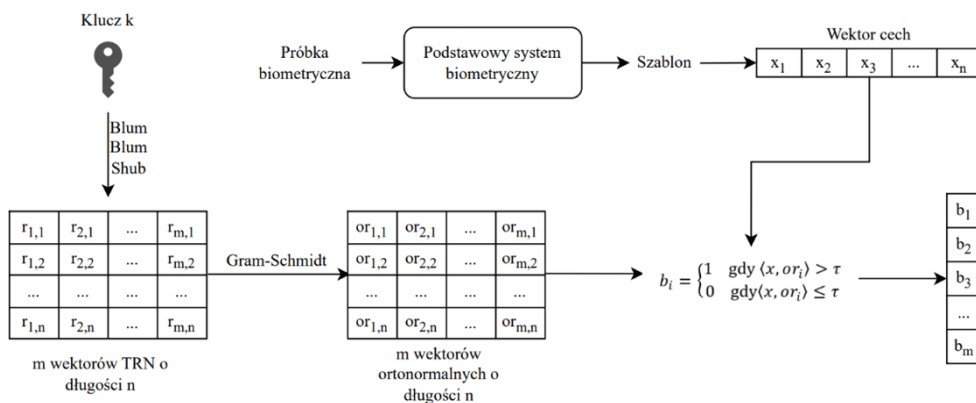
Rysunek 21.2. Działanie systemu biometrii anulowalnej

Do celów pracy, wybrane zostały dwa algorytmy biometrii anulowalnej – Biohashing [8] oraz Bloom Filters [9].

Biohashing

Algorytm Biohashing wytwarza tożsamość biometryczną w postaci wektora binarnego. Początkowo szablon biometryczny, wytworzony podstawowym systemem biometrycznym, należy przekształcić w postać wektora – wektor cech. W tym celu, kolejne wiersze macierzy są ze sobą po kolei łączone.

Algorytm wykorzystuje jedną daną zewnętrzną, nazywaną kluczem, która jest unikalna dla każdego użytkownika. Na podstawie klucza, generowana jest macierz tokenizowanych wektorów pseudolosowych, wykorzystując algorytm Blum Blum Shub [10]. Wygenerowane wektory poddawane są ortonormalizacji Grama–Schmidta [11]. Kolejno, wyliczany jest iloczyn skalarny każdego wektora ortonormalnego z wektorem cech. Jeśli wartość iloczynu jest większa niż ustalony próg, do nowego wektora dodawana jest wartość „1”, w przeciwnym wypadku dodawana jest wartość „0”. Nowo utworzony wektor jest tożsamością. Na rysunku 21.3 przedstawiono dokładny schemat działania algorytmu Biohashing.



Rysunek 21.3. Generowanie tożsamości algorytmem Biohashing

Tożsamości są ze sobą porównywane przez wyliczenie odległości Hamminga.

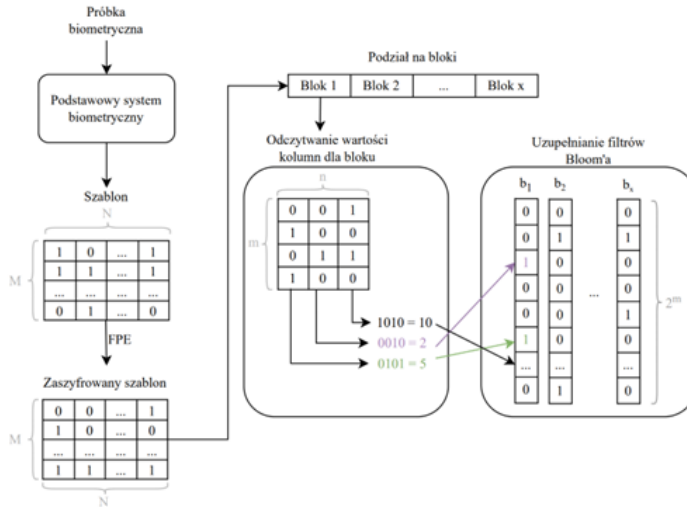
Bloom Filters

Algorytm Bloom Filters tworzy tożsamość w postaci macierzy binarnej, wykorzystując koncepcję filtru Blooma [13]. Wykorzystywane są dwie wartości zewnętrzne:

- Tweak – unikalny dla każdego użytkownika klucz;
- Klucz systemowy – klucz stały i jednakowy dla każdego użytkownika systemu.

Obydwa klucze wykorzystywane są do szyfrowania FPE (Format-preserving Encryption) [13], polegającego na szyfrowaniu przy zachowaniu domeny oraz formatu obiektu. Zasyfrowana macierz dzielona jest na jednakowej wielkości bloki. Dla każdego z bloków odczytywane są wartości kolumn, a wartość binarna przekształcana jest na wartość dziesiętną. Dla każdego bloku tworzony jest wektor uzupełniony zerami, a każda odczytana

wartość dziesiątą, wskazuje numer pozycji w wektorze, którą należy uzupełnić wartością „1”. Uzupełnione dla każdego bloku wektory tworzą macierz, która jest wygenerowaną tożsamością biometryczną. Na rysunku 21.4 przedstawiono dokładny schemat działania algorytmu Bloom Filters.



Rysunek 21.4. Generowanie tożsamości algorytmem Bloom Filters

W celu porównania dwóch tożsamości, przez autorów artykułu [9] zaproponowany został wzór (21.1).

$$Diff = \frac{\sum_{i=1}^x \frac{HD(b_i, b'_i)}{|b_i| + |b'_i|}}{x} \quad (21.1)$$

gdzie:

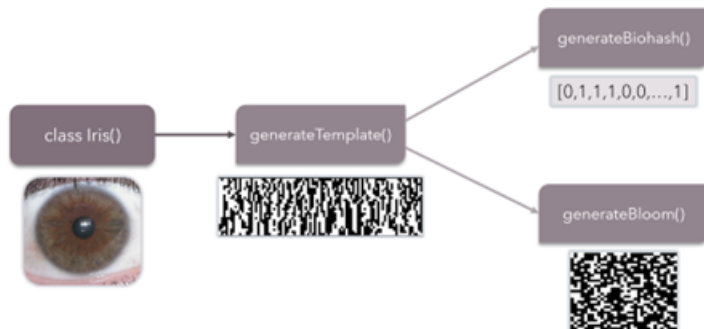
- x – liczba filtrów Blooma – liczba kolumn,
- b_i – kolejny filtr Blooma jednej tożsamości,
- b'_i – kolejny filtr Blooma drugiej tożsamości,
- $HD(b, b')$ – dystans Hamminga między dwoma wektorami b i b' ,
- $|b|$ – liczba bitów wektora przyjmująca wartość „1”.

21.3. Projekt i wykonanie

Do zrealizowania celu, niezbędna była odpowiednia baza danych. Wybrana została baza UBIRISv1 [14]. Zawiera ona zdjęcia oczu należących do 246 osób, w tym po 5 zdjęć jednego oka.

Do implementacji trzech systemów, wykorzystany został język Python w wersji 3.10. Wykorzystane zostały liczne biblioteki, mające na celu między innymi: ułatwienie w operowaniu na obrazach oraz macierzach, analizę, czy wizualizację danych, przykładowo.: OpenCV, Numpy, Pandas.

Zaimplementowana została klasa, zawierająca metody, symulujące działanie systemów biometrycznych (rysunek 21.5).



Rysunek 21.5. Uproszczony schemat implementacji

Początkowo, na podstawie zdjęcia tęczówki wywoływana jest metoda `generateTemplate()`, której zadaniem jest utworzenie szablonu biometrycznego, bazując na algorytmie opisanym w artykule [1]. Na podstawie wygenerowanego szablonu, możliwe jest wywołanie dwóch metod, odpowiadających za symulację algorytmów biometrii anulowalnej. Za utworzenie tożsamości algorytmem Biohashing odpowiada metoda `generateBiohash()`, a za algorytm Bloom Filters metoda `generateBloom()`.

Co więcej, poza klasą zdefiniowane zostały dodatkowe funkcje, służące do wykonania odpowiedniej analizy. Funkcjonalności te mają na celu:

- rejestrację wszystkich użytkowników – utworzenie szablonu oraz dwóch tożsamości,
- usuwanie użytkowników,
- generowanie odpowiednich wykresów:
 - zależności współczynników FAR oraz FRR od progu akceptacji systemu
 - histogramy ukazujące wyniki porównywania próbek należących do jednakowych oraz różnych użytkowników
 - histogramy ukazujące wyniki porównywania próbek należących do różnych użytkowników oraz tysiąca tożsamości wygenerowanych na podstawie jednej próbki biometrycznej.

Dodatkowo, analizie poddano zdolność algorytmów do rozpoznawania zmodyfikowanych próbek biometrycznych. Na rysunku 21.7 przedstawiono kolejne modyfikacje, jakim poddana została oryginalna próbka biometryczna (rysunek 21.8).



Rysunek 21.6. Oryginalne zdjęcie oka

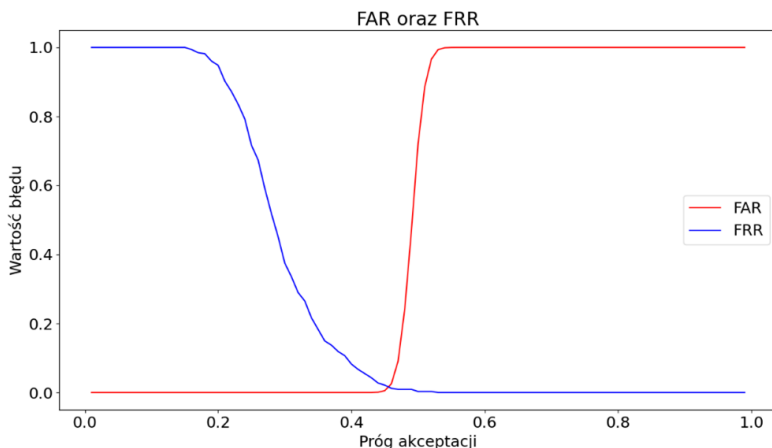


Rysunek 21.7. Zmodyfikowane próbki biometryczne

21.4. Uzyskane wyniki

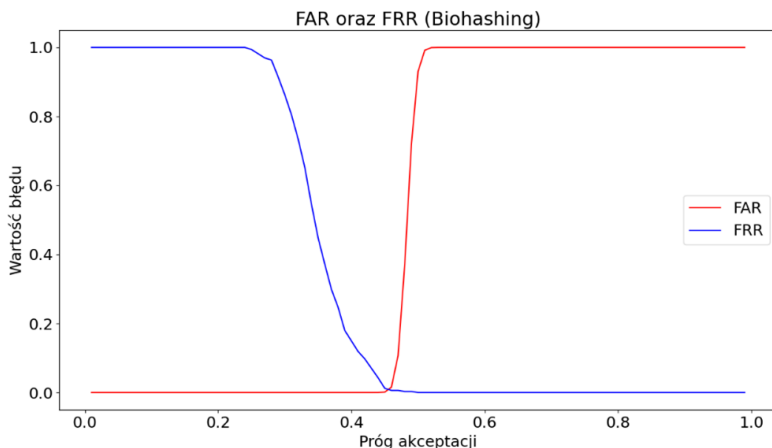
21.4.1. Współczynnik FAR oraz FRR

Jako pierwsze analizie poddane zostały wykresy, ukazujące wartości współczynników FAR oraz FRR w zależności od ustawione progu akceptacji systemu biometrycznego. Na rysunku 21.8 przedstawiono wyniki otrzymane dla podstawowego systemu biometrycznego. O uzyskanym wyniku w dużym stopniu zależy punkt przecięcia krzywych. Powinien on znajdować się możliwie jak najniżej, gdyż wtedy obydwa współczynniki są sobie równe i przyjmują stosunkowo małą wartość błędu. Dla podstawowego systemu biometrycznego krzywe przecinają się dla progu wynoszącego 0,46, przyjmując błąd o wartości około 0,015 ($\approx 1,5\%$). Jest to akceptowalny, niski błąd, co oznacza, że system działa prawidłowo.



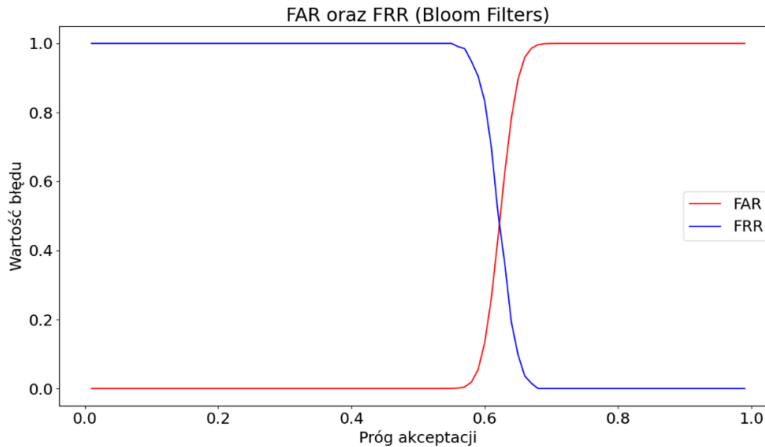
Rysunek 21.8. Wartości współczynników FAR i FRR dla podstawowego systemu biometrycznego

Wyniki dla systemu wykorzystującego algorytm Biohashing zostały przedstawione na rysunku 21.9. Krzywe przecinają się dla jednakowego progu, jak w przypadku podstawowego systemu (0,46), przyjmując wartość błędu równą około 0,0074 ($\approx 0,74\%$). Wartość błędu znacząco się zmalała, co oznacza, że algorytm Biohashing pozytywnie wpłynął na optymalne parametry systemu. Jednakże, krzywe są bardziej nachylone, co oznacza, że dla poszczególnych progów akceptacji, wartości błędów są większe niż dla podstawowego systemu, przez co cięższe może być dobranie odpowiedniego progu akceptacji.



Rysunek 21.9. Wartości współczynników FAR i FRR dla algorytmu Biohashing

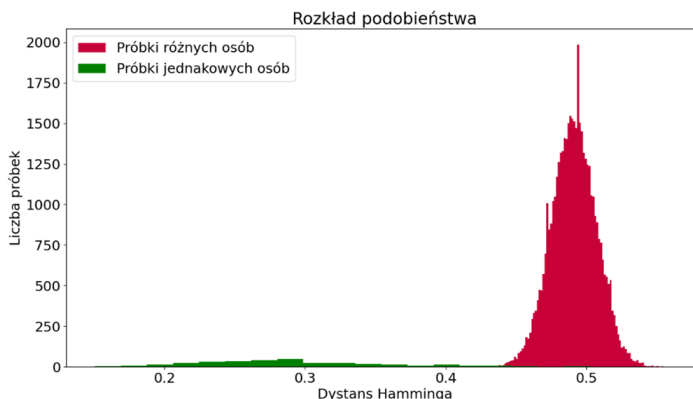
Na wykresie 21.10 przedstawiono wyniki uzyskane dla algorytmu Bloom Filters. Krzywe przyjmują inną postać niż dla poprzednich algorytmów. Są one niemalże symetryczne, a punkt przecięcia następuje dla wartości błędu około 0,47 ($\approx 47\%$). Jest to nieakceptowalny błąd, który świadczy o dużej losowości systemu.



Rysunek 21.10. Wartości współczynników FAR i FRR dla algorytmu Bloom Filters

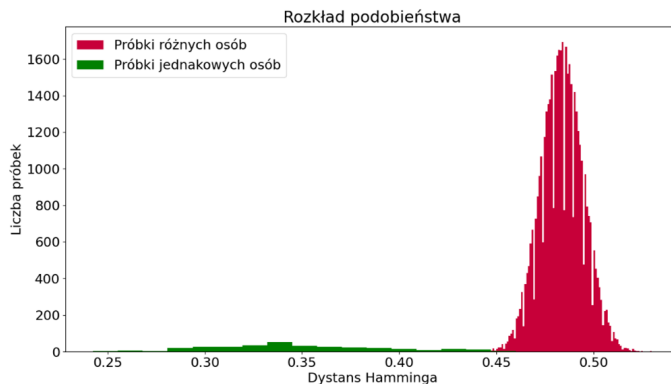
21.4.2. Rozkład podobieństwa próbek

Wygenerowane zostały histogramy, ukazujące wyniki które zostały osiągnięte podczas porównywania próbek należących do tych samych użytkowników oraz różnych. Na rysunku 21.11 przedstawiono histogramy wygenerowane dla podstawowego systemu biometrycznego. Między dwoma histogramami widoczna jest wyraźna granica, mimo iż w niewielkim stopniu histogramy się pokrywają. Możliwe jest rozróżnienie próbek należących do tych samych oraz do różnych użytkowników. Oznacza to, że system ma umiejętność rozpoznawania próbek.



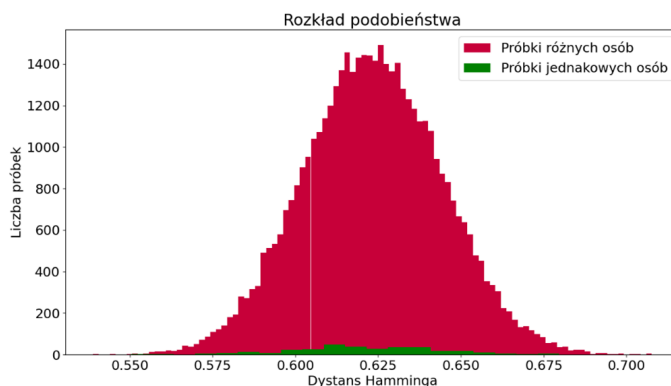
Rysunek 21.11. Rozkład podobieństwa próbek dla podstawowego systemu biometrycznego

Na rysunku 21.12 zaprezentowane zostały wyniki dla algorytmu Biohashing. Histogramy również są wyraźnie rozdzielone, nachodząc na siebie w niewielkim stopniu. Algorytm posiada umiejętność rozpoznawania próbek.



Rysunek 21.12. Rozkład podobieństwa próbek dla algorytmu Biohashing

Dla algorytmu Bloom Filters (rysunek 21.13) histogramy całkowicie się nachodzą. Porównywanie tych samych użytkowników oraz różnych użytkowników, zwraca takie same wyniki. Oznacza to, że system korzystający z algorytmu Bloom Filters nie ma zdolności do rozpoznawania próbek.



Rysunek 21.13. Rozkład podobieństwa próbek dla algorytmu Bloom Filters

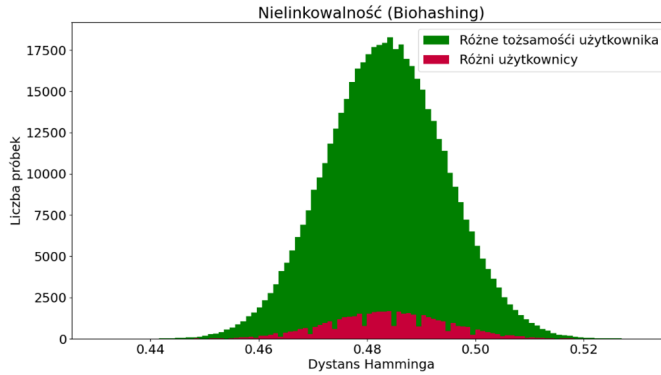
21.4.3. Nielinkowalność

Dla algorytmów anulowanych wygenerowane zostały histogramy pokazujące wyniki uzyskane podczas porównywania tysiąca tożsamości wygenerowanych na podstawie jednej próbki biometrycznej oraz podczas porównywania różnych użytkowników.

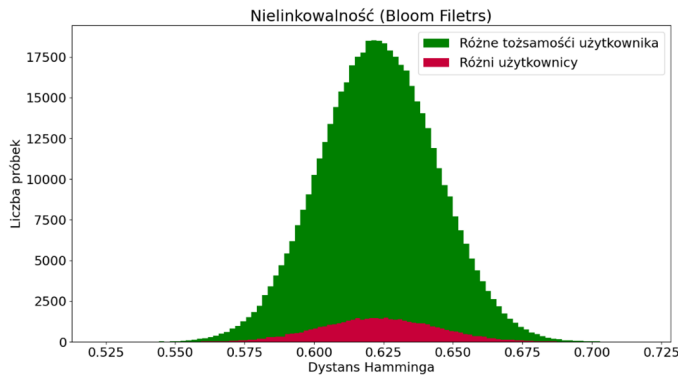
Na rysunku 21.14 przedstawione zostały wyniki dla algorytmu Biohashing. Wyniki uzyskane dla wielu tożsamości jednej osoby pokrywają się z wynikami osiągniętymi przy porównywaniu różnych osób. Oznacza to, że algorytm nie posiada umiejętności rozróżnienia nowej tożsamości od innego użytkownika. Niemożliwe jest stwierdzenie, czy jest to nowa tożsamość, czy inna osoba. Cecha nielinkowalności została spełniona.

Na rysunku 21.15 przedstawiono wyniki uzyskane dla algorytmu Bloom Filters. Histogramy całkowicie pokrywają się ze sobą, co mogłoby świadczyć o spełnionej cesze

nielinkowalności. Jednakże, wcześniejsza analiza wykazała, iż system nie posiada umiejętności rozpoznawania próbek. Niemożliwe jest, więc, stwierdzenie, iż nieelinkowalność została spełniona, gdyż nie wiadomo, czy otrzymane wykresy nie wynikają z nieprawidłowego działania systemu.



Rysunek 21.14. Rozkład podobieństwa tożsamości dla algorytmu Biohashing



Rysunek 21.15. Rozkład podobieństwa tożsamości dla algorytmu Bloom Filters

Zmodyfikowane próbki zostały porównane z oryginalną próbką, a wyniki zostały przedstawione w tabeli 21.1. Podstawowy algorytm oraz algorytm Biohashing z większością modyfikacji poradziły sobie bezbłędnie. Osiągnięte wyniki zawierają się poniżej optymalnego progu (0,46), co oznacza, że mimo modyfikacji algorytmy odpowiednio dopasowały próbki. Algorytm Bloom Filters nie poradził sobie z modyfikacjami próbek, zwracając wysokie wyniki. Wyjątkiem jest rysunek 21.7d, dla którego uzyskany został akceptowalny, niski wynik – algorytm rozpoznał próbkę. Niemożliwe było porównanie próbki z nałożonym filtrem (rysunek 21.7e), gdyż nie został utworzony dla niej szablon biometryczny. Prawdopodobnie zbyt ciemna tęczówka uniemożliwiła segmentację.

Tabela 21.1. Wyniki porównywania próbek – odległości Hamminga między wzorcem a zmodyfikowaną próbką

Zdjęcie	Algorytm podstawowy	Biohashing	Bloom Filters
Rysunek 21.7a	0,4	0,427	0,72
Rysunek 21.7b	0,204	0,29	0,714
Rysunek 21.7c	0,188	0,279	0,712
Rysunek 21.7d	0,022	0,091	0,321
Rysunek 21.7e	Fail to enroll	Fail to enroll	Fail to enroll
Rysunek 21.7f	0,254	0,333	0,694
Rysunek 21.7g	0,256	0,329	0,698
Rysunek 21.7h	0,279	0,352	0,715
Rysunek 21.7i	0,266	0,344	0,695

21.5. Podsumowanie

W ramach pracy udało się zrealizować wszystkie postawione cele. Krokiem koniecznym do realizacji pracy była implementacja trzech w pełni funkcjonalnych systemów biometrycznych. Udało się zaprojektować program, który umożliwi utworzenie szablonu biometrycznego, wykorzystując przetwarzanie tęczy oka. Zaimplementowane zostały dwa opisane w artykułach [8] oraz [9] algorytmy anulowalne mające na celu zwiększenie bezpieczeństwa systemów biometrycznych. Program umożliwia odpowiednią manipulację danymi, dając możliwość rejestrowania użytkowników, ich usuwania oraz generowania/zmieniaania danych zewnętrznych koniecznych do algorytmów anulowalnych. Z wykorzystaniem zaimplementowanych systemów oraz dodatkowych funkcji, mających na celu porównywanie szablonów oraz interpretację wyników, wygenerowane zostały odpowiednie wykresy. Na podstawie wykresów możliwe było określenie jak wprowadzenie dodatkowego przetwarzania wpływa na współczynniki FAR oraz FRR systemu biometrycznego. Wprowadzenie biometrii anulowalnej zwiększa wartości współczynników FAR oraz FRR dla niektórych progów akceptacji, jednakże optymalna wartość błędu może przyjmować niższą wartość niż dla systemu podstawowego. Wprowadzenie dodatkowego przetwarzania negatywnie wpływa na umiejętność systemu na rozpoznawanie próbek biometrycznych, gdyż krzywe FAR i FRR oraz histogramy dla jednakowych oraz różnych próbek są do siebie bardziej zbliżone. Utrudnia to dobranie odpowiedniego progu przy zachowaniu niskich wartości obydwu błędów. Wnioski w dużym stopniu zostały wyciągnięte na podstawie algorytmu Biohashing, ponieważ odpowiednia analiza umożliwiła odkrycie, iż algorytm Bloom Filters nie funkcjonuje prawidłowo i nie posiada zdolności do prawidłowego rozpoznawania próbek.

Udało się wykonać odpowiednią analizę nielinkowalności tożsamości biometrycznych wygenerowanych przy pomocy algorytmów anulowalnych. Wykazane zostały pozytywne wyniki dla algorytmu Biohashing, jednakże ze względu na nieprawidłowe działanie algorytmu Bloom Filters niemożliwe było rzetelne zbadanie nielinkowalności tego algorytmu.

Ze względu na negatywne wyniki otrzymane dla algorytmu Bloom Filters, zdecydowano się na kontakt z autorami artykułu [9]. Zdecydowano, iż niepożądane wyniki mogą być spowodowane wykorzystaniem innej bazy danych niż zaproponowana przez autorów. Algorytm może być niewystarczająco odporny na duże błędy bitowe, dlatego nie otrzyma-

no pożądaných wyników. Warto zaznaczyć, iż algorytm Biohashing mimo wykorzystanie odmiennego algorytmu podstawowego oraz innej bazy danych niż zaproponowana przez autorów, zwrócił bardzo dobre wyniki. Oznacza to, iż algorytm Biohashing jest algorytmem bardzo uniwersalnym, czego nie można stwierdzić o algorytmie Bloom Filters.

Bibliografia

- [1] Deepika R., Shambhavi M., Impana R., Shishira A.P., Krishna L., Zero-Bit Watermarking Technique for Generation of Unique ID Using Biometric Images. 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), 2022, s. 1–4.
- [2] Canny J., A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **1986**, PAMI-8, s. 679–698.
- [3] Illingworth J., Kittler J., The Adaptive Hough Transform. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **1987**, PAMI-9, s. 690–698.
- [4] Daugman J., How iris recognition works. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* **2004**, 14, s. 21–30.
- [5] Shapiro J.M., Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Transactions on Signal Processing* **1993**, 41, s. 3445–3462.
- [6] Klema V., Laub A., The singular value decomposition: Its computation and some applications. *IEEE Transactions on Automatic Control* **1980**, 25, s. 164–176.
- [7] Hamming R., Classical Error-Correcting Codes: Machines should work. People should think. W *Classical and Quantum Information*; Marinescu D., Marinescu G., Eds., Academic Press: Boston, USA, 2012, s. 345–454.
- [8] Thiyam C., Shahin, A. A variant of cancelable iris biometric based on BioHashing. 2016 International Conference on Signal and Information Processing (ICoNSIP), 2016, s. 1–5.
- [9] Bansal V., Garg S., A cancelable biometric identification scheme based on bloom filter and format-preserving encryption. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences* **2022**, 34, s. 5810–5821.
- [10] Blum L., Blum M., Shub M., A Simple Unpredictable Pseudo-Random Number Generator. *SIAM Journal on Computing* **1986**, 15, s. 364–383.
- [11] Björck Å., Numerics of Gram-Schmidt orthogonalization. *Linear Algebra and its Applications* **1994**, 197–198, s. 297–316.
- [12] Mitzenmacher M., Compressed Bloom filters. *IEEE/ACM Transactions on Networking* **2002**, 10, s. 604–612.
- [13] Bellare M., Ristenpart T., Rogaway P., Stegers T., Format-Preserving Encryption. Cryptology ePrint Archive, Paper 2009/251, 2009.
- [14] Proença H., Alexandre L.A., UBIRIS: A noisy iris image database. 13th International Conference on Image Analysis and Processing – ICIAP 2005, LNCS 3617, 2005, s. 970–977.

Analiza bezpieczeństwa typowej stacji końcowej w Internecie

mgr inż. Michał Józków

Cyberbezpieczeństwo

dr inż. Marcin Jaroszewski

Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki

Niniejsze badanie ocenia skuteczność oprogramowania antywirusowego w kontekście ochrony przed nowoczesnymi zagrożeniami bezpieczeństwa. Przy użyciu specjalnie opracowanych próbek złośliwego oprogramowania, symulujących podstawowe techniki ataku – takie jak modyfikacja plików, zapisywanie do rejestrów systemowych oraz wykorzystanie funkcji systemowych – zbadano, jak skutecznie programy antywirusowe radzą sobie z wykrywaniem różnych komponentów tych działań. Wyniki analizy wykazały znaczące różnice w efektywności poszczególnych rozwiązań. Najlepszy wynik uzyskał Bitdefender, który zidentyfikował jedynie 19 z 178 próbek, pozostawiając 159 działań niewykrytych. Aby rozszerzyć badanie, próbki przesłano również do serwisu VirusTotal, gdzie średnia wykrywalność wyniosła 3 na 74 dostawców. W końcowej fazie eksperymentu przeprowadzono symulacje trzech dużych ataków, które potwierdziły zależność skuteczności wykrycia od zdolności identyfikacji konkretnych technik ataków. Wyniki sugerują potrzebę dalszych badań nad mechanizmami wykrywającymi kluczowe składowe współczesnych zagrożeń. Wyniki jedynie potwierdziły wcześniejsze przypuszczenia: skuteczność poszczególnych składowych definiuje ogólną skuteczność.

22.1. Cel i przebieg pracy

Celem pracy dyplomowej było zbadanie poziomu bezpieczeństwa typowego użytkownika Internetu, który polega wyłącznie na antywirusie, oraz ocena, czy taka forma ochrony rzeczywiście wystarcza do zapewnienia bezpieczeństwa. Spełnienie założonego celu wymagało:

- zdefiniowania infrastruktury typowego użytkownika – OS+AV,
- zdefiniowania charakteru, zachowania i sposobu testowania złośliwych próbek,
- przygotowania środowiska testowego w tym niezbędnych narzędzi oraz próbek,
- testowania najpierw każdej próbki w odizolowanym środowisku, a następnie przesłanie jej do VirusTotal,

- przeanalizowania wyników i wyciągnięcia wniosków,
- dodatkowo: przygotowanie z wcześniejszych próbek trzech dużych ataków o dużej szkodliwości dla zwykłego użytkownika,
- analizy dodatkowych wyników i wyciągnięcia ostatecznych wniosków.

22.2. Wstęp teoretyczny

Firmy, aby skutecznie chronić swoje dane w cyberprzestrzeni, inwestują ogromne środki w zaawansowane systemy zabezpieczeń. Obejmują one takie rozwiązania jak oprogramowanie antywirusowe, systemy EDR/XDR, HIDS, DLP oraz zapory ogniowe. Dodatkowo wdrażają narzędzia monitorujące ruch w sieci, takie jak WAF, IDS czy IPS, które wspierają analizę danych i reakcję na zagrożenia. Tak kompleksowe podejście do ochrony wymaga znacznych nakładów finansowych, ale jest niezbędne, aby sprostać rosnącym wyzwaniom cyberbezpieczeństwa.

Jednak jak wygląda kwestia bezpieczeństwa zwykłych użytkowników? Użytkowników, którymi sami przecież jesteśmy. Nie ma możliwości przeniesienia nawet niewielkiej części takiego systemu do domowych sieci. Przeciętnego użytkownika nie stać na takie rozwiązania, ani nie ma czasu i wiedzy, aby je utrzymywać. I mówimy tutaj tylko o tych, którzy są świadomi zagrożeń i chcieliby jakoś im przeciwdziałać, a takich osób, według ankiety przeprowadzonej przez UE (około 23 tysiące respondentów), nie jest zbyt dużo. Zgodnie z badaniem, tylko 42% respondentów zdecydowało się na zainstalowanie oprogramowania antywirusowego i był to jeden z najwyższych wyników w tej kategorii [1]. Stąd też z powodu niskiej świadomości, braku czasu, pieniędzy i wiedzy, zaczęło się rodzić przekonanie, że antywirus rozwiąże wszystkie te problemy – wystarczy go zainstalować, a bezpieczeństwo będzie zapewnione. Nawet nie trzeba go konfigurować. Zresztą same antywirusy budują takie przekonanie prześcigając się wynikami ich skuteczności i tworząc coraz prostsze interfejsy i ustawienia. Dodatkowo nie mówi się, aby wraz z AV stosować inne rozwiązania oprócz higieny cyfrowej i ogólnych zasad korzystania z Internetu. W internecie zaczynają pojawiać się nawet stwierdzenia, że jeśli ktoś „umie” korzystać z Internetu, to nawet najprostszy i domyślny antywirus w zupełności mu wystarczy. Po co w takim razie firmy wydają setki tysięcy na ochronę danych, skoro wystarczyłoby zwykły antywirus? Przecież technicznie rzecz biorąc, ataki na użytkowników indywidualnych i firmy niewiele się od siebie różnią.

22.3. Projekt i wykonanie

Po zdefiniowaniu środowiska typowego użytkownika, którym jest Windows 10 (wybrany na podstawie danych ze źródła [2]) oraz 12 różnych antywirusów, przystąpiono do jego realizacji.

22.3.1. Środowisko i metodologia testowania

Stworzono główną maszynę wirtualną w technologii VirtualBox, z wyżej wspomnianym systemem operacyjnym, oraz dokonano niezbędnych modyfikacji, takich jak wgranie pry-

watnych plików, instalacja popularnych programów, aktualizacje systemu oraz wstępna, ale nie zaawansowana konfiguracja. Następnie zapisano stan maszyny i utworzono jej 12 klonów. Na każdym z nich zainstalowano jednego antywirusa, zaktualizowano go i wykonano początkowy skan. W kolejnym kroku każda z maszyn została podpięta do nowej izolowanej od Internetu sieci, a następnie utworzono ostateczną migawkę. Od tego momentu, po każdym testowaniu jednej próbki, stan maszyny był przywracany do pierwotnego stanu migawki. Dzięki temu uzyskano pewność, że jedna próba nie wpłynie na wyniki innej i każda z próbek będzie miała to samo środowisko startowe. Po zakończeniu testów w izolowanym środowisku, wszystkie próbki były kolejno wysyłane do VirusTotal. Wykorzystanie tego narzędzia pozwalało na poszerzenie zakresu badań, ponieważ korzysta ono z około 74 silników detekcji zagrożeń, zintegrowanych z Internetem oraz ich pełnym zapleczem. Próbka raz wysłana do VirusTotal jest testowana jednocześnie przez wszystkie dostępne silniki, co eliminuje ryzyko wzajemnego wpływu wyników, które mogłyby wystąpić przy ręcznym testowaniu kolejnych antywirusów z dostępem do internetu. Dzięki temu uzyskano wiarygodne wyniki zarówno z testów lokalnych, jak i zdalnych.

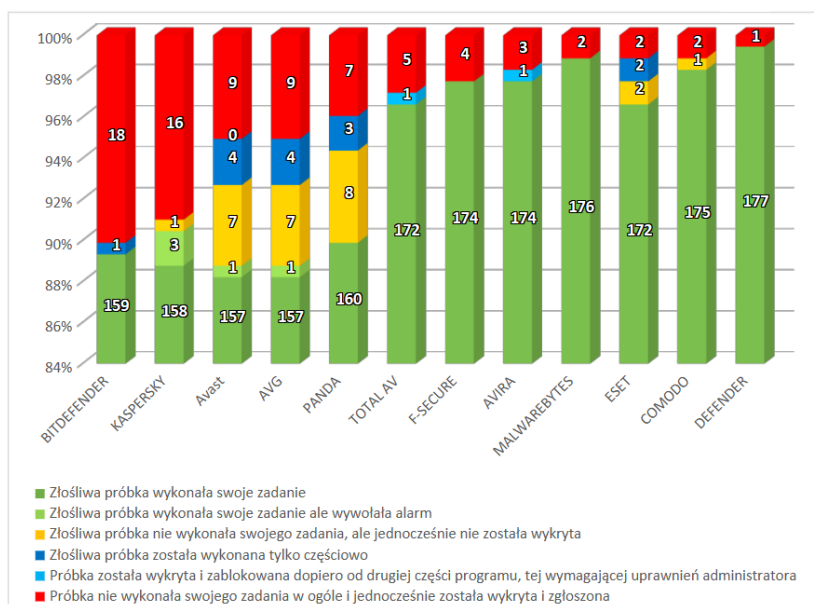
22.3.2. Próbki

Kolejnym krokiem było zdefiniowanie odpowiedniego sposobu przygotowania próbek, tak aby wyniki były obiektywne i nie budziły wątpliwości. Wykorzystanie gotowych próbek złośliwego oprogramowania wiązałyby się z wieloma problemami. Głównym z nich jest to, że antywirusy mogą już je znać i zablokować na podstawie sygnatur, co wykluczałoby możliwość analizy behawioralnej, która jest kluczowym elementem oceny. Dodatkowo, w przypadku wykrycia nie ma pewności, co dokładnie spowodowało detekcję. Czy była to nazwa funkcji, zmienna, czy może próba uzyskania dostępu do chronionego obszaru systemu? Antywirusy z reguły nie dzielą się tymi informacjami. W efekcie uzyskane wyniki byłyby dość uśrednione, mówiąc jedynie o skuteczności wykrywania złośliwego oprogramowania w kontekście wybranych próbek. Takie podejście byłoby niewystarczające. Atak to nie tylko pojedynczy plik, ale cała sieć powiązań różnych technik i zachowań. Zaczyna się od kontaktu z ofiarą, przez dostarczenie ładunku, wykonanie, uzyskanie uprawnień, eksfiltrację, kończąc na zdalnym dostępie i ręcznym działaniu. Dlatego postanowiono rozbić atak na jak najmniejsze składowe, z których każdy element wykonuje tylko jeden określony cel, którego nie da się bardziej rozdrobnić. W ten sposób zbadana zostanie skuteczność antywirusów w wykrywaniu każdego aspektu ataku. Ze względu na dużą liczbę możliwych ataków i ich składowych próba ich samodzielnego wymienienia byłaby nieefektywna i niedokładna. W związku z tym postanowiono oprzeć się na sprawdzonej bazie Mitre ATT&CK, która zawiera szczegółowy i usystematyzowany opis technik ataków. Aby uniknąć problemu wykrycia na podstawie sygnatur lub wcześniej poznanych metadanych, zdecydowano się stworzyć własne próbki. Dzięki temu można mieć pewność, że żaden program antywirusowy nie miał z nimi wcześniej do czynienia i będzie musiał dokładnie je przeanalizować lub śledzić ich zachowanie w poszukiwaniu anomalii. Na czas testowania antywirusy nie były podłączone do sieci, aby zapobiec udostępnieniu próbek innym systemom i informowaniu ich o nowym zagrożeniu. Dodatkowo każda próbka była testowana pod kątem 3 faz: dostarczenia do ofiary, ręcznego skanowania próbki oraz fazy wykonania złośliwego pliku.

Przygotowano łącznie 178 próbek, z których każda realizowała jeden, konkretny cel. Tylko pięć z nich uznano za „bezpieczne”, ponieważ ich działania są typowe dla wielu legalnych programów, np. weryfikacja rozmiaru dostępnej pamięci lub wykrycia języka systemu operacyjnego. Innymi słowy, trudno uznać je za złośliwe. Natomiast aż 168 próbek oznaczono jako wymagające „monitorowania” – ich zachowania powinny być obserwowane przez oprogramowanie antywirusowe, a wszelkie odstępstwa od normy natychmiast zgłaszane. Z tych 168 próbek, 152 uznano za podejrzane, czyli takie, których funkcjonalność jest z definicji niebezpieczna i antywirusy powinny albo natychmiast podnieść alarm, albo szczegółowo monitorować ich działania aż do wyjaśnienia wszelkich wątpliwości. Przykładem takiej próbki jest keylogger. Dodatkowo każda próbka miała 3 cechy wspólne, nawiązujące do cech rzeczywistego ataku. Po pierwsze były traktowane jako podejrzane, ponieważ pochodziły z serwera WEB postawionego w testowanej izolowanej sieci, symulując w ten sposób pobranie malware z internetu. Po drugie, nie licząc wyjątków, uruchamiały się w tle bez wyskakujących okienek, przez co użytkownik nie był świadomy ich uruchomienia i działania. Po trzecie były niepodpisane.

22.4. Uzyskane wyniki

Rysunek 22.1 przedstawia wyniki uzyskane przez każdego z analizowanych antywirusów.



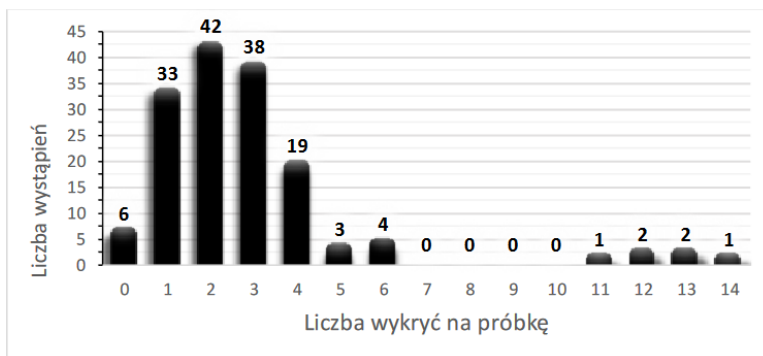
Rysunek 22.1. Skuteczność próbek dla fazy wykonania względem AV

Najlepszą skuteczność spośród 12 badanych AV osiągnął Bitdefender, blokując zaledwie 19 ze 178 próbek, podczas gdy 159 wykonało swoje zadanie. Na drugim miejscu uplasował się Kaspersky, blokując tylko 16 próbek. Zaraz za nimi znajduje się Avast i AVG, które zablokowały po 9 próbek. Wspomniano o nich tylko dlatego, że do podium nadrabiają jakimś dziwnym mechanizmem blokowania złośliwego pliku, ale nie wykrywania

lub usuwania go. Mimo to, że tak wiele próbek w mojej ocenie zachowuje się podejrzanie i realizuje cele, które powinny być przynajmniej zgłaszane oraz posiadają 3 cechy typowo złośliwego oprogramowania, to niestety wyniki antywirusów tego nie pokazują. Aby zobrazować, jak destrukcyjne były niektóre próbki i jak niską miały wykrywalność, podano kilka przykładów: aż 8 antywirusów zezwoliło na całkowite zniszczenie prywatnych danych użytkownika, 9 na ich zaszyfrowanie, 12 na 4 różne DoS-y (w postaci: lokalnej, sieciowej, systemowej i aplikacyjnej), 12 na usuwanie kont systemu oraz 9 na wyczyszczenie MBR lub tablicy partycji. A to tylko mały wycinek całej tablicy wyników. Tak słabe rezultaty antywirusów przerażają, gdyż według nich zwykły użytkownik w ogóle nie może czuć się bezpiecznie. Jest to zaskakujące, bo wychodzi na to, że antywirusy reagują głównie na znane sygnatury, a analiza behawioralna opiera się przede wszystkim na wykryciu określonych zmiennych w systemie, których jest zbyt mało.

22.4.1. Wyniki z VirusTotal

Skoro badane antywirusy nie poradziły sobie z wykrywaniem zagrożeń, warto sprawdzić, czy to jest ich wina, czy być może próbki zostały tak przygotowane, że żaden antywirus ich nie wykryje. Liczba próbek z wynikami, uwzględniając omówione w pracy problemy, wynosiła 151. Wyniki uzyskane za pomocą narzędzia VirusTotal (rysunek 22.2) również są bardzo słabe, ponieważ średnia wykryć na próbkę wśród około 74 dostawców wynosiła prawie 3.



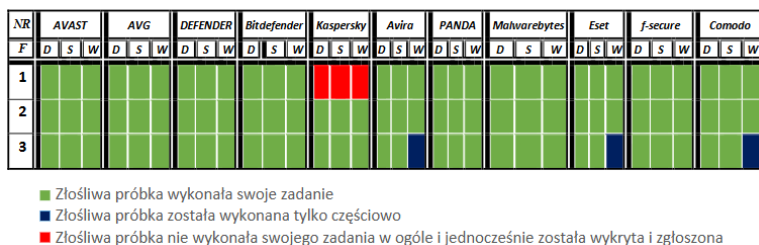
Rysunek 22.2. Histogram wystąpień próbek z określoną liczbą wykryć

Statystycznie rzecz biorąc, plik z taką liczbą wykryć może być uznany za „czysty” w granicach błędu. Co więcej, za ponad 56% wszystkich wykryć odpowiadało jedynie 3 dostawców zabezpieczeń, co po głębszej analizie skłania do wniosku, że w ich przypadku były to nieświadome wykrycia. Ponadto, próbki, które cieszyły się największą wykrywalnością, czyli około dwunastoma wykryciami, nie są tak krytyczne jak wcześniej wymienione. Co z technikami, które mogą usuwać dane użytkowników, ich konta, manipulować danymi w rejestrze usług systemowych, wprowadzać użytkowników w błąd lub nawet kraść dane? Wszystkie te techniki wydają się być bezpieczne według wyników. Dodatkowo, analizując wyniki z VirusTotal, zauważono, że sandboxy dość często przy pliku umieszczały reguły Sigma, które potrafiły trafnie określić cel pliku, na przykład: MEDIUM – Matches rule PowerShell Timestamp. Czy według antywirusów i VirusTotal podmiana znaczników cza-

su pliku realizowana przez PowerShell, a nie system, jest normalna i nie budzi żadnych podejrzeń? Istnieje jeszcze więcej reguł, które dokładnie opisują działanie próbek, jednak ich każdorazowe opisywanie nie ma sensu, skoro wnioski jest ten sam: oprogramowania antywirusowe na nie nie reagują. Jako ciekawostkę warto dodać, że sandboxy w ogóle nie wykryły złośliwego działania próbki „OS Exhaustion Flood”, której celem jest ciągłe obciążanie procesora i pamięci na 100% przez nieskończone kopiowanie samego siebie. Skoro takie zachowanie uznane zostało za naturalne przez antywirusy i innych dostawców, to nie ma nadziei na bezpieczeństwo zwykłego użytkownika.

22.4.2. Kompleksowe ataki

Być może przyczyną tak kiepskich wyników antywirusów był brak połączenia technik w jeden złożony atak, co mogłoby umożliwić ich wykrycie. Jednak takie podejście nie jest skutecznym rozwiązaniem, ponieważ atakujący może zastosować długofalową strategię. Zamiast jednego złożonego ataku, może dostarczać co jakiś czas pojedynczy plik zawierający jedną technikę. Na przykład najpierw zbierze dane do konkretnego folderu, a tydzień później wyśle je na zdalny serwer. Wówczas nie ma szans na wykrycie połączonych technik, ponieważ takie połączenie nie istnieje. Niemniej jednak stworzone zostały trzy duże ataki, składające się wyłącznie z technik, które nie były wykrywane przez antywirusy, aby sprawdzić, czy połączenie niewykrytych technik prowadzi do niewykrytego ataku. Jednocześnie dążono do stworzenia jak najbardziej złośliwych i destrukcyjnych dla bezpieczeństwa zwykłego użytkownika programów. Każdy z tych ataków miał inny cel, lecz ich cechą wspólną było podszycie się pod aplikację kalkulatora, aby użytkownik uruchamiając go, myślał, że uruchamia jedynie niewinną aplikację, nie podejrzewając niczego złego w dodatkowych plikach dostarczonych wraz z nią. Tak więc pierwszy atak umożliwiał przechwytywanie wszystkiego, co robi użytkownik i to dotyczyło zarówno tego co wprowadza na klawiaturze, jak i tego co widzi na ekranie. Drugi dostarczał informacji o zasobach, procesach i innych danych systemowych, a trzeci atak nieustannie wykradał prywatne dane i umożliwiał zdalną kontrolę.



Rysunek 22.3. Wyniki skuteczności wykrywania AV względem 3 ataków

Analizując wyniki, zauważono, że połączenie różnych technik praktycznie nie zwiększyło skuteczności wykrywania antywirusów, z wyjątkiem Kasperskiego. Niemniej jednak, w przypadku Kasperskiego, prawdopodobnie rozwiązanie jest podobne do tego z Bitdefendera – w jego przypadku wystarczyło podmienić wywołanie funkcji na inne, aby AV nic nie wykrywał. Dodatkowo te 3 niebieskie pola są tak oznaczone, ponieważ atak został wykonany w 100% i dane zostały wysłane, jednak złośliwy serwer miał problem z ich

poprawnym odczytaniem. Ze względu na ograniczony czas, dokładniejsze zbadanie tych zagadnień nie było możliwe.

Observacje potwierdzają tezę, że jeśli coś nie jest wykrywane od razu, to później również nie będzie. Można by argumentować, że przeprowadzone trzy ataki to zbyt mało i mogą się mieścić w granicach błędu przy tak wielu różnych możliwych kombinacjach. Jednak jeśli te przykłady nie są wystarczająco krytyczne w kontekście bezpieczeństwa użytkownika, aby antywirusy je wykryły, to trudno sobie wyobrazić, co mogłoby być bardziej niebezpieczne. W przypadku wyników z VirusTotal wykrywalność dla odpowiednio 1, 2 i 3 ataków wynosiła: 8, 7, 8 i CS SigmaRules 2 HIGH, 2 HIGH i 1 HIGH. Mimo destrukcyjnego charakteru tych ataków, ich wykrywalność była niższa niż niektórych pojedynczych technik. Reguł Sigma było również zbyt mało i nie dotyczyły one bezpośrednio celów ataku, więc i one sobie nie poradziły.

22.5. Podsumowanie

Praca dyplomowa rzuca światło na istotne niedoskonałości i luki w dzisiejszych systemach antywirusowych. Analizując wyniki badań, można stwierdzić, że obecne rozwiązania nie radzą sobie skutecznie z analizą behawioralną plików. Antywirusy skupiają się głównie na monitorowaniu wąskiego zakresu zmiennych i wywołań, co staje się niewystarczające w obliczu coraz bardziej złożonych zagrożeń w cyberprzestrzeni. Fragmentacja ataków na mniejsze elementy, a następnie ich opisanie i przetestowanie, wyraźnie ujawniło, że wiele zmian w systemie lub potencjalnie złośliwych zachowań pozostaje niewykrytych, mimo że powinny być. Mogłoby się wydawać, że analiza przeprowadzona na ograniczonej liczbie antywirusów nie jest dostateczna. Jednak analiza przeprowadzona za pośrednictwem platformy VirusTotal ujawniła, że skuteczność innych dostawców zabezpieczeń jest bardzo podobna, nie wskazując na jednoznaczne najlepsze rozwiązanie. To prowokuje pytanie, dlaczego niektóre kluczowe aspekty, podobne do tych zawartych w wykrytych Sigma Rules, nie są obecnie monitorowane. Warto również zauważyć, że większość technik wykorzystywanych przez atakujących, w tym tych przedstawionych w pracy, jest rzadko używana przez przeciętnego użytkownika. Zastosowanie tych technik powinno być monitorowane lub blokowane, tymczasem można ich używać przez niepodpisane i nieznanne programy z Internetu. Wdrożenie reguł Sigma lub nawet współpraca antywirusów z narzędziami takimi jak sysmon w celu analizy zachowań mogłoby skutecznie zapobiec wielu atakom. Na zakończenie pracy dyplomowej przedstawiono trzy ataki, które łączyły wcześniej omawiane techniki, charakteryzujące się zerową wykrywalnością, aby sprawdzić czy może zestawienie technik ze sobą jest wykrywane. Wyniki testów wykazały, że tylko jeden z tych ataków został wykryty i to tylko raz przez Kasperskiego przy pierwszym ataku, kolejne dwa już przepuścił. Te trzy ataki były szczególnie krytyczne dla bezpieczeństwa zwykłego użytkownika, gdyż zezwalały na śledzenie, kontrolowanie, analizowanie i wysyłanie prywatnych danych użytkownika, a mimo to mają prawie 100% skuteczność wykonania.

Należy zwrócić uwagę na istotny fakt, że oprogramowanie antywirusowe nie jest dostosowane specjalnie pod indywidualnego użytkownika. Różnorodność konfiguracji możliwych w mechanizmach antywirusowych jest ograniczona, co oznacza, że zarówno po-

tencjalny cyberprzestępca, jak i jego ofiara mogą posiadać ten sam system operacyjny oraz ten sam antywirus z takimi samymi mechanizmami zabezpieczeń. Cyberprzestępca nie musi więc dostarczać wielu różnych wariantów plików do ofiary, aby być pewnym, że przedrą się przez zabezpieczenia. Wystarczy, że przetestuje je u siebie, a jeśli AV nie wykryje wirusa, to najprawdopodobniej również nie zostanie on wykryty u ofiary.

W świetle tych wyników, należy zmodyfikować pytanie postawione na początku pracy dyplomowej. Nie powinno się już pytać, na ile bezpieczny jest zwykły użytkownik Inter-
netu, ale czy w ogóle jest bezpieczny. Oznacza to, że należy całkowicie zignorować drugą część pytania, która sugeruje, że istnieje pewne minimum bezpieczeństwa dla użytkowników Internetu. Odpowiedź na postawione pytanie jest jednoznaczna.

Nie jest bezpieczny, to co powinno być blokowane i monitorowane, po prostu może być uruchamiane. Wszystkie dane użytkownika mogą w każdej chwili zostać wykradzione. Złośliwy plik ma najróżniejsze miejsca do długotrwałego ukrycia. Można przechwytywać to co widzi i wprowadza użytkownik i wiele, wiele więcej, zależne już od wykrywalności konkretnych antywirusów jak szyfrowanie, niszczenie, modyfikowanie danych czy usuwanie systemu. Skoro autor, oceniając swoje umiejętności, nie uważa się za osobę z dużą wiedzą w tej dziedzinie, jest w stanie dojść do takich wyników, to nie można wyobrazić sobie, co jest w stanie zrobić prawdziwy haker.

Bibliografia

- [1] Union, An official website of the European. Dostępny online: <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2249> [dostęp: 06-06-2024].
- [2] Statcounter Globalstats. Dostępny online: <https://gs.statcounter.com/os-version-market-share/windows/desktop/worldwide> [dostęp: 06-06-2024].

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Konstrukcja i oprogramowanie urządzenia do pomiaru położenia kręgosłupa

inż. Ivan Danylenko

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Mateusz Popek

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Praca przedstawia proces konstrukcji, oprogramowania i ewaluacji urządzenia do pomiaru położenia kręgosłupa z wykorzystaniem płytki mikrokontrolera Beetle RP2040 i czujników inercyjnych GY-521. Zaproponowano metodę sekwencyjnego odpytywania wielu czujników na jednej magistrali IIC, pokonującą ograniczenie maksymalnej liczby urządzeń podrzędnych na szynie, oraz dwie metody aproksymacji krzywej kręgosłupa. Skonstruowane urządzenie daje możliwość wizualizacji położenia kręgosłupa na podstawie 13 punktów pomiarowych w czasie rzeczywistym i może znaleźć zastosowanie w analizie postawy ciała i wspomaganie procesu rehabilitacji.



Rysunek 23.1. Aproksymowana krzywizna kręgosłupa, nałożona na zdjęcie w pozycji pomiarowej z założonym urządzeniem (fragment rys. 23.5)

23.1. Wprowadzenie

Pomiar pozycji i ruchu kręgosłupa odgrywa kluczową rolę w diagnostyce i leczeniu wielu schorzeń, takich jak choroba zwyrodnieniowa odcinka lędźwiowego (DSD) i ból dolnego odcinka kręgosłupa (LBP), które mają duży wpływ na zdrowie populacji [1–3]. Monitorowanie postawy jest istotne w profilaktyce i rehabilitacji, szczególnie w kontekście ćwiczeń wzmacniających mięśnie stabilizujące kręgosłup [4, 5]. Tradycyjne metody, takie jak MRI i rentgenografia, są skuteczne w pomiarach położenia kręgosłupa, ale posiadają ograniczenia wynikające z kosztów, dostępności badania i ekspozycji pacjenta na promieniowanie [6, 7]. W ostatnich latach przenośne czujniki ruchu i położenia, stały się obiecującym podejściem w kontekście pomiaru krzywizny kręgosłupa i monitorowania postawy, oferując nieinwazyjne i mobilne rozwiązania, wspomagające leczenie i profilaktykę [8, 9]. Biorąc pod uwagę istotność zagadnienia, w pracy postawiono na celu opracowanie urządzenia do pomiaru położenia kręgosłupa na bazie czujników inercyjnych.

Aby osiągnąć ów cel, skonstruowano i oprogramowano urządzenie do pomiaru położenia kręgosłupa przy użyciu płytki mikrokontrolera Beetle RP2040 oraz czujników GY-521. Urządzenie zawiera m.in. ręcznie wytworzoną płytkę drukowaną do montażu wszystkich modułów w obudowie wykonanej techniką wytwarzania przyrostowego oraz metodę odpytywania z jednego adresu wielu czujników na pojedynczej szynie IIC (Inter-Integrated Circuit) z użyciem demultipleksera.

W celu oceny powstałego urządzenia, przeprowadzono eksperymenty z udziałem autora pracy. Autor przyjmował różne pozycje, wymuszając zmianę położenia kręgosłupa, która była rejestrowana przez urządzenie.

Podsumowując, główne osiągnięcia niniejszej pracy to:

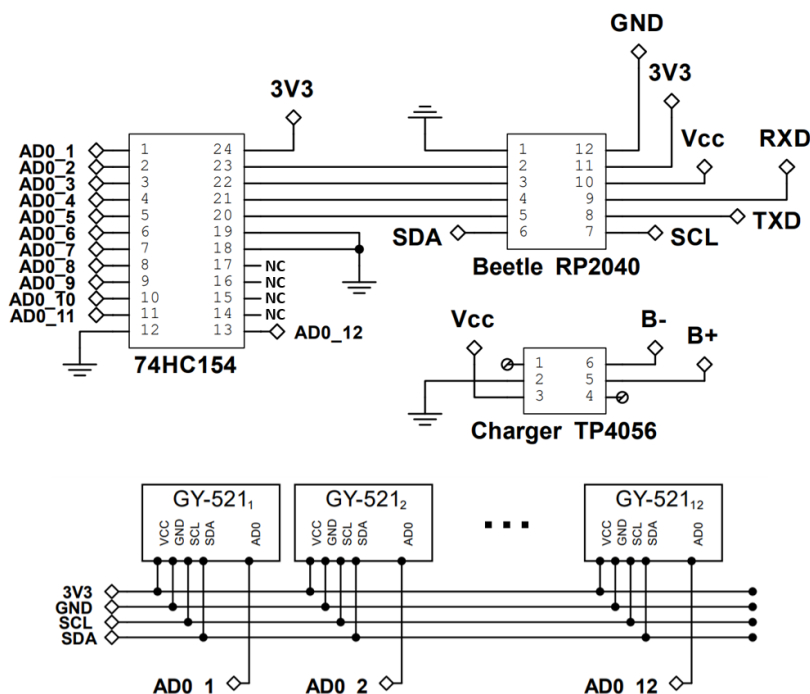
1. Skutecznie zaprojektowano i skonstruowano urządzenie, nadające się do wielu zastosowań w warunkach klinicznych i laboratoriach badawczych. Urządzenie pokonuje główne ograniczenia tradycyjnych technik pomiarowych, będąc urządzeniem przenośnym, nieinwazyjnym i umożliwiając ciągle, długotrwałe pomiary.
2. Opracowano metodę do pokonania limitu urządzeń na jednej szynie IIC przez implementację sekwencyjnego odpytywania czujników za pomocą demultipleksera.
3. Zaproponowano dwie metody aproksymacji krzywej na podstawie punktów pomiarowych o różnym stopniu zaawansowania i dokładności odwzorowania krzywej.

23.2. Obecne metody pomiarowe

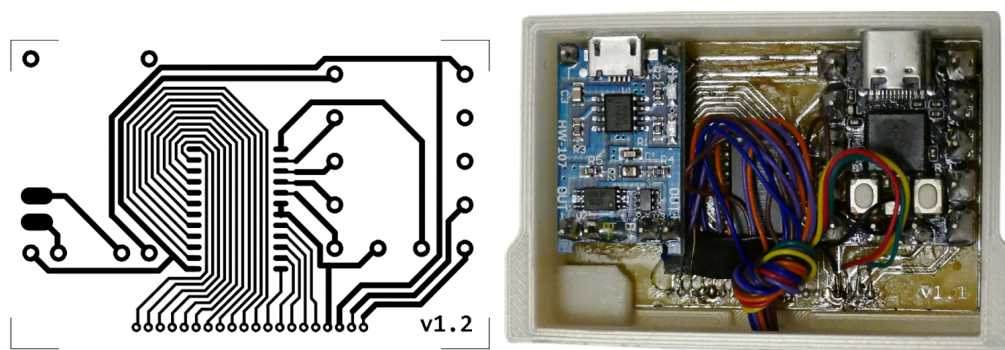
W medycynie dokładne i wiarygodne pomiary są kluczowe dla oceny stanu pacjenta i podejmowania decyzji w sprawie jego leczenia, w związku z czym na przestrzeni lat opracowano liczne techniki obrazowania medycznego. Różne techniki obrazowania, takie jak wideofluoroscopia (VF), ultrasonografia (US), rezonans magnetyczny (MRI) i rentgenografia konwencjonalna, są stosowane do badania kręgosłupa, z których każda ma swoje wady i zalety. Wideofluoroscopia (VF), wykorzystując promieniowanie rentgenowskie, zapewnia dokładne pomiary w czasie rzeczywistym, ale wiąże się z ekspozycją pacjenta na promieniowanie i wysokim kosztem badania. Rentgenografia konwencjonalna oferuje doskonałą jakość obrazowania tkanek twardych, jednakże ze względu na promieniowanie

jonizujące wielokrotne pomiary są szkodliwe dla zdrowia badanego. MRI, będąc nieinwazyjną metodą o wysokiej rozdzielczości, jest kosztowna i nie zawsze dostępna, natomiast ultrasonografia (US) charakteryzuje się niższymi kosztami i powszechną dostępnością, jednakże nie umożliwia pomiaru położenia kręgosłupa w całości. Tradycyjne metody są ograniczone do zastosowań szpitalnych, wymagają specjalistycznego personelu i nie nadają się do długotrwałego monitorowania [10].

W celu pokonania ograniczeń tradycyjnych metod, obecnie prowadzone są prace nad przenośnymi urządzeniami medycznymi w oparciu o czujniki położenia, mocowane do ubrań lub bezpośrednio na ciele, które umożliwiają nieinwazyjne i dokładne pomiary. Wśród stosowanych technologii dominują czujniki inercyjne (żyroskopy i akcelerometry) oraz elastyczne (piezoelektryczne, pojemnościowe, tensometryczne) [11]. Czujniki inercyjne, szczególnie popularne, oferują szerokie możliwości w monitorowaniu pozycji kręgosłupa [8]. Różne rozwiązania wykorzystują odmienną liczbę czujników – od systemów z niewielką liczbą punktów pomiarowych [12] po rozbudowane sieci czujników o wysokiej precyzji [13, 14]. W niniejszej pracy opisano urządzenie wyposażone w 12 czujników inercyjnych, mocowanych w obrębie wyrostków kolczystych za pomocą taśmy kinestetycznej.



Rysunek 23.2. Schemat głównej płytki skonstruowanego urządzenia, przedstawiający łączenie modułu mikrokontrolera z peryferiami. Architektura rozwiązania umożliwia łączenie wielu czujników do jednej szyny IIC. Poszczególne wyjścia demultipleksora są doprowadzone do pinów AD0 modułów GY-521 celem sterowania ich stanem. Wszystkie podzespoły dzielą ze sobą wspólną masę, a czujniki dodatkowo mają wspólne linie sygnałową i zegarową



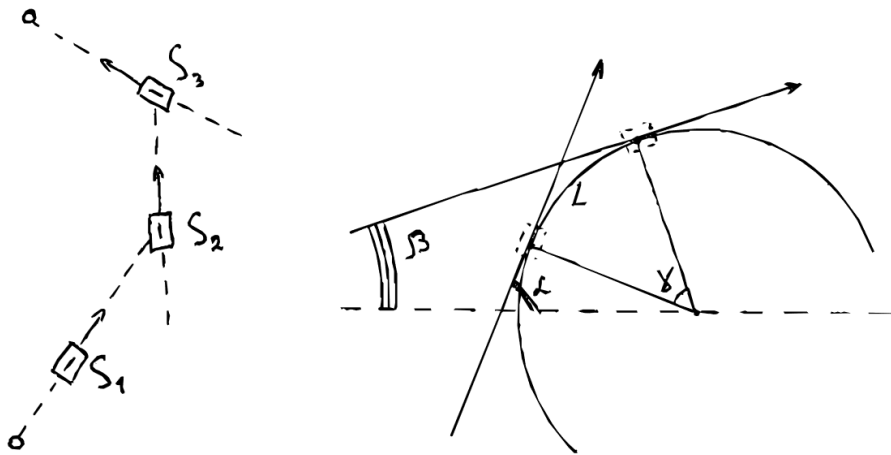
Rysunek 23.3. Maską lutowniczą dla płytki drukowanej (po lewej) oraz gotowa główna płytka urządzenia w obudowie wydrukowanej technologią wytwarzania przyrostowego (po prawej). Na wytrawioną płytkę wlutowano moduł mikrokontrolera, ładowarkę oraz demultiplekser

23.3. Zaproponowane rozwiązanie

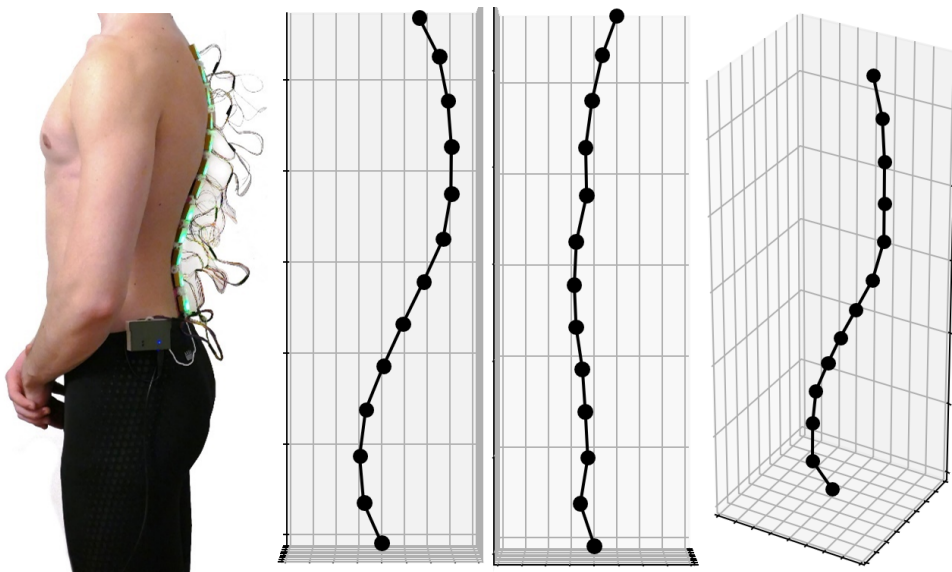
Skonstruowane urządzenie umożliwia mierzenie położenia dwunastu punktów pomiarowych umieszczonych w obrębie kręgosłupa przy wykorzystaniu dwunastu czujników akcelerometryczno-żyroskopowych oraz odtworzenie krzywizny kręgosłupa w 3D (rys. 23.5 i 23.6). Liczba czujników dobrana jest tak, aby przy ich wymiarach uzyskać jak największą gęstość punktów pomiarowych. Czujniki komunikują się z układem nadrzędnym przy użyciu jednej szyny IIC i są odpytywane sekwencyjnie przy użyciu demultipleksera, co umożliwia skalowanie ilości zastosowanych w układzie czujników od 1 do 16. Do tego celu wykorzystane są 4 wyjścia cyfrowe układu mikrokontrolera w połączeniu z demultiplekserem 4×16 (rys. 23.2). Układ posiada zasilanie bateryjne, a także pole do implementacji bezprzewodowej komunikacji z aplikacją do wizualizacji danych. Wszystkie podzespoły są zamknięte w wydrukowanych z polilaktydu (PLA) obudowach, zaprojektowanych na potrzeby proponowanego rozwiązania.

Peryferia układu sterującego i zasilania umieszczone są na głównej płytce PCB (Printed Circuit Board), zaprojektowanej na podstawie opracowanego konceptu układu elektronicznego i wytrawionej przy pomocy technologii termotransferu toneru drukarki na laminat (rys. 23.3). Urządzenie w trybie pracy przesyła dane o położeniach czujników do aplikacji desktopowej, w której następuje obliczenie współrzędnych punktów pomiarowych zgodnie z przyjętą metodą aproksymacji krzywej oraz wizualizacja wyników w przestrzeni trójwymiarowej.

Zaproponowano dwie metody aproksymacji krzywizny kręgosłupa: uproszczoną i zaawansowaną (rys. 23.4). Uproszczona metoda zakłada, że każdy czujnik wskazuje położenie kolejnego czujnika, co umożliwia obliczenie współrzędnych za pomocą prostych równań trygonometrycznych, jednak skutkuje kumulującym się błędem wynikającym z traktowania kręgosłupa jako linii łamanej. Zaawansowana aproksymacja mierzonej krzywej zakłada, że przy wystarczającej gęstości punktów pomiarowych, ową krzywą można odtworzyć przy pomocy łuków, łączących punkty pomiarowe.

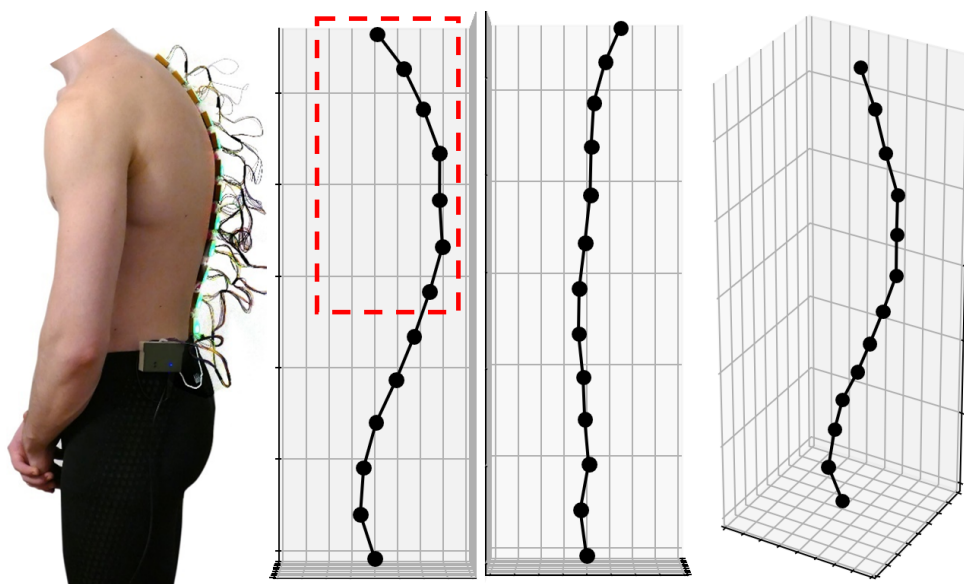


Rysunek 23.4. Geometryczna reprezentacja relacji między dwoma czujnikami w uproszczonej metodzie aproksymacji krzywej (po lewej) oraz w zaawansowanej metodzie aproksymacji (po prawej) na przykładzie przestrzeni dwuwymiarowej



Rysunek 23.5. Pomiar położenia kręgosłupa przy anatomicznie prawidłowej postawie w pozycji stojącej. Rysunek przedstawia (od lewej do prawej) mierzoną pozycję, rzut wyniku pomiaru na płaszczyznę strzałkową, płaszczyznę czołową oraz widok w aksonometrii.

Zaburzenia w odczycie są widoczne na widoku z tyłu i wynikają zarówno z ruchomości czujników na plecach badanego, jak i z niewystarczającej dokładności pomiarowej czujników w danej płaszczyźnie



Rysunek 23.6. Pomiar położenia kręgosłupa przy celowo pogłębionej kifozie piersiowej w pozycji stojącej. Rysunek przedstawia (od lewej do prawej) mierzoną pozycję, rzut wyniku pomiaru na płaszczyznę strzałkową, płaszczyznę czołową oraz widok w aksonometrii. Czerwony prostokąt wskazuje interesujący dla danego pomiaru obszar

23.4. Podsumowanie

W pracy zostało zaprojektowane, skonstruowane i oprogramowane urządzenie elektroniczne, umożliwiające pomiar położenia dwunastu czujników inercyjnych, umieszczonych w pobliżu kręgosłupa, na podstawie czego rekonstruowana jest jego krzywizna. Opracowano koncept układu elektronicznego, na podstawie którego zaprojektowano i wytrawiono płytkę drukowaną. Podzespoły urządzenia zostały umieszczone w obudowach z tworzywa sztucznego, zaprojektowanych na potrzeby proponowanego rozwiązania. Urządzenie w trybie pracy przesyła dane o położeniach czujników do aplikacji desktopowej, w której następuje obliczenie współrzędnych punktów pomiarowych zgodnie z przyjętą metodą aproksymacji krzywej oraz wizualizacja wyników w przestrzeni trójwymiarowej.

Zaproponowano metodę sekwencyjnego odpytywania czujników z ograniczonym zakresem adresów na jednej linii IIC przy pomocy demultipleksera, która została wykorzystana do pokonania ograniczenia maksymalnej ilości urządzeń podrzędnych na szynie. Zaproponowano dwie metody aproksymacji krzywizny kręgosłupa: uproszczoną i zaawansowaną.

Urządzenie jest w pełni nieinwazyjne; w porównaniu do aparatów konwencjonalnych technik obrazowych – bardzo mobilne i umożliwia wykonywanie długotrwałych pomiarów położenia kręgosłupa. Stosowanie go jako narzędzia do prewencyjnego monitorowania postawy ciała może zapobiec występowaniu takim schorzeniom, jak LBP, DSD, nabyta skolioza i innym. Rozwiązanie ma duży potencjał zastosowania we wspomaganie terapii aktywnej, analizie poprawności wykonywania ćwiczeń fizycznych, zwiększając ich skuteczność i bezpieczeństwo dzięki możliwości wglądu w położenie kręgosłupa.

23.5. Dalsze prace

Przedstawione w pracy rozwiązanie ma potencjał rozwojowy, dlatego w dalszych etapach pracy nad nim należy rozważyć takie jego modyfikacje, jak implementacja komunikacji bezprzewodowej, zaawansowany projekt płytki drukowanej, uwzględniający doświadczenie, zdobyte przy tworzeniu pierwszej wersji PCB, zaawansowane metody kalibracji urządzenia; krzywa kalibracyjna.

Bibliografia

- [1] Ravindra V.M., Waldrop R., Alshami A.M., Degenerative lumbar spine disease: estimating global incidence and worldwide volume. *Global Spine Journal* **2018**, *8*, 784–794.
- [2] Alshami A.M., Prevalence of spinal disorders and their relationships with age and gender. *Saudi Medical Journal* **2015**, *36*, 725.
- [3] Čadar I.D., Pop L.V., Correlations between cervical spine posture and low back pain. *Human and Veterinary Medicine* **2015**, *7*, 178–181.
- [4] Pinzon E.G., Lumbar spine rehabilitation. *Practical Pain Management* **2003**, *3*, 28.
- [5] Gasibat Q., Simbak N.B., Moderation of back pain by rehabilitation exercises; multifidus muscle' perspective. *IOSR Journal of Sports and Physical Education* **2017**, *4*, 14–18.
- [6] Roudsari B., Jarvik J.G., Lumbar spine MRI for low back pain: indications and yield. *American Journal of Roentgenology* **2010**, *195*, 550–559.
- [7] Hassan M.E., et al., Prevalence of spinal disorders in Saudi population using conventional radiology: Age and gender correlation. *Medical Science* **2022**, *26*, e2195.
- [8] Peulic A., Högl H., Filipovic N., A back spine position measuring system based on accelerometer data. *The IPSI BgD Transactions on Internet Research* **2011**, *7*, 11–16.
- [9] Shanthar C.H., Gammulle H., Wickramarathna L.N., Design and realization of a wearable posture correcting device. *IEEE EMBS International Student Conference* **2021**.
- [10] Daniel E.S., Lee R.Y.W., Williams J.M., The reliability of video fluoroscopy, ultrasound imaging, magnetic resonance imaging, and radiography for measurements of lumbar spine segmental range of motion in-vivo: A review. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation* **2023**, *36*, 117–135.
- [11] EP M.J., Jegan R., Human posture monitoring using flex sensor. *2023 8th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, IEEE, **2023**.
- [12] Pelc M., et al., Initial study on an expert system for spine diseases screening using inertial measurement unit. *Scientific Reports* **2023**, *13*, 10440.
- [13] Cortell-Tormo J.M., et al., Lumbatex: a wearable monitoring system based on inertial sensors to measure and control the lumbar spine motion. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* **2019**, *27*, 1644–1653.
- [14] Consmüller T., et al., Comparative evaluation of a novel measurement tool to assess lumbar spine posture and range of motion. *European Spine Journal* **2012**, *21*, 2170–2180.

System wspomagający osoby niedowidzące

inż. Maciej Urban

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Mateusz Popek

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Praca koncentruje się na opracowaniu systemu wspomagającego dla osób niedowidzących, mającego na celu pomoc w poruszaniu się po otoczeniu z wykorzystaniem haptycznego sprzężenia zwrotnego. System wykorzystuje czujnik czasu przelotu do skanowania otoczenia przed użytkownikiem w 16 różnych punktach. Zmierzone odległości są następnie przekształcane na różne natężenia wibracji, które są przekazywane do 16 silników wibracyjnych umieszczonych na dłoni użytkownika.

Kluczowe komponenty obejmują czujnik czasu przelotu VL53L1X, mikrokontroler Arduino Nano RP2040, sterownik PCA9685 do generowania sygnału PWM oraz ogniwa litowo-jonowe Samsung 35-e do bezprzewodowego zasilania układu. Regulator napięcia step-down LM2596 zapewnia, że system działa przy stabilnym napięciu 5 V.

Dzięki urządzeniu użytkownik może „poczuć” swoje otoczenie przez matrycę silników wibracyjnych, zwiększając świadomość przestrzenną i poprawiając mobilność w nieznanym środowiskach.

24.1. Cel i założenia

Celem pracy jest opracowanie systemu wspomagającego osoby niedowidzące w bezpiecznym poruszaniu się w ich otoczeniu, mające na celu być nowoczesną alternatywą dla klasycznej białej laski. System ten wykorzystywać ma haptyczne sprzężenie zwrotne do przekładania informacji o odległości przeszkód na wibracje, co ma pozwolić użytkownikowi na intuicyjne i efektywne rozpoznawanie przeszkód w otaczającej go przestrzeni.

Główne założenia projektowe pracy to:

- wykorzystanie czujnika czasu przelotu do pomiaru odległości w wielu punktach przestrzeni znajdującej się na drodze użytkownika,
- zastosowanie mikrokontrolera do przetwarzania danych z czujnika oraz zarządzania systemem,
- implementacja matrycy silników wibracyjnych, które będą odpowiadać za haptyczne sprzężenie zwrotne.

24.2. Wstęp teoretyczny

W tym rozdziale zawiera się teoria działania najważniejszych elementów wykorzystanych do zbudowania systemu – czujnika czasu przelotu oraz jednofotonowych diód lawinowych, z których jest on zbudowany.

24.2.1. Jednofotonowa dioda lawinowa (SPAD)

Jednofotonowa dioda lawinowa (ang. Single Photon Avalanche Diode, SPAD) to czułe urządzenie półprzewodnikowe, które wykrywa i wzmacnia sygnały świetlne na poziomie pojedynczych fotonów. W przeciwieństwie do tradycyjnych fotodiod SPAD działa w trybie Geigera, co umożliwia wykrywanie nawet pojedynczych fotonów. W trybie Geigera dioda jest odwrotnie spolaryzowana powyżej napięcia przebicia, co prowadzi do silnego pola elektrycznego w obszarze zubożonym.

Absorpcja pojedynczego fotonu powoduje wygenerowanie pary elektron–dziura, co inicjuje proces lawinowej generacji nośników przez jonizację uderzeniową przyspieszaną wytworzonym polem elektrycznym. Proces ten prowadzi do powielania sygnału, przekształcając go w wykrywalny impuls prądowy rzędu kilkudziesięciu mA. Po osiągnięciu pewnego progu napięcie doprowadzane do diody jest obniżane poniżej napięcia przebicia, co powoduje wygaszenie sygnału, dzięki czemu dioda jest gotowa na kolejny pomiar.

24.2.2. Czujniki czasu przelotu (ToF)

Czujniki czasu przelotu (ang. Time of Flight, ToF) są stosowane do pomiaru odległości na podstawie analizy czasu podróży światła od emitera do obiektu i z powrotem. Główna zasada działania ToF opiera się na stałej prędkości światła (ok. $3 \cdot 10^8$ m/s), co umożliwia precyzyjne określanie odległości przez pomiar czasu przelotu sygnału świetlnego z wykorzystaniem równania (24.1).

W przypadku wybranego modelu sensora, do nadawania wiązki wykorzystywany jest bezpieczny dla oczu laser klasy 1 o długości fali 940 nm. Sygnał zbierany jest w kolektorze, który ze względu na ich wysoką czułość na pojedyncze fotony, zbudowany jest z matrycy 16×16 diód SPAD, co umożliwia detekcję nawet bardzo słabych sygnałów. Odległość d od obiektu oblicza się na podstawie zależności:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (24.1)$$

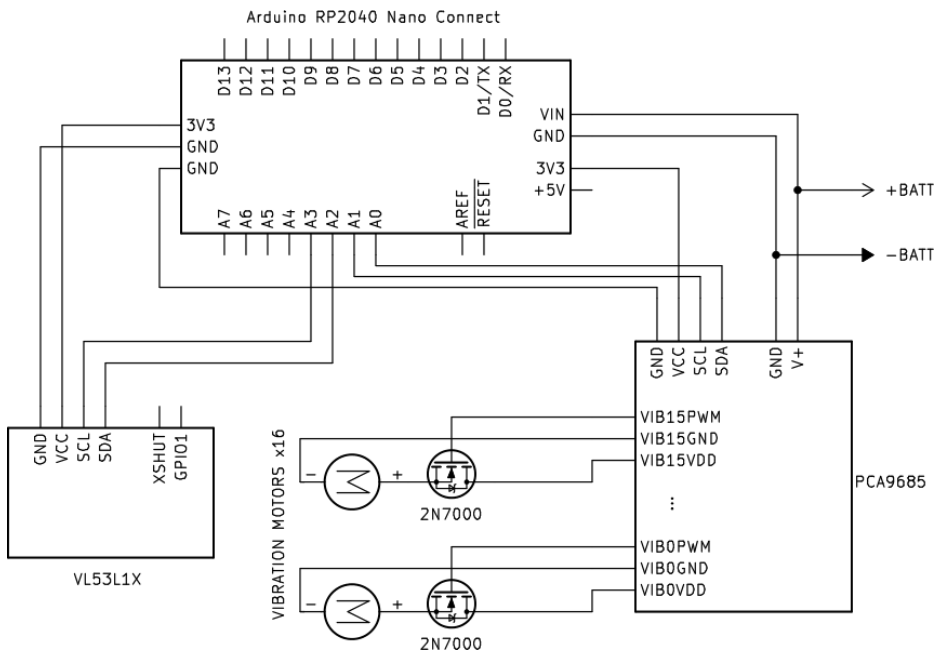
gdzie c to prędkość światła, a t to zmierzony czas przelotu.

24.3. Projekt i wykonanie

W ramach realizacji projektu podjęto szereg kroków, mających na celu zaprojektowanie i implementację proponowanego systemu. Proces ten został podzielony na kilka etapów, obejmujących wybór komponentów, projektowanie obudowy, budowę prototypu, opracowanie oprogramowania sterującego oraz testowanie i optymalizację.

24.3.1. Wybór komponentów i schemat urządzenia

Pierwszym krokiem w realizacji projektu było wybranie odpowiednich komponentów elektronicznych, które spełniałyby wymagania systemu. Najważniejszym elementem był czujnik czasu przelotu VL53L1X, który umożliwia precyzyjne skanowanie otoczenia użytkownika do odległości 4 m. Oprócz tego wykorzystano mikrokontroler Arduino Nano RP2040 Connect, sterownik PWM PCA9685 oraz zestaw 16 silników wibracyjnych. Przy wyborze kierowano się zarówno dokładnością pomiarów, jak i efektywnością energetyczną. Z wykorzystaniem komponentów utworzony został schemat elektryczny urządzenia widoczny na rysunku 24.1.

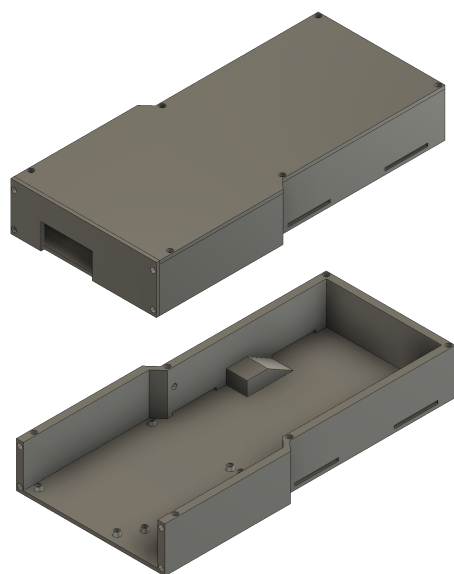


Rysunek 24.1. Schemat urządzenia

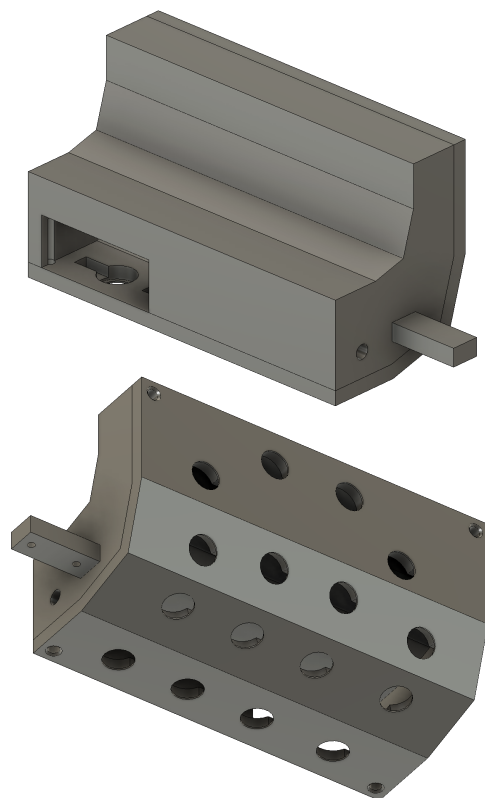
24.3.2. Projektowanie obudowy

Po skompletowaniu wszystkich niezbędnych komponentów, przystąpiono do modelowania obudowy, która miała na celu zintegrowanie sensora i silników wibracyjnych w formie przenośnej „rękawicy”. Do stworzenia jej prototypu wykorzystano druk 3D. Model obudowy został podzielony na trzy części:

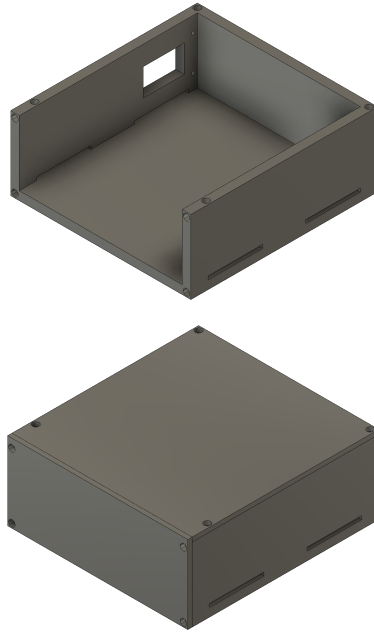
- moduł sterowania przedstawionego na rysunku 24.2,
- moduł haptyczny przedstawionego na rysunku 24.3,
- oraz moduł zasilania przedstawionego na rysunku 24.4.



Rysunek 24.2. Model modułu sterowania



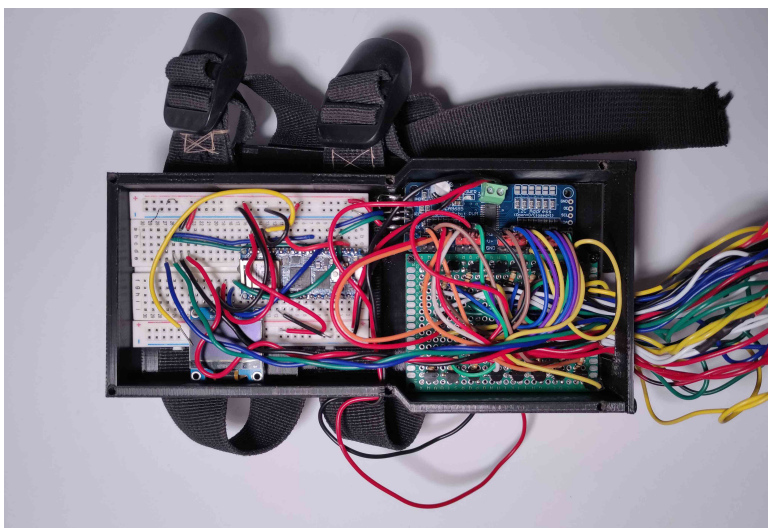
Rysunek 24.3. Model modułu haptycznego



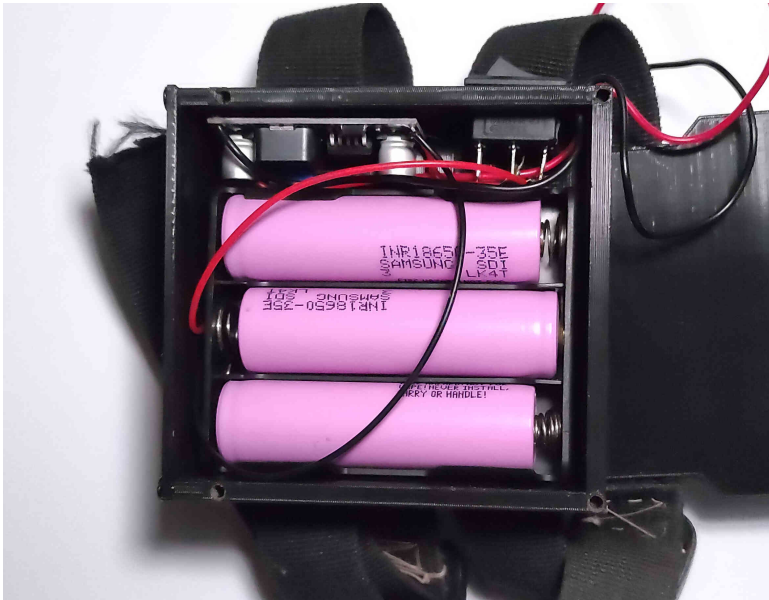
Rysunek 24.4. Model modułu zasilania

24.3.3. Budowa prototypu

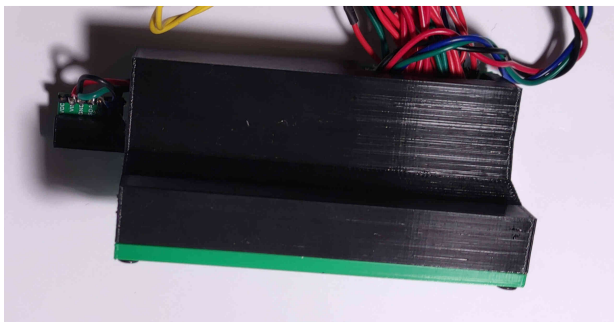
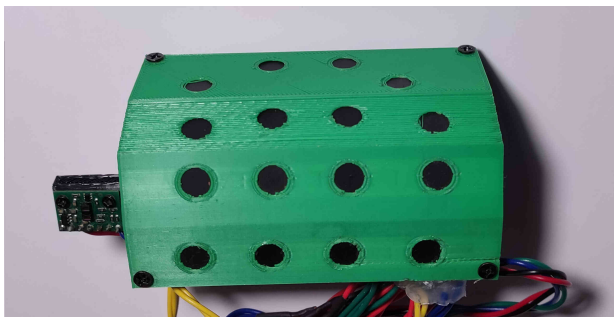
Po wydrukowaniu obudowy umieszczono w niej komponenty i połączono przewodami według schematu znajdującego się na rysunku 24.1. Przedstawione – po montażu – na rysunkach są kolejno wewnątrz modułu sterującego (rysunek 24.5), wewnątrz modułu zasilania (rysunek 24.6) oraz moduł haptyczny (rysunek 24.7).



Rysunek 24.5. Moduł sterowania bez górnej pokrywy



Rysunek 24.6. Moduł zasilania bez górnej pokrywy



Rysunek 24.7. Moduł haptyczny

24.3.4. Oprogramowanie systemu

Następnym etapem było opracowanie oprogramowania sterującego pracą urządzenia. Mikrokontroler Arduino Nano RP2040 Connect został zaprogramowany w celu zarządzania danymi z czujnika VL53L1X i kontroli intensywności wibracji silników przez manipulację sygnałów PWM sterownikiem PCA9685. Do programowania wybrano język Rust, który eliminuje całe klasy problemów [1] związanych z programowaniem w klasycznych językach niskiego poziomu, takich jak, np. C.

24.3.5. Testowanie i optymalizacja

Ostatnim krokiem w projekcie było przeprowadzenie testów funkcjonalnych systemu. Wstępnie przeanalizowano skuteczność detekcji przeszkód w różnych warunkach oraz intuicyjność użytkowania urządzenia.

24.4. Uzyskane wyniki

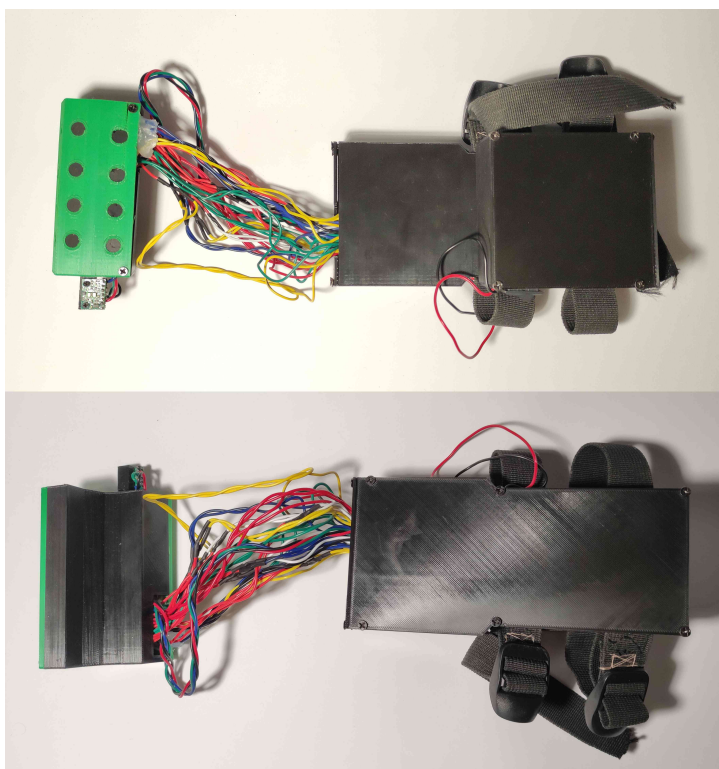
Dokładność sensora była testowana w różnych warunkach oświetleniowych, pokazując wysoką skuteczność w środowisku kontrolowanym. Jednak w warunkach zewnętrznych, zwłaszcza w mocnym świetle słonecznym, zauważono spadki jakości pomiaru, stosując tryb pomiarowy do 4 m. Z tego względu zastosowano tryb do 1,2 m, który zapewniał lepsze rezultaty w trudniejszych warunkach.

Dodatkowo system wibracyjny okazał się skutecznym i intuicyjnym sposobem komunikacji dla użytkowników podczas wstępnych testów, choć wymaga on przeznaczenia przez użytkownika czasu na naukę użytkowania urządzenia. Natomiast ze względu na ograniczoną ilość czasu nie można było przeprowadzić szczegółowych testów, które byłyby następnym krokiem rozwojowym urządzenia.

24.5. Podsumowanie

Wynikiem pracy dyplomowej jest funkcjonujący prototyp urządzenia widoczny na rysunku 24.8, które ma na celu wspomaganie osób z niepełnosprawnością wzrokową. Urządzenie zbiera informacje o przestrzeni znajdującej się przed użytkownikiem i przedstawia je w postaci haptycznego sprzężenia zwrotnego przez zróżnicowaną siłę wibracji matrycy silników wibracyjnych znajdujących się w module haptycznym.

Analiza porównawcza z istniejącymi technologiami, takimi jak laski elektroniczne i aplikacje mobilne z nawigacją głosową, pokazała, że zaproponowany system oferuje unikalne korzyści. Jego główną zaletą jest bezpośredniość w przekazywaniu informacji o przeszkodach. Do tego jest przenośny i nieinwazyjny.



Rysunek 24.8. Prototyp urządzenia wspomagającego dla osób niewidomych

W porównaniu z kamizelkami i kurtkami wyposażonymi w czujniki [2, 3] system ten jest bardziej kompaktowy i lżejszy, co jest istotne dla osób z ograniczeniami ruchowymi. W przypadku kamizelki pojawiają się również obawy dotyczące rozdzielczości czuciowej, ponieważ silniki są umieszczone na torsie, który charakteryzuje się niską rozdzielczością przestrzenną. Dwupunktowy test dyskryminacji Webera pokazuje, że w jego przypadku próg rozróżnialności wynosi około 36 mm, podczas gdy w przypadku palców jest to około 3 mm [4].

Ponadto, w przeciwieństwie do systemów opartych na dźwięku, nie zakłóca on zmysłu słuchu, który jest kluczowy dla osób z upośledzeniem wzroku.

Dodatkowo projekt posiada znaczny potencjał rozwoju. Przyszłe ulepszenia mogą obejmować:

- Miniaturyzację modułów.
- Integrację z systemami nawigacji GPS i aplikacjami mobilnymi, co pozwoliłoby użytkownikom na otrzymywanie dodatkowych informacji, takich jak kierunki.
- Rozbudowę systemu o wizualizator, który po odebraniu informacji z urządzenia mógłby wyświetlać je na ekranie, co pozwoliłoby na prostsze diagnozowanie i rozwiązywanie potencjalnych problemów z urządzeniem.
- Przesyłanie informacji o użytkowniku do upoważnionej osoby, która mogłaby śledzić jego lokalizację i zapewniać mu pomoc w potrzebie.
- Rozbudowę systemu wibracyjnego – zastosowanie większej liczby mniejszych silników pozwoliłoby na większą rozdzielczość przestrzenną i większą ilość informacji

przekazywanych użytkownikowi. Wymaga to jednak dalszych badań w celu określenia optymalnej liczby silników oraz ich rozmieszczenia.

- Rozszerzenie systemu o dodatkowe sensory, np. ultradźwiękowe, mogłoby również zwiększyć jego użyteczność, zwłaszcza w bardziej złożonych środowiskach.
- Dodanie możliwości zmiany trybu odległościowego czujnika ToF za pomocą przycisku.
- Zastąpienie układu akumulatorów litowo-jonowych bezpieczniejszymi akumulatorami niklowo-metalowo-wodorkowymi lub zbudowanie systemu monitorowania i ostrzegania o stanie akumulatorów litowo-jonowych. Szczególnie ważnym elementem byłaby detekcja przegrzania lub uszkodzenia ogniw. W sytuacjach takich użytkownik powinien natychmiast być poinformowany o zagrożeniu, np. za pomocą sygnału dźwiękowego.

Bibliografia

- [1] Microsoft Security Response Center – A proactive approach to more secure code. Dostępny online: <https://msrc.microsoft.com/blog/2019/07/a-proactive-approach-to-more-secure-code> [dostęp: 09-10-2024].
- [2] Güntürkün R. et al., The Design and Implementation of a Vest Made For Visually Handicapped Which Recognizes the Obstacles and Determines the Direction. *Int. Journal of Engineering Research and Applications* **2016**, 6, s. 56–62.
- [3] Kosowatz J., High-Tech Eyes. *Mechanical Engineering* **2017**, 139, s. 36–41.
- [4] Weinstein S., Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality. *The First Int' l Symp. on the Skin Senses* **1968**.

Aplikacja webowa wspomagająca zdrowy tryb życia

inż. Sebastian Bednarski

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Agnieszka Kazimierska

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Celem niniejszej pracy było stworzenie aplikacji webowej DietDetective, mającej za zadanie wspieranie użytkowników w prowadzeniu zdrowego stylu życia. DietDetective zawiera obszerną bazę produktów oraz funkcje wspierające użytkowników w utrzymaniu zdrowych nawyków żywieniowych, zapewniając nie tylko informacje, ale również narzędzia motywacyjne. Aplikacja umożliwia monitorowanie odżywiania i nawodnienia, z uwzględnieniem potrzeb osób z wybranymi jednostkami chorobowymi związanymi z dietą (ce-liakia, nietolerancja laktozy). Najbardziej innowacyjnym elementem aplikacji jest Asystent AI, który, bazując na posiadanych danych o użytkowniku, udziela porad i odpowiada na pytania. W pracy przedstawiono pełen cykl wytwarzania oprogramowania w modelu kaskadowym, od analizy wymagań, przez implementację, testowanie, aż do wdrożenia. Aplikacja została przetestowana pod kątem jakości (testy jednostkowe i akceptacyjne, narzędzia deweloperskie), a wyniki potwierdzają jej zgodność z wymaganiami funkcjonalnymi i нефункциональными. Aplikacja DietDetective, dostępna pod adresem <http://dietdetective.live/>, jest odpowiedzią na rosnącą potrzebę wsparcia w zakresie zdrowego żywienia i może stanowić wartościowe narzędzie dla osób dążących do poprawy jakości życia.

25.1. Cel i założenia

Celem niniejszej pracy inżynierskiej było zaprojektowanie i implementacja aplikacji webowej wspierającej utrzymanie zdrowego stylu życia, ze szczególnym uwzględnieniem monitorowania żywienia oraz nawodnienia. Aplikacja miała odpowiadać na potrzeby zarówno osób zdrowych, jak i tych z określonymi schorzeniami lub nietolerancjami pokarmowymi, dostarczając im interaktywnego narzędzia do zarządzania codziennymi nawykami żywieniowymi. Kluczowym elementem aplikacji miał być Asystent AI, który doradza użytkownikom na podstawie wprowadzonych przez nich danych. Zrealizowano następujące etapy pracy:

- przeprowadzenie przeglądu literatury dotyczącej zasad zdrowego stylu życia oraz odżywiania,
- analiza krytyczna dostępnych na rynku rozwiązań, z oceną ich mocnych i słabych stron,
- identyfikacja wymagań użytkowników oraz opracowanie szczegółowych wymagań funkcjonalnych i niefunkcjonalnych dla aplikacji,
- zaprojektowanie aplikacji oraz wybór technologii, takich jak React.js (do frontendu), Spring Boot (do backendu) oraz PostgreSQL (do zarządzania relacyjną bazą danych),
- implementacja aplikacji zgodnie z opracowaną specyfikacją techniczną,
- walidacja działania aplikacji przez testy jednostkowe i testy akceptacyjne użytkowników oraz narzędzia developerskie,
- wdrożenie oprogramowania na platformie chmurowej Amazon AWS, z zapewnieniem bezpieczeństwa danych i dostępności.

25.2. Wstęp teoretyczny

Zgodnie z definicją Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), zdrowie to „całkowity fizyczny, psychiczny i społeczny dobrostan człowieka, a nie tylko brak choroby lub niepełnosprawności”. Definicja ta podkreśla znaczenie prozdrowotnego stylu życia i holistycznego podejścia, które łączy aspekty fizyczne, psychiczne i społeczne. Jednymi z kluczowych elementów zdrowia w tym ujęciu są odpowiednie żywienie i regularne nawodnienie, które pomagają zapobiegać zaburzeniom masy ciała oraz chronicznym chorobom niezakaźnym, takim jak schorzenia sercowo-naczyniowe, celiakia czy cukrzyca typu II [1–6].

Jednym z najpoważniejszych zaburzeń masy ciała jest otyłość, definiowana jako chroniczna patologia metaboliczna związana z zaburzeniem homeostazy energii. Główną przyczyną tego stanu są problemy z kontrolą apetytu, co prowadzi do nadmiernego spożycia kalorii i akumulacji tkanki tłuszczowej. W celu oceny otyłości najczęściej wykorzystuje się wskaźnik masy ciała (BMI), który oblicza się według wzoru (25.1).

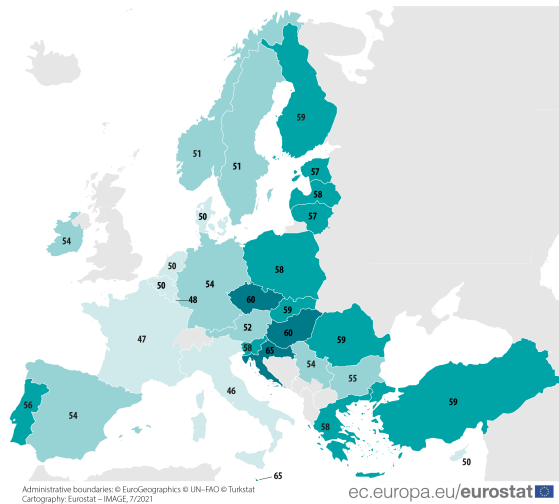
$$BMI = \frac{MASA \text{ [kg]}}{WZROST^2 \text{ [m}^2\text{]}} \quad (25.1)$$

Mimo że BMI nie precyzuje procentowej zawartości tłuszczu w organizmie, pozwala na szacunkową ocenę sylwetki pacjenta i jest rutynowo stosowany do określenia ogólnej kategorii masy ciała, w której pacjent się znajduje (tabela 25.1). Zbyt wysoki BMI sygnalizuje nadwagę, a zbyt niski niedowagę. Oba stany mogą powodować poważne zagrożenia zdrowotne [1, 7].

We współczesnym świecie zjawisko otyłości spotykane jest powszechnie i stanowi poważny problem cywilizacyjny. Na mapie (rysunek 25.1) ukazano procent dorosłych cierpiących na otyłość w krajach Unii Europejskiej w 2019 roku. W Europie Środkowej i Wschodniej ponad połowa populacji została sklasyfikowana jako otyła. W 2019 roku 52,7% dorosłych w UE miało nadwagę [8].

Tabela 25.1. Tabela klasyfikacji BMI z ryzykiem chorób towarzyszących otyłości

Kategoria	Opis	BMI [kg/m ²]	Ryzyko chorób towarzyszących otyłości
Niedowaga	Wyglodzenie	<16,0	Minimalne, ale zwiększone ryzyko innych problemów zdrowotnych
	Wychudzenie	16,0–16,99	
	Niedowaga	17,0–18,49	
Norma	Pożądana masa ciała	18,5–24,99	Minimalne
Nadwaga	Nadwaga	25,0–29,99	Średnie
	I st. otyłości	30,0–34,99	Wysokie
	II st. otyłości	35,0–39,99	Bardzo wysokie
	III st. otyłości	≥40,0	Ekstremalny poziom ryzyka



Rysunek 25.1. Występowanie otyłości w Unii Europejskiej w 2019 roku, opracowanie na podstawie danych Eurostat [8]. Liczby wskazują procentowy udział osób otyłych w dorosłej populacji danego kraju

W ramach przeciwdziałania zaburzeniom masy ciała Ministerstwo Zdrowia zaleca zdrowy styl życia, który obejmuje regularne posiłki, codzienne spożycie warzyw i owoców, ograniczenie tłuszczów oraz picie co najmniej 2 litrów wody dziennie [9–11]. Ważne jest również dostosowanie kaloryczności posiłków. Minimalną ilość energii potrzebną do życia można określić przez obliczenie wskaźnika podstawowej przemiany materii uwzględniającego płeć, wzrost, wiek i masę ciała. Dla mężczyzn współczynnik podstawowej przemiany materii oblicza się przez uproszczony wzór Harrisa–Benedicta (równanie (25.2)) [12].

$$BMR = 66,47 + 5 \cdot \text{wysokość w cm} + 13,7 \cdot \text{waga w kg} - (6,8 \cdot \text{wiek w latach}) \quad (25.2)$$

Dla kobiet współczynnik podstawowej przemiany materii oblicza się przez uproszczony wzór Harrisa–Benedicta (równanie (25.3)) [12].

$$BMR = 65,51 + 1,8 \cdot \text{wysokość w cm} + (9,6 \cdot \text{waga w kg}) - (4,7 \cdot \text{wiek w latach}) \quad (25.3)$$

Duże znaczenie w kontekście żywienia i dietyki mają także makroskładniki, które odgrywają istotną rolę w zachowaniu homeostazy organizmu oraz są niezbędne dla jego prawidłowego funkcjonowania. Klasyfikacja makroskładników obejmuje trzy główne grupy:

- Białka (10–35% kalorii, 4 kcal/g) są niezbędne do utrzymania masy mięśniowej oraz syntezy enzymów i hormonów. Źródła białka to m.in. jajka, kurczak i ryby.
- Tłuszcze (20–35% kalorii, 9 kcal/g) dostarczają energii, wspierają funkcjonowanie narządów oraz przyswajanie witamin rozpuszczalnych w tłuszczach, a ich źródła to m.in. awokado, oleje i masło.
- Węglowodany (45–65% kalorii, 4 kcal/g) to preferowane źródło energii dla mózgu i mięśni. Wspierają także układ pokarmowy i odpornościowy. Znajdują się w zbożach, produktach mlecznych, owocach i warzywach skrobiowych.

25.3. Projekt i wykonanie

25.3.1. Analiza biznesowa

Współczesne społeczeństwo coraz bardziej świadomie podchodzi do kwestii zdrowego trybu życia, poszukując innowacyjnych rozwiązań, które wspierają realizację tego celu. W tym kontekście szczególnie istotne stają się wyroby medyczne, w tym oprogramowanie służące do diagnostyki i monitorowania stanu zdrowia. Przewiduje się, że globalny rynek systemów informatycznych w ochronie zdrowia osiągnie wartość 641,98 miliarda USD do 2032 roku, co świadczy o rosnącym zapotrzebowaniu na cyfrowe rozwiązania w opiece zdrowotnej [13].

Głównym celem zaprojektowanej aplikacji webowej, nazwanej DietDetective, jest propagowanie optymalnego stylu życia oraz edukacja użytkowników w tym zakresie. Aplikacja ma na celu ułatwienie zarządzania codziennymi nawykami żywieniowymi przez zastosowanie zaawansowanych metod wizualizacji, monitorowania i analizy danych. Dzięki tym funkcjom użytkownicy będą mogli precyzyjnie śledzić postępy w osiąganiu wyznaczonych celów zdrowotnych. Kluczowym aspektem jest personalizacja, która dostosowuje działanie aplikacji do indywidualnych preferencji, co czyni zdrowsze wybory żywieniowe bardziej dostępnymi i atrakcyjnymi. Ostatecznie, celem opracowania takiej aplikacji jest nie tylko zapewnienie dostępu do kluczowych informacji zdrowotnych, ale także motywowanie użytkowników do świadomego i aktywnego zaangażowania w dbanie o własne zdrowie.

25.3.2. Projekt aplikacji

Aplikacja została zaprojektowana z wykorzystaniem narzędzia Figma, które służy do projektowania stron internetowych. W procesie projektowania uwzględniono oczekiwania potencjalnych użytkowników oraz zasady UX (z ang. User Experience). Zastosowano sprawdzone rozwiązania, aby aplikacja działała podobnie do popularnych narzędzi, co zgodnie z prawem Jacoba ułatwia użytkownikom naukę jej obsługi [16].

Przykładowo, liczba kategorii w panelu bocznym ograniczona została do 7, co zapewnia łatwość nawigacji i ogranicza poczucie dezorientacji, zgodnie z prawem Millera, które mówi o ograniczonej pamięci krótkotrwałej [17]. Wizualne reprezentacje postępów

użytkowników mają na celu wywołanie efektu Zeigarnika, motywując użytkowników do realizacji krótkoterminowych celów [18]. Aby zminimalizować złożoność aplikacji, poszczególne ekrany podzielono na wyraźnie oznaczone sekcje, a proces rejestracji rozbity został na kilka prostych etapów. Liczba decyzji na stronie głównej została ograniczona, a przyciski akcji wyróżnione, co sprawia, że aplikacja jest intuicyjna. Użytkownicy mogą korzystać z czatu z asystentem opartym na sztucznej inteligencji, co zapewnia im poczucie wsparcia. Dostosowana kolorystyka i typografia poprawiają użyteczność oraz estetykę aplikacji.

25.3.3. Implementacja

Wybór stosu technologicznego dla aplikacji skoncentrowany był na trzech kluczowych technologiach: React, Spring Boot oraz PostgreSQL.

- React.js to popularny framework oparty na języku JavaScript, który pozwala na tworzenie dynamicznych interfejsów użytkownika. Jego szerokie wsparcie ze strony aktywnej społeczności sprawia, że jest to jeden z najlepszych wyborów dla nowoczesnych aplikacji webowych [19, 20].
- Spring Boot jest uznawany za efektywny framework do rozwijania aplikacji w języku Java po stronie logiki biznesowej oraz dostępu do danych. Oferuje bogaty zestaw wbudowanych funkcji, co znacząco przyspiesza proces tworzenia aplikacji [21].
- PostgreSQL to zaawansowany, otwarty system zarządzania relacyjnymi bazami danych. Gwarantuje on bezpieczeństwo oraz rozbudowane możliwości SQL, co czyni go idealnym rozwiązaniem do zarządzania danymi.

Dodatkowo warto zwrócić uwagę na inne technologie, które wsparły rozwój aplikacji:

- Chakra UI: Biblioteka do stylowania, umożliwiająca tworzenie estetycznych interfejsów użytkownika dzięki gotowym komponentom.
- Spring Security i JSON Web Token: Framework zapewniający uwierzytelnianie i autoryzację, a także ochronę przed zagrożeniami cybernetycznymi. JWT umożliwia bezpieczne przesyłanie informacji w formacie JSON, co pozwala na ich weryfikację.
- Swagger: Narzędzie do opisu i dokumentowania struktury API, które generuje interaktywną dokumentację i wspiera testowanie metod HTTP.
- Docker: Platforma do wdrażania aplikacji w kontenerach, co zapewnia jej przenośność i ułatwia skalowanie oraz zarządzanie środowiskiem.
- Flyway Migrations: Narzędzie do wersjonowania bazy danych, które umożliwia zarządzanie migracjami i utrzymywanie spójności struktury bazy danych.

Strona główna końcowej aplikacji (rysunek 25.2) zawiera pasek nawigacyjny z możliwością przejścia do strony logowania i rejestracji, a na środku wyświetla chwytliwy slogan, opis aplikacji i wizualizację przykładowych posiłków.

Główny ekran monitorowania (rysunek 25.3) zawiera powitanie użytkownika, mierzony wskaźnik osiągnięć ze wskazaniem aktualnego BMI oraz wykresem kołowym progresu do wagi docelowej, jak również podsumowanie dziennego spożycia wody wraz z wykresem kołowym progresu do dziennego celu oraz informację odnośnie zapotrzebowania kalorycznego organizmu, kalorii spożytych danego dnia oraz liczby kalorii pozostałych do osiągnięcia dziennego zapotrzebowania. Ekran przedstawia również ostatnio uzupełnioną masę ciała oraz wykres zmian masy ciała od danego dnia. Informacje na głównym ekranie są aktualizowane w miarę uzupełniania wpisów dotyczących m.in. przyjętych kalorii (poprzez

dodawanie produktów lub całych posiłków) czy wody. Każdy z tych elementów posiada dedykowany ekran, do którego przejść można przez odnośniki w menu bocznym (rysunek 25.3). Ekran wyboru produktów posiada m.in. opcję filtracji i sortowania w zależności od wybranego typu diety (np. niskowęglowodanowa, wysokobiałkowa).



Rysunek 25.2. Strona główna aplikacji



Rysunek 25.3. Główny ekran monitorowania zdrowego stylu życia – wykresy oraz współczynniki

Najważniejszą funkcjonalnością aplikacji jest Asystent AI (rysunek 25.4), który zapewnia całodobowe wsparcie użytkownika przez monitorowanie jego problemów i automatyczne udzielanie odpowiedzi.



Rysunek 25.4. Asystent AI – przykład działania funkcjonalności asystenta żywieniowego opartego na sztucznej inteligencji. Użytkownik może uzyskać od asystenta także podsumowanie informacji dostępnych w profilu. Można zauważyć, że dane wrażliwe, takie jak hasło, nie są udostępniane w podsumowaniu

Asystent jest oparty na modelu sztucznej inteligencji GPT-3.5-turbo, integruje się z aplikacją, dostarczając spersonalizowane porady na podstawie danych użytkownika, takich jak zapotrzebowanie kaloryczne, czy historia posiłków. Działa jak „wirtualny przyjaciel”, oferując informacje oraz analizę danych zdrowotnych, wspierając użytkownika w realizacji jego celów.

25.3.4. Walidacja

Testy automatyczne odgrywają wspólnie kluczową rolę w weryfikacji poprawności działania aplikacji na wczesnym etapie rozwoju, minimalizując ryzyko wystąpienia błędów w dalszych fazach projektu. Narzędzia takie jak JUnit, Mockito i AssertJ zostały zastosowane do stworzenia testów jednostkowych. JUnit służy do definiowania i grupowania przypadków testowych, Mockito umożliwia tworzenie obiektów zastępczych (tzw. mocków), co pozwala na symulację zależności w systemie, a AssertJ zapewnia bogaty zestaw wyrażeń asercji, dzięki którym testy są bardziej czytelne i zrozumiałe [22–24].

Ocena stopnia przetestowania aplikacji za pomocą testów jednostkowych opiera się na parametrze pokrycia, który określa procentową wartość przetestowanych elementów w aplikacji. Za pomocą środowiska programistycznego IntelliJ IDEA wygenerowano raport pokrycia dla końcowej wersji aplikacji (rysunek ??) z podziałem na trzy składowe:

- pokrycie klas: 81% (56 z 69 klas przetestowanych),
- pokrycie metod: 81% (245 z 300 metod przetestowanych),
- pokrycie linii kodu: 78% (445 z 570 linii kodu wykonanych w testach).

Pakiety takie jak auth, categories, eatmeals, meal, user i weightrecords, w których zawarto kluczowe funkcjonalności aplikacji, uzyskały wysokie pokrycie, natomiast config i exception charakteryzują się niskim pokryciem ze względu na ograniczoną funkcjonalność.

Testy manualne, przeprowadzane przez niezależnych testerów, pozwalają ocenić działanie aplikacji z perspektywy użytkownika końcowego, co jest kluczowe w ocenie m.in. interfejsu użytkownika oraz intuicyjności aplikacji. W tym wypadku testerzy dostarczyli istotnych sugestii dotyczących estetyki i ergonomii aplikacji, co przyczyniło się do poprawy warstwy wizualnej interfejsu [25]. Ponadto testy ujawniły problem z nadmiernym zużyciem pamięci na serwerze AWS, dzięki czemu zoptymalizowano zarządzanie wersjami aplikacji, co zredukowało czas odpowiedzi serwera i usprawniło działanie aplikacji.

25.4. Wdrożenie

Aplikacja została wdrożona i jest dostępna pod adresem <http://dietdetective.live/>. Oferuje pełną funkcjonalność zarówno na komputerach, jak i urządzeniach mobilnych. Aby sprawdzić wszystkie możliwości aplikacji, użytkownik musi przejść przez proces rejestracji i wykonać wywiad środowiskowy, co umożliwi stworzenie konta do logowania.

Pierwszym krokiem w procesie wdrożenia była konteneryzacja aplikacji za pomocą Dockera, otwartego narzędzia z 2013 roku, które pozwala na uruchamianie aplikacji w zamkniętych kontenerach, co upraszcza zarządzanie kodem, zależnościami i konfiguracjami.

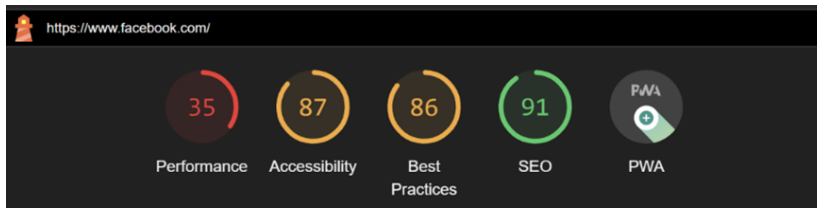
W procesie wykorzystano dwa kluczowe pliki: Dockerfile, który określa, jak budować obraz kontenera, oraz docker-compose.yml, umożliwiający konfigurację wielu kontenerów jednocześnie. Dzięki Dockerowi proces konfiguracji bazy danych PostgreSQL został uproszczony do jednego skryptu, co znacznie przyspieszyło wdrażanie aplikacji i umożliwiło pracę w jednolitym środowisku programistycznym niezależnie od lokalizacji [26, 27].

Kolejnym etapem było wykupienie domeny dietdetective.live za pośrednictwem serwisu name.com oraz skonfigurowanie serwera typu DNS CName, który przekierowuje ruch na właściwy adres. Następnie stworzono instancję serwera EC2 w Amazon Web Services (AWS), zlokalizowaną w Sztokholmie. Po nawiązaniu bezpiecznego połączenia z serwerem przy użyciu pliku PEM i protokołu Secure Shell (SSH) sklonowano repozytorium z GitHuba, a następnie uruchomiono aplikację poleceniem docker compose up.

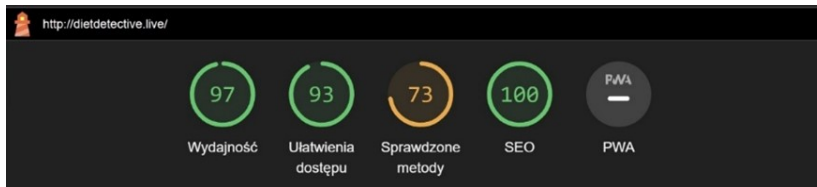
Jednym z wyzwań tak skonfigurowanej aplikacji było wolne ładowanie podstrony z przepisami, co zostało zidentyfikowane jako problem związany z przechowywaniem zdjęć w backendzie aplikacji. Aby poprawić wydajność, zastosowano kilka kroków: skompresowano pliki graficzne, zmieniono format na .webp, a także przeniesiono przechowywanie obrazów na zewnętrzny serwer Firebase w Belgii. Te działania przyczyniły się do niemal dwukrotnego skrócenia czasu ładowania podstrony, co znacząco poprawiło ogólną wydajność aplikacji [28, 29].

25.5. Uzyskane wyniki

Analiza wydajności aplikacji DietDetective została przeprowadzona przy użyciu narzędzi Lighthouse i WebPageTest. Raport z narzędzia Lighthouse przedstawia parametry takie jak wydajność, dostępność, metodologia i SEO. W porównaniu do Facebooka (rysunek 25.5), aplikacja DietDetective (rysunek 25.6) osiągnęła zbliżony wynik w zakresie dostępności i SEO, jednak jej wydajność okazała się znacznie lepsza, co można przypisać mniejszej liczbie użytkowników.



Rysunek 25.5. Otrzymane parametry witryny facebook.com



Rysunek 25.6. Otrzymane parametry jakości zaprojektowanej strony dietdetective.live, takie jak wydajność, dostępność, metodyka oraz SEO

WebPageTest dostarcza szczegółowych informacji na temat wydajności w czasie rzeczywistym, w tym czasów ładowania strony. Tabela 25.2 porównuje wyniki z Lighthouse i WebPageTest. W przypadku DietDetective, czas pierwszej wyrenderowanej treści (FCP) wynosi 1 s, a czas renderowania treści (LCP) 1,6 s, co jest zgodne z akceptowalnymi normami. Lighthouse zarejestrował czas FCP na poziomie 1 sekundy, zgodny z najlepszymi praktykami, natomiast WebPageTest wykazał nieco wyższy czas wynoszący 1,3 sekundy, nadal w akceptowalnych normach. Wskaźnik LCP wyniósł 1,6 sekundy dla Lighthouse i 1,4 sekundy dla WebPageTest, co świadczy o wysokiej optymalizacji renderowania treści w aplikacji. Całkowity czas blokowania (TBT) oraz skumulowane przesunięcie układu (CLS) utrzymały się na minimalnym poziomie, co potwierdza efektywność aplikacji w kontekście interaktywności i stabilności wizualnej.

Tabela 25.2. Porównanie badania Lighthouse oraz WebPageTest

Lp.	Kontrola	Lighthouse	WebPageTest	Zalecenie
1	FCP – czas pierwszej wyrenderowanej treści	1 s	1,3 s	0,95–1,6 s
2	LCP – czas renderowania treści	1,6 s	1,4 s	1,2–2,4 s
3	TBT – całkowity czas blokowania	10 ms	0 s	150–350 ms
4	CLS – skumulowane przesunięcie układu	0 (brak przesunięcia)	–	0,1–0,25
5	SI – Indeks prędkości	2,1 s	1,77 s	1,3–2,3 s

Rysunek 25.7 to wykres kaskadowy, pokazujący czas ładowania różnych elementów strony, gdzie głównym opóźnieniem było pobranie zdjęcia tła, trwające około 1 s. Łączny czas ładowania wyniósł około 2,4 s, co jest uznawane za optymalne [30, 31].



Rysunek 25.7. Wykres kaskadowy uwzględniający dokładny czas procesów w odniesieniu do całkowitego czasu ładowania strony

25.6. Podsumowanie

Celem pracy była implementacja aplikacji webowej wspierającej użytkownika w zachowaniu zasad zdrowego stylu życia, przede wszystkim w zakresie żywienia i nawodnienia. Proponowana aplikacja została w pełni zaprojektowana oraz zaimplementowana, a niniejsza praca pisemna odzwierciedla proces rozwoju aplikacji zgodnie z modelem kaskadowym cyklu życia oprogramowania, który zakłada kolejno: analizę biznesową aplikacji, projekt oprogramowania, implementację rozwiązania, testowanie, aż do końcowego wdrożenia [32].

W pierwszym kroku zdefiniowano listę wymagań funkcjonalnych przez wywiad z potencjalnymi użytkownikami oraz analizę krytyczną istniejących rozwiązań pokrewnych. Aplikacja skupia się na wsparciu użytkownika przez monitorowanie oraz wizualizację parametrów związanych z żywieniem i spożyciem wody, z uwzględnieniem miar stosowanych w planowaniu żywienia, a także biorąc pod uwagę osoby z wybranymi jednostkami chorobowymi związanymi z żywieniem, takimi jak celiakia i nietolerancja laktozy. Zrealizowano wszystkie postawione wyzwania dotyczące działania aplikacji, obejmujące: stronę główną, uwierzytelnianie użytkownika, wywiad środowiskowy, monitorowanie odżywiania, makroskładników, spożycia wody, wykres trendu wagi, przypomnienia, wizualizacje, przepisy na posiłki, dziennik aktywności, sprawdzanie kaloryczności żywności, filtrowanie kategorii posiłków i produktów, uwzględnienie nietolerancji i alergii pokarmowych, zarządzanie profilem, płatności, a także wsparcie asystenta AI, który jest najważniejszą w kategorii innowacyjności funkcjonalnością i odpowiada aktualnym trendom na rynku IT. Działanie aplikacji zostało zweryfikowane przez automatyczne testy jednostkowe oraz manualne testy eksploracyjne wykonane przez niezależnych użytkowników. Zapewnione zostały również kluczowe wymagania нефункционалне: wydajność, bezpieczeństwo danych, łatwość obsługi, skalowalność i dostępność, które zweryfikowano za pomocą automatycznych narzędzi testujących aplikacje webowe. Aplikacja została wdrożona i można ją przetestować pod adresem: <http://dietdetective.live/>, a repozytorium kodu dostępne jest przez system kontroli wersji GitHub: https://github.com/sebo21cc21/IB_DietDetective. Ostatni krok jednoznaczny jest ze spełnieniem postawionego na wstępie celu pracy.

W obliczu narastającego występowania zaburzeń masy ciała i chorób żywieniowo zależnych we współczesnych społeczeństwach rosnącym zainteresowaniem cieszy się wykorzystanie technologii jako wsparcia w zachowaniu zasad zdrowego stylu życia. Zaproponowana

w tej pracy aplikacja webowa DietDetective może być wartościowym narzędziem dla osób pragnących polepszyć jakość swojego życia przez pomoc w monitorowaniu i utrzymaniu zdrowych nawyków żywieniowych oraz dostarczanie użytkownikom informacji, narzędzi i motywacji.

Bibliografia

- [1] Alicja Głowacka-Rębała, Zachowania zdrowotne w rodzinie a problem otyłości u dzieci. Dostępny online: <https://www.wbc.poznan.pl/Content/328203/index.pdf> [dostęp: 20-12-2023].
- [2] Ostryżek Artur, Marcinkowski Jerzy T., Biomedyczny versus holistyczny model zdrowia a teoria i praktyka kliniczna. *Problemy Higieny i Epidemiologii* **2012**, 93.4, s. 682–686.
- [3] Piotrowicz M, Urban E. Zdrowie – Definicja, Projekt ProfiBaza. Dostępny online: <https://profibaza.pzh.gov.pl/publikacje/podstawy-zdrowiapublicznego/01-zdrowie-definicja> [dostęp: 20-12-2023].
- [4] Caio Giacomo, et al. Celiac disease: a comprehensive current review. *BMC medicine* **2019**, 17, s. 1–20.
- [5] Rubiotapia Alberto, et al. American College of Gastroenterology guidelines update: Diagnosis and management of celiac disease. *Official journal of the American College of Gastroenterology/ACG* **2023**, 118.1, s. 59–76.
- [6] American Diabetes Association. 2. Classification and diagnosis of diabetes: standards of medical care in diabetes—2021. *Diabetes care* **2021**, 44.Supplement_1, s. S15–S33.
- [7] World Health Organization, BMI classification. Dostępny online: <https://archive.ph/IZQvU> [dostęp: 20-12-2023].
- [8] Eurostat, Overweight and obesity — BMI statistics. Dostępny online: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Overweight_and_obesity_-_BMI_statistics#Education_level_and_overweight [dostęp: 20-12-2023].
- [9] Definicja — Choroba chroniczna. Dostępny online: <https://stomalife.pl/choroba-chroniczna> [dostęp: 20-12-2023].
- [10] Ministerstwo Zdrowia, Zdrowy styl życia. Dostępny online: <https://archiwum.mz.gov.pl/zdrowie-i-profilaktyka/choroby-cywilizacyjne/zdrowy-styl-zycia/> [dostęp: 20-12-2023].
- [11] Forum Zaburzeń Metabolicznych 2010, tom 1, nr 1, s. 12–21.
- [12] Wang X, Mao D, Xu Z, Wang Y, Yang X, Zhuo Q, Tian Y, Huan Y, Li Y. Predictive Equation for Basal Metabolic Rate in Normal—Weight. *Nutrients* **2023**, 27, 15(19):4185.
- [13] Precedence research, Healthcare Information Systems Market Size in the U.S. 2023 To 2032. Dostępny online: <https://www.precedenceresearch.com/healthcare-information-systems-market> [dostęp: 20-12-2023].
- [14] Johnson, Jim & Mulder, Hans, *Endless Modernization: How Infinite Flow Keeps Software Fresh*, 2021.
- [15] Piotr Miętkiewicz, Analiza biznesowa — recepta na sukces projektu IT. Dostępny online: <https://solwit.com/blog/analiza-biznesowa-w-projekcie-it/> [dostęp: 20-12-2023].
- [16] UX LAWS. Dostępny online: <https://stripes-design.pl/ux/jacobs-law/> [dostęp: 20-12-2023].
- [17] UX LAWS. Dostępny online: <https://stripes-design.pl/ux/prawo-millera/> [dostęp: 20-12-2023].
- [18] UX LAWS. Dostępny online: <https://stripes-design.pl/ux/zeigarnik-effect/> [dostęp: 20-12-2023].

- [19] React. Dostępny online: <https://react.dev/> [dostęp: 20-12-2023].
- [20] Tomasz Kozon, Virtual DOM — Jak to działa i dlaczego jest ważny. Dostępny online: <https://boringowl.io/blog/virtual-dom-jak-dziala-i-dlaczego-jest-wazny> [dostęp: 20-12-2023].
- [21] Spring. Dostępny online: <https://spring.io/> [dostęp: 20-12-2023].
- [22] Stefan Bechtold, Sam Brannen, Johannes Link, Matthias Merdes, Marc Philipp, Juliette de Rancourt, Christian Stein, JUnit 5 User Guide. Dostępny online: <https://junit.org/junit5/docs/current/user-guide/> [dostęp: 20-12-2023].
- [23] Dostępny online: <https://www.toptal.com/java/a-guide-to-everyday-mockito> [dostęp: 20-12-2023].
- [24] Ivan Pavlov, A Unit Testing Practitioner's Guide to Everyday Mockito. Dostępny online: <https://assertj.github.io/doc/> [dostęp: 20-12-2023].
- [25] Testowanie manualne i automatyczne. Różnice. Dostępny online: <https://testerzy.pl/baza-wiedzy/artykuly/testowanie-manualne-i-automatyczne-roznice> [dostęp: 20-12-2023].
- [26] Docker, Use containers to Build, Share and Run your applications. Dostępny online: <https://www.docker.com/resources/what-container> [dostęp: 22-10-2023].
- [27] Docker Overview. Dostępny online: <https://docs.docker.com/get-started/overview/> [dostęp: 22-10-2023].
- [28] Mcleod Angus, *Marketing internetowy w praktyce. Jak rozkręcić dochodowy biznes w Internecie*, Złote Myśli, Gliwice, 2007.
- [29] WebP, An image format for the Web. Dostępny online: <https://developers.google.com/speed/webp?hl=en> [dostęp: 22-10-2023].
- [30] Lighthouse Overview. Dostępny online: https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/performance/performance-scoring?utm_source=lighthouse&utm_medium=devtools&hl=en [dostęp: 22-10-2023].
- [31] Armando Roggio, Google Lighthouse: Monitor Site Performance, SEO, Accessibility. Dostępny online: <https://www.webpagetest.org/> [dostęp: 22-10-2023].
- [32] Kasprzyk Rafał, Przegląd modeli cyklu życia oprogramowania. *Software Developer's Journal* **2006**, 10.

Parametryzacja ujemnej fali niezgodności w odpowiedzi na bodźce słuchowe

mgr inż. Zofia Dobrowolska
Inżynieria Biomedyczna

dr hab. inż. Cezary Sielużycki
Katedra Inżynierii Biomedycznej

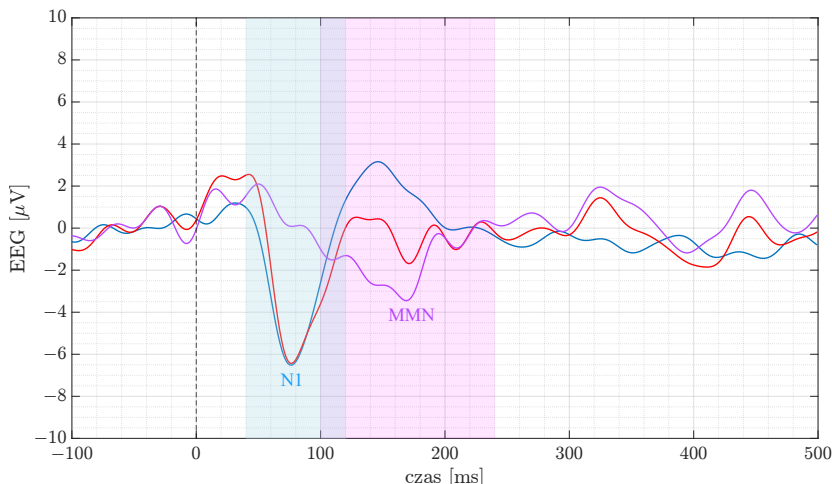
W pracy skupiono się na rejestrowanych za pomocą elektroencefalografii odpowiedziach mózgu człowieka na sekwencje bodźców słuchowych. Analizowano dwa załamki: N1, odpowiadający mimowolnej rejestracji przez mózg wystąpienia dźwięku, oraz MMN, którego obecność przypisuje się detekcji zmiany charakteru dźwięku w sekwencji. Celem zaproponowanej metodologii było zrównoważenie stosunku sygnału do szumu (SNR) w estymatach odpowiedzi na bodźce częste (standardy) i rzadkie (dewianty), ponieważ znany z literatury brak tej równowagi poddaje w wątpliwość jakość załamka MMN opartego na wspomnianych estymatach. Przy braku zrównoważenia SNR, typowym dla prac poświęconych MMN, nie wiadomo, czy różnice w morfologii estymat odpowiedzi mózgu na standardy i dewianty wynikają z ich różnej liczebności w sekwencji prezentowanych dźwięków, czy z różnic w charakterze bodźca. W obliczu tej trudności stosowanie MMN jako biomarkera klinicznego obarczone jest niepewnością interpretacyjną. Proponujemy metodologię estymacji MMN wolnej od obciążenia niezrównoważonym SNR. Szczegółowe analizy wykazały, że sformułowanie wartościowych wniosków wymaga dalszych badań.

26.1. Cel i założenia

Ze względu na niski stosunek sygnału do szumu (ang. *signal-to-noise ratio*, SNR) rejestracji pojedynczej odpowiedzi mózgu wywołanej bodźcem [1–3] uzyskanie wiarygodnej morfologii takiej odpowiedzi (ang. *event-related potential*, ERP) w pomiarach elektroencefalograficznych (EEG) wymaga wielokrotnego powtarzania stymulacji i rejestracji, a następnie arytmetycznego uśrednienia pozyskanych w ten sposób sygnałów [2, 4]. Operacja uśredniania redukuje szum, zachowując jednocześnie kształt ERP [5, 6]. Im więcej powtórzeń, tym większa redukcja szumu, jednak zbyt długie badanie może obniżyć jakość wynikowego sygnału ze względu na artefakty będące skutkiem zmęczenia osoby badanej [4, 7].

Ze względu na różny SNR uśrednionych ERP wywołanych bodźcami dźwiękowymi częstymi (standardami) i rzadkimi (dewiantami) w klasycznym paradygmacie *oddball* [8], typowe parametry załamków N1 i MMN, przedstawionych na rysunku 26.1, cechują się różną precyzją, co może prowadzić do fałszywej klasyfikacji reakcji mózgu na bodziec jako patologicznej albo poprawnej.

Celem pracy dyplomowej było zbadanie, czy zrównoważenie SNR w uśrednionych odpowiedziach mózgu na bodźce standardowe oraz dewiacyjne wpłynie na zdolność dyskryminacyjną testów statystycznych w zakresie rozróżniania estymat cech odpowiedzi mózgu na te dwa rodzaje bodźców, gdzie cechami tymi są zaproponowane w pracy parametry załamków N1 i MMN, a wartości tych parametrów są wyznaczane automatycznie. Takie statystyczne różnicowanie jest istotne np. w porównaniach cech sygnałów EEG pozyskanych od osób cierpiących na różnorakie schorzenia z ich odpowiednikami dla sygnałów osób zdrowych, przez co określone parametry sygnałów mogą zyskać status swoistych biomarkerów. Jest to szczególnie istotne w badaniach morfologii MMN, ponieważ MMN wyznacza się jako różnicę uśrednionych odpowiedzi na bodziec dewiacyjny i uśrednionych odpowiedzi na bodziec standardowy.



Rysunek 26.1. Morfologia załamka N1 w uśrednionym sygnale odpowiedzi mózgu na bodziec standardowy (przedstawionym kolorem niebieskim) oraz na bodziec dewiacyjny (kolorem czerwonym), a także MMN (w kolorze fioletowym), będący różnicą sygnałów niebieskiego i czerwonego. Zacięte obszary odpowiadają oknom czasowym typowego występowania załamków, odpowiednio N1 (pole błękitne) oraz MMN (pole różowe)

Założenia badawcze realizowanej pracy obejmowały m.in.:

- ocenę wpływu zrównoważenia SNR na uzyskiwane wartości parametrów N1 i MMN,
- weryfikację wpływu zrównoważenia SNR na statystyczne różnicowanie odpowiedzi na bodźce standardowe i odpowiedzi na bodźce dewiacyjne,
- wstępną ocenę wpływu zrównoważenia SNR na wartości parametrów załamków N1 i MMN celem oszacowania zdolności dyskryminacyjnej w porównaniach sygnałów EEG pozyskanych w grupie pacjentów cierpiących na anoreksję oraz w kontrolnej grupie osób zdrowych.

26.2. N1 i MMN

Potencjały wywołane (ERP) to zmiany napięcia w sygnale EEG, które pojawiają się w odpowiedzi na fizyczne lub psychiczne zdarzenia. Są one użyteczne w badaniu, w jaki sposób mózg przetwarza bodźce zewnętrzne i wykonuje złożone funkcje poznawcze. Uśredniony sygnał EEG w zależności od paradygmatu eksperymentalnego i użytych bodźców cechuje się sekwencją fal nazywanych załamkami, o pozytywnej (P) bądź negatywnej (N) polaryzacji względem linii bazowej wyznaczonej w oknie czasowym przed prezentacją bodźca. Załamki te klasyfikuje się również według czasu ich wystąpienia po bodźcu, zwanego latencją. Odzwierciedlają one przepływ sygnałów elektrycznych w mózgu towarzyszących różnorodnym procesom w zakresie od mimowolnej percepcji zmysłowej do realizacji złożonych zadań poznawczych.

Słuchowe potencjały wywołane (ang. *auditory evoked potentials*, AEP) to sygnały elektryczne generowane w mózgu w odpowiedzi na dźwięki [7, 9–11]. Najbardziej wyróżniającym się załamkiem słuchowym jest N100 (skrótowo N1), o polaryzacji ujemnej i latencji, czyli czasie wystąpienia wartości szczytowej, wynoszącej około 100 ms [6, 12–15]. Na podstawie uśrednionych sygnałów EEG rejestrowanych w paradygmacie *oddball* [9, 10, 16] w związku z prezentacją dźwiękowych bodźców częstych i rzadkich – różniących się wzajemnie z uwagi na wybrany parametr, np. częstotliwość dźwięku – wyznacza się załamek MMN (ang. *mismatch negativity*) [13, 15], będący cechą sygnału różnicowego powstałego na skutek odjęcia uśrednionego sygnału EEG związanego z prezentacją bodźca częstego od analogicznego sygnału związanego z prezentacją bodźca rzadkiego. Bodźce te pojawiają się w prezentowanej sekwencji w określonym stosunku ilościowym determinującym ich charakter – zwykle od 8:2 do 9:1 dla, odpowiednio, bodźców częstych (tzw. standardów) vs rzadkich (tzw. dewiantów) [8, 16–19]. Jako cechę różnicowej załamki MMN przypisuje się odzwierciedlanie detekcji różnic między dwoma omawianymi charakterami bodźców [9, 13, 15, 20]. W nomenklaturze polskojęzycznej MMN określa się mianem fali niezgodności.

Istnieją dwa obozy badaczy, które różnie tłumaczą proces powstawania załamki MMN. Przedstawiciele jednego twierdzą, że MMN generowane jest w wyniku zapamiętywania poprzednich bodźców i porównywania nowych z zapamiętanymi. Drugi obóz postuluje, że MMN odzwierciedla różnice w aktywności różnych grup neuronów, właściwych dwóm rozpatrywanym charakterom bodźców [9, 10, 20].

Jednym z celów pracy było oszacowanie zdolności dyskryminacyjnej zaproponowanych parametrów załamek N1 oraz MMN jako swoistych biomarkerów potencjalnie umożliwiających różnicowanie osób cierpiących na jadłowstręt psychiczny (grec. *anorexia nervosa*, AN) i osób zdrowych. AN to zaburzenie odżywiania charakteryzujące się intensywnym lękiem przed przytyciem i zniekształconym obrazem ciała, co prowadzi do samodzielnie wywołanego głodzenia się [21–23]. AN wykazuje najwyższy wskaźnik śmiertelności spośród wszystkich zaburzeń psychicznych i najczęściej dotyka nastoletnie dziewczęta, choć może wystąpić u osób w każdym wieku i dowolnej płci. Objawia się poważną utratą wagi, niedożywieniem oraz problemami zdrowotnymi, takimi jak bradykardia i hipotensja, a także obsesyjnym liczeniem kalorii i unikaniem posiłków [21–23]. W mózgach osób z anoreksją zaobserwowano zmniejszenie objętości istoty szarej oraz inne zaburzenia, co sugeruje

wpływ na funkcje poznawcze i emocjonalne. Diagnoza opiera się na kryteriach DSM-5 [22], a leczenie obejmuje opiekę medyczną, poradnictwo żywieniowe i terapię psychologiczną.

26.3. Metodyka

Opracowana metoda wyznaczania parametrów załamek N1 i MMN w warunkach zrównoważonego SNR została wstępnie przetestowana na danych EEG otrzymanych od zespołu dr. Lecha Kipińskiego z Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu. W eksperymencie uczestnikom prezentowano dźwięki częste (standardy, o częstotliwości 500 Hz) oraz rzadkie (dewianty, o częstotliwości 1000 Hz) w stosunku 9:1 [8]. Grupa kontrolna składała się z 42 osób zdrowych, zaś grupa pacjentów z 28 osób cierpiących na anoreksję. Wszystkie procedury przetwarzania i analizy sygnału EEG zostały przeprowadzone w środowisku MATLAB (MathWorks, Inc.), gdzie surowe sygnały zostały poddane detrendyzacji oraz filtracji za pomocą pasmowoprzepustowego filtra Butterwortha w zakresie 1–30 Hz [10, 14, 15].

W kontekście estymacji potencjałów wywołanych tzw. *epoka* to wycinek sygnału obejmujący określony odcinek czasu względem początku bodźca. Sygnał EEG został podzielony na epoki o długości 600 ms, od 100 ms przed do 500 ms po początku bodźca [2, 14, 17, 18]. Uśrednione po epokach sygnały zostały wyznaczone dla bodźców standardowych oraz osobno dla bodźców dewiacyjnych. W klasycznym paradygmacie *oddball* wartości SNR takich dwóch uśrednionych sygnałów różnią się istotnie ze względu na znacząco różne liczby epok – w naszym przypadku 450 dla standardów i 50 dla dewiantów [14, 16–18]. Taki niezrównoważony SNR stanowi problem, zwłaszcza w eksperymentach klinicznych, w których z cech załamek N1 oraz MMN wyciąga się wnioski dotyczące stanu zdrowia osób badanych.

26.3.1. Zrównoważenie SNR

Badania nad MMN wykazują znaczące nieścisłości, ponieważ zdarza się, że MMN jest słabo widoczne w sygnale różnicowym mimo zdolności osoby badanej do dyskryminacji bodźców, bądź wyraźne MMN pojawia się mimo nikłej zdolności do takiej dyskryminacji. Problem ten może wynikać z nierównych SNR sygnałów uśrednionych dla bodźców, odpowiednio, standardowych oraz dewiacyjnych, co skutkuje trudnościami interpretacyjnymi przy porównaniach parametrów załamek N1 obu sygnałów, jak również przy ocenie załamka MMN w sygnale różnicowym. W celu zbadania, czy różnice w wartościach parametrów wynikają z rzeczywistych różnic w odpowiedzi mózgu, czy jedynie z różnic w SNR, epoki odpowiadające standardom podzielono na podzbiory o liczebności równej liczbie dewiantów. Zrównanie liczebności podzbiorów epok odpowiadających standardom z liczebnością epok odpowiadających dewiantom miało na celu zrównoważenie SNR w sygnałach uśrednionych, aby wyeliminować zasygnalizowany wcześniej problem nierównych SNR, obecny w literaturze poświęconej MMN. Dla obu klas bodźców obliczono sygnały uśrednione, na podstawie których dokonano parametryzacji załamek N1 oraz MMN.

26.3.2. Parametryzacja N1 i MMN

Parametrami, którymi opisano załamki N1 i MMN, były:

1. magnituda [μV], czyli najbardziej ujemna wartość (depresja) załamka o negatywnej polaryzacji w oknie czasowym odpowiadającym badanej fali (60–160 ms dla N1, 100–250 ms dla MMN),
 2. prominencja [μV], czyli różnica wartości magnitudy oraz podstawy załamka zdefiniowanej jako mniejsze z dwóch najbardziej wyraźnych maksimów otaczających depresję N1, po jednym z każdej strony,
 3. latencja [ms], opisująca odległość w czasie między depresją załamka a początkiem bodźca,
 4. szerokość w połowie magnitudy [ms], zdefiniowana jako odległość czasowa wokół depresji załamka ograniczona sygnałem w połowie jego magnitudy,
 5. szerokość w połowie prominencji [ms], czyli odległość czasowa wokół depresji załamka ograniczona sygnałem w połowie jego prominencji,
 6. długość zbocza po lewej i prawej stronie depresji załamka,
 7. tangens kąta – po lewej i prawej stronie depresji załamka – wyznaczonego przez linie określające nachylenie odpowiadającego zbocza i wertykalną linię poprowadzoną w miejscu latencji załamka,
 8. pole powierzchni zawartej pomiędzy sygnałem a osią czasu w obrębie szerokości załamka w połowie jego prominencji.
- Część z tych parametrów stosowano w pracy [24].

26.3.3. Ewaluacja statystyczna

Ponieważ w pomiarze sygnałów badanych osób występowało 50 bodźców dewiacyjnych i średnio 450 standardowych, epoki standardowe podzielono na 8 albo 9 podzbiorów, zależnie od rzeczywistej liczby standardów w danym pomiarze. Wartości parametrów odpowiednio uśrednionych sygnałów $\overline{standard}_n$ (gdzie $n \in \{1, \dots, N\}$, $N \in \{8, 9\}$) porównano między sobą oraz z wartościami parametrów uśrednionego sygnału $\overline{dewiant}$ za pomocą testów statystycznych. W analizie uwzględniono korekcję Bonferroniego poziomu istotności testów, aby zminimalizować ryzyko błędu I rodzaju. Podobną analizę przeprowadzono dla wartości parametrów załamka MMN obecnego w sygnałach powstałych z odejmowania każdego ze $\overline{standard}_n$ od $\overline{dewiant}$. Celem pewniejszego zbadania wpływu wyrównania SNR analogiczne analizy statystyczne przeprowadzono dodatkowo dla tysiąca zestawów podzbiorów $\overline{standard}_1$ i $\overline{standard}_2$ utworzonych przez losowanie bez powtórzeń po 50 epok.

Przeprowadzono również analizy porównawcze wartości rozpatrywanych parametrów załamek N1 (dla bodźców standardowych i osobno dla bodźców dewiacyjnych) oraz MMN między grupą pacjentów cierpiących na anoreksję a kontrolną grupą osób zdrowych. W tym przypadku badano różnice między grupami badanych, a nie wewnątrz jednej grupy.

26.4. Podsumowanie

Parametry załamek N1 i MMN słuchowych potencjałów wywołanych mózgu mogą pełnić rolę wskaźników mechanizmów neuronalnych związanych z detekcją bodźców dźwiękowych i percepcją zmian w ich charakterystykach. Przeprowadzone badania miały na celu m.in. sprawdzenie, jak zrównoważenie SNR dwu klas uśrednionych sygnałów EEG odpo-

wiadających dwóm charakterom bodźców dźwiękowych w paradygmacie *oddball* wpływa na wartości zaproponowanych parametrów załamek N1 i MMN w kontekście zdolności dyskryminacyjnej tych parametrów rozpatrywanych w roli ewentualnych biomarkerów.

W tradycyjnym podejściu do oceny potencjałów wywołanych zwykle stosuje się jedynie wartości magnitudy i latencji. W proponowanej metodologii wykorzystano rozszerzony zestaw parametrów opisujących cechy tych potencjałów. Szczegółowe analizy wykazały, że – typowo dla pomiarów biomedycznych – wyniki są wrażliwe na jakość danych wejściowych. Z uwagi na trudne do jednoznacznego zidentyfikowania źródła silnych artefaktów obecnych w wejściowych sygnałach EEG, którymi dysponowaliśmy, opublikowanie informatywnych wyników oraz dobrze uzasadnionych wniosków wymaga przeanalizowania nowych zbiorów danych o możliwie lepszej jakości, co jest naszym celem w najbliższej przyszłości.

Bibliografia

- [1] Legatt A.D., Intraoperative monitoring of auditory evoked potentials, W: *Handbook of Clinical Neurophysiology*, tom 10 *Disorders of Peripheral and Central Auditory Processing*, Celestia G. G., Elsevier, Amsterdam, **2013**, s. 235–252.
- [2] Houston R.J., Ceballos N.A., Human neurophysiology: EEG and quantitative EEG in addiction research, W: *Biological Research on Addiction: Comprehensive Addictive Behaviors and Disorders*, Academic Press, San Diego, CA, **2013**.
- [3] Biagio-De Jager L., Auditory evoked potentials (AEPs): Underlying principles, *Open Access Guide to Audiology and Hearing Aids*, University of Cape Town, **2018**, s. 1–19.
- [4] Maggu A., Auditory evoked potentials in communication disorders: An overview of past, present, and future, *Seminars in Hearing*, **2022**, 43(3), s. 137–148.
- [5] Duncan C., Barry R., Connolly J., Fischer C., Michie P., Näätänen R., Polich J., Reinvang I., Van Petten C., Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400, *Clinical Neurophysiology*, **2009**, 120(11), s. 1883–1908.
- [6] Luck S., *An Introduction to The Event-Related Potential Technique*, The MIT Press, Cambridge, **2005**.
- [7] Sielużycki C., Matysiak A., König R., Iskander D.R., Reducing the number of MEG/EEG trials needed for the estimation of brain evoked responses: A bootstrap approach, *IEEE Transactions of Biomedical Engineering*, **2021**, 68(7), s. 2301–2312.
- [8] Dorobisz Ł., Kipiński L., Pilecki W., Perspektywy badań poznawczych potencjałów wywołanych u chorych z zaburzeniami wyższych czynności nerwowych z powodu udaru mózgu, W: *Komputerowe Wspomaganie Badań Naukowych*, Zarzycki J., Wrocławskie Towarzystwo Naukowe, Wrocław, **2016**, s. 19–30.
- [9] Näätänen R., Gaillard A.W.K., Mäntysalo S., Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted, *Acta Psychologica*, **1978**, 42(4), s. 313–329.
- [10] May P.J.C., Tiitien H., Mismatch negativity (MMN), the deviance-elicited auditory deflection, explained, *Psychophysiology*, **2010**, 47(1), s. 66–122.
- [11] Shomer D., Lopes da Silva F.H., *Niedermeyer's Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, Oxford University Press, Oxford, **2017**.
- [12] Woods D., The component structure of the N1 wave of the human auditory evoked potential, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **1995**, 44, s. 102–109.

- [13] Legatt A.D., Electrophysiologic auditory tests, W: *Handbook of Clinical Neurology*, tom 129 *The Human Auditory System*, Aminoff M. J., Boller F., Swaab D. F., Elsevier, Amsterdam, **2015**, s. 289–311.
- [14] Fagundes Silva L.A., Honjo Kawahira R.S., Kim C., Matas C., Abnormal auditory event-related potentials in Williams syndrome, *European Journal of Medical Genetics*, **2021**, 64(3), s. 104163.
- [15] Arminius Cassvan, Auditory evoked potentials, W: *The Physiological Basis of Rehabilitation Medicine*, Downey J. A., Myers S. J., Gonzalez E. G., Lieberman J. S., wyd. 2, Butterworth-Heinemann, Oxford, **1994**, s. 295–323.
- [16] Rosburg T., Weigl M., Mager R., No evidence for auditory N1 dishabituation in healthy adults after presentation of rare novel distractors, *International Journal of Psychophysiology*, **2022**, 174, s. 1–8.
- [17] Takeda Y., Kimura M., The auditory N1 amplitude for task-irrelevant probes reflects visual interest, *International Journal of Psychophysiology*, **2014**, 94(1), s. 35–41.
- [18] Kamal F., Morrison C., Campbell K., Taler V., Event-related potential evidence that very slowly presented auditory stimuli are passively processed differently in younger and older adults, *Neurobiology of Ageing*, **2021**, 103, s. 12–21.
- [19] Haumann N.T., Petersen B., Vuust P., and Brattico E., Age differences in central auditory system responses to naturalistic music, *Biological Psychology*, **2023**, 179, s. 108566.
- [20] Näätänen R., Picton T., The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: A review and an analysis of the component structure, *Psychophysiology*, **1987**, 24(4), s. 375–425.
- [21] Morris J., Twaddle S., Anorexia nervosa, *BMJ*, **2007**, 334(7599), s. 894–898.
- [22] *American Psychiatric Association. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: DSM-5-TR™*, American Psychiatric Publishing, Washington, DC, **2013**.
- [23] Hasan T.F., Hasan H., Anorexia nervosa: a unified neurological perspective, *International Journal of Medical Sciences*, **2011**, 8(8), s. 679–703.
- [24] Bogdanowicz L., Assessment of sensory gating in auditory brain evoked potentials, praca inżynierska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, **2023**.

To już piąta z kolei monografia, stanowiąca podsumowanie całorocznej działalności naukowej Stowarzyszenia Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej w 2024 roku. Działalności opartej między innymi na przeprowadzanych nieprzerwanie od 60 lat konkursów na najlepsze prace dyplomowe, gdzie pierwszy konkurs odbył się w roku 1965 na Wydziale Elektrycznym. Konkursy, w których wyłaniane są najlepsze prace dyplomowe inżyniersko-badawcze, obecnie ogłaszane są na czterech wydziałach Politechniki Wrocławskiej, łączących pokrewne dyscypliny naukowe związane z obszarem szeroko pojętej elektryki (automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, informatyka techniczna i telekomunikacja oraz inżynieria biomedyczna). Na wydziałach prowadzone są innowacyjne badania, w które włączani są młodzi ludzie, tworzący swoje prace dyplomowe. Autorzy tych prac, często stojących na bardzo wysokim poziomie merytorycznym, skupiają uwagę na aktualnych problemach naukowo-badawczych, odzwierciedlając obecne trendy w stosowanych rozwiązaniach technologicznych. Monografia zawiera streszczenia nagrodzonych prac dyplomowych z edycji Konkursu w roku 2024, wybranych ze względu na innowacyjność, kreatywność i zaangażowanie studentów Politechniki Wrocławskiej podczas ich przygotowywania.

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



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w sprzedaży wysyłkowej:
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl
ISBN 978-83-7493-291-2

