

Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Wrocławski im. prof. Kazimierza Idaszewskiego

Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej

**Trendy i rozwiązania technologiczne
w elektrotechnice**



edycja 2021



Stowarzyszenie Elektryków Polskich w Politechnice Wrocławskiej 2021

Trendy i rozwiązania technologiczne w elektrotechnice

Redakcja:
dr inż. Remigiusz Mydlikowski

KOMITET NAUKOWY:

- dr hab. inż. Michał Mazur
- dr hab. inż. Piotr Serkies
- dr hab. inż. Agnieszka Ulatowska-Jarża
- dr inż. Dariusz Banasiak
- dr inż. Tomasz Grysiński
- dr inż. Maciej Gwoździewicz
- dr inż. Iwona Hołowacz
- dr inż. Remigiusz Mydlikowski
- dr inż. Damian Nowak
- dr inż. Adam Wąż
- inż. Aleksandra Chudzyńska
- Wiktoria Weichbrodt
- Daniel Ząbek

Skład i łamanie
Aleksandra Rzeszowska

Korekta
Stanisław Gancarz

Projekt okładki
Dominika Osadców-Będkowska

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 2020

© Copyright by Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Wrocławski, Wrocław 2020

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>;

e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-190-8

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

Spis treści

I WYDZIAŁ ELEKTRONIKI	9
1 Projekt i budowa manipulatora stacjonarnego	11
<i>inż. Jakub Tomaszewski, opiekun: dr inż. Joanna Ratajczak</i>	
2 Automatyczna giętarka do drutu	23
<i>inż. Kinga Tokarska, opiekun: dr inż. Mirela Kaczmarek</i>	
3 Zastosowania monokrystalicznych modułów fotowoltaicznych w alternatywnych układach zasilania elektrycznego	29
<i>inż. Grzegorz Jachacz, opiekun: dr inż. Andrzej Jabłoński</i>	
4 Proteza dłoni z rozpoznawaniem sygnałów EMG i obrazów RGB	39
<i>mgr inż. Dawid Grzeszkowiak, opiekun: dr hab. inż. Przemysław Śliwiński</i>	
5 Układ sterowania robota mobilnego z funkcją lokalizacji i identyfikacji wózków transportowych	47
<i>mgr inż. Dawid Moszyński, opiekun: dr inż. Jarosław Szrek</i>	
6 Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w identyfikacji uszkodzeń taśmy przenośnikowej	55
<i>mgr inż. Aleksandra Rzeszowska, opiekun: dr inż. Agata Kirjanów-Błazej</i>	
II WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY	65
7 Zdalnie sterowany robot przeznaczony do instalacji światłowodów	67
<i>inż. Szymon Niczyporuk, opiekun: dr inż. Robert Czechowski</i>	
8 System automatycznego utrzymywania odległości w pojazdach samochodowych	73
<i>inż. Błazej Szymański, opiekun: dr inż. Krzysztof Dyrz</i>	
9 Wykorzystanie modułów bezpieczeństwa sterownika PLC	79
<i>inż. Natalia Dutka, opiekun: dr hab. inż. Piotr Serkies</i>	

10	Optymalizacja kosztów zużycia energii elektrycznej na przykładzie parafii pw. św. Andrzeja Apostoła w Męcince	83
	<i>mgr inż. Daniel Duś, opiekun: dr inż. Maciej Gwoździwicz</i>	
11	Silnik BLDC do napędu pojazdu elektrycznego	93
	<i>mgr inż. Kinga Tokarska, opiekun: dr hab. inż. Marek Ciurys</i>	
12	Tests and diagnostics of HV power cables — best practice in line with current standards	103
	<i>mgr inż. Artur Witaszewski, opiekun: dr hab. inż. Krzysztof Wieczorek</i>	
III	WYDZIAŁ PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI . . .	109
13	Opracowanie układu kondycjonowania sygnału w pomiarach bioimpedancji tkanek metodą tomografii impedancyjnej	111
	<i>inż. Janusz Janaszek, opiekun: dr inż. Zdzisław Szczepanik</i>	
14	Projekt i wykonanie bezprzewodowego masażera do mięśni	117
	<i>inż. Krzysztof Bober, opiekun: dr inż. Andrzej Grobelny</i>	
15	Zbadanie transmisji kodowanej w metodzie przepuszczania fali ultradźwiękowej przez struktury tkankopodobne	123
	<i>inż. Anna Iluk, opiekun: prof. dr hab. inż. Krzysztof Opiełiński</i>	
16	Projekt i realizacja przenośnego urządzenia do monitorowania parametrów oświetlenia wewnętrznego	131
	<i>inż. Anna Gybej, opiekun: dr inż. Tomasz Grysiński</i>	
17	Projekt urządzenia do obrazowania fantomu piersi	137
	<i>inż. Mateusz Olek , opiekun: dr inż. Iwona Hołowacz</i>	
IV	WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, MIKROSYSTEMÓW I FOTONIKI .	143
18	Elektrodynamiczne pułapkowanie mikrocząsteczek	145
	<i>inż. Szymon Matczak, opiekun: dr hab. inż. Tomasz Grzebyk</i>	
19	Aktuacja elektromagnetyczna w drukowanych mikrosystemach	153
	<i>inż. Pratyush Kainth, opiekun: dr hab. inż. Rafał Walczak</i>	
20	Synteza termiczna tlenków metali do zastosowań w gazowych sensorach chemicznych	161
	<i>inż. Afrodyta Daskalakis, opiekun: dr hab. inż. Ryszard Korbutowicz</i>	
21	Badanie właściwości wydruków 3D realizowanych w technologii <i>FDM</i>	169
	<i>mgr inż. Paweł Chodasewicz, opiekun: dr hab. inż. Artur Wiatrowski</i>	

- 22 Charakteryzacja metalicznych mikrogeneratorów termoelektrycznych z wykorzystaniem zmodyfikowanego systemu pomiarowego 177**
mgr inż. Szymon Wójcik, opiekun: prof. dr hab. inż. Andrzej Dziędzic
- 23 Wpływ wygrzewania na właściwości optyczne, elektryczne i sensorowe cienkich warstw tlenku wanadu wytworzonych metodą rozpylania magnetronowego 187**
mgr inż. Szymon Kiełczawa, opiekun: dr. hab. inż. Michał Mazur

Przedmowa

Niniejsza monografia jest podsumowaniem naukowej obecności Stowarzyszenia Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej w 2021 roku. Stowarzyszenie realizuje swoją działalność statutową na czterech wydziałach Politechniki, związanych z dyscyplinami naukowymi pokrewnymi do szeroko rozumianej elektryki: automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz inżynieria biomedyczna. Dla absolwentów tych Wydziałów organizowane są od lat konkursy na najlepsze prace dyplomowe inżyniersko-badawcze. Komisje Konkursowe powoływane na Wydziałach, oceniają zgłaszane prace pod kątem:

- sposobu rozwiązania problemu technicznego lub naukowego,
- powiązania pracy z aktualnymi problemami gospodarki narodowej lub regionu,
- stopnia samodzielności autora i oryginalności rozwiązania problemu.

Prace inżyniersko-badawcze zgłaszane do Konkursu, charakteryzują się wysokim poziomem merytorycznym realizacji problemu technicznego. Poruszane są w nich aktualne problemy naukowo-badawcze odzwierciedlające obecne trendy stosowanych rozwiązań technologicznych.

W monografii zawarto streszczenia wszystkich nagrodzonych prac dyplomowych z edycji Konkursu 2021 roku.

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

Cześć I

Wydział Elektroniki

Projekt i budowa manipulatora stacjonarnego

inż. Jakub Tomaszewski

Automatyka i Robotyka

dr inż. Joanna Ratajczak

Katedra Cybernetyki i Robotyki

Robotyka jest w obecnych czasach niezwykle prężnie rozwijającą się dziedziną nauki. Wiele czynników sprawia, że dostęp do wiedzy nigdy dotąd nie był tak powszechny i łatwy. Można do nich zaliczyć dostęp do programowalnych mikrokontrolerów wysokiej wydajności jak i projekty typu *open source*. Innymi czynnikami są rozwój i powszechność technologii druku 3D oraz dostęp do darmowego oprogramowania *CAD/CAM*. Wszystko to sprawia, że dotąd nieosiągalny rynek profesjonalnych robotów przemysłowych w nowych realiach stanął w zasięgu małych firm, prężnie rozwijających się *startupów*. Dostęp oraz powszechność technologii wytwarzania sprawiły, że tworzenie inteligentnych urządzeń jest również w zasięgu pojedynczych jednostek pragnących rozwijać własne pomysły.

1. Cel i założenia

Celem pracy było zaprojektowanie oraz stworzenie fizycznego modelu manipulatora stacjonarnego o trzech stopniach swobody. Projekt pokazuje, że pojedyncza osoba w warunkach domowych jest w stanie stworzyć fizyczne urządzenie w obliczu dostępu do rozmaitych rozwiązań oraz technologii wytwarzania. Podczas realizacji pracy przeprowadzono badania oraz testy nowych rozwiązań w dziedzinie robotyki. Założenia projektowe podzielono na trzy kategorie. Do najważniejszych założeń **konstrukcji mechanicznej** należą:

- rozbudowa drukarki 3D w celu zapewnienia dostatecznej jakości wydruków,
- stworzenie modelu 3D manipulatora, wykorzystując środowisko programistyczne *CAD*,
- wykonanie fizycznego manipulatora w technologii druku 3D,
- wykorzystanie druku 3D do stworzenia przekładni zapewniających wysoki moment obrotowy poszczególnych przegubów manipulatora,
- ułożyskowanie każdego z przegubów,

- promień pola roboczego ramienia manipulatora wynoszący 500 mm,
- możliwość łatwej wymiany drugiego ramienia w celu rozbudowy do 6 stopni swobody.

Dla układu elektroniki i napędów:

- dobór elementów oraz napędów elektrycznych,
- testy oraz strojenie silników bezszczotkowych,
- zastosowanie osobnych kontrolerów silników dla każdego z przegubów,
- jedno źródło zasilania dla wszystkich podzespołów,
- łączność pomiędzy poszczególnymi komponentami przy pomocy protokołu *CAN FD*,
- 4 przewody zapewniające pracę całego urządzenia — 2 zasilające oraz 2 komunikacyjne.

Dla układu sterowania:

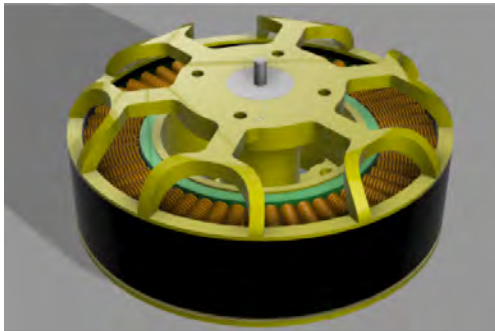
- stworzenie dedykowanej aplikacji do sterowania urządzeniem z interfejsem graficznym,
- zaimplementowanie algorytmu sterowania współrzędnymi przegubowymi,
- zdalne sterowanie manipulatorem poprzez sieć LAN,
- odbieranie oraz wyświetlanie informacji o położeniu i prędkości każdego z przegubów,
- wyświetlanie informacji o aktualnym położeniu efektora we współrzędnych kartezjańskich.

2. Najważniejsze komponenty

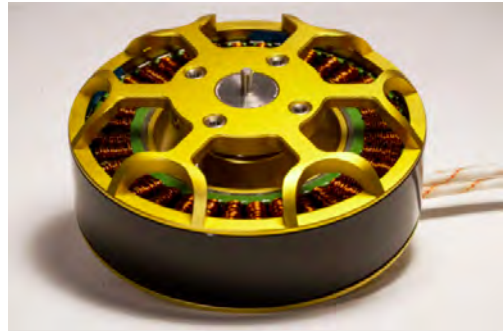
Ze względu na założenia projektowe zdecydowano się na wybór silników bezszczotkowych (*BLDC*) *EaglePower* 8318 100 kV o mocy 2900 W i masie 600 g. Silniki *BLDC* posiadają duży stosunek momentu obrotowego do masy oraz możliwość kontrolowania momentu obrotowego co jest niezwykle istotne w przypadku sterowania manipulatorem. Na podstawie rysunku technicznego oraz fizycznego modelu wykonano projekt 3D silnika zapewniający dokładne odwzorowanie szczegółów oraz wymiarów. Pozwoliło to na uniknięcie błędów w konstrukcji manipulatora, gdzie dokładność rzędu milimetrów miała istotny wpływ na poprawność działania. Zaprojektowany model 3D silnika bezszczotkowego *EaglePower* LA8318 100 kV oraz model rzeczywisty zostały przedstawione na rysunku 1.1.

Silniki bezszczotkowe są trudne w sterowaniu i niezbędny jest do tego odpowiedni kontroler. Zdecydowano się na wybór sterowników *moteus* firmy *mjbots*. Kontroler udostępnia zaawansowane tryby umożliwiające implementacje wszelkich algorytmów sterowania. Charakteryzuje się wysoką częstotliwością sterowania wynoszącą 40 kHz oraz komunikacją

w czasie rzeczywistym. Jeden kontroler posiada możliwość sterowania jednym silnikiem bezszczotkowym, a wbudowany enkoder magnetyczny pozwala na określenie położenia aktualnej pozycji silnika. Ponadto wykorzystuje on protokół komunikacyjny *CAN FD*. Sterownik posiada dwa wyprowadzenia dla zasilania i danych w celu integracji z wieloma kontrolerami. Potrzebne są więc zaledwie 4 przewody (2 zasilające oraz 2 do komunikacji *CAN FD*), aby podłączyć równolegle wszystkie kontrolery w manipulatorze. Podobnie jak w przypadku silnika wykonano dokładny projekt 3D kontrolera. Projekt modelu 3D kontrolera oraz rzeczywisty model zostały przedstawione na rysunku 1.2.

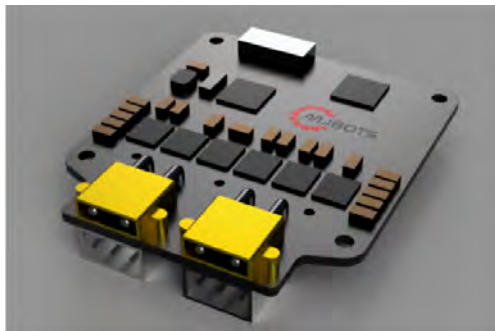


(a) Model 3D silnika zaprojektowany w programie *Autodesk Fusion 360*



(b) Rzeczywisty model silnika

Rysunek 1.1. Silnik bezszczotkowy *EaglePower LA8318 100 kV*



(a) Model 3D kontrolera zaprojektowany w programie *Autodesk Fusion 360*



(b) Rzeczywisty model kontrolera

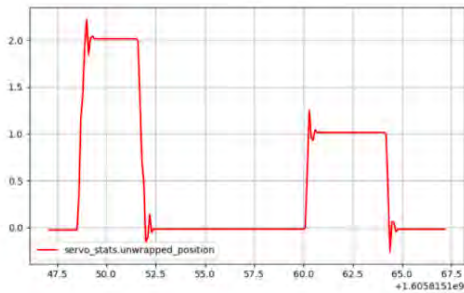
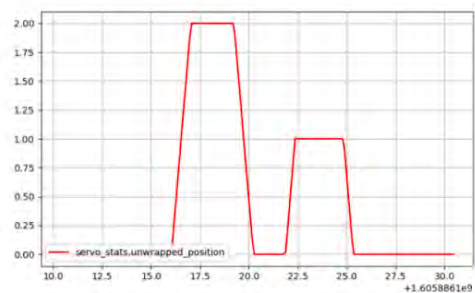
Rysunek 1.2. Kontroler *moteus* w wersji r4.3

3. Testy silników bezszczotkowych

Przed wykonaniem modelu manipulatora wykonane zostały testy silników wraz z kontrolerami. W tym celu wykonano model podstawy testowej, na której przetestowano elektronikę obejmującą zasilanie oraz komunikację między kontrolerem a silnikiem. Zbadano rów-

niez wpływ poszczególnych parametrów na jakość sterowania. Jako źródło zasilania wykorzystano 200 W zasilacz *AC/DC* o napięciu 24 V oraz natężeniu prądu wynoszącym 8 A. Do komunikacji z kontrolerem wykorzystano konwerter *USB – CAN FD* pozwalający na podłączenie sterownika *moteus* do komputera.

W pierwszej kolejności w celu zapewnienia odpowiedniego sterowania zbadano wpływ nastaw regulatora PD na osiąganie zadanej pozycji. Dla zmieniających się nastaw K_p oraz K_d wykonywano tę samą sekwencję pozycji. Na rysunku 1.3 zostały przedstawione wykresy osiąganych pozycji dla przykładowych wartości nastaw. Na przedstawionych wykresach widać, że dla nastawy $K_p = 1$ oraz $K_d = 0,005$ występują znacznie większe przeregulowania niż dla nastaw $K_p = 100$ oraz $K_d = 0,5$. Ponadto przedstawiona na wykresach pozycja podawana jest w obrotach, a więc przeregulowania te są znaczące.

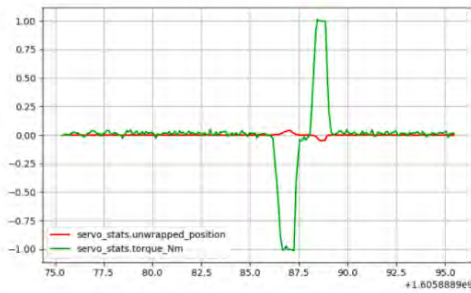
(a) $K_p = 1$ oraz $K_d = 0,005$ (b) $K_p = 100$ oraz $K_d = 0,5$

Rysunek 1.3. Osiąganie zadanych pozycji w zależności od dobranych nastaw regulatora PD

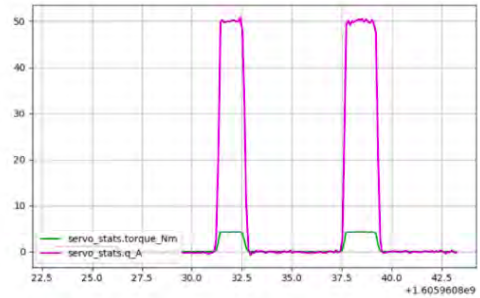
W kolejnym kroku zbadano również zależność między wartością nastawy K_p , a generowanym momentem obrotowym w przypadku wystąpienia obciążenia na silniku. W tym celu dla zmieniających się wielkości wzmocnienia, zwiększano obciążenie silnika do chwili osiągnięcia wartości momentu obrotowego równego 1 Nm. Następnie sprawdzono wartość wychylenia z zadanej pozycji zerowej. Najlepsze rezultaty otrzymano dla $K_p = 100$ oraz $K_d = 0,5$, które zostały przedstawione na rysunku 1.4a. Dobranie wystarczająco dużej nastawy wzmocnienia K_p zapewniło odpowiednio dużą sztywność przegubów w przypadku wystąpienia sił zewnętrznych. Na rysunku 1.4a przedstawiono maksymalny osiągnięty moment obrotowy przy zastosowanym źródle zasilania. Na przedstawionym wykresie widać, że zastosowany zasilacz o napięciu 24 V oraz natężeniu prądu wynoszącym 8 A pozwala na wygenerowanie przez kontroler prądu o wartości 50 A podawanego na silnik. Przekłada się to natomiast na moment obrotowy o wartości około 4,5 Nm.

4. Projekt 3D

Po przeprowadzonych testach oraz poznaniu możliwości kontrolera oraz silników, kolejnym etapem było stworzenie projektu 3D manipulatora. Projekt został wykonany w oprogramowaniu *Autodesk Fusion 360*. Wymiary całego modelu musiały zostać dopasowane do stosowanych napędów oraz kontrolerów. Większe części zostały podzielone na mniejsze ze względu na obszar pola roboczego drukarki 3D o wymiarach 200×200 mm.



(a) Badania wychYLENIA przy obciążeniu równym 1 Nm dla $K_p = 100$ oraz $K_d = 0,55$

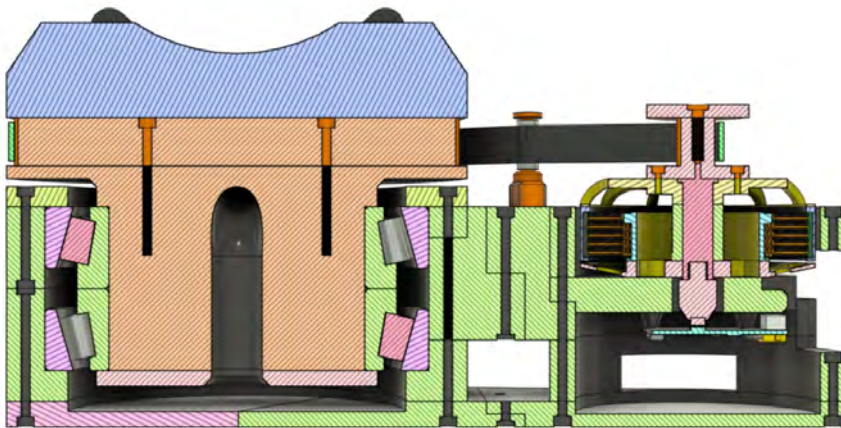


(b) Maksymalny wygenerowany moment obrotowy w zależności od natężenia prądu

Rysunek 1.4. Badania związane z momentem obrotowym silnika

4.1. Podstawa manipulatora

Pierwszym etapem projektu było stworzenie podstawy manipulatora, w skład której wchodzi pierwszy przegub obrotowy składający się z silnika bezszczotkowego, kontrolera oraz przekładni zębatej pasowej osadzonej na łożyskach. Przekrój modelu zaprojektowanej podstawy został przedstawiony na rysunku 1.5.



Rysunek 1.5. Przekrój podstawy manipulatora

Konstrukcja przedstawionej podstawy składa się z 44 części (bez uwzględnienia śrub). Wymiary podstawy wynoszą $327,85 \times 236$ mm, natomiast jej wysokość jest równa 171 mm. Górna część podstawy przystosowana jest do dołączenia kolejnego przegubu manipulatora. Do zamocowanego wraz z kontrolerem silnika bezszczotkowego zostało przymocowane koło zębate o 11 zębach, będące napędem pierwszego przegubu. Napędzane koło zębate składa się ze 110 zębów, co daje przełożenie równe 11:1. Istotnym elementem konstrukcyjnym są zastosowane w podstawie dwa łożyska stożkowe o wymiarach $100 \times 150 \times 32$ mm oraz wadze 2 kg każde. Charakterystyczną cechą łożysk stożkowych

jest to, że mogą przenosić obciążenia osiowe oraz obciążenia promieniowe takiej samej wielkości. Pojedyncze łożysko stożkowe jest w stanie przejąć obciążenia osiowe wyłącznie z jednego kierunku. Z tego powodu najczęściej stosowane są w tak zwanym układzie „X”. Dzięki temu rozwiązaniu obciążenia osiowe mogą być przenoszone w obu kierunkach. Na rysunku 1.5 jest widoczny również zamocowany silnik wraz z wkręconym tylnym walem, na którym osadzony jest magnes. W odległości 0,7 mm od magnesu znajduje się wbudowany w kontroler enkoder sterujący pracą silnika. W zaprojektowanym reduktorze o przełożeniu 11:1 zastosowano pas zębaty *HTD5* o szerokości 15 mm. Bardzo istotne jest odpowiednie naprężenie pasa zapobiegające powstawaniu luzów oraz drgań podczas sterowania. W tym celu wykonano dwa napinacze pasa, z których każdy składa się z zamocowanych na sobie 5 łożysk kulkowych.

4.2. Ramiona manipulatora

Najbardziej złożoną oraz skomplikowaną częścią konstrukcji jest pierwsze ramię manipulatora. Jest ono źródłem napędu dla drugiego oraz trzeciego przegubu manipulatora. Składa się z 91 części (bez uwzględniania śrub). Łączy ze sobą wiele wydrukowanych oraz mechanicznych części, w tym dwie przekładnie zębate pasowe oraz 26 łożysk. Wewnątrz ramienia są zamocowane dwa silniki bezszczotkowe, natomiast sterujące nimi kontrolery zostały umieszczone na zewnątrz konstrukcji. Wymiary ramienia wynoszą $435.5 \times 145 \times 172$ mm, przy czym odległość pomiędzy osiami obrotu przegubów wynosi 300 mm. Zaprojektowany model 3D pierwszego ramienia został przedstawiony na rysunku 1.6c.

Ramię jest mocowane do podstawy przy pomocy specjalnych uchwytów, w których osadzone są łożyska kulkowe o wymiarach $85 \times 110 \times 13$ mm. Ramię jest obracane przy pomocy silnika zamocowanego w jego dolnej części, do którego przymocowane zostało koło zębate o 11 zębach, będącego napędem drugiego przegubu. Przymocowane do podstawy koło zębate składa się z 88 zębów co daje przełożenie równe 8:1. Umieszczony u góry drugi silnik jest napędem kolejnej przekładni poruszającej ramieniem drugim.

Cała konstrukcja oraz zasada działania jest analogiczna jak dla przegubu pierwszego. Do silnika przymocowane zostało koło zębate o 11 zębach, które za pomocą pasa zębatego napędza zębatkę przegubu trzeciego składającej się z 77 zębów co daje przełożenie równe 7:1. Mniejsze przełożenie jest możliwe ponieważ drugie ramię manipulatora pozbawione jest wszelkiej elektroniki i ciężkich napędów. Cały napęd trzeciego przegubu został umieszczony wewnątrz pierwszego ramienia, stąd ramię drugie składa się wyłącznie z wydrukowanych elementów. Z przodu każdego z silników jest przymocowany wał składający się z trzech części, na końcu którego znajdują się zębatka. Ze względu na to, że zębatka ta jest osadzona na długim wale przechodzącym przez wnętrze konstrukcji, zostały zastosowane dwa łożyska kulkowe. Umożliwiają one płynny ruch obracającej się zębatki oraz chronią przed uszkodzeniami mechanicznymi przy dużych obciążeniach. Obracająca się zębatka ma za zadanie utrzymać ciężar całej konstrukcji. Ze względu na to, że przedni wał nie jest jednolitym, lecz skręcanym elementem, konieczne było wykonanie zębatego połączenia przedstawionego na rysunku 1.6a oraz rysunku 1.6b. Połączenie to po skręceniu śrubą uniemożliwia niezależny obrót części dzięki znacząco zwiększonemu tarciu w miejscu łączenia. Jest to mały, jednak znaczący element umożliwiający poprawne działanie każdego z przegubów.



(a) Przedni wał silnika bez przykręconej zębatki

(b) Przedni wał silnika z przykręconą zębatką



(c) Model 3D pierwszego ramienia manipulatora

Rysunek 1.6. Połączenie zębate dwóch elementów zębatki oraz model 3D pierwszego ramienia manipulatora

5. Budowa manipulatora

Kolejnym etapem było wydrukowanie poszczególnych elementów manipulatora zaprojektowanych w programie *Autodesk Fusion 360*. W tym celu wykorzystano zmodyfikowaną na potrzeby projektu drukarkę *Anet A6*. Wprowadzone zmiany w drukarce miały kluczo-

wy wpływ na jakość wydruków poszczególnych części. Łączny czas drukowania wszystkich części manipulatora wyniósł ok. 670 godzin. Po uwzględnieniu przerw występujących między wydrukami (gdy przykładowo druk zakończył się w nocy), wydruk elementów trwał 44 dni. Do wykonania części został użyty materiał *PLA* polskiego producenta *Fiberlogy*. Łącznie zużyto około 4.8 kg filamentu. Wybrany materiał *PLA* zapewnia dużą wytrzymałość wydruków oraz jest w pełni biodegradowalny. Aby zmniejszyć negatywny wpływ na środowisko, zakupiony został filament bez plastikowych szpul, której waga każdej wynosi 300 g. W przypadku zużytych siedmiu szpul jest to w sumie 2,1 kg plastiku, który zostałby wyrzucony. Projekt końcowy manipulatora składa się z opisanej podstawy, pierwszego



(a) Model 3D manipulatora



(b) Skonstruowany manipulator

Rysunek 1.7. Porównanie zaprojektowanego modelu 3D manipulatora z obiektem rzeczywistym

oraz drugiego ramienia, co przekłada się na 149 części (w tym 38 łożysk) bez uwzględnienia śrub. Stworzenie dokładnych modeli silników oraz kontrolerów pozwoliło na uniknięcie błędów konstrukcyjnych. W modelu zostały również uwzględnione przejścia dla przewodów niezbędnych do poprawnego działania manipulatora oraz gwarantujące duże zakresy ruchów poszczególnych przegubów. Na rysunku 1.7 zostało przedstawione porównanie zaprojektowanego modelu 3D w oprogramowaniu *Autodesk Fusion 360* z fizycznie wykonaną konstrukcją. Wszystkie zaprojektowane części zostały wykonane oraz połączone zgodnie z zaprojektowanym modelem.

Ponadto zastosowany materiał oraz parametry wydruku zapewniły odpowiednio dużą wytrzymałość mechaniczną. Zakres kątów dla pierwszego przegubu umieszczonego w podstawie wynosi od -720° do $+720^\circ$. Większe wartości mogłyby spowodować skręcenie przewodów poprowadzonych w podstawie do stopnia zagrażającego uszkodzeniu. W przypadku przegubu drugiego, zakres kątów ograniczony jest do wartości od -90° do $+90^\circ$ ze względu na możliwości mechaniczne konstrukcji. Natomiast w przypadku przegubu

trzeciego, właściwości konstrukcyjne ograniczają zakres możliwych kątów do wartości od -50° do $+230^\circ$. Wysokość przedstawionego modelu wynosi 587,5 mm przy założeniu że pierwsze ramie ustawione jest w pozycji wertykalnej, natomiast drugie w pozycji horyzontalnej.

6. Dedykowana Aplikacja

Po stworzeniu konstrukcji manipulatora, kolejnym etapem było zaimplementowanie algorytmu sterowania na mikrokomputerze *Raspberry Pi*. Aby zapewnić intuicyjne wysyłanie poleceń oraz możliwość obserwowania danych odbieranych z kontrolera, stworzono aplikację z interfejsem graficznym użytkownika. Głównym założeniem aplikacji było stworzenie interfejsu graficznego umożliwiającego korzystanie z zaimplementowanego algorytmu sterowania. Ze względu na szybkość działania warstwa sterowania została napisana przy użyciu języka C++. Z kolei interfejs graficzny został stworzony przy użyciu języka *QML* dającego możliwość tworzenia okienkowych oraz intuicyjnych aplikacji.



Rysunek 1.8. Okno sterowania współzrędnymi przegubowymi aplikacji

Aplikacja składa się z okna startowego zawierającego ogólne informacje na temat oprogramowania, dającego możliwość zmiany podstawowych ustawień oraz wyboru algorytmu sterowania. Na rysunku 1.8 zostało przedstawione okno aplikacji sterowania współzrędnymi przegubowymi. Po lewej stronie widoczne są pola do wpisania wartości kątów poszczególnych przegubów, podawanych w stopniach. Następnie określone wartości są przeliczane na obroty będące jednostką położenia w kontrolerach. Za pomocą przycisków znajdujących się po lewej stronie każdego z pól określany jest znak wpisanej wartości. Po określeniu wartości współrzędnych $Q1$, $Q2$ oraz $Q3$, za pomocą przycisku „*START*” możliwe jest rozpoczęcie sterowania.

W trakcie ruchu do zadanych pozycji, do sterowników poszczególnych przegubów wysyłane są polecenia zapytania aktualnej pozycji i prędkości. Odebrane dane będą przeliczane, uwzględniając zamianę jednostek oraz zastosowane przekładnie, a następnie wyświetlane na wykresach umieszczonych po prawej stronie okna. Odebrane pozycje poszcze-

gólnych przegubów będą również wykorzystywane do obliczania aktualnej pozycji efektora manipulatora we współrzędnych kartezjańskich względem globalnego układu współrzędnych.

Aby umożliwić wymianę danych pomiędzy aplikacją uruchomioną na komputerze a programem sterującym pracą manipulatora znajdującym się na *Raspberry Pi*, wykorzystano lokalną sieć LAN. Wprowadzone w aplikacji przez użytkownika zadane pozycje poszczególnych przegubów są wysyłane do *Raspberry Pi* podłączonego do tej samej sieci za pomocą protokołu *UDP*. Następnie dane są przekształcane do odpowiedniej postaci heksadecymalnej, po czym wysyłane do kontrolerów *moteus* (za pomocą protokołu *CAN FD*) sterujących napędami poszczególnych przegubów. W trakcie ruchu do zadanej pozycji, *Raspberry Pi* wysyła polecenia zapytań pozycji oraz prędkości do poszczególnych sterowników. Te w odpowiedzi wysyłają aktualne wartości poszczególnych wielkości do *Raspberry Pi*. Dane te są odczytywane, a następnie wysyłane za pomocą protokołu *UDP* do aplikacji uruchomionej na komputerze. Odebrane dane są reprezentowane na wykresach poszczególnych przegubów, przy czym wartość pozycji jest dodatkowo używana do obliczenia aktualnego położenia efektora. Cała operacja powtarzana jest z częstotliwością 100 Hz. Po osiągnięciu zadanych kątów użytkownik ma możliwość zadania nowych wartości współrzędnych.

7. Podsumowanie

Efektom pięciomiesięcznej pracy jest manipulator o trzech stopniach swobody wraz z dedykowaną aplikacją służącą do sterowania. W pierwszej fazie projektu dokonano przeglądu możliwych rozwiązań w celu wyboru napędów oraz kontrolerów spełniających początkowe założenia. W celu wykorzystania potencjału wybranych napędów w każdym z przegubów manipulatora został zastosowany profesjonalny kontroler. Rozwiązanie to zapewniło komunikację za pomocą szybkiego protokołu *CAN FD* oraz zastosowanie czterech przewodów zapewniających pracę całego urządzenia. Umożliwiło to również określanie pozycji napędów za pomocą wbudowanego enkodera magnetycznego. Aby zapewnić możliwość sterowania pracą manipulatora, szybkość działania oraz komunikację sieciową, zastosowano *Raspberry Pi* wraz z nakładką *pi3hat mjbots* przekształcającą mikrokontroler w wysokowydajną platformę do sterowania ruchem manipulatora.

Wszystkie niestandardowe części manipulatora zostały wykonane przy użyciu druku 3D w technologii *FDM*. W celu zapewnienia dostatecznej jakości wydruków rozbudowano amatorską drukarkę 3D. Dodano kluczowe elementy, takie jak napinacze pasów osi *X* oraz *Y*, nawiew wentylatora przyspieszający stygnięcie wypchanego filamentu, a także elementy usztywniające całą konstrukcję. Zbadano wpływ oprogramowania oraz ustawianych w nim parametrów na jakość wydruków, a następnie dostosowano je do konstrukcji drukarki, jak i zastosowanego materiału. Wykonano model 3D manipulatora, wykorzystując oprogramowanie *Autodesk Fusion 360*. Model został podzielony na wiele części, umożliwiając ich wykonanie w technologii druku 3D. Dla każdego z przegubów została zaprojektowana przekładnia zębata pasowa zwiększająca maksymalny moment obrotowy, niezbędny do pracy przy dużych obciążeniach. Ponadto w każdym z przegubów zostały zastosowane łożyska zwiększające stabilność konstrukcji oraz umożliwiające przenoszenie

dużych obciążeniach. Konstrukcja zapewnia promień pola roboczego przekraczający 600 mm. Dokładny model umożliwił stworzenie fizycznej konstrukcji manipulatora. Na rysunku 1.9 został przedstawiony manipulator po zadaniu różnych wartości współrzędnych przegubowych.



Rysunek 1.9. Manipulator po zadaniu różnych wartości współrzędnych przegubowych

Aby umożliwić sterowanie manipulatorem, stworzono dedykowaną aplikację z interfejsem graficznym wykonaną w środowisku *Qt*. Aplikacja umożliwia zdalną komunikację z manipulatorem z poziomu komputera PC przy użyciu lokalnej sieci LAN. Interfejs graficzny daje użytkownikowi możliwość sterowania manipulatorem, jak i odbieranie oraz wyświetlanie w postaci wykresów danych o położeniu i prędkości każdego z przegubów manipulatora.

Wszystkie założenia pracy zostały spełnione. Przetestowano zastosowanie silników bezszczotkowych w robotyce oraz ich wykorzystanie z profesjonalnymi kontrolerami mającymi szerokie spektrum zastosowań.

Do komunikacji wykorzystany został protokół *CAN FD*, który jest nowym rozwiązaniem w dziedzinie robotyki oraz zapewnia duże możliwości rozwoju na przestrzeni kolejnych lat. Ponadto zarówno sterowniki *moteus*, jak i nakładka *pi3hat*, są produktami typu *open source*. Wykonane testy oraz kontakt z ich producentem przyczyniły się do wprowadzenia zmian w kodzie mających realny wpływ na polepszenie jakości urządzeń. Skonstruowany manipulator został w całości wykonany w technologii *FDM*, wykorzystując amatorską drukarkę z wprowadzonymi usprawnieniami. Projekt pokazał, że w warunkach domowych pojedyncza osoba, wykorzystując technologię druku 3D, jest w stanie stworzyć fizyczne urządzenie w obliczu dostępnego oprogramowania oraz produktów typu *open source*. Na rysunku 1.10 został przedstawiony manipulator wraz z jabłkiem w celu zaprezentowania rzeczywistej skali modelu.



Rysunek 1.10. Manipulator wraz z jabłkiem w celu zaprezentowania skali modelu

Bibliografia

- [1] Jaskulski A., *Autodesk Inventor Professional 2019PL/2019+/Fusion 360. Metodyka Projektowania.*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Polska 2018.
- [2] *Autodesk. fusion 360 documentation.*, <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/>, dostęp: 01-09-2020.
- [3] Deng S., Gu J., Cui Y., Zhang W., *Dynamic analysis of a tapered roller bearing*, *Industrial Lubrication and Tribology*, 70, 2017, 00–00.
- [4] Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W., *Modelowanie i Sterowanie Robotów.*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Polska 2003.
- [5] Tchoń K., Muszyński R., Mazur A., Dulęba I., Hossa R., *Modelowanie i Sterowanie Robotów.*, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Polska 2000.
- [6] *Raspberry pi foundation. raspberry pi documentation.*, <https://www.raspberrypi.org/documentation/>, dostęp: 01-11-2020.
- [7] Patel S., *Modeling and implementation of intelligent commutation system for bldc motor in underwater robotic applications*, [w:] *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES) 2016*, 1–4.
- [8] Woo S., Jo H., Kim I., Lee D., *A practical security architecture for in-vehicle can-fd*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17, 2016, 1–14.

Automatyczna giętarka do drutu

inż. Kinga Tokarska

Automatyka i Robotyka

dr inż. Mirela Kaczmarek

Katedra Cybernetyki i Robotyki

Celem pracy dyplomowej było zaprojektowanie, zbudowanie i zaprogramowanie miniaturowej wersji automatycznej giętarki do drutu. Wybór tematu pracy został podyktowany przede wszystkim rosnącym zapotrzebowaniem na elementy wytwarzane przez obrabiarki sterowane numerycznie. Praca polegała na stworzeniu funkcjonalnego, dopasowanego do warunków pracy stanowiska roboczego służącego do zaginania drutu w celu uformowania go w pożądaną kształt oraz aplikacji umożliwiającej intuicyjną, bezproblemową obsługę maszyny. Zbudowane w ramach pracy urządzenie przedstawiono na rysunku 2.1. Do głównych założeń projektu należały: uniwersalność maszyny, w pełni automatyczne działanie, powtarzalność i precyzja jej pracy, a także prostota użytkowania. Przyjęto, że giętarka będzie umożliwiać pracę z drutem wykonanym z dowolnego gatunku stali, materiał będzie zaginany w wielu płaszczyznach, a detale będą wykonywane w serii na podstawie jednego projektu.

1. Projekt

W celu realizacji projektu dokonano analizy głównych aspektów procesu obróbki metalu oraz w oparciu o przegląd aktualnie dostępnych na rynku urządzeń służących do zaginania drutu rozplanowano poszczególne etapy pracy maszyny. Zdecydowano, że giętarka będzie umożliwiać pobieranie drutu z kręgu, przygotowywanie go do obróbki poprzez prostowanie, zaginanie drutu w obu kierunkach oraz ucinanie gotowego elementu. Ustalono także, że obrabiarka będzie zaginać materiał w wielu płaszczyznach, co znacznie zwiększy jej możliwości i pozwoli na produkcję elementów trójwymiarowych.

Poszczególne elementy mechaniczne zaprojektowano przy użyciu oprogramowania komputerowego. Następnie zaplanowano rozmieszczenie poszczególnych podzespołów na blacie roboczym, zapewniające ich ścisłą współpracę i automatyzację procesu tworzenia detali. Istotnym etapem konstruowania giętarki było zapewnienie odpowiedniego napędu. Na podstawie cech surowca, do pracy z którym dedykowana jest giętarka obliczono parametry silników krokowych napędzających poszczególne podzespoły. Następnie dopasowano elementy elektroniczne umożliwiające sprawne sterowanie wybranymi silnikami. Na podstawie wymaganej mocy potrzebnej do zasilania wszystkich elementów giętarki dobrano zasilacze impulsowe. Wybrano także sterowniki silników krokowych, przetwornice, płytke *Arduino* i wentylatory chłodzące wewnątrz skrzynki sterowniczej. Przy użyciu odpowiedniego oprogramowania stworzono schemat połączeń elektrycznych.



Rysunek 2.1. Automatyczna giętarka do drutu

2. Budowa

Kolejnym etapem była budowa maszyny. Liczne elementy konstrukcyjne giętarki wykonano przy użyciu sterowanych numerycznie tokarki oraz frezarki, a następnie umieszczono na blacie roboczym w zaplanowany wcześniej sposób.



Rysunek 2.2. Prościarka

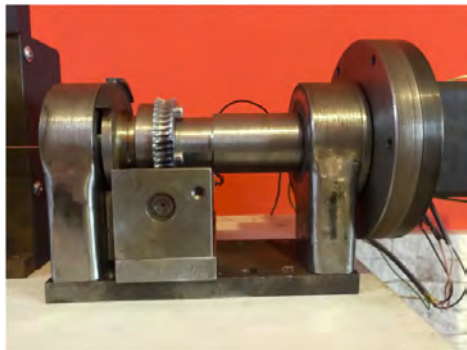


Rysunek 2.3. Mechanizm posuwu

Do przygotowywania drutu do obróbki służy dwupłaszczyznowa regulowana prościarka rolkowa (rysunek 2.2). Przeprowadzenie drutu pomiędzy jej rolkami umożliwia nadanie mu odpowiedniego kształtu. Urządzenie można dostosować do stopnia zniekształcenia wykorzystywanego surowca poprzez zmianę położenia krążków prostujących. Jego właściwe ustawienie jest istotne dla optymalizacji wydajności pracy maszyny oraz jakości produkowanych detali.

Następnym elementem jest mechanizm posuwu drutu (rysunek 2.3) zbudowany z czterech identycznych podzespołów, z których każdy składa się z rolki oraz dwóch łożysk. Do jego zadań należy pobranie surowca ze szpuli, przesunięcie go pomiędzy rolkami prościarki, wsunięcie do kanału prowadniczego i doprowadzenie go aż do matrycy gnąco-tnącej. Mechanizm jest napędzany dobranym na podstawie przedstawionych w pracy obliczeń silnikiem krokowym.

Kolejny element stanowi mechanizm obracania ramieniem (rysunek 2.4), który pozwala na zmianę płaszczyzny zaginania, co umożliwia produkcję elementów przestrzennych. Jest zbudowany z wału drążonego, przez który przebiega materiał roboczy, dwóch łożysk tocznych oraz silnika krokowego, w taki sposób, że całe ramię, na którym osadzone jest mechanizm gnąco-tnący, ma możliwość obracania się wokół obrabianego surowca.



Rysunek 2.4. Mechanizm obracania ramieniem



Rysunek 2.5. Mechanizm gnąco-tnący

Najistotniejszy element składowy maszyny stanowi wysunięte poza granicę stołu ramię, będące zespołem umożliwiającym zaginanie i cięcie drutu (rysunek 2.5). Surowiec wysuwający się pomiędzy rolek posuwu zostaje wprowadzony do wału drążonego, a po jego opuszczeniu jest przesuwany po powierzchni blatu roboczego mechanizmu gnąco-tnącego. Praca mechanizmu gnącego opiera się na silniku krokowym, obracającym stempel gnący wokół matrycy. Drut zostaje wysunięty z matrycy i unieruchomiony poprzez trzymanie silnika posuwu. Wówczas rozpoczyna się proces zaginania realizowany przez stempel gnący, który dociska surowiec do zewnętrznej krawędzi matrycy. Zastosowanie elektromagnesów umożliwia wsuwanie i wysuwanie stempla, co z kolei pozwala na zaginanie drutu w obu kierunkach.

Proces produkcji pojedynczego detalu zakańcza działanie stempla tnącego, który ucina surowiec na krawędzi matrycy. System tnący jest zamocowany od spodniej strony blatu roboczego mechanizmu gnąco-tnącego i działa na zasadzie prasy śrubowej napędzanej silnikiem krokowym dobranym na podstawie obliczeń przedstawionych w pracy.

Szpula z surowcem oraz skrzynka sterownicza, w której umieszczono elementy elektroniczne urządzenia, zostały umieszczone pod blatem roboczym. Należyta uwagę poświęcono także kwestiom bezpieczeństwa. Dla zapewnienia bezkolizyjnej pracy maszyny zastosowano łączniki elektryczne, które poza funkcją zabezpieczania przed wyjazdem dynamicznych zespołów obrabiarki poza zaplanowany obszar, odgrywają także istotną rolę przy określaniu względnych położень narzędzi, co jest niezbędne dla osiągnięcia satysfakcjonujących rezultatów obróbki.

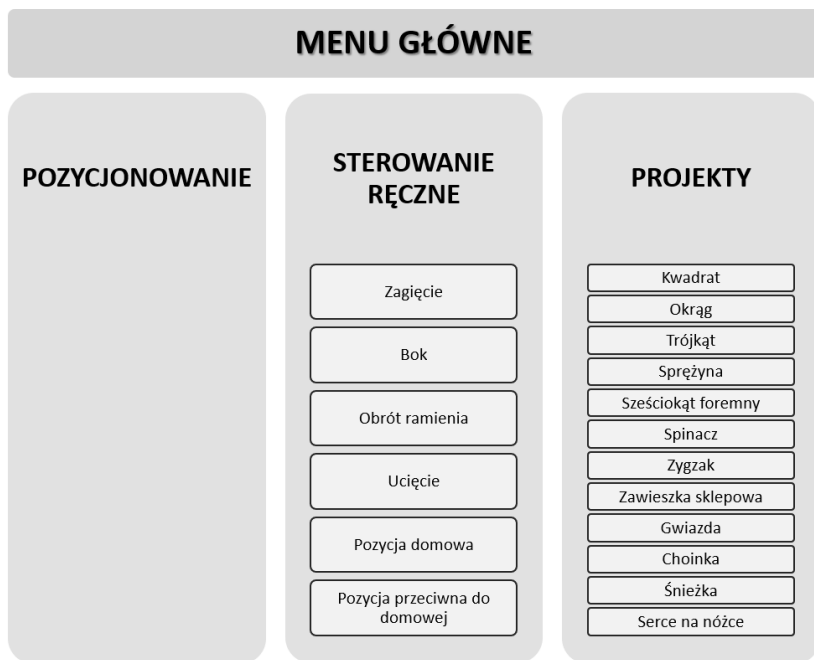
Poza wykonaniem poszczególnych elementów składowych i odpowiednim ich rozmieszczeniem, budowa maszyny obejmowała połączenie silników krokowych oraz wszystkich elementów znajdujących się w skrzynce sterowniczej zgodnie z utworzonym wcześniej schematem. Na koniec zadbano o obudowy i osłony poszczególnych elementów, które pełnią nie tylko funkcję ochronną, ale także dodają giętarce walorów wizualnych.

3. Programowanie

Plan pracy uwzględnił także zaprogramowanie maszyny w celu zapewnienia komfortowego zarządzania procesem zaginania. Do sterowania giętarką wykorzystano płytke *Arduino*. Do stworzenia aplikacji umożliwiającej obsługę maszyny użyto środowiska programistycznego *Arduino IDE*.

Stworzenie aplikacji wymagało wykonania stosownych obliczeń oraz przeprowadzenia licznych doświadczeń. Pozwoliły one na opracowanie metody umożliwiającej przeliczenie wprowadzonej przez użytkownika wartości kąta zagięcia na liczbę kroków, jakie musi wykonać silnik napędzający mechanizm zaginający, a także wprowadzonej przez użytkownika długości wysuwanego odcinka drutu na liczbę kroków, jakie musi wykonać silnik napędzający mechanizm posuwu.

Program opiera się na wielopoziomowym menu, zapewniającym operatorowi dostęp do wszystkich funkcji realizowanych przez maszynę. Aplikacja daje możliwość wywołania pojedynczych funkcji takich jak pozycjonowanie, wysunięcie odcinka drutu o wprowadzonej długości, zagięcie drutu o wprowadzoną wartość kąta, obrót ramienia zaginającego czy ucięcie drutu, a także wykonanie w całości kilku projektów. Graf przypadków użycia przedstawia rysunek 2.6.



Rysunek 2.6. Graf przypadków użycia programu — menu główne

Dzięki tak zbudowanej aplikacji obsługa urządzenia jest intuicyjna nawet dla najmniej zaawansowanego użytkownika i nie wymaga szczegółowego zapoznawania się z jego budową i zasadami działania.

4. Testowanie

Skonstruowane urządzenie zostało poddane licznym testom. Zrealizowane przy użyciu giętarki projekty zarówno dwuwymiarowych, jak i trójwymiarowych elementów przedstawiono na rysunku 2.7.



Rysunek 2.7. Przykładowe projekty

Powyższe projekty pozwoliły na dokładne przetestowanie możliwości maszyny. Zostały w nich wykorzystane wszystkie podstawowe funkcje: zaginanie drutu zarówno o kąt dodatni, jak i ujemny, posuw i ucięcie surowca, obrót ramienia w kierunku dodatnim i ujemnym.

5. Podsumowanie

Realizacja projektu wymagała połączenia wiedzy i umiejętności zarówno z zakresu mechaniki, jak i elektroniki oraz programowania. Praca wiązała się z praktycznym zastosowaniem podstaw budowy maszyn, technologii metali oraz wykorzystaniem mikrokontrolerów.

Wszystkie początkowe założenia projektu zostały spełnione. Zbudowana w ramach projektu maszyna stanowi doskonały przykład wykorzystania nowoczesnych, zaawansowanych technologii w dynamicznie rozwijającej się dziedzinie plastycznej obróbki metali. Urządzenie umożliwia zaginanie cienkiego drutu w celu uformowania go w pożądanym, wybranym przez użytkownika kształt. Kolejno realizuje poszczególne etapy obróbki surowca: pobiera go ze szpuli, prostuje, zagina o zadany kąt i uciną gotowy element. Dodatkowo maszyna została wzbogacona o możliwość zaginania drutu w wielu płaszczyznach, co umożliwia produkcję elementów zarówno dwuwymiarowych, jak i trójwymiarowych.

Kolejne procesy następują po sobie samorzutnie, bez konieczności interwencji operatora, co pozwala na automatyczną, seryjną produkcję zaprojektowanych przez użytkownika elementów. Wytwarzanie wielu detali na podstawie jednego projektu znacznie usprawnia proces masowej

produkcji drobnych przedmiotów, takich jak biżuteria, zawieszki lakiernicze, haki do wieszaków, artykuły dla florystyki i ogrodnictwa, a nawet elementy robotów.

W czasie realizacji projektu dużą wagę przywiązano do precyzji pracy giętarki. Dzięki szczegółowym obliczeniom, odpowiedniemu dobraniu części maszyny oraz przeprowadzeniu licznych testów, urządzenie pozwala na wykonanie nawet niewielkich elementów z dużą dokładnością i w stosunkowo krótkim czasie.

Olbrzymią zaletą giętarki jest jej uniwersalność. Daje ona możliwość pracy z drutem wykonanym z różnych gatunków stali. Zmiana materiału wymaga od operatora jedynie dostosowania parametrów pracy do właściwości surowca. Możliwość zastosowania jednej maszyny do pracy z wieloma rodzajami materiałów niewątpliwie pozwala na redukcję kosztów w przedsiębiorstwie.

Bibliografia

- [1] *Kształtowanie materiałów metodą gięcia i prostowania*, <http://www.pcez-bytow.pl/download/plk/tw2-operator-obrab.pdf>, dostęp: 14-11-2020.
- [2] *Silniki krokowe*, <https://www.multiprojekt.pl/technika-napedowa/silniki-krokowe/>, dostęp: 16-11-2020.
- [3] *Kicad eda - schematic capture and pcb design software*, <https://kicad.org/>, dostęp: 16-11-2020.
- [4] *Software | arduino*, <https://www.arduino.cc/en/software>, dostęp: 18-11-2020.
- [5] *Druty spawalnicze*, <https://www.arduino.cc/en/software>, dostęp: 16-11-2020.
- [6] Avallone E.A., Baumeister T., Sadegh A., *Marks' Standard Handbook For Mechanical Engineers (Standard Handbook for Mechanical Engineers)*, McGraw-Hill Professional 2006.
- [7] Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z., *Obróbka plastyczna*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1981.
- [8] Evans M., Noble J., Hochenbaum J., *Arduino w akcji*, Wydawnictwo Helion 2014.
- [9] Grzesik W., Niesłony P., Bartoszek M., *Programowanie obrabiarek NC/CNC*, Wydawnictwo WNT 2010.
- [10] Górecki A., *Technologia ogólna. Podstawy technologii mechanicznych*, Wydawnictwo WSiP 1984.
- [11] Niesłony P., *Podstawy programowania maszyn CNC w systemie CAD/CAM Mastercam*, Wydawnictwo BTC 2012.
- [12] Niezgodziński M., Niezgodziński T., *Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1996.
- [13] Przepiórkowski J., *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*, Wydawnictwo BTC 2012.
- [14] Schwab K., *Czwarta rewolucja przemysłowa*, Warszawa: Wydawnictwo Studio Emka 2018.
- [15] Osiński Z., *Podstawy konstrukcji maszyn*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2010.

Zastosowania monokrystalicznych modułów fotowoltaicznych w alternatywnych układach zasilania elektrycznego

inż. Grzegorz Jachacz
Automatyka i Robotyka

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

Celem niniejszej pracy jest zapoznanie z systemami pozwalającymi na pozyskiwanie energii elektrycznej z udziałem ogólnodostępnego promieniowania słonecznego, a także gromadzenie i użytkowanie nabytego medium z zastosowaniem zbudowanego modelu. Omawiane są kolejno części: teoretyczna zapewniająca zrozumienie zachodzącego procesu przemiany energii poczynając od drogi przez nią przebytej, przez zachodzące procesy fizyczne, aż po komponenty do tego wykorzystywane; praktyczna opisująca stworzoną makietę oraz badania na niej przeprowadzone; ekonomiczna zawierająca analizę zużycia energii w domu jednorodzinny oraz rolę systemów fotowoltaicznych.

1. Wstęp teoretyczny

Fotowoltaika to dziedzina nauki, która zgodnie z etymologią zajmuje się konwersją energii promieniowania świetlnego w energię elektryczną. W jej skład wchodzi głównie rozwiązania techniczne, ale także zjawiska fizyczne na mocy których odbywają się procesy opisane w dalszej części czy pojęcia ekonomiczne dowodzące o słuszności rozwiązania.

- **Potencjał energetyczny** Słońce to kula gazów i plazmy, jest głównym źródłem energii docierającej do Ziemi. Jego masa dzieli się w około 71% na wodór, 27% hel i pozostałe cięższe pierwiastki. W każdej sekundzie 657 milionów ton wodoru zamieniane są w 653 milionów ton helu, różnica 4 milionów ton jest zatem emitowana w postaci energii. Moc promieniowania została oszacowana przez naukowców na poziomie L_{\odot} (równanie (3.1)) [1].

$$L_{\odot} = 3,82 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (3.1)$$

- **Stała słoneczna** Parametr ten określa ilość energii pochodzącą ze słońca padającą pod kątem prostym na powierzchnię o danym wymiarze, nazywany jest również gęstością

strumienia promieniowania słonecznego. Obliczany jest dla zewnętrznej części atmosfery ziemskiej, a jego wartość przedstawia równanie (3.2). [1]

$$S = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (3.2)$$

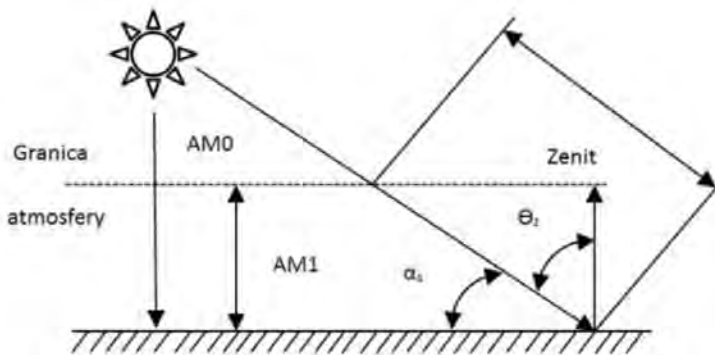
- **Całkowity strumień energii promieniowania słonecznego** Ilość całkowitej energii słonecznej docierającej do Ziemi jest zatem iloczynem stałej słonecznej oraz powierzchni, na którą światło pada (rzutem kuli na płaszczyznę jest koło). Korzystając z podanych wyżej danych całkowity strumień energii promieniowania słonecznego docierający do zewnętrznej warstwy atmosfery słonecznej przedstawiono równaniem (3.3). [1]

$$\dot{E} = 1.74 \cdot 10^7 \text{ W} \quad (3.3)$$

Powyższa wartość jest średnią chwilową ilością tej energii, która dociera jedynie do „widocznej” dla Słońca części Ziemi. Uwzględniając ruch obrotowy naszej planety, możemy uzyskać średnią dobową ilość energii docierającej do zewnętrznej powłoki atmosfery (jednak tej, która po przedostaniu się przez atmosferę trafi na Ziemię) (równanie (3.4)).

$$G_{sr} = 342 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (3.4)$$

- **Masa optyczna atmosfery** Definiowana jest jako stosunek odległości jaką musi pokonać promieniowanie przedzierające się przez atmosferę pod kątem, do odległości w przypadku padania pod kątem prostym (najkrótsza możliwa droga). AM0 (ang. *Air Mass*) oznacza masę równą zero, czyli na zewnętrznej warstwie atmosfery, AM1 dla promieni padających pod kątem prostym na ziemię. AM2 dla kąta pomiędzy ziemią a padającym promieniem równego 30 stopni. Wartość AM decyduje nie tylko o ilości energii docierającej do powierzchni Ziemi, ale wpływa również na spektrum tego światła co jest istotne m.in. podczas wyznaczania charakterystyki modułu. [2]



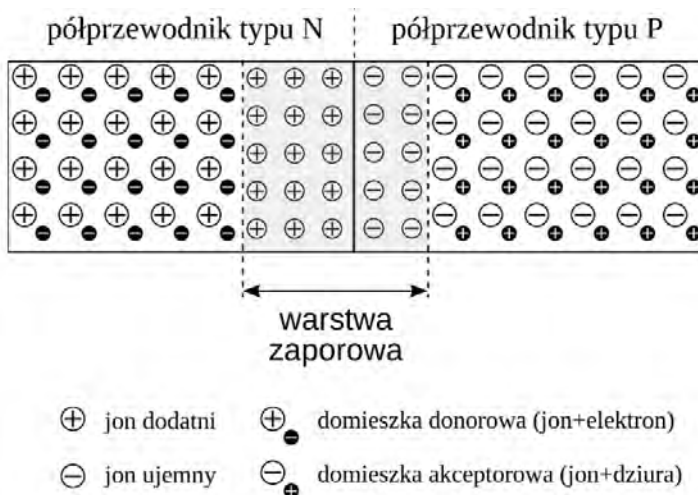
Rysunek 3.1. Masa optyczna atmosfery — wizualizacja [2]

- **Potencjał energetyczny na powierzchni Ziemi** Dotychczasowe obliczenia są traktowane dla AM0 (promieniowanie jeszcze nie przedostało się przez atmosferę). Szacuje się, że około 72% energii wnika do biosfery ziemskiej, a 34% tej z kolei, jest wykorzystywana na zmiany fazy wody oraz ruchy powietrza. Pomniejszając zatem obliczoną wcześniej wartość o opisane straty, zostajemy z liczbą 162 W na metr kwadratowy ziemi, co jest potencjałem już dostępnym dla nas do wykorzystania.

2. Zasada działania ogniwa fotowoltaicznego

Efekt fotowoltaiczny w ogniwie występuje dzięki zastosowaniu złącza P-N. Złączeniem P-N nazywa się połączenie półprzewodnika typu P i typu N ze sobą. Z uwagi na różnice koncentracji nośników następuje zjawisko dyfuzji. Nadmiarowe elektrony z półprzewodnika typu N, przemieszczają się do półprzewodnika typu P będąc tam nośnikami mniejszościowymi, następnie łączą się z nośnikami większościowymi — z dziurami. Taki sam proces odbywa się z dziurami przechodzącymi do półprzewodnika typu N. W efekcie czego maleje liczba nośników, ponieważ wolne elektrony/dziury łączą się ze sobą, a dotychczasowe jony, stają się atomami o neutralnym ładunku. W miejscu łączenia półprzewodników pozostają jednak jony, ujemne po stronie półprzewodnika typu P, a dodatnie po stronie półprzewodnika typu N, tworząc tym samym pole elektryczne. Obszar ten nazywa się warstwą zaporową, ponieważ aktywne tam pole blokuje dalsze przemieszczanie się nośników większościowych, bądź obszarem zubożonym, z uwagi na marginalną ilość wolnych nośników.

Kiedy złącze P-N jest wystawione na działanie światła, fotony padające na warstwę zaporową wytwarzają pary elektron-dziura. Pod wpływem obecnego tam pola elektrycznego pary są dzielone, elektrony są kierowane do półprzewodnika typu N, a dziury do półprzewodnika typu P, nadmiar nośników większościowych w tych obszarach po zamknięciu obwodu powoduje przepływ prądu.



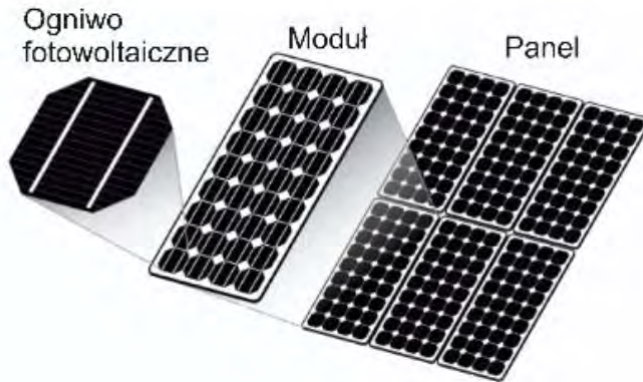
Rysunek 3.2. Ilustracja obrazująca złącze P-N [3]

3. Budowa jednostki fotowoltaicznej

W nomenklaturze można spotkać wiele terminów, z pozoru są to synonimy, jednak jest to niejednokrotnie błędne założenie. Rysunek 3.3 wyjaśnia kwestię owej niejasności. [4]

- **Ogniwo fotowoltaiczne.** Większość obecnie produkowanych ogniw opartych jest na półprzewodniku typu P jako bazie (w/w wafel), na który napyłana jest cieńsza warstwa półprzewodnika typu N, stąd różnica w grubości. Samodzielne ogniwo generuje około $35 \frac{\text{mV}}{\text{cm}^3}$ przy napięciu 550 mV w pełnym oświetleniu. Ładunki są zbierane z powierzchni ogniwa przy pomocy tzw. busbarów — szynoprzewodów.

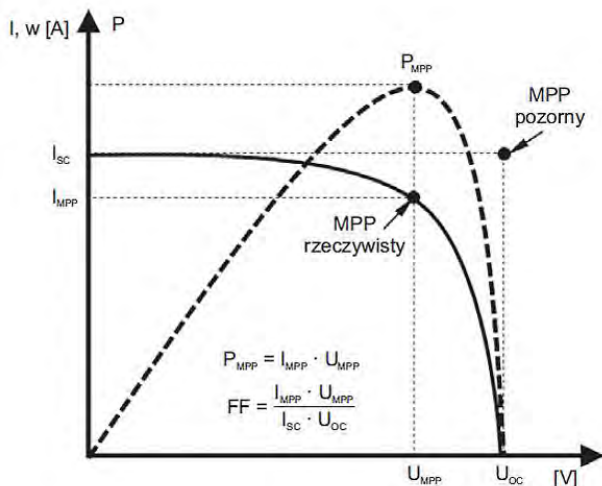
- **Moduł fotowoltaiczny** to zespół połączonych szeregowo/równoległe ogniw, umieszczony w ramie pozwalającej na montaż, zapewnia ochronę ogniw przed warunkami atmosferycznymi, najmniejsza jednostka składająca się na potoczną „instalację”
- **Panel fotowoltaiczny** to bateria modułów fotowoltaicznych gotowa do generowania energii elektrycznej w formie „użytecznej” do dalszego przetwarzania. Razem z falownikiem/kontrolerem ładowania i ewentualnym magazynem energii, tworzą generator fotowoltaiczny.



Rysunek 3.3. Ogniwo, moduł, panel — zestawienie [4]

4. Przetwarzanie energii

- **Punkt mocy maksymalnej.** Każde ogniwo czy też moduł ma swoją charakterystykę prądowo-napięciową, a co za tym idzie, punkt mocy maksymalnej (MPP). W celu maksymalizacji uzysku urządzenia odpowiedzialne za pobieranie tej energii powinny dostosowywać obciążenie modułu (dokładniej jego napięcie) w taki sposób, aby osiągnąć MPP.



Rysunek 3.4. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa modułu [5]

- **Falownik.** W przypadku chęci korzystania z energii w tradycyjny sposób, tak jak z „normalnego” prądu do przetwarzania energii wykorzystywany jest falownik/inwerter (tzw. instalacja *on-grid*). Napięcie obecne w polskich gniazdkach (sieciowe) ma przebieg sinusoidy o częstotliwości 50 Hz i wartości skutecznej 230 V. Natomiast na złączach modułu fotowoltaicznego pojawia się napięcie stałe (co do przebiegu) o mniejszej wartości - przykładowo 40 V. Głównym zadaniem falownika jest zmiana napięcia stałego (VDC), na napięcie przemiennie (VAC) o żądanych parametrach, czyli zwykle takich, jakie są obecne w gniazdku.
- **Kontroler ładowania.** Jeśli generator fotowoltaiczny ma stanowić autonomiczne rozwiązanie i ładować np. akumulator z którego następnie będziemy pobierali energię, korzystamy z kontrolera ładowania (instalacja *off-grid*/wyspowa). Najprostszym kontrolerem jest zwykły mechanizm zabezpieczający akumulator przed nadmiernym rozładowaniem/przeladowaniem, którego zadaniem jest obserwowanie napięć panujących w układzie i odpowiednia zero-jedynkowa reakcja (np. odłączenie modułu/obciążenia). Zazwyczaj jednak kontroler jest przetwornicą DC/DC (często w topologii buck, czyli obniżającej napięcie), której zadaniem jest umożliwienie procesu ładowania mimo różnych napięć oraz płynne regulowanie obciążenia, a co za tym idzie utrzymywanie modułu w punkcie MPP lub baterii na danej wartości napięcia.
- **Magazyn energii.** W przypadku potrzeby gromadzenia energii, często wybierane są akumulatory kwasowo-ołowiowe, najlepiej przeznaczone do głębokiego rozładowania, ponieważ lepiej znoszą pracę cykliczną. Alternatywą są ogniwa w technologii litowej (np. litowo-jonowe, czy szczególnie litowo-żelazowo-fosforanowe), które cechują się lepszą gęstością energetyczną, jeszcze lepiej znoszą pracę cykliczną oraz pozwalają na dużą dowolność w kwestii dobrania napięcia nominalnego czy pojemności baterii.

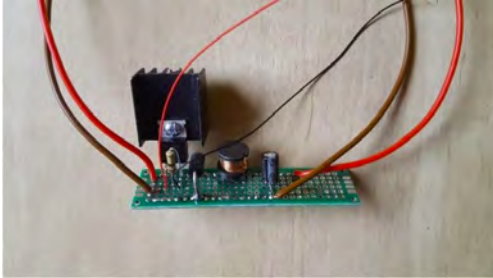
5. Zbudowany model

Do badań stworzono makietę opartą o monokrystaliczny moduł fotowoltaiczny o mocy nominalnej 20 W. Zastosowano prosty kontroler ładowania oraz akumulator kwasowo-ołowiowy.

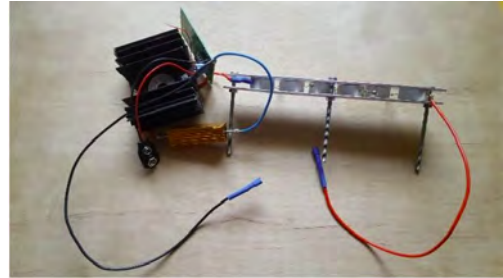


Rysunek 3.5. Zbudowany model

Powstał również monitor MPP oparty na układzie *INA226* komunikujący się z płytką *Arduino* sprzężoną z wyświetlaczem OLED lub wyświetlaczem LCD + kartą SD w celu akwizycji danych, tj. aktualnego napięcia modułu, prądu pobieranego, a co za tym idzie generowanej mocy. Dodatkowe dwa zbudowane układy to obciążenie stałoprądowe oraz przetwornica obniżająca napięcie.



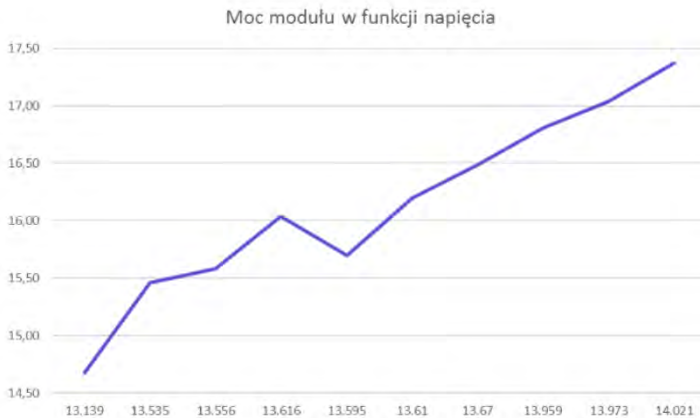
(a) przetwornica w topologii buck



(b) układ obciążający

Rysunek 3.6. Zmontowane układy

Przeprowadzone badania uwiarykowały prostą konstrukcję kontrolera ładowania, który nie pozwalał na utrzymanie modułu w jego punkcie mocy maksymalnej. Moc modułu wzrastała wraz z napięciem akumulatora, ze względu na sprzężenie napięć modułu i akumulatora.

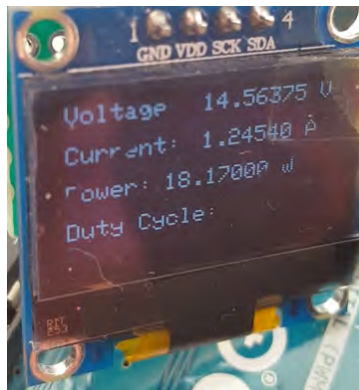
**Rysunek 3.7.** Parametry modułu — wyniki pierwszej serii pomiarów

Z pomocą zbudowanego *dataloggera* sprawdzono też moc modułu w czasie trzy i półgodzinnego eksperymentu. Moc utrzymuje się na stosunkowo stałym poziomie ze względu na charakterystykę ładowania akumulatora kwasowo-ołowiowego, który w tej fazie utrzymywał dość stałe napięcie. Spadek mocy w dalszej części spowodowany był zachodzącym słońcem, kiedy jego energia malała, (eksperymenty wykonywane późną jesienią, stąd krótkie okno czasowe).

Maksymalna moc którą udało się zarejestrować to 18,17 W, która została osiągnięta przy napięciu 14,56 V, zatem około 1,5 V poniżej napięcia optymalnego. Dowodzi jednak poprawnego działania modułu, który pomimo nieidealnego nasłonecznienia, jak również pracy poza MPP generował moc niecałe 10% niższą od nominalnej.



Rysunek 3.8. Moc generowana przez moduł w czasie drugiego eksperymentu



Rysunek 3.9. Maksymalna uzyskana moc modułu podczas pierwszej serii badań

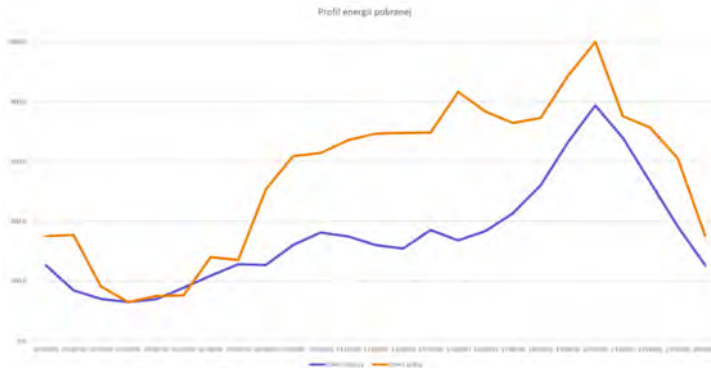
6. Analiza zużycia energii w domu jednorodzinnym

- **Akwizycja danych.** Do monitorowania zużycia energii elektrycznej wykorzystano urządzenie *OneMeter* w wersji PV. Działanie urządzenia polega na odpytywaniu licznika energii elektrycznej przez dostępny port optyczny. Zatem urządzenie jest jedynie interfejsem umożliwiającym gromadzenie odczytów z licznika co 15 minut. Zaletą jest fakt, iż pomiar dokonywany jest przez licznik energii elektrycznej — rejestrowane wartości są tymi samymi, z których korzysta dostawca energii elektrycznej.
- **Roczne zużycie energii** zostało oszacowane na podstawie miesięcy sierpień-listopad, z których dostępne są kompletne dane. Na przestrzeni tych 4 miesięcy zużycie energii elektrycznej wyniosło 1,267 MWh, co przekładając na roczne zużycie daje wartość 3,8 MWh. Biorąc jednak pod uwagę czynniki takie jak przejście z ogrzewania elektrycznego (latem) na kocioł CO (zimę), koniec sezonu prac na zewnątrz, krótszą długość dnia, ferie i święta ustalono średnie zapotrzebowanie roczne na poziomie 3,6 MWh, które zostało przyjęte do dalszych obliczeń.



Rysunek 3.10. Porównanie profili energii pobranej dla dnia roboczego i wolnego

- Profil energii zużytej w ciągu dnia W rozważaniach na temat rozkładu poboru energii elektrycznej w ciągu dnia możemy dokonać podziału na dzień roboczy (godziny robocze poza domem) oraz dzień wolny. Dysponując bezpośrednim porównaniem profili zużycia energii dla dnia roboczego i wolnego można poczynić pewne obserwacje. Przede wszystkim energia pobrana w dniu wolnym jest znacznie większa, co jest logiczne i spodziewane. Występują pewne podobieństwa w postaci, niskiego zużycia energii w godzinach nocnych oraz zwiększone zużycie w godzinach wieczornych. Zasadnicza różnica występuje w godzinach od 7:00 do 18:00.



Rysunek 3.11. Porównanie profili energii pobranej dla dnia roboczego i wolnego

7. Kalkulacja instalacji oraz okres zwrotu

- **Moc i cena.** Moc generatora dla domu jednorodzinnego o średnim rocznym zużyciu energii na poziomie 3,6 MWh, została oszacowana na 4,0 – 4,5 kWp. Wybrany został, dostępny do zakupu gotowy zestaw przeznaczony do montażu na gruncie, którego cena wraz z oszacowaną usługą montażu wyniosła około 15159 zł. Biorąc pod uwagę dostępne dotacje w postaci programów Mój Prąd oraz Czyste Powietrze, obliczono możliwą ulgę w wysokości 5000 zł z pierwszego programu oraz dzięki drugiemu programowi — odliczenie podatku

w wysokości około 3250 zł, co prowadzi do kwoty 6908,12 zł za instalację.

- **Koszty energii.** Z poprzednich faktur za energię elektryczną odczytano ceny 0,77 zł i 0,38 zł za 1 kWh odpowiednio w strefie dziennej i nocnej (taryfa *G12*). Posiadając dane zużycia (również z podziałem na strefy) obliczono roczny koszt prądu na poziomie 2211,70 zł
- **Produkcja energii.** Biorąc pod uwagę bieżące zużycie oraz konieczność magazynowania nadmiarowej energii (w sieci energetycznej na zasadach opustu), dostępną do wykorzystania ilość jest 3880 kWh. Zakładając roczny spadek mocy, którą jesteśmy w stanie wyprodukować na poziomie 1%, generator w pełni zaspokoi potrzeby domu przez pierwsze 7 lat eksploatacji.
- **Okres zwrotu.** W przypadku konieczności całkowitego pokrycia kosztów instalacji (bez dotacji), okres ten wynosi niecałe 7 lat, a uzyskując maksymalne możliwe dofinansowanie ten czas to nieco ponad 3 lata.

8. Podsumowanie

Omówiono cztery dostępne usługi pozwalające na sprawdzenie nasłonecznienia w danym obszarze, optymalne ustawienie panelu czy też trajektorię słońca na przestrzeni roku. Podczas projektowania generatora nie zawsze przyłożona jest należyta uwaga do pewnych potencjalnych problemów. Pokróćce opisano: ograniczenia publicznej sieci elektroenergetycznej, która nie zawsze jest w stanie przyjąć wyprodukowaną energię; możliwy wzrost napięcia w sieci, a co za tym idzie wzrost poboru prądu np. dla prostych obciążeń rezystancyjnych; bilansowanie międzyfazowe, kierunek ustawienia w celu optymalizacji okna czasowego, w którym generujemy energię; a także potencjalne rozwiązanie dla magazynowania energii w postaci usługi *Vehicle to Grid*.

Na drodze zgłębiania tajemnic technologii jak również rozwoju modelu zauważono kilka potencjalnych ścieżek do udoskonalenia systemu, są to: pełne wdrożenie kontrolera ładowania opartego na przetwornicy; projekt zintegrowanej płytki PCB, zmiana akumulatora na taki w technologii litowej, mechanizm śledzenia słońca.

Zagadnienie systemów fotowoltaicznych jest tematem rozległym i ciężko opisać je w całości, w ramach pracy powyższej pracy. Stanowi za to ciekawy wstęp, dający ogólny pogląd na fotowoltaikę. Warto pamiętać, iż poczynione kalkulacje opierają się na prognozach i estymacjach i mogą odbiegać od stanu rzeczywistego, aczkolwiek wiedza zgromadzona na drodze rozwoju tej technologii, jest wystarczająco obszerna, aby wystarczająco dokładnie przewidzieć istotne aspekty w montażu i eksploatacji generatora PV. To świetne rozwiązanie pozwalające na korzystanie z ogólnodostępnej darmowej energii. Pozwala ograniczyć koszty energii elektrycznej, jednocześnie będąc przyjazną środowisku alternatywą dla konwencjonalnych źródeł energii. Jeśli odpowiednio zaprojektowana może ograniczyć koszty niemal do zera. Jednak ciężko, aby stanowiła samodzielne źródło prądu elektrycznego. W ostatnich czasach rozwija się niezwykle dynamicznie. Istnieje wiele przedsiębiorstw zajmujących się projektowaniem i montażem generatorów, w dobie korzystnych dofinansowań nie jest zaskoczeniem, iż jest to tak popularna inwestycja.

Bibliografia

- [1] Sarniak M., *Systemy fotowoltaiczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2019.
- [2] Matuszczyk P., Popławski T., Flaszka J., *Potencjał i możliwości energii promieniowania elektromagnetycznego słońca*, Przegląd Elektrotechniczny, 91, 1, 2015, 183–187.

- [3] *Wikipedia, wolna encyklopedia*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Strona_g%C5%82%C3%B3wna, dostęp: 01-11-2020.
- [4] *Słowniczek - solsystem*, <https://solsystem.pl/slowniczek/>, dostęp: 01-11-2020.
- [5] *Instalacje fotowoltaiczne – dobór falownika, przewodów oraz ich zabezpieczeń | elektro.info*, <https://www.elektro.info.pl/artykul/fotowoltaika/64215,instalacje-fotowoltaiczne-dobor-falownika-przewodow-oraz-ich-zabezpieczen>, dostęp: 01-11-2020.
- [6] Sarniak M., *Systemy fotowoltaiczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2019.
- [7] Klugmann-Radziemska E., *Fotowoltaika: w teorii i praktyce*, Wydawnictwo BTC 2010.
- [8] *Polskie sieci elektroenergetyczne*, https://twitter.com/pse_pl?ref_src=twsrc%5Egoogle%7Ctwcamp%5Eserp%7Ctwgr%5Eauthor, dostęp: 14-10-2020.

Proteza dłoni z rozpoznawaniem sygnałów EMG i obrazów RGB

mgr inż. Dawid Grzeszkowiak

Elektronika

dr hab. inż. Przemysław Śliwiński

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Wynikiem projektu jest autorski model-prototyp protezy dłoni sterowanej z wykorzystaniem widzenia maszynowego i sygnałów elektromiograficznych. Autor skonstruował protezę dłoni i przeprowadził badania mające na celu określenie przydatności systemów uczenia i widzenia maszynowego do jej sterowania porównując je z klasycznymi metodami wykorzystującymi elektromiografię.

Praca ta jest kontynuacją pracy inżynierskiej, w ramach której autor wykonał protezę dłoni sterowaną algorytmami widzenia maszynowego zaimplementowanymi w smartphonie użytkownika. By zrozumieć powody i sensowność wykorzystania metod uczenia i widzenia maszynowego w kontroli protezy należy wpieryw przyjrzeć się mechanizmom jakie funkcjonują i angażują się podczas manipulacji obiektem w ciele człowieka. Zdrowa osoba chcąc chwycić w dłoń dowolny przedmiot najpierw wykorzysta informacje wzrokową do tego by go zlokalizować, następnie palce dłoni ustawią się do odpowiedniego chwytu zanim jeszcze dojdzie do kontaktu z przedmiotem. Drugim bardzo ważnym zmysłem jest zmysł dotyku, dzięki któremu pozycje palców i siła przyłożona do przedmiotu mogą zostać jeszcze lepiej dopasowane. Pobieranie danych biomedycznych może być utrudnione u osób, u których doszło do rozległych obrażeń, poparzeń lub które straciły całą rękę. Zwykle wtedy pobiera się dane EMG z innych mięśni, np. ramienia, jednakże jest to działanie nieefektywne, gdyż funkcja sygnałów elektromiograficznych tych mięśni jest zupełnie inna od funkcji mięśni kontrolujących palce, dłoń. Wykorzystanie widzenia maszynowego sprawia, że można dobrać odpowiedni chwyt do rozpoznanego obiektu. Ogólne cele i zakres pracy magisterskiej obejmowały:

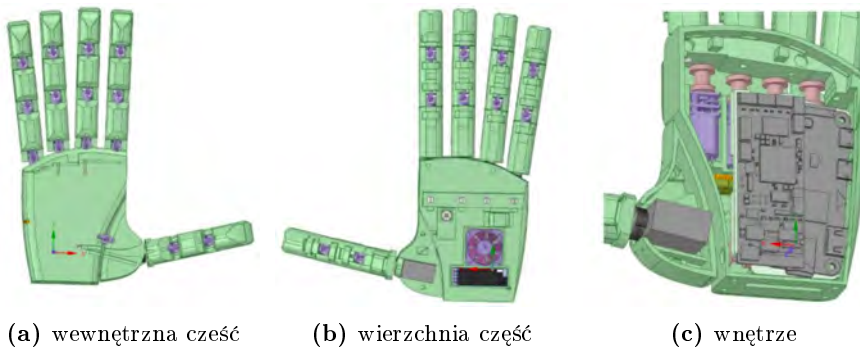
- badania nad metodami tensometrycznymi, czujniki nacisku.
- ocenę wpływu wykorzystania kamery w kontroli protezy,
- zbadanie najlepszych konfiguracji i układów elektrod,
- porównanie metod pomiaru EMG w konfiguracji bipolarnej i wielobiegunowej,
- opracowanie metod klasyfikacji sygnałów EMG.

Dodatkowo postawiono sobie zadanie zaprojektowania nowego modelu dłoni zwiększającego zręczność, w szczególności kciuka, wyposażenie palców w czujniki nacisku, badania nad metodami tensometrycznymi oraz umieszczenie całości mechaniki, silników i elektroniki wewnątrz protezy dłoni.

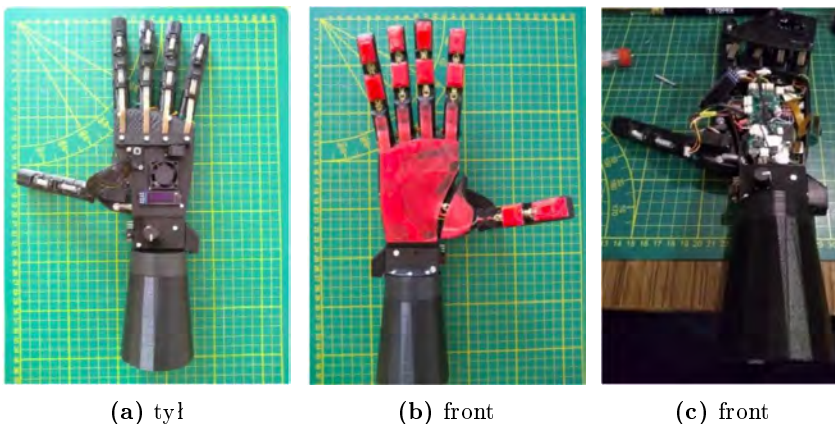
1. Projekt protezy

Proteza została zaprojektowana w darmowym oprogramowaniu *Designspark Mechanical*. Jej modele 3D zostały wydrukowane na drukarce 3D z polilaktydu (*PLA*) i termoplastycznego poliuretanu (*TPU*). Projektując model starano się odwzorować wszystkie wymiary i proporcje obecne w dłoni człowieka, jednakże konieczne było pójście na pewne ustępstwa. Postawiono sobie też za zadanie umieszczenie całości mechaniki i elektroniki sterującej wewnątrz śródreżcza dłoni. Dzięki temu proteza może być używana wszechstronnie zarówno dla osób, które posiadają nadgarstek jak i dla tych które straciły część przedramienia. Wnętrze sztucznej dłoni, a także opuszki palców pokryto warstwą gumy (*TPU*) wydrukowanej na drukarce 3D tak by zwiększyć tarcie pomiędzy chwytanymi obiektami.

Proteza kontrolowana jest przez sześć silników DC i jeden serwowmotor obracający kciuk. Na rysunku 4.2 widoczna jest jeszcze zaprojektowana część nadgarstka protezy i gniazdo na kikut dłoni. Gniazdo na kikut jest projektem przykładowym tego, jak mogłoby wyglądać gniazdo docelowe, ponieważ powinno ono zostać zaprojektowane na podstawie ręki klienta. Każdy palec protezy wyposażony jest w dwa czujniki tensometryczne wykonane na bazie membrany rezystancyjnej umieszczonej pomiędzy dwoma elektrodami z taśmy miedzianej. Nacisk na gumowy opuszek palca powoduje zmianę rezystancji czujnika.



Rysunek 4.1. Model 3D protezy

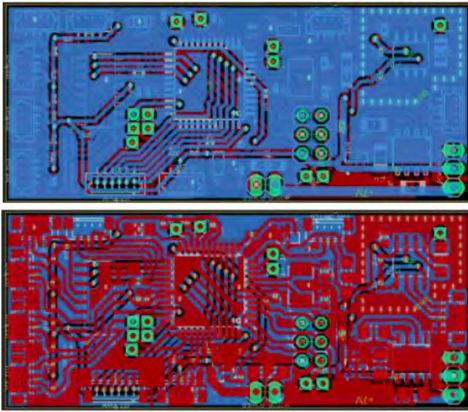


Rysunek 4.2. Wykonana proteza dłoni

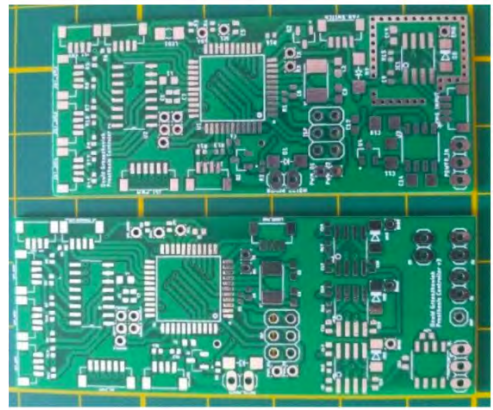
2. Elektronika protezy

W ramach tego projektu zaprojektowano dwie płytki PCB, jedna dla zbadania pomiarów w konfiguracji wielobiegunowej i jedną dla konfiguracji bipolarnej. Ostatecznie ze względu na ograniczony czas i środki proteza kontrolowana jest z wykorzystaniem jednego kanału *EMG*. Płytką PCB nazywaną *Prosthesis Controller v4* składa się z mikrokontrolera *Atmega1284* przetwarzającego dane i wzmacniacza biomedycznego *INA128U* wzmacniającego sygnały elektromiograficzne i szeregu pasywnych i scalonych układów pomocniczych.

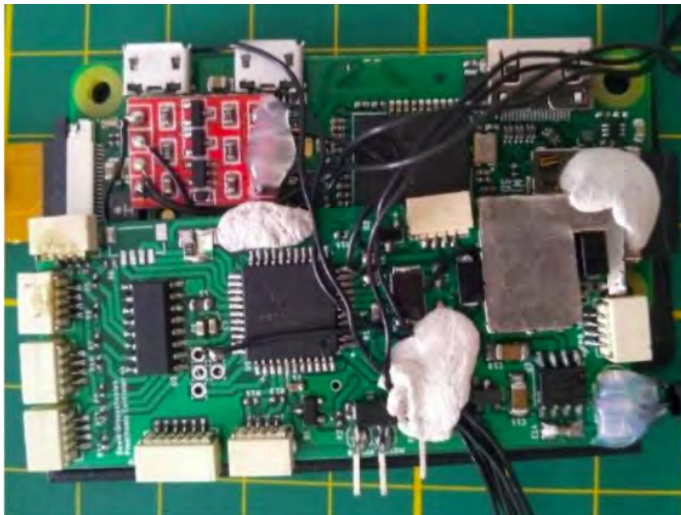
Zaprojektowana płytką *Prosthesis Controller v4* komunikuje się z płytką *Raspberry Pi Zero* (rysunek 4.5 realizującą widzenie i uczenie maszynowe, poprzez magistralę *UART* w architekturze *master-slave*. Zasilanie dostarczone jest przez osobny moduł (rysunki 4.6 oraz 4.7).



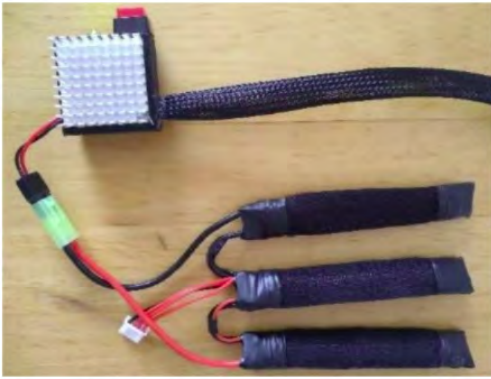
Rysunek 4.3. Layout górnej i dolnej strony płytki *Prosthesis Controller v4*



Rysunek 4.4. Porównanie dwóch wersji PCB



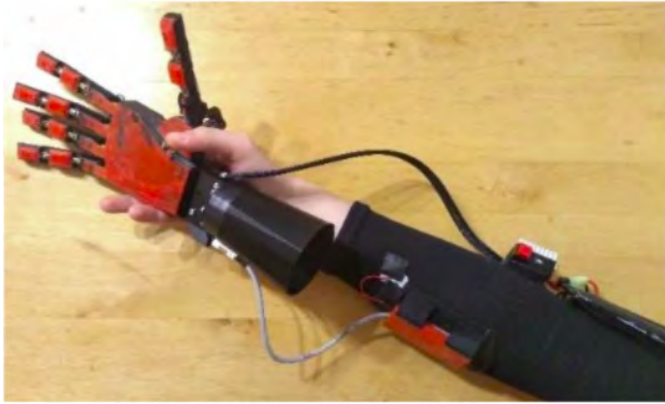
Rysunek 4.5. Płyta główna protezy, *Prosthesis Controller v4* i *Raspberry Pi Zero*



Rysunek 4.6. Moduł zasilania z bateriami



Rysunek 4.7. Wnętrze modułu zasilania



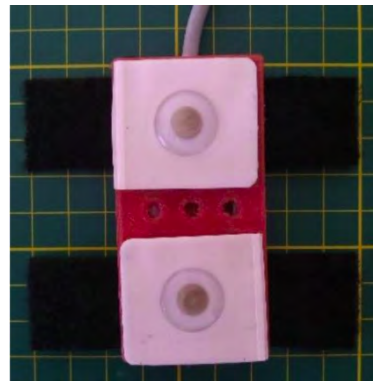
Rysunek 4.8. Proteza wraz z modułem zasilania i elektrodami umieszczonymi na specjalnie wykonanej opasce



(a) opaska i stabilizator



(b) uchylony stabilizator



(c) stabilizator elektrod

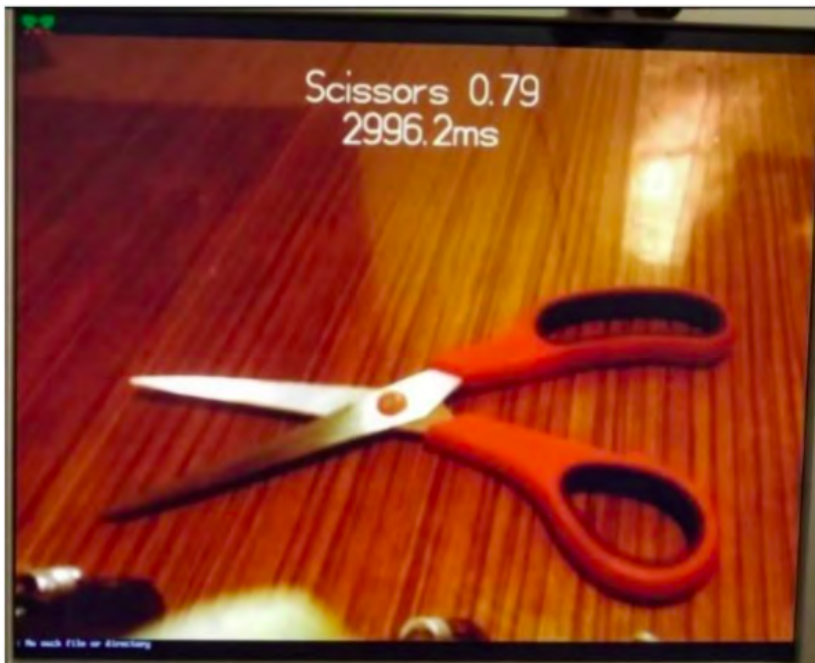
Rysunek 4.9. Wykonana proteza

Wykonano urządzenie, które nazwano stabilizatorem elektrod (rysunek 4.9), które to zapewnia odpowiednią odległość między elektrodami żelowymi, ekranowanie i równomierny nacisk na dłoń. Eliminuje on też szumy tryboelektryczne wynikające z ruchów gniazd, elektrod i kabli.

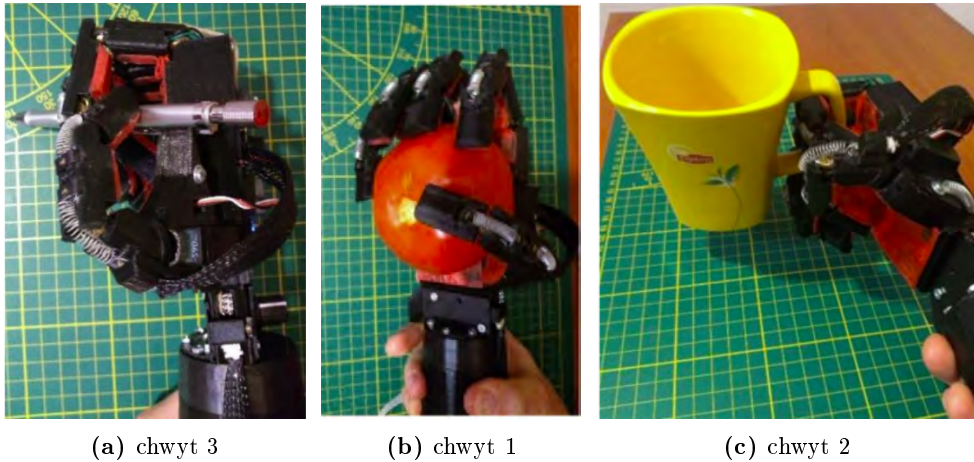
3. Sterowanie protezą

Na początku do klasyfikacji sygnałów EMG zaimplementowano sieć neuronową. Jednakże ostatecznie proteza potrafi przyporządkować sygnały do dwóch klas wykorzystując autorski algorytm klasyfikacji sygnałów EMG. Widzenie i uczenie maszynowe stało się kluczowym aspektem pozwalającym na wykorzystanie w pełni możliwości protezy. Jako że proteza klasyfikuje tylko dwa rodzaje sygnałów, to EMG zostało wykorzystane do wyzwalania chwytów, całość kontroli, dobór nastaw palców realizowany jest dzięki widzeniu i uczeniu maszynowemu. Zaimplementowane zostało no na płytce *Raspberry Pi Zero* poprzez platformę *Tensorflow*.

Po rozpoznaniu konkretnego obiektu zawartego w bazie *danchy*, na płytkę *Prosthesis Controller v4* przesłane zostają informacje o tym jako chwyt powinien zostać zastosowany. Chwyty mogą się powtarzać między obiektami. Do klasyfikacji obiektów wykorzystano gotowy model sieci neuronowej *mobile_object_labeler_v1*. Model ten jest jedynie przyuczony, powinien skończyć naukę na docelowej bazie danych. Jednakże autorowi brakło czasu na nauczanie modelu na docelowych obrazach w związku z tym sieć klasyfikuje zdjęcia dosyć wolno. W przyszłości zaimplementowane zostanie widzenie i uczenie maszynowe *object detection*, które pozwoli na wykrywanie wielu obiektów w czasie rzeczywistym. Jako komputer przetwarzający dane wykorzystany zostanie od niedawna dostępny moduł obliczeniowy *Raspberry Pi Compute Module 4*. Główny program obsługujący protezę wgrany jest na płytkę *Prosthesis Controller v4*. Napisany został w języku *C++* z pomocą środowiska *Arduino IDE*. Program umieszczony na *Raspberry Pi Zero* napisany został w języku *Python*.



Rysunek 4.10. Podgląd z kamery umieszczonej na protezie wraz z predykcją obrazu



(a) chwyt 3

(b) chwyt 1

(c) chwyt 2



(d) chwyt 2

(e) chwyt 2

Rysunek 4.11. Przykładowe chwyt

4. Podsumowanie

Praca ta pozwoliła na zbadanie wielu podejść, gdy chodzi o projektowanie protezy. W jej ramach udało się zaprojektować antropomorficzną autorską protezę, w której dłoni zmieszczono całą elektronikę i mechanikę. Zaprojektowano i zbadano różne rodzaje czujników tensometrycznych, które pozwoliły uzyskać precyzyjny i mocny chwyt. Porównano działanie układów elektromiograficznych w różnych konfiguracjach co zaowocowało systemem pozwalającym kontrolować protezę. Wykonano także opaskę, na przedramię i ramię, która pozwala ustabilizować elektrody i jest miejscem mocowania układu zasilania i baterii. Sprawdzone zasadność i wymagania potrzebne do uruchomienia sieci neuronowych na układach wbudowanych i porównano je z autorskim algorytmem statystycznym. Zaprojektowano algorytm opierający się na widzeniu i uczeniu maszynowym, który jest odpowiedzialny za dobieranie chwytów, nastaw palców protezy w zależności od rozpoznanych obiektów.

Widzenie i uczenie maszynowe okazało się kluczowym elementem pozwalającym na działanie protezy. W przyszłych projektach prawdopodobnie zostanie one jedynym i podstawowym syste-

mem sterującym jako, że dostarcza ono wszystkich koniecznych informacji do kontroli protezy.

Pod poniższym linkiem zawarto prywatny film na platformie *Youtube* przedstawiający działającą protezę: https://www.youtube.com/watch?v=aFwNCnq5GRI&ab_channel=Invalidor

Bibliografia

- [1] Castellini C., Artemiadis P., Wininger M., Ajoudani A., Alimusaj M., Bicchi A., Caputo B., Craelius W., Dosen S., Englehart K., Farina D., Gijsberts A., Godfrey S., Hargrove L., Ison M., Kuiken T., Marković M., Pilarski P., Rupp R., Scheme E., *Proceedings of the first workshop on peripheral machine interfaces: Going beyond traditional surface electromyography*, *Frontiers in neurorobotics*, 8, 2014, 22.
- [2] He Y., Shima R., Fukuda O., bu N., Yamaguchi N., Okumura H., *Development of distributed control system for vision-based myoelectric prosthetic hand*, *IEEE Access*, 7, 2019, 54542–54549.
- [3] DeGol J., Akhtar A., Manja B., Bretl T., *Automatic grasp selection using a camera in a hand prosthesis*, *Conference proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference*, 2016, 2016, 431–434.
- [4] Dally C., Johnson D., Canon M., Ritter S., Mehta K., *Characteristics of a 3d-printed prosthetic hand for use in developing countries*, [w:] *2015 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC) 2015*, 66–70.
- [5] Saudabayev A., Varol A., *Sensors for robotic hands: A survey of state-of-the-art*, *IEEE Access*, 3, 2015, 1–1.
- [6] Jamal M., *Signal Acquisition Using Surface EMG and Circuit Design Considerations for Robotic Prosthesis*, rozdz. 18, *InTech 2012*, 427–448.
- [7] *Simple mlp neuralnetwork library for microcontrollers*, <https://github.com/GiorgosXou/NeuralNetworks>, dostęp: 01-11-2020.
- [8] Acar G., Ozturk O., Golparvar A., Elboshra T., Böhringer K., Yapici M., *Wearable and flexible textile electrodes for biopotential signal monitoring: A review*, *Electronics*, 8, 2019.

Układ sterowania robota mobilnego z funkcją lokalizacji i identyfikacji wózków transportowych

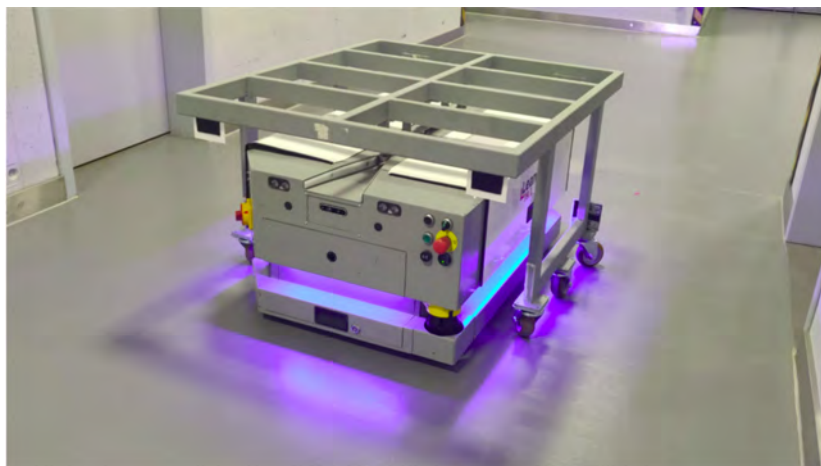
mgr inż. Dawid Moszyński

Automatyka i Robotyka

dr inż. Jarosław Szrek

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych

Przedmiotem pracy było opracowanie układu sterowania dla robota mobilnego, który pozwoli na autonomiczny transport ładunku w środowisku przemysłowym. Układ przeznaczony jest dla platformy AMR (*Autonomous Mobile Robots*), która jest wyposażona w wszelkie niezbędne podzespoły i przystosowana do współpracy z dedykowanymi wózkami (rysunek 5.1). Celami pracy było opracowanie modułów programowych do lokalizacji i identyfikacji wózka, realizacji jego autonomicznego podłączania oraz przetransportowania do zdefiniowanej w przestrzeni lokalizacji.



Rysunek 5.1. Platforma transportująca dedykowany wózek

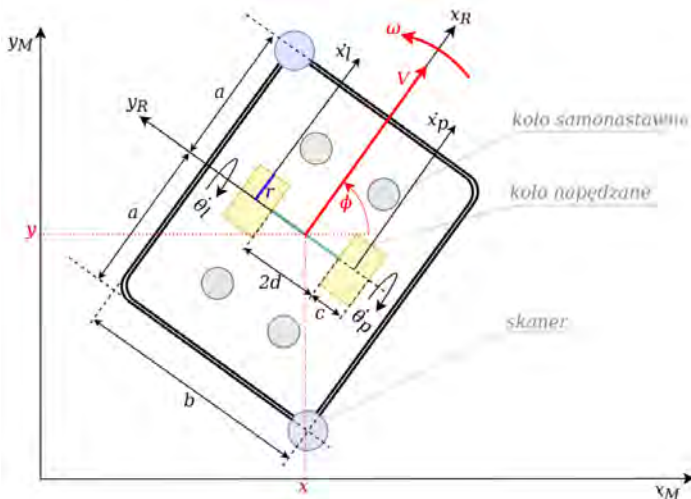
Podstawowym z aspektów pracy, była integracja sprzętowo - programowa wykorzystywanych elementów platformy. Zastosowanie narzędzi programistycznych, które są dedykowane dla robotów mobilnych, pozwoliło na jej szybkie i skuteczne przeprowadzenie. Integracja polegała na dostosowaniu lub opracowaniu odpowiednich modułów ROS (*Robot Operating System*) w taki sposób, aby zapewnić komunikację z każdym z niezbędnych w układzie podzespołów. W efekcie

integracji dostępne są odpowiednie usługi, a dane sensoryczne publikowane są na odpowiednich tematach, które mogą być subskrybowane przez moduły je przetwarzające.

Zastosowanie platformy mobilnej o solidnej konstrukcji, która jest wyposażona w zaczep zapewniający podłączanie wózków transportowych umożliwiło opracowanie realizacji autonomicznego transportu. Różnicowy układ napędowy oraz możliwość uproszczenia kinematyki do układu monocykla, umożliwiło wykonywalność ścieżek planowanych w postaci punktów na mapie (rysunek 5.2). Sensory znajdujące się w platformie, zostały odpowiednio przetworzone w celu ich interpretacji.

Opracowano moduły zapewniające ich wstępną filtrację, scalenie oraz podstawową analizę. Dostępne w systemie dane sensoryczne dostarczyły niezbędnych informacji potrzebnych do lokalizacji globalnej oraz lokalnej w przestrzeni.

Lokalizację globalną platformy uzyskano dzięki zastosowaniu algorytmów opartych o metody Monte Carlo oraz mapę statyczną zbudowaną z wykorzystaniem metody *SLAM* (*Simultaneous localization and mapping*).



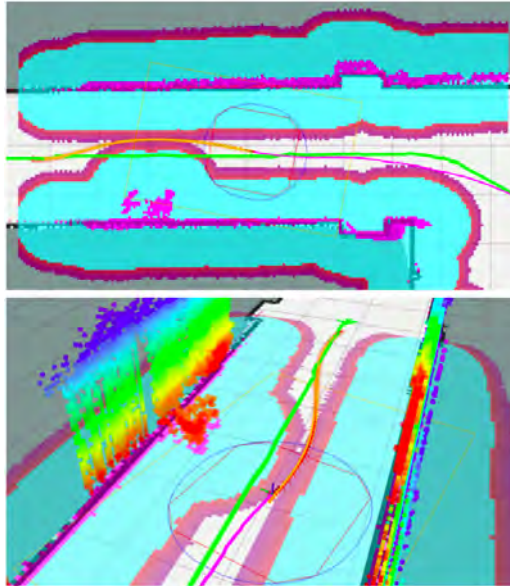
Rysunek 5.2. Definicja platformy mobilnej w globalnym układzie współrzędnych. Wartości parametrów: $a = 0,65m$, $b = 0,80m$, $c = 0,04m$, $d = 0,275m$, $r = 0,075m$

Opracowanie mapy oraz szacowanie pozycji na jej podstawie, możliwe było dzięki danym z skanerów laserowych, które po połączeniu zapewniły zakres percepcji wynoszący 360° w jednej płaszczyźnie równoległej do podłoża. Natomiast lokalizacja lokalna wyznaczana była w oparciu o dane odometryczne, których błędy wynikające z poślizgów kompensowano z zastosowaniem układu inercyjnego *IMU* oraz rozszerzonego filtru Kalmana. Aktualny stan środowiska, którego znajomość jest niezbędna w celu zaplanowania ścieżek oraz ich realizacji zapewniono z zastosowaniem map kosztów oraz dostępnych danych sensorycznych. W celu uwzględnienia wymiarów konstrukcji platformy, wykorzystywano ślad robota w formie wielokąta, który ma bezpośredni wpływ na budowane siatki zajętości. Planowanie globalne ścieżki możliwe było dzięki globalnej mapie kosztów, opartej o mapę statyczną. Natomiast lokalny stan środowiska opracowywano z zastosowaniem danych z skanerów laserowych oraz kamer 3D. Kształt stosowanego śladu robota był uwarunkowany aktualnie obowiązującą strefą bezpieczeństwa, której wymiary zależały od stosowanych sensorów oraz drogi hamowania platformy z danej prędkości. Wspomniana strefa miała za zadanie dostarczyć informację o przeszkodzie występującej tak blisko platformy, że konieczne jest jej bezwzględne zatrzymanie. Co więcej, w celu poprawnej interpretacji przeszkód

niezbędne było zapewnienie filtracji danych sensorycznych, które dotyczyły konstrukcji platformy oraz podłączonego ładunku.

Planowanie globalnej trasy, zapewniono z zastosowaniem mapy statycznej oraz metody opartej o algorytm Dijkstry. Za jej realizację odpowiedzialny był lokalny planner, który planował i optymalizował lokalne trajektorie zastosowaniem metody *TimedElasticBand*. Zapewniał on realizację ścieżek w sposób bezkolizyjny, głównie z uwzględnieniem kosztów czasowych oraz odległościowych. Ślad robota stosowany podczas optymalizacji wyznaczany był poprzez definicję przy pomocy dwóch linii.

Jej zastosowanie oraz odpowiednie dobranie parametrów umożliwiło właściwe działanie lokalnego planera i sprawne omijanie przeszkód (rysunek 5.3).



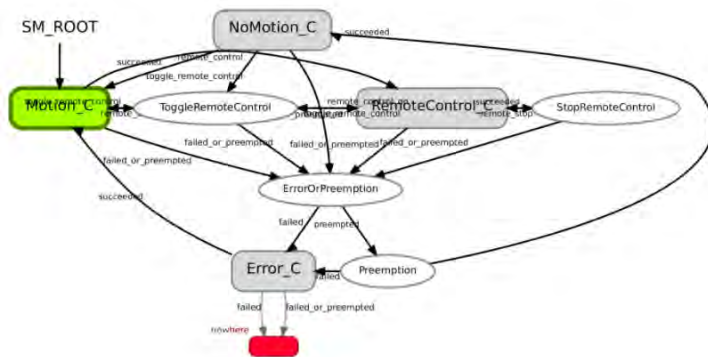
Rysunek 5.3. Realizacja omijania przeszkody z ładunkiem

W celu wykrywania tras niemożliwych do realizacji – w wyniku wystąpienia lokalnych przeszkód, opracowano metodę filtracji, która poprawnie przerywała realizację zadania. Stosowane ślady platformy zależały od kształtu strefy bezpieczeństwa *emergency*, na którą wpływał fakt podłączenia ładunku oraz stan strefy *warning*. Opracowanie konfiguracji parametrów dla zestawów stref, zapewniło sprawne dostosowanie układu w zależności stanu podłączenia ładunku. Obecność przeszkód w strefie *warning* powodowała zmniejszenie prędkości maksymalnej platformy, co z kolei umożliwiło zmniejszenie strefy bezpieczeństwa. Dodatkowo zapewnienie oddzielnych zestawów konfiguracji dla etapu podłączania oraz odłączania zagwarantowało sprawną zmianę parametrów lokalnego planera w zależności od realizowanego zadania. Zlecenie zadań z wykorzystaniem pojedynczych komend lub złożonego scenariusza, zapewniło elastyczność pod kątem ich definicji oraz stosowanego systemu zarządzającego. Opracowany układ umożliwił przede wszystkim realizację zadania przemieszczenia po ustalonej ścieżce, podłączenia oraz odłączenia wózka, a także zatrzymania, wznowienia lub anulowania każdego z nich w dowolnym momencie.

Stosując globalny planner jako metodę interpolacji dostarczanych ścieżek, pozwoliło na określenie trasy do realizacji w postaci punktów pośrednich. Natomiast zastosowanie definicji komendy zawierającej parametry numeryczne umożliwiło implementację określonej realizacji komendy

w zależności od wartości parametrów. Dzięki temu możliwe było zdalne zadawanie prędkości sterujących lub sterowanie zaczepem w określonym kierunku. Dodatkowo, zastosowanie chwili czasowej przypisywanej do pojedynczej komendy oraz ustalonych warunków zabezpieczyło układ przed błędami występującymi w komunikacji.

Za realizację wydawanych platformie poleceń odpowiedzialna była opracowana maszyna stanów (rysunek 5.4).



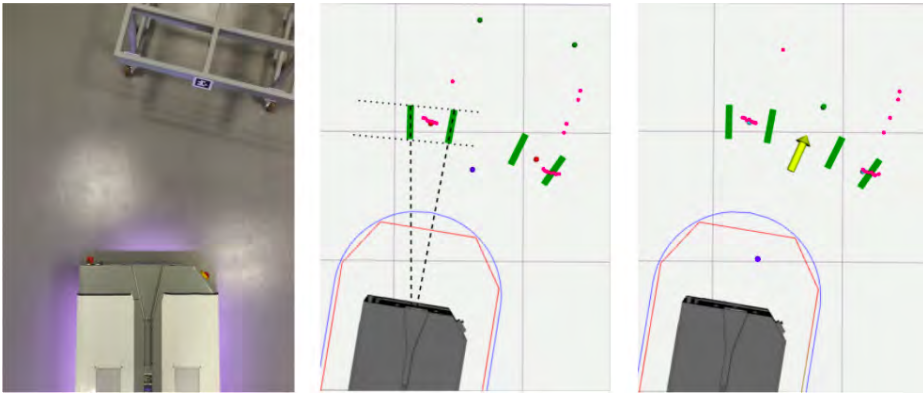
Rysunek 5.4. Główna maszyna stanów

Zastosowanie architektury złożonej z kontenerów różnego typu, umożliwiło wydzielenie oddzielnych podmaszyn odpowiedzialnych za zachowanie robota. Maszyna została zbudowana stanów, które połączono zapewniając logikę w prawidłowy przebieg realizacji kolejnych etapów wykonywanego zadania, a opracowany system komunikacji zagwarantował ich pełną kontrolę. Implementacja stanów pracujących równolegle pozwoliła uzyskać mechanizm przerwania realizowanych zadań, który jest niezbędny do poprawnej pracy układu. Utworzone stany, klucze oraz tranzycje zagwarantowały hermetyzację stanów platformy, w zależności od stanu środowiska oraz otrzymywanych komend. Natomiast opracowana metoda introspekcji, umożliwiła jednoznaczne określenie jej globalnego stanu. Zapewnienie przerwania podczas realizacji przemieszczenia pozwoliło na dynamiczne rozpoczęcie podłączania ładunku – w chwili jego wykrycia.

Najistotniejszym aspektem realizowanej pracy było opracowanie algorytmu lokalizacji oraz identyfikacji wózków transportowych, który zrealizowano na bazie informacji z skanerów laserowych w połączeniu z systemem wizyjnym (rysunek 5.5).

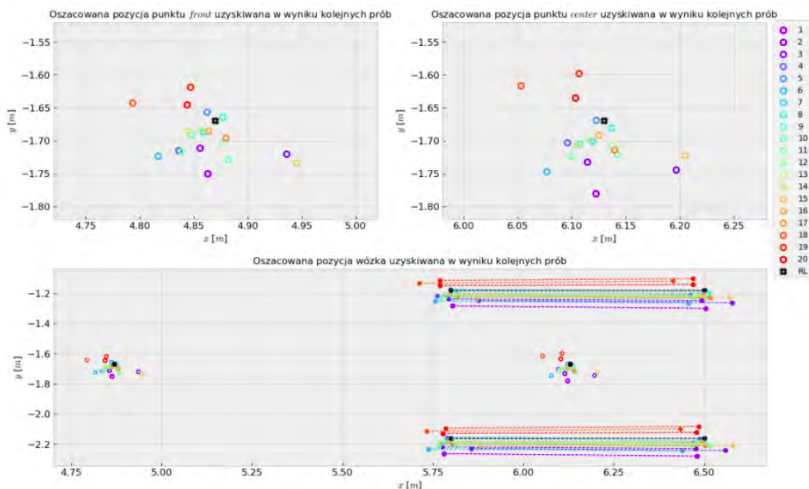
System wizyjny zastosowano w celu lokalizacji znaczników referencyjnych, umieszczonych na stosowanym wózku, na podstawie których przeprowadzana była dokładna estymacja pozycji ładunku w oparciu o dane odległościowe z skanerów. Zastosowanie znaczników *ArUco* zapewniło identyfikację poszukiwanego wózka, a opracowany algorytm lokalizacji dostarczał dane, które pozwoliły wystarczająco dokładnie oszacować jego pozycje. Platforma rozpoczyna realizację zadania podłączenia w chwili wykrycia poszukiwanego ładunku, następnie estymuje jego pozycje zbliżając się do niego. Na podstawie uzyskanej pozycji, platforma wykonuje pozycjonowanie na wózek oraz końcowy etap dokowania. Poprawność oraz skuteczność realizacji kolejnych etapów dokowania, została zwiększona dzięki opracowaniu regulacji na podstawie widocznych znaczników.

Układ sterowania został przebadany pod kątem autonomicznej realizacji poleceń, zdefiniowanych w oparciu o przyjęty system zarządzający. Uzyskane rezultaty potwierdziły poprawność pracy opracowanych modułów oraz zastosowanych algorytmów zapewniających realizację zadań w sposób autonomiczny. Badania miały przede wszystkim sprawdzić skuteczność oraz powtarzal-



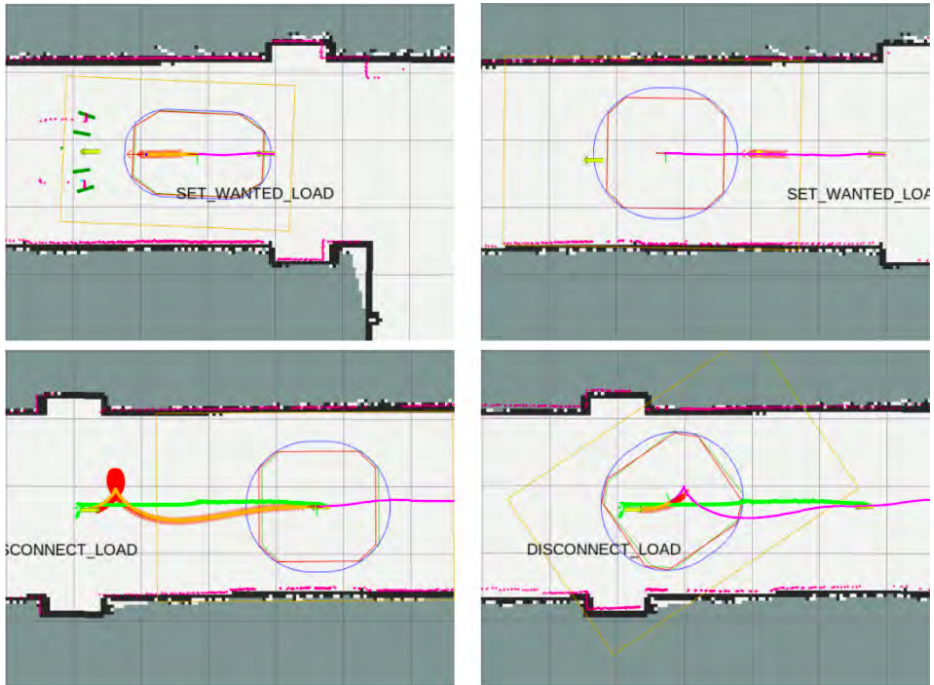
Rysunek 5.5. Wyznaczenie pozycji nóg wózka na podstawie lokalizacji znaczników *ArUco* oraz danych odległościowych z skanerów laserowych

ność zastosowanych metod lokalizacji i identyfikacji ładunku oraz jego podłączania. Wykonane eksperymenty w pełni to potwierdzają (rysunek 5.5).

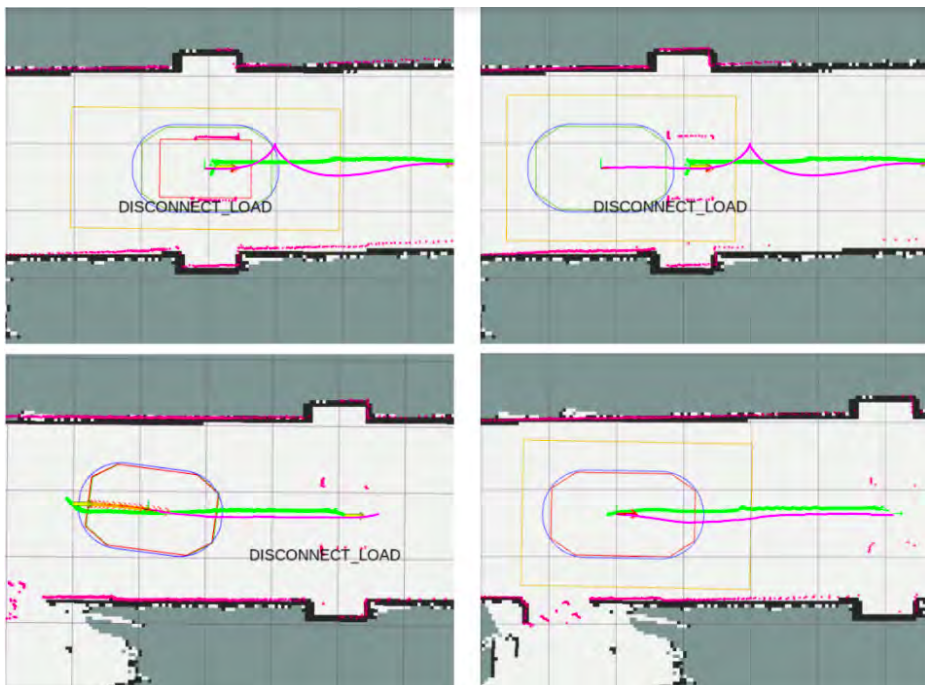


Rysunek 5.6. Porównanie uzyskiwanej estymacji lokalizacji punktów front oraz center definiujących pozycję ładunku w przestrzeni

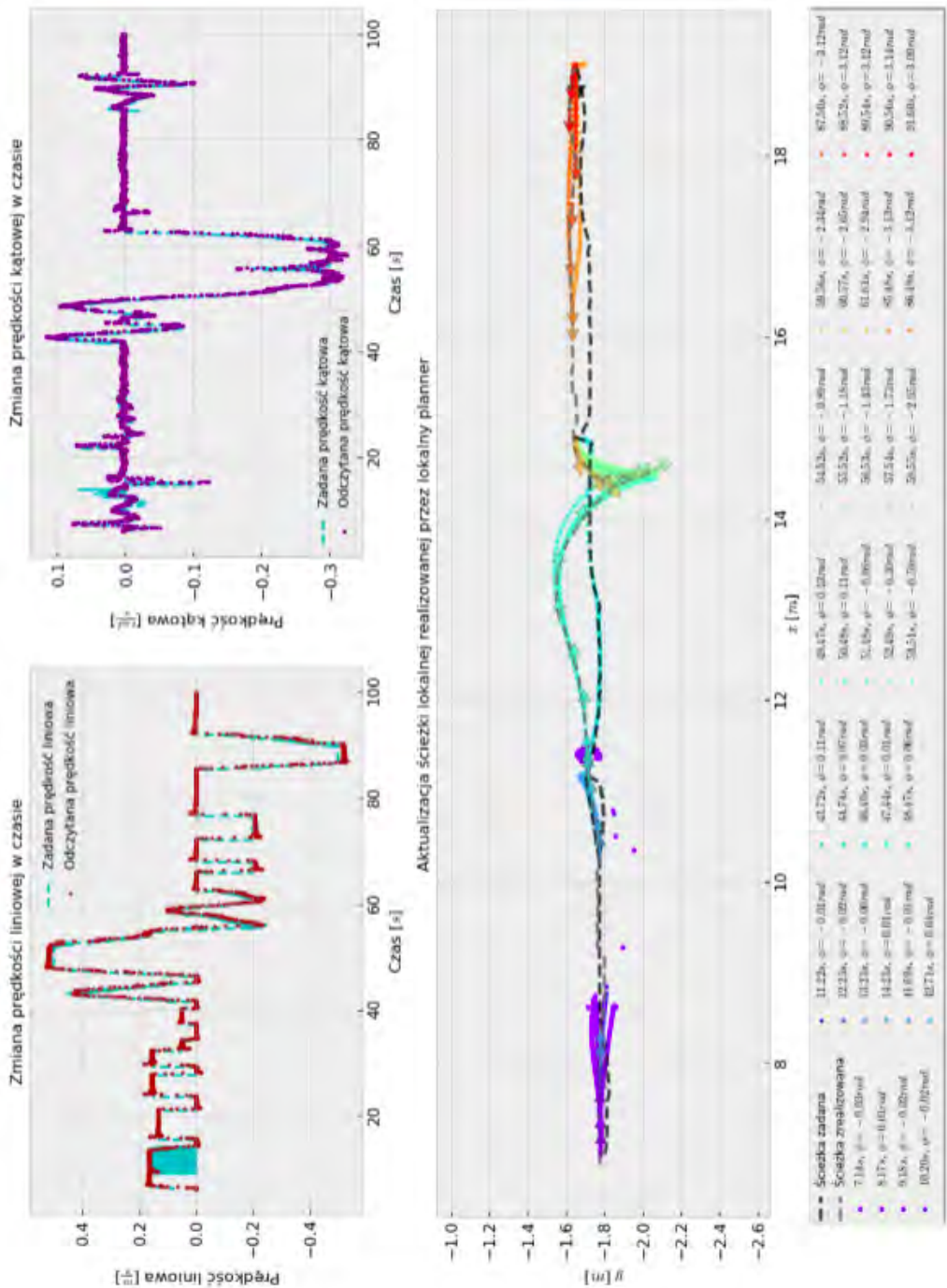
Platforma w każdym z przebadanych przypadków poprawnie lokalizowała poszukiwany ładunek, podłączała go oraz transportowała do określonej lokalizacji. Realizację przykładowego scenariusza przedstawiono na rysunkach 5.7–5.9. Zweryfikowano również poprawność dynamicznej zmiany parametrów w zależności od stanu podłączenia wózka, która wpływa na realizowane trajektorie i jest niezbędna dla poprawnego wykonywania zadania transportu. Platforma realizowała zadanie przemieszczenia w sposób płynny i zgodny z zadaną ścieżką, a pozycje docelowe były osiągane z zadaną dokładnością. Przeprowadzone badania potwierdzają, że opracowany układ może być z powodzeniem stosowany jako system transportu w dynamicznych środowiskach przemysłowych.



Rysunek 5.7. Lokalizacja, podłączanie oraz transport ładunku



Rysunek 5.8. Odłączanie ładunku oraz osiągnięcie pozycji końcowej



Rysunek 5.9. Zmiana lokalnej ścieżki oraz prędkości podczas realizacji scenariusza

Bibliografia

- [1] Almasri M., Elleithy K., Alajlan A., *Sensor fusion based model for collision free mobile robot navigation*, *Sensors*, 16, 1, 2016.
- [2] Aaaar O., Mokhtari I., Bengherabi M., *Pdcat: a framework for fast, robust, and occlusion resilient fiducial marker tracking*, *Journal of Real-Time Image Processing*, 18, 2021.
- [3] Azadeh K., De Koster R., Roy D., *Robotized and automated warehouse systems: Review and recent developments*, *Transportation Science*, 53, 2019.
- [4] Baglivo L., Biasi N., Biral F., Bellomo N., Bertolazzi E., Lio D., Cecco M., *Autonomous pallet localization and picking for industrial forklifts: A robust range and look method*, *Measurement Science and Technology*, 22, 2011, 085502.
- [5] Darvish K., Wanderlingh F., Bruno B., Simetti E., Mastrogiovanni F., Casalino G., *Flexible human-robot cooperation models for assisted shop-floor tasks*, *Mechatronics*, 51, 2018, 97–114.
- [6] De Ryck M., Versteijhe M., Debrouwere F., *Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques*, *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 2020, 152–173.
- [7] Fellan A., Schellenberger C., Zimmermann M., Schotten H.D., *Enabling communication technologies for automated unmanned vehicles in industry 4.0, [w:] 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) 2018*, 171–176.
- [8] Kim Y., Shin D., Lee J., Lee Y., Yoo H.J., *A 0.55 v 1.1 mw artificial intelligence processor with on-chip pvt compensation for autonomous mobile robots*, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, PP, 2017, 1–14.
- [9] Macenski S., Tsai D., Feinberg M., *Spatio-temporal voxel layer: A view on robot perception for the dynamic world*, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17, 2020, 172988142091053.
- [10] Mastrogiovanni F., Sgorbissa A., Zaccaria R., *How the location of the range sensor affects ekf-based localization*, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 68, 2012.
- [11] Mur-Artal R., Tardos J., *Orb-slam2: an open-source slam system for monocular, stereo and rgb-d cameras*, *IEEE Transactions on Robotics*, PP, 2016.

Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w identyfikacji uszkodzeń taśmy przENOŚnikowej

mgr inż. Aleksandra Rzeszowska

Automatyka i Robotyka

dr inż. Agata Kirjanów-Błażej

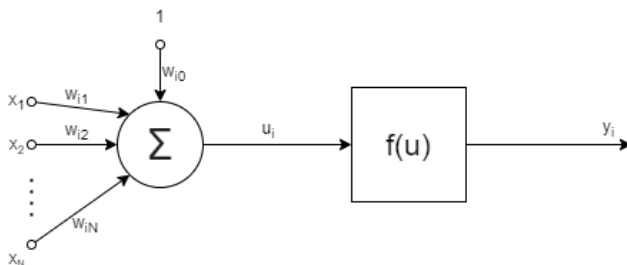
Katedra Systemów i Sieci Komputerowych

Celem pracy dyplomowej magisterskiej jest stworzenie kompletnego systemu pozwalającego na identyfikację uszkodzeń taśmy przENOŚnikowej z wykorzystaniem mechanizmów sztucznej inteligencji. W obręb niniejszej pracy wchodzi opracowanie założeń projektowych, przygotowanie danych do zastosowania sieci neuronowej, zaprezentowanie typu i struktury wybranej sieci neuronowej, implementacja sieci neuronowej w wybranym języku programowania, opracowanie scenariuszy badań i dobór odpowiednich parametrów sieci, przeprowadzenie testów poprawności zaimplementowanych rozwiązań oraz opracowanie wniosków. Analiza sygnałów korespondujących z uszkodzeniem taśmy przENOŚnikowej z wykorzystaniem mechanizmów sztucznej inteligencji jest innowatorskim pomysłem, dotychczas nieporuszonym przez badaczy, a jednym z wielu założeń przeprowadzenia badań opisywanych w ramach pracy magisterskiej było sprawdzenie możliwości zastosowania tego typu rozwiązania. Wejściowy zestaw danych jest niewielki, mimo to uzyskane wyniki wykazują wysoką skuteczność, porównywalną ze skutecznością rozpoznawania uszkodzeń przez doświadczonego operatora.

1. Wprowadzenie do sieci neuronowych

Sieci neuronowe znalazły swoje zastosowanie w informatyce dzięki rozwiązaniu zaproponowanemu przez neurofizjologa Warrena McCullocha oraz matematyka Waltera Pittsa w artykule *A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity* w 1943 roku [1, 2]. W tym artykule badacze przedstawili uproszczony model matematyczny działania neuronów w trakcie przeprowadzania skomplikowanych obliczeń wykorzystujących rachunek zdań oraz zaproponowali architekturę pierwszej sztucznej sieci neuronowej (model neuronu McCullocha-Pittsa). Podążając za ideą działania neuronów w ludzkim mózgu powstało wiele modeli neuronów oraz wiele metod ich uczenia. Modele te, bardziej bądź mniej, odzwierciedlają własności rzeczywistej komórki nerwowej. Każde z zaprezentowanych podejść do modelowania sieci neuronowej wymaga przyjęcia odpowiedniego sposobu uczenia się sieci, wśród których wyróżnia się uczenie z nauczycielem (nazywane też uczeniem pod nadzorem) oraz uczenie bez nauczyciela. Metoda uczenia z nauczycielem wymaga znajomości zarówno sygnałów wejściowych, jak i pożądaných odpowiedzi na dane wejście, a sam dobór wag jest prowadzony w taki sposób, by aktualny sygnał wyjściowy neuronu

na zadane pobudzenie był jak najbliższy oczekiwanemu. Jeśli nie jest możliwe zapewnienie znajomości pożądanych odpowiedzi na zadane wejście, pozostaje wybór strategii uczenia sieci bez nadzoru, gdzie dobór wag odbywa się na innej zasadzie niż w uczeniu z nauczycielem, wykorzystując konkurencję między neuronami (model typu Winner Takes All lub Winner Takes Most) lub korelację sygnałów uczących (model neuronu Hebb'a). Jednym z najpopularniejszych modeli neuronów jest model neuronu sigmoidalnego, który stanowi modyfikację tradycyjnego modelu McCullocha-Pittsa, w którym skokowa funkcja aktywacji zastąpiona została funkcją sigmoidalną. Rysunek 6.1 obrazuje ogólny schemat takiego podejścia.



Rysunek 6.1. Model neuronu sigmoidalnego

Sygnał wyjściowy generowany przez tego typu neuron można opisać matematyczną zależnością:

$$y_i = f \left(\sum_{j=1}^N w_{ij} x_j + w_{i0} \right) \quad (6.1)$$

Sygnał wyjściowy przedstawiony na równaniu (6.1) jest wartością funkcji aktywacji dla argumentu będącego sygnałem sumacyjnym. Uczenie tego typu neuronu należy do działu uczenia z nauczycielem, a najprostszą metodą uczenia w tym przypadku jest tzw. *reguła perceptronu*, zgodnie z którą najpierw ustala się arbitralnie postać macierzy wag (najczęściej tworzą ją liczby z rozkładu jednostajnego), następnie sieci pokazuje się wektor uczący i oblicza wartość sygnału wyjściowego produkowanego przez nią. W kolejnym etapie wartość aktualnego sygnału wyjściowego porównuje się z oczekiwaną wartością wyjścia, a na podstawie tej różnicy odpowiednio aktualizuje się wagi. W następnym kroku prezentuje się nowy wektor uczący, ponawiając cały proces wielokrotnie na wszystkich próbkach do momentu, aż uzyska się minimalizację odpowiednio zdefiniowanej funkcji celu.

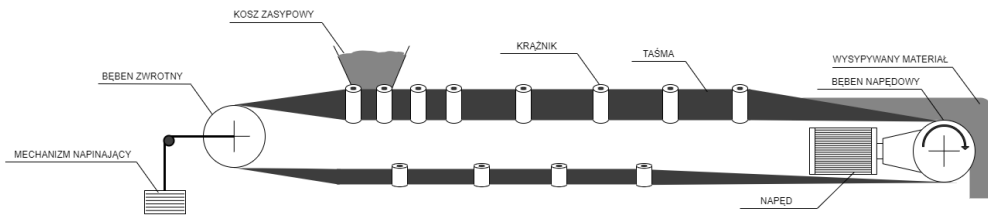
Warto w tym miejscu również zauważyć, że przyjmowana w procesie uczenia neuronu sigmoidalnego metoda gradientowa nie gwarantuje osiągnięcia minimum globalnego. W przypadku, gdy poszukiwane jest minimum funkcji wielomodalnej, znalezione minimum może być jedynie minimum lokalnym, odległym od minimum globalnego. Aby pominąć ograniczenie związane z przyciąganiem do określonego minimum lokalnego należy zastosować bardziej skomplikowaną procedurę aktualizacji wag niż prosty algorytm największego spadku. Jednym ze sposobów jest uwzględnienie w procesie aktualizacji wag również aktualnego trendu zmian wag.

Elastyczność sieci neuronowej z dużą ilością parametrów do optymalizacji jest jedną z jej największych wad — wiele parametrów bowiem należy dostroić, by uzyskać optymalny wynik. W procesie dostrajania hiperparametrów możliwe jest obranie jednej z wielu dostępnych opcji — można sprawdzić wszystkie możliwe kombinacje hiperparametrów i wybrać najlepszy możliwy zestaw, lub parametry stroić po kolei, startując od pewnego wyjściowego zestawu parametrów i w każdym kroku optymalizacji zmieniać tylko jeden parametr, wybierając najlepszą opcję używaną w optymalizacji kolejnych hiperparametrów. Drugie rozwiązanie stanowi kompromis pomiędzy czasem optymalizacji a jakością rozwiązania.

2. Bezinwazyjna diagnostyka taśm przenośnikowych

Przenośniki taśmowe są urządzeniami powszechnie stosowanymi na świecie od ponad dwustu lat, a jednym z ich najczęstszych zastosowań jest transport w kopalniach, gdzie stanowią podstawową formę transportu, uprzednio wypierając powszechnie stosowany w kopalniach podziemnych transport szynowy [3]. Transport taśmowy jest powszechnie stosowany, głównie dzięki szeregowi zalet, z jakimi się wiąże — generuje niskie koszty jednostkowe transportu, nie powodując przy tym zanieczyszczeń. Mimo tym niskim kosztom jednostkowym, koszt transportu taśmowego stanowi jedną z głównych źródeł kosztów w kopalniach (w górnictwie odkrywkowym drugie z kolei źródło, po płacach). [4]

Przenośnik taśmowy jest środkiem transportu o ograniczonym zasięgu, który pracuje w ruchu ciągłym, transportując nosiwo od bębna zwrotnego do napędowego. W trakcie pracy przenośnika taśmowego, taśma przewija się przez oba bębny, zmieniając na nich kierunek biegu. Pomiedzy bębnami, na całej długości taśma podpierana jest przez zestawy kraźników. Nad taśmą przenośnikową, w okolicy bębna zwrotnego znajduje się kosz zasypowy, którego ułożenie i kształt gwarantuje poprawne ułożenie wysypywanego nosiwa na taśmie przenośnikowej i zapobiega jego wysypywaniu się poza obszar taśmy. Urobek przemieszczany jest wzdłuż taśmy do bębna zrzutowego (napędowego), gdzie zmienia się kierunek biegu taśmy, a nosiwo zostaje zrzucone poza obszar przenośnika taśmowego [5]. Rysunek 6.2 przedstawia schemat przenośnika taśmowego wykorzystywanego w górnictwie.

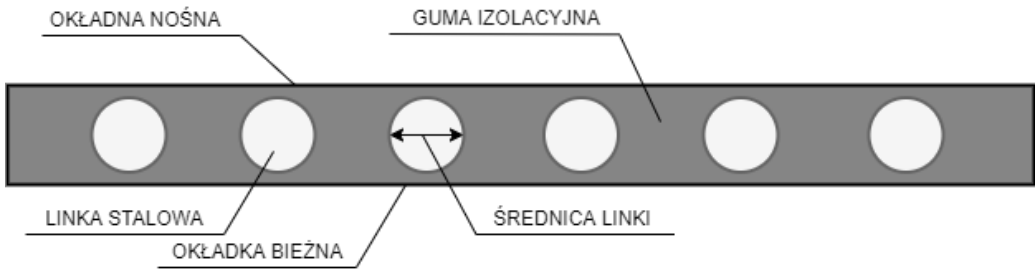


Rysunek 6.2. Schemat budowy przenośnika taśmowego

Najważniejszą i ulegającą najczęstszym uszkodzeniom częścią przenośnika taśmowego jest sama taśma przenośnikowa. Szacuje się, że jej koszt stanowi około 60% kosztu całego przenośnika taśmowego [4]. Stawiane taśmom przenośnikowym żądania wymagają, by taśma była produktem wysokojakościowym, co z kolei przekłada się na jej koszt. Tym bardziej tak istotna jest jej diagnostyka i szybkie wykrywanie potencjalnych uszkodzeń jeszcze w momencie, gdy możliwe jest ich usunięcie, bowiem potencjalna awaria przenośnika taśmowego generuje koszt związany nie tylko z jej naprawą, ale również związany z wymuszonym przestojem w transporcie nosiwa.

Sama taśma przenośnikowa składa się z rdzenia, okładek i obrzeża, które spełniają różne zadania. Rdzeń ma za zadanie przenosić obciążenia — otoczony jest on okładkami i obrzeżami, a czasem również wzmocniony dodatkowymi warstwami ochronnymi, zwiększającymi odporność taśmy na przebicie i przecięcie. Najwyższą wytrzymałość przy stosunkowo niewielkich wydłużeniach wzdłużnych można osiągnąć dzięki zastosowaniu taśm z linkami stalowymi. W tego typu taśmach rdzeń stanowią ułożone równoległe do osi taśmy linki stalowe zawulkanizowane w gumie [5]. Rysunek 6.3 przedstawia przekrój poprzeczny przykładowej taśmy z linkami stalowymi wraz z oznaczeniem najważniejszych jej składowych.

Stworzony na Politechnice Wrocławskiej system *DiagBelt* wykorzystuje metodę magnetyczną do wizualizacji potencjalnych miejsc uszkodzeń rdzenia taśmy przenośnikowej. Ze względu na fakt, że rdzeń taśmy składa się z zatopionych w gumie linek stalowych, do lokalizacji potencjalnych uszkodzeń wykorzystać można pole magnetyczne. Idea działania tej metody opiera



Rysunek 6.3. Przekrój poprzeczny przez taśmę z linkami stalowymi

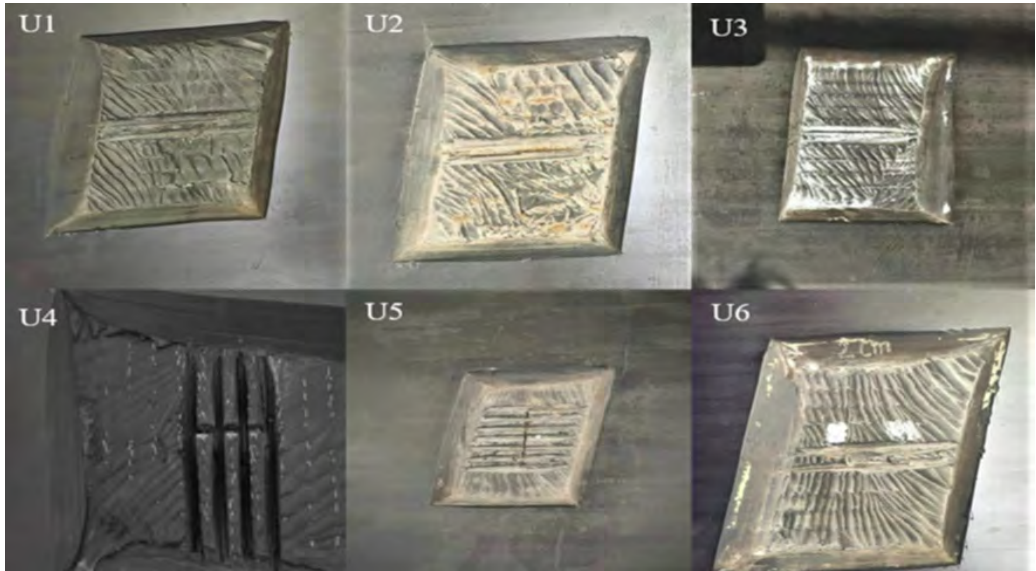
się na wykrywaniu zmiany pola magnetycznego, generowanego przez wcześniej namagnesowane linki stalowe, na których występuje uszkodzenie lub łączenie taśmy. W ramach tej metody w badanym obiekcie wzbudza się pole magnetyczne o dostatecznie dużym strumieniu indukcji i poszukuje się magnetycznych pól rozproszenia (miejsz wycieku pola magnetycznego). Wizualizacja pól rozproszenia możliwa jest z wykorzystaniem proszku ferromagnetycznego, sondy Halla lub taśmy magnetycznej [6]. Dzięki temu, że system ten zawiera głowicę pomiarową z wieloma cewkami rejestrującymi zmiany pola magnetycznego, możliwe jest zarejestrowanie nawet niewielkich uszkodzeń, wynikających z uszkodzenia pojedynczej linki. Sam system nie mierzy wartości pola magnetycznego, a jego zmianę, dzięki czemu uzyskany obraz jest skwantyzowany do trzech wartości: -1 , 0 lub 1 , co umożliwia wizualizację otrzymanego sygnału na dwuwymiarowym rysunku. [3, 6]

3. Projekt

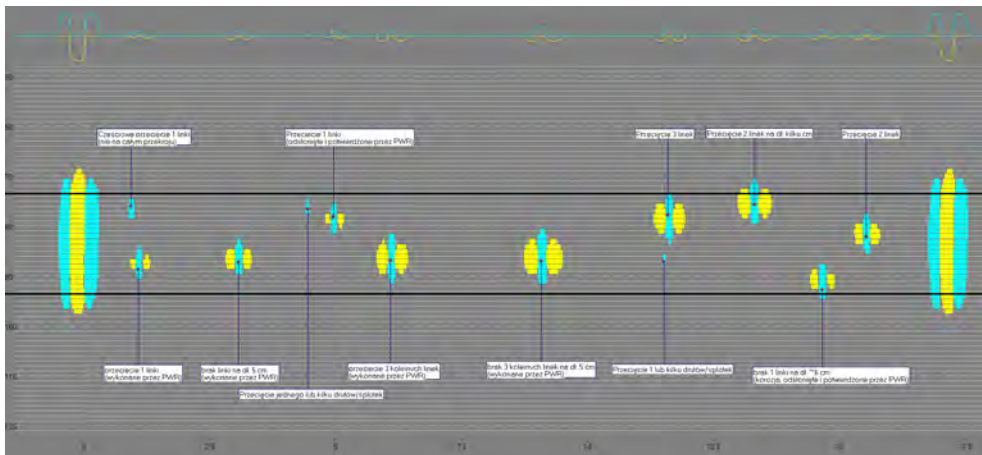
Zestaw danych pomiarowych przygotowanych do analizy w ramach niniejszego projektu uzyskany został przy wykorzystaniu metody magnetycznej i systemu *DiagBelt* pracującego na taśmie przENOŚNIKOWEJ, na której uszkodzenia wykonane zostały sztucznie. Stopień i tempo zużycia taśm przENOŚNIKOWYCH zależy od wielu czynników, które wymienione są w pracy [7]. Wśród nich wyróżnia się takie jak twardość, wielkość i kształt transportowanych materiałów, specyfika miejsca transportu oraz długość i wiek taśmy przENOŚNIKOWEJ, a także prędkość, z jaką taśma pracuje. Niektóre z tych czynników powodują uszkodzenia okładki taśmy, a niektóre jej rdzenia. Na rysunku 6.4 pokazany został rzeczywisty wygląd uszkodzeń rdzenia taśmy przENOŚNIKOWEJ po odsłonięciu okładki nośnej. Defekty widoczne na taśmie wykonano ręcznie do potrzeb badawczych (Częściowe uszkodzenie linki stalowej (20% (U1) i 50% (U2)), całkowite przecięcie jednego linki stalowej (U3), przecięcie trzech linek (U4) i sześciu linek (U5) oraz brak jednej linki na długości 20 mm (U6)). Analiza uszkodzeń z wykorzystaniem metod statystycznych wykonana została w ramach badań, których rezultaty opisano w pracach [8, 9].

W ramach analizowanych danych wyróżniono 7 klas uszkodzeń — przecięcie kilku drutów/wspłotek (0), przecięcie jednej linki (1), przecięcie trzech linek (2), brak jednej linki (3), brak dwóch linek (4), brak trzech linek (5), łączenie taśmy (6). Jeden cykl pomiarowy danych uzyskiwanych w systemie *DiagBelt* przedstawiono na rysunku 6.5, na którym kolorem niebieskim oznaczono wartość ujemną, zaś kolorem żółtym dodatnią oraz ręcznie opisano uszkodzenia.

Dane pomiarowe odbierane przez system *DiagBelt* tworzą chmury punktów, z których każdy może przyjmować jeden z trzech stanów — $-1, 0$ lub 1 . Urządzenie pomiarowe odczytuje sygnał na wielu kanałach rozłożonych równomiernie wzdłuż szerokości taśmy. Dzięki przemieszczaniu się taśmy przENOŚNIKOWEJ pod głowicą magnesującą i pomiarową możliwe jest uzyskanie pełnego obrazu stanu taśmy przENOŚNIKOWEJ. Mnogość kanałów pomiarowych gwarantuje uzyskanie sy-



Rysunek 6.4. Rzeczywisty wygląd uszkodzeń



Rysunek 6.5. Jeden cykl pomiarowy analizowanych danych

gnału na całej szerokości taśmy, a jej ruch pozwala na zeskanowanie całej długości. Informacje o uszkodzeniach w postaci danych (x, y) zostały wstępnie przetworzone z wykorzystaniem języka programowania *Python*. W pierwszym kroku wczytane zostały dane zawarte w pliku csv generowanym w programie *DiagBelt*. Dane te zawierają współrzędną położenia x , ciąg wartości sygnałowych ($-1, 0$ lub 1) oraz sumę kontrolną. W kolejnym kroku odnaleziono zostały chmury powstałych punktów. Ze względu na fakt, że w ramach niniejszego opracowania badana jest płytka sieć neuronowa, niezbędne było wyciągnięcie istotnych cech, które zostaną następnie podane na wejście sieci neuronowej.

Wyciągając 14 parametrów (pole, liczba kanałów, szerokość, przesunięcie środka ciężkości dla każdego z trzech podobszarów oraz liczba kanałów i szerokość chmury składającej się na jedno uszkodzenie), stworzono bazę wejściową dla sieci neuronowej. Ilość wykrytych potencjalnych miejsc uszkodzenia lub łączenia taśmy przENOśnikowej to 98 próbek.

Sieć neuronowa wykorzystana do przeprowadzenia zadania klasyfikacji danych pomiarowych opisanych powyżej zaimplementowana została z użyciem języka programowania *Python* oraz interfejsu *Keras*. *Keras* jest interfejsem API, z pomocą którego można w łatwy sposób budować różne rodzaje sieci neuronowych, trenować je i testować, a pracę ułatwia szeroko rozbudowana dokumentacja. *Keras* w swoim działaniu wykorzystuje bibliotekę *TensorFlow* i został upubliczniony w marcu 2015 roku w postaci otwartego kodu źródłowego.

4. Analiza wpływu parametrów sieci

Celem zoptymalizowania działania sieci neuronowej zmieniano szereg parametrów, definiujących strukturę tworzonej sieci oraz algorytm jej uczenia. W uczeniu sieci zastosowana została regularyzacja poprzez wczesne zatrzymanie, która polega na zatrzymaniu procesu uczenia sieci neuronowej w sytuacji, gdy błąd na zestawie walidującym zacznie rosnać. Aby nie przerywać procesu w momencie, gdy błąd ten nieznacznie wzrośnie, a w następnej epoce spadnie, ustawiono parametr o nazwie *cierpliwość* na wartość 10 — to oznacza, że wartość odczytywanego błędu może rosnać przez 10 kolejnych epok, zanim uczenie zostanie zatrzymane. Do przeprowadzenia badań, które pozwolą na porównanie skuteczności sieci utworzone zostały 3 zestawy danych podzielonych na zestaw testowy oraz treningowy. Każdy zestaw treningowy zawiera 91 próbek, zaś zestaw testowy 7 — po jednej dla każdej z reprezentowanych klas. Ze względu na fakt, że działanie sieci neuronowej rozpoczyna się każdorazowo od losowo wybranych wartości wag, eksperyment dla każdego z zestawów parametrów powtórzono 3-krotnie, a wyniki uśredniono. W każdym przypadku działania sieci uznano, że wartości generowane przez sieć na wyjściu, które są mniejsze, bądź równe 0,5 oznaczają wartość 0, zaś te, które są większe niż 0,5 oznaczają wartość 1. Tak określona decyzyjność sieci pozwala na wyznaczenie macierzy pomyłek, z której możliwe jest odczytanie klas, dla których zostaje podjęta decyzja oraz zidentyfikowanie, z którą z pozostałych klas myłona jest dana reprezentacja.

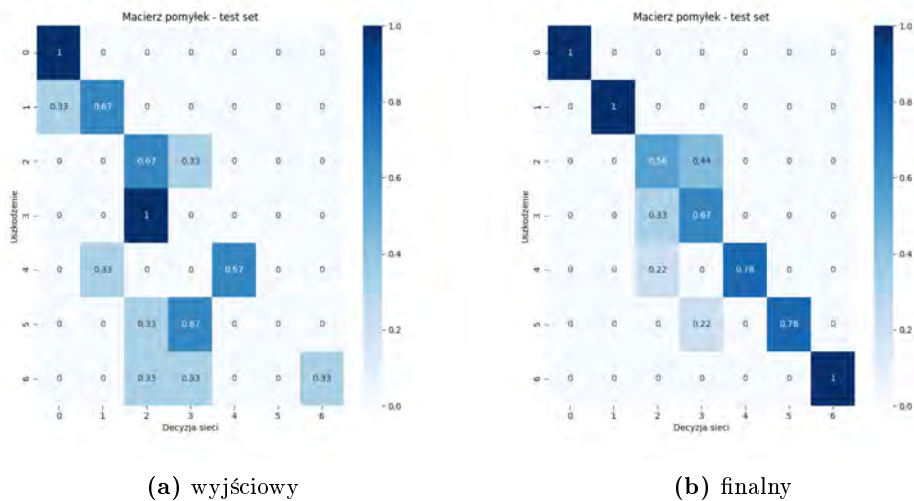
Przeprowadzane badania zakładały modyfikację tylko jednego parametru w danym badaniu, a następnie wybór najlepszej wartości i użycie jej w badaniach kolejnych parametrów. Zestawem startowym był zestaw z następującymi parametrami:

liczba warstw ukrytych	1
liczba neuronów w warstwie ukrytej	10
funkcja aktywacji w warstwie ukrytej	sigmoidalna
funkcja aktywacji w warstwie wyjściowej	sigmoidalna
funkcja straty	kategoryczna entropia krzyżowa
optymalizator	Nadam
cierpliwość	10
maksymalna liczba epok uczenia się	200
rozmiar zbioru walidującego	0, 10
liczba próbek w serii	1

Po przeprowadzeniu badań można określić finalną postać parametrów, które pozwalają na osiągnięcie najlepszego wyniku działania algorytmu. Poniżej zebrane zostały wartości dobranych parametrów.

liczba warstw ukrytych	2
liczba neuronów w warstwie ukrytej	32 – 8
funkcja aktywacji w warstwie ukrytej	sigmoidalna — sigmoidalna
funkcja aktywacji w warstwie wyjściowej	softmax
funkcja straty	kategoryczna entropia krzyżowa
optymalizator	RMSprop
cierpliwość	10
maksymalna liczba epok uczenia się	200
rozmiar zbioru walidującego	0, 10
liczba próbek w serii	2

Oprócz przebiegów błędu w procesie uczenia sieci, sprawdzono również jej zdolności klasyfikacyjne po zakończeniu procesu uczenia. Rysunek 6.6 przedstawia macierz pomyłek uzyskaną po zakończonym procesie uczenia dla finalnego oraz wyjściowego zestawu parametrów na zestawie testowym.



Rysunek 6.6. Macierz pomyłek — zestaw testowy

5. Podsumowanie

Bezinwazyjna diagnostyka taśm przesyłkowych stosowana w wykrywaniu uszkodzeń jej rdzenia pozwala na znaczne ograniczenie kosztów związanych z wymianą taśmy, a także ocenę dalszej przydatności i stopnia jej zużycia w czasie, a tym samym zwiększenia bezpieczeństwa w miejscu, gdzie taśma przesyłkowa znajduje swoje zastosowanie. W zależności od tego, w jakim miejscu znajduje się przesyłnik taśmowy, jakiego rodzaju urobek transportuje czy jaka jest jego długość,

taśma może zużywać się w różnym tempie, choć proces zużycia jest nieodłącznym elementem pracy urządzenia.

Dane z magnetycznych sensorów doskonale nadają się do dalszego przetwarzania w poszukiwaniu potencjalnych uszkodzeń, a zapis danych w postaci dwuwymiarowej ułatwia pracę i późniejszą weryfikację przetworzonych danych. Mimo wszystko jednak, do prawidłowego rozpoznawania potencjalnie występujących problemów ręcznie wymagane jest dobre przeszkolenie operatora tak, by był wyczulony na najbardziej charakterystyczne punkty świadczące o zakwalifikowaniu danego obszaru do konkretnej kategorii. Dlatego też warto zastanowić się nad wprowadzeniem mechanizmów sztucznych sieci neuronowych do rozwiązania takiego zadania.

Dane pomiarowe analizowane w ramach niniejszego badania pochodzą z taśmy zainstalowanej na przenośniku, na której wykonano uszkodzenia w sposób ręczny. Sygnał zarejestrowano jedynie przy jednym ustawieniu parametrów urządzenia DiagBelt (prędkość taśmy, czułość czujników, odległość głowicy pomiarowej od taśmy). Korzystając z analogicznych danych powstało kilka publikacji ([8–10]), pozwalających na identyfikację uszkodzeń taśmy przenośnikowej. W części z nich przeprowadzona została szeroka analiza statystyczna, umożliwiająca zbudowanie modelu statystycznego, ale użyto też sztucznych sieci neuronowych.

Aby zminimalizować ilość optymalizowanych hiperparametrów, warto rozważyć ekstrakcję najważniejszych cech opisujących każde uszkodzenie. W ramach przedstawionych badań z chmury punktów opisującej dane uszkodzenia wyciągniętych zostało 14 wartości — trzy pierwsze opisują pola trzech podobszarów składowych, trzy kolejne liczbę kanałów, na których sygnał danego podobszaru został zarejestrowany, ilość kanałów, na których rejestrowany był sygnał całego uszkodzenia, szerokość uszkodzenia oraz sześć wartości opisujących położenie środka ciężkości podobszaru względem środka ciężkości opisującego go prostokąta.

Badania przeprowadzane w celu optymalizacji działania sieci przeprowadzone zostały w sposób pozwalający na uniknięcie generowania wielu rozwiązań — ustalono zestaw początkowy parametrów, a następnie w jednym badaniu zmieniano tylko jedną wartość i wynikającą z przeprowadzonego badania najlepszą wartość przyjmowano do dalszych analiz. Wybrany sposób takiego przeprowadzania działań jest kompromisem między czasem i ilością przeprowadzanych badań a możliwościami optymalizacyjnymi. Może okazać się jednak, że istnieje inny dobór parametrów, który gwarantuje lepsze rozwiązanie, a nie został poddany procesowi badawczemu.

Ze względu na fakt, że wagi przypisane do neuronów inicjalizowane są w sposób losowy, niezbędne jest przeprowadzenie kilkukrotnego eksperymentu mającego na celu wyeliminowanie własności stochastycznych. W ramach badań przeprowadzonych w projekcie eksperymenty badawcze wykonane zostały trzykrotnie, a wyniki uśrednione.

Porównanie uzyskanych wyników po i przed optymalizacją działania sieci najlepiej przedstawiają macierze pomyłek przedstawione na rysunku 6.6. Ze względu na to, że poszczególne klasy w zbiorze testowym były równoliczne, można określić ilość błędnie sklasyfikowanych uszkodzeń. Zbiór testowy zawierał 4 podzestawy, trening uruchomiony był trzykrotnie dla tego samego zestawu parametrów. Przed optymalizacją skuteczność sieci wynosiła 0,48%, zaś po optymalizacji zwiększyła się do 83% poprawnych klasyfikacji. Uzyskana skuteczność nie jest duża, ponieważ sieci neuronowe zazwyczaj generują rozwiązanie o skuteczności ponad 90%, nie można jednak zapominać, że uzyskany wynik wynika z trenowania sieci na bardzo małej ilości próbek (91).

Analiza macierzy pomyłek pokazuje, że zaprojektowana i zoptymalizowana sieć nie zawsze radzi sobie z prawidłową klasyfikacją uszkodzeń 2 oraz 3 — rozwiązaniem pozwalającym na zwiększenie skuteczności byłoby z pewnością powiększenie zbioru uczącego.

Bibliografia

- [1] Géron A., *Uczenie maszynowe z użyciem Scikit-Learn i TensorFlow*, Helion SA, Gliwice, Polska 2020.
- [2] McCulloch W.S., Pitts W., *A logical calculus of ideas immanent in nervous activity*, Bulletin of Mathematical Biophysics, 5, 4, 1943, 115–133.
- [3] Błażej R., *Ocena stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi*, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska 2018.
- [4] Neumann T., *Conveyor belt group. mining 4.0 - our digital journal*.
- [5] Hardygóra M., Żur T., *Przenośniki tasmowe w górnictwie*, Wydawnictwo Naukowe 'Śląsk', Katowice, Polska 1996.
- [6] Kirjanów A., *Model rozwoju uszkodzeń rdzenia taśm przenośnikowych z linkami stalowymi*, rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska 2018.
- [7] Webb C., Sikorska J., Nazim R.K., Hodkiewicz M., *Developing and evaluating predictive conveyor belt wear models*, Data-Centric Engineering, 1, 2020, e3.
- [8] Olchówka D., Rzeszowska A., Jurdziak L., Błażej R., *Statistical Analysis and Neural Network in Detecting Steel Cord Failures in Conveyor Belts*, Energies, 14, 11, 2021, 1–11.
- [9] Olchówka D., Jurdziak L., Błażej R., Kozłowski T., *Examination of the steel cord belts core damage condition using the diagbelt system. part 1. determining the number of steel cord cuts in damage. badanie stanu uszkodzeń rdzenia taśm z linkami stalowymi systemem diag-belt. część 1. określanie liczby przeciętych linek w uszkodzeniach.*, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 1, 2021, 6–13.
- [10] Kirjanów-Błażej A., Rzeszowska A., *Conveyor belt damage detection with the use of a two-layer neural network*, Applied Sciences, 11, 12, 2021.

Część II

Wydział Elektryczny

Zdalnie sterowany robot przeznaczony do instalacji światłowodów

inż. Szymon Niczyporuk

Automatyka i Robotyka

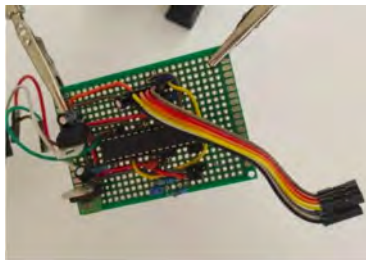
dr inż. Robert Czechowski

Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki

Prace inspekcyjne oraz instalacyjne w rurach wodociągowych i kanalizacyjnych prowadzone bezpośrednio przez człowieka to procesy bardzo trudne, kosztowne i długotrwałe. Wykorzystanie zdalnie sterowanych robotów zapewnia bezpieczeństwo i skraca ich czas. Celem pracy było stworzenie zdalnie sterowanego pojazdu przeznaczonego do instalacji światłowodów w rurach i przepustach o utrudnionej dostępności. Należało zaprojektować i wykonać mały pojazd kołowy wyposażony w ruchomą kamerę z oświetleniem sterowany za pomocą dowolnego kontrolera.

1. Realizacja założeń

Do projektu wykorzystane zostały mikrokontrolery AVR. *ATmega88PA-PU DIP* ze względu na stosunkowo małe wymiary oraz 10-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy odpowiadała za pracę kontrolera, natomiast *ATmega16A-PU* umieszczona została w pojeździe, ponieważ posiada cztery kanały *PWM*. Do programowania wykorzystane zostało środowisko *Eclipse*. Zastosowany programator sprzętowy typu USB komunikuje się z mikrokontrolerem z wykorzystaniem interfejsu *SPI*. Układy umieszczone zostały na płytkach uniwersalnych z wykorzystaniem techniki montażu przewlekane (THT).



(a) układ kontrolera

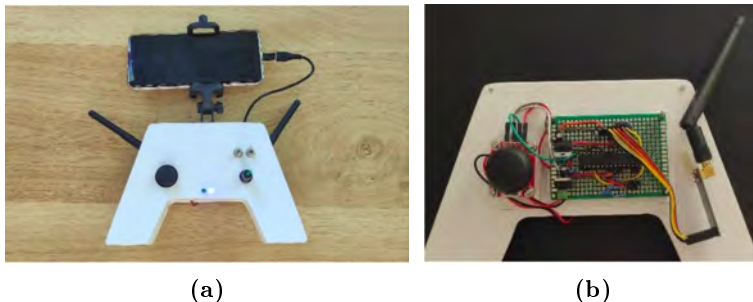


(b) układ robota

Rysunek 7.1. Montaż THT

Kontroler zawiera następujące elementy:

- joystick – służy do sterowania ruchem pojazdu,
- potencjometr – przesyła sygnał kontrolujący pozycję kamery,
- dwa przełączniki – pierwszy załącza oświetlenie, drugi sekwencję przybijania światłowodu,
- dwie diody LED – informują o procesie przybijania i przesyłają dane,
- uchwyt na telefon,
- odbiornik *FPV* – obraz z kamery,
- mikrokontroler *ATmega88PA*,
- nadajnik radiowy *nRF24L01* – komunikacja z robotem.



Rysunek 7.2. Zaprojektowany kontroler

Do budowy pojazdu wykorzystana została platforma gąsienicowa z napędem w postaci dwóch silników prądu stałego z przekładnią 87:1. Ich prędkość regulowana jest za pomocą modulacji szerokości impulsów (*PWM*). W celu zapewnienia zmiany kierunku obrotów wykorzystany został tzw. „mostek H”. Poprzez załączenie pierwszej pary kluczy tranzystorowych możemy uzyskać przepływ prądu w jednym, natomiast załączenie drugiej pary prowadzi do przepływu prądu w przeciwnym kierunku. Podczas konstrukcji obrotowej platformy z kamerą należało zapewnić obrót w zakresie 0 – 360°, aby umożliwić obserwację w każdym kierunku. Co więcej istotne było dobre pozycjonowanie i wysoka kontrola ruchu. W tym celu wykorzystany został silnik krokowy sterowany metodą pełnokrokową typu *full step*. Tym razem jednak nie generowano sygnału *PWM*, a odpowiednią sekwencję impulsów elektrycznych.

Pozycja startowa (stan = 7)		ATmega88 ADC (445,504) wynik = 7	NRF24L01 data[3] = 7 	ATmega16 pozycja = 7 stan - pozycja = 0	
Obrót kamery w lewo z pozycji startowej (stan = 7)		ATmega88 ADC (518,577) wynik = 8	NRF24L01 data[3] = 8 	ATmega16 pozycja = 8 stan - pozycja = -1	
Obrót kamery w prawo z pozycji poprzedniej (stan = 8)		ATmega88 ADC (372,431) wynik = 6	NRF24L01 data[3] = 6 	ATmega16 pozycja = 6 stan - pozycja = 2	

Rysunek 7.3. Zasada działania platformy

Zapewnienie wizji w rurach i przepustach zrealizowane zostało przy pomocy trzech głównych elementów:

- Mini odbiornika *FPV 5,8GHz* na telefon – obraz na telefonie,
- Kamery *FPV LST-S2 OSD*,
- Modułu z białą diodą power LED.

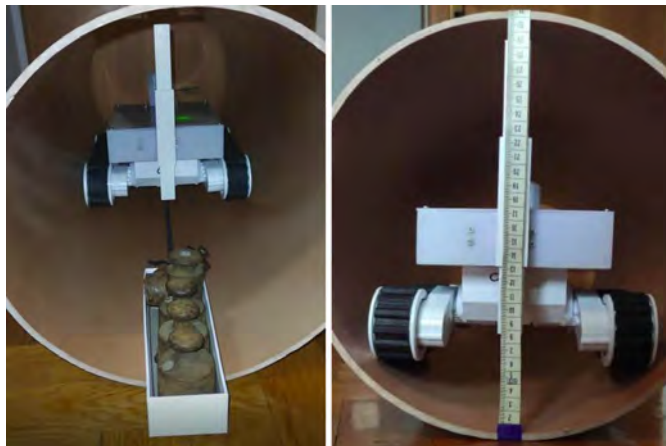
Odbiornik *FPV* wraz z kamerą komunikują się bezprzewodowo, a dioda LED zapewnia odpowiednie oświetlenie. Oprócz układu sterowania należało zaprojektować mechanizm robota pozwalający na instalację światłowodu. Do celu symulacji tego procesu skonstruowane zostało wysuwane ramię. Przekształcenie ruchu obrotowego na liniowy odbywa się poprzez sprzężenie koła zębatego przymocowanego do wału silnika z listwą zębatą. W projekcie wykorzystany został serwomechanizm do pracy ciągłej. Posiada on duży moment oraz pozwala na dokładną kontrolę ruchu.

2. Wyniki badań

• Badanie maksymalnej masy ciągniętego balastu

Badanie to przeprowadzone zostało wewnątrz rury kanalizacyjnej PCV o średnicy 300 mm. Do pojazdu przyłączony został pojemnik o wadze 9 g, w którym umieszczane były obciążniki wagowe. Balast symuluje ciężar i opór linki oraz światłowodu. Przy obciążeniu 2,5 kg widoczne było zmniejszenie prędkości przemieszczania się, dlatego następnie ciężar był zwiększany sukcesywnie o 10 gram, aż do momentu, gdy pojazd nie potrafił przeciągnąć balastu. Zgodnie z danymi z karty katalogowej firmy *BiTfiber*, przyjmując najlżejszą wersję kabla światłowodowego, 2,5 kilograma odpowiada 50 metrom kabla *Z-XOTKtsd*. Jest to połowa maksymalnego zasięgu modułów radiowych zastosowanych w projekcie.

WYNIK: 2559 gramów.



Rysunek 7.4. Badanie masy maksymalnego ciągniętego balastu

• Badanie minimalnego promienia skrętu

Badanie to pozwala na ocenę zwrotności pojazdu. W literaturze definiuje się średnicę obrysową czyli średnicę okręgu opisanego przez rzut na jezdnie najbardziej na zewnątrz lub

wewnątrz leżącego punktu pojazdu (względem chwilowego środka skrętu). Promienie obrysowe stanowią połowę tych średnic. W związku z tym, że robot może równocześnie z jednakową prędkością przeciwnie wprawiać w ruch gaśienice, obrót następuje w miejscu. Łuk okręgu uzyskany został poprzez wyznaczenie doświadczalnie kilku punktów najbardziej zewnętrznej części gaśienicy, a następnie wykreślenie łuku przecinającego te punkty. Środkiem okręgu jest środek symetrii rzutu z góry podwozia.

WYNIK: 14 centymetrów.



Rysunek 7.5. Wyznaczanie minimalnego promienia skrętu

- **Badanie maksymalnego zasięgu na otwartej przestrzeni**

Wstępne oszacowanie wynosiło 100 metrów, ponieważ taką wartość podaje producent modułów radiowych. W specyfikacji nadajnika kamery nie podano maksymalnego zasięgu. W związku z tym badanie zostało przeprowadzone na boisku piłkarskim o standardowych wymiarach (długość 105 metrów, szerokość 68 metrów). Pojazd poruszał się wzdłuż przekątnej po linii prostej. Zamontowaną miał dodatkową linę, która pozwoliła na późniejsze zmierzenie odległości.

WYNIK: 98 metrów.



Rysunek 7.6. Badanie maksymalnego zasięgu na otwartej przestrzeni

- **Badanie maksymalnego zasięgu w otoczeniu betonowym**

Test ten miał na celu zbadania zasięgu modułu radiowego oraz wizji z kamery w warunkach podobnych do środowiska pracy. Pojazd umieszczono w piwnicy, natomiast operator z kontrolerem znajdował się na zewnątrz w pobliżu ściany, koło której umiejscowiony został robot. Prostopadle do ściany rozciągnięto miarkę, aby zmierzyć odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem. Test polegał na zapalaniu oświetlenia lub przemieszczaniu oraz obserwacji efektów na ekranie kontrolera.

WYNIK: 19 metrów.



Rysunek 7.7. Badanie maksymalnego zasięgu modułu dla otoczenia betonowego (łączność oraz jej utrata)

- **Badanie minimalnej średnicy rury (rzeczywiste w rurze PCV)**

Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem rury kanalizacyjnej PCV o średnicy 300 mm, wartość ta została dobrana na podstawie wymiarów na schemacie robota w programie *AutoCAD*.

WYNIK: 300 milimetrów.

- **Badanie minimalnej średnicy rury w programie *AutoCAD*** Badanie przeprowadzone za pomocą programu komputerowego pozwoliło wyznaczyć minimalną średnicę rury równą 250 milimetrów dla zaprojektowanego robota. Należy jednak pamiętać, że konieczne jest wtedy skrócenie długości wysuwanego ramienia o 6,5 centymetra.

WYNIK: 250 milimetrów.

Bibliografia

- [1] Abdellatif M., Mohamed H., Hesham M., Abdelmoneim A., Kamal A., Khaled A., *Mechanics design of an autonomous pipe-inspection robot*, MATEC Web of Conferences, 153, 2018, 02002.
- [2] Baranowski R., *Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce*, Wydawnictwo BTC 2015.
- [3] Dyrz K., Kowalski C., Żarczyński Z., *Podstawy techniki mikroprocesorowej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1999.
- [4] Horowitz P., Hill W., *Sztuka elektroniki, cz. 1 i 2*, Wydawnictwo Komunikacji i łączności 1997.

- [5] Kardaś M., *Mikrokontrolery AVR język C podstawy programowania*, Wydawnictwo Atnel 2011.
- [6] Li H., Li R., Zhang J., Zhang P., *Development of a pipeline inspection robot for the standard oil pipeline of china national petroleum corporation*, Applied Sciences, 10, 2020, 2853.
- [7] Lozia Z., Pudło J., *Niekompatybilność wymiarowa elementów infrastruktury drogowej miast i autobusów, jako możliwe zagrożenie bezpieczeństwa ruchu pojazdów*, Paragraf na Drodze. Prawne i kryminalistyczne problemy ruchu drogowego, numer specjalny, 2011, 283–297.
- [8] Panasiuk J., Kaczmarek W., Siwek M., Prusaczyk P., Borys S., *Development of a mobile robot demonstrator for inspection and engineering works in sewage pipes*, Mechanik, 92, 2019, 554–556.
- [9] Panasiuk J., Siwek M., Kaczmarek W., Borys S., Prusaczyk P., *The concept of using the mobile robot for telemechanical wires installation in pipelines*, AIP Conference Proceedings, 2029, 2018, 020054.
- [10] Potocki L., *Silniki krokowe od podstaw, cz. 1 - dla niecierpliwych praktyków*, Elektronika dla Wszystkich, 7, 2002, 22–26.
- [11] Potocki L., *Silniki krokowe od podstaw, cz. 3 - sterowanie*, Elektronika dla Wszystkich, 10, 2002, 24–26.

System automatycznego utrzymywania odległości w pojazdach samochodowych

inż. Błażej Szymański

Automatyka i Robotyka

dr. inż. Krzysztof Dyrz

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Współczesny świat pokazuje jak bardzo technologia potrafi zastąpić człowieka w codziennych czynnościach. Większa automatyzacja wiąże się z większym bezpieczeństwem poprzez zastąpienie ludzi w czynnościach dla nich niebezpiecznych lub wymagających szybszego czasu reakcji. Pozwala również odciążać człowieka w momencie gdy ludzki organizm nie daje już rady, np. męczy się podczas długich podróży, natomiast maszyna nie odczuwa tzw. zmęczenia, senności. Wykorzystanie maszyn wiąże się ze zwiększeniem niezawodności działania systemu. W pojazdach samochodowych automatyzacja osiąga z każdym rokiem kolejny krok w kierunku najwyższego stopnia autonomiczności, w którym kierowcę całkowicie zastąpiłaby maszyna.

Dlaczego automatyzacja kierowania pojazdami samochodowymi jest w obecnych czasach taka ważna? Według raportów organizacji WHO każdego roku w wypadkach drogowych traci życie ponad 1,35 mln ludzi, oznacza to, że co 24 sekundy ginie człowiek. Największym wskaźnikiem śmiertelności w ruchu drogowym cechują się kraje o niższych średnich zarobkach netto, są to między innymi Afryka, czy też Azja Południowo-Wschodnia. Jest to jeden z większych problemów dotyczących automatyzacji pojazdów samochodowych na tych terenach, niskie zarobki nie pozwalają na kupno pojazdów z nowymi systemami bezpieczeństwa. Możliwość korzystania z tańszych zamienników, nie zmniejszając przy tym ich jakości działania dało by możliwość rozpowszechnienia nowoczesnych systemów nawet w takich krajach. W krajach ubogich na drogach brakuje oddzielnych pasów ruchu dla pieszych i rowerzystów, lub odpowiednich przejść dla pieszych. Dodatkowo liczba wypadków na drogach jest również odzwierciedleniem nie tylko złej infrastruktury, ale i braku stosowania przepisów prawa drogowego, które w niektórych krajach w ogóle nie obowiązują, albo pozwalają na zbyt duże prędkości np. w obszarach miejskich. W krajach uboższych i bardziej zaludnionych powszechnym środkiem transportu są pojazdy 2- i 3-kołowe. W Azji Południowo-Wschodniej aż 43% wypadków śmiertelnych ponoszą kierowcy jednośladów, natomiast w Afryce, w 40% wypadkach giną piesi i w takiej samej liczbie procentowej wypadków giną kierowcy pojazdów 4-kołowych. Głównymi przyczynami jest brak zapinania pasów bezpieczeństwa (czasem ich całkowity brak w krajach Trzeciego Świata), jazda pod wpływem środków odurzających, czy braku np. kasku w pojazdach dwukołowych. Wykorzystanie technologii pozwoliłoby na znaczne ograniczenie tego typu wypadków.

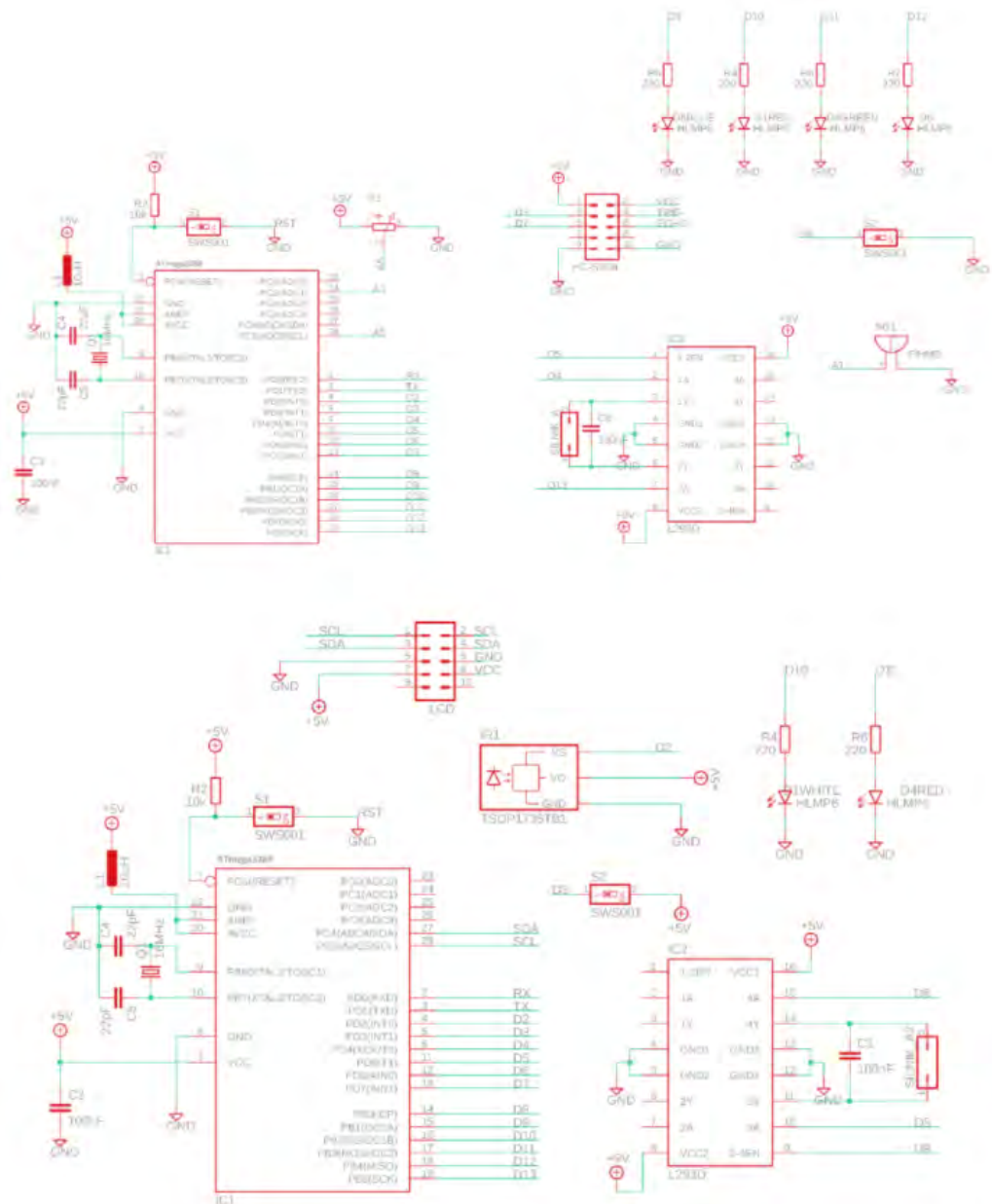
Wszystkie wymienione czynniki jednoznacznie wynikają z niewłaściwych zachowań ludzi poruszających się na drogach. Odsuwając człowieka od kierownicy można by stworzyć bezpieczny

system oparty na komunikacji między pojazdami. Zaczynając od prostych systemów takich jak *ABS* (*Antilock Braking System*) pozwalającego na hamowanie bez utraty przyczepności kół, czy *ESP* (*Electronic Stability Program*) stabilizującego tor jazdy pojazdu samochodowego podczas wykonywania zakrętu, kończąc na systemach umożliwiających całkowite przejęcie kontroli nad pojazdem i pozwolenie kierowcy na chwilę wytchnienia. Priorytetem w tworzeniu zaawansowanych technologii jest poznanie ich podstaw i dojście do wyższych poziomów poprzez stawianie mniejszych kroków. W pracy został zbadany jeden z podstawowych systemów, które znajdują się na pierwszym stopniu w 6-stopniowej skali autonomiczności.

Celem niniejszej pracy było stworzenie makiety umożliwiającej obserwację działania systemu automatycznego utrzymywania odległości w pojeździe samochodowym. Makieta miała za zadanie odzwierciedlić sytuację spowodowaną w prawdziwym życiu, na drodze. Posiadała dwa pojazdy samochodowe, jeden z nich był pojazdem głównym, w którym został zaimplementowany system automatycznej regulacji prędkości, natomiast drugi pojazd służył za ruchomą przeszkodę. Oba pojazdy zostały zaopatrzone w oddzielne systemy sterowania, dzięki czemu podczas badań można było swobodnie manipulować pojazdem służącym za przeszkodę i jednocześnie odczytywać informacje przesyłane przez szeregowe połączenie mikrokontrolera i aplikacji przeznaczonej do badania działania systemu. Zostały wykorzystane dwa mikrokontrolery *ATmega328P*, każdy służył do sterowania osobnym pojazdem, a w jednym z nich (sterujący pojazdem głównym) został zaimplementowany stworzony regulator PID o zmiennych wartościach wzmocnień. Wybór regulatora był uwarunkowany powszechnością występowania w dzisiejszych pojazdach.

Najbardziej rozpowszechnionym regulatorem w nowoczesnych systemach okazał się właśnie regulator PID, który swój początek miał już ponad 250 lat temu. Wstępnie nazywano tak urządzenia mechaniczne (np. regulatory odśrodkowe), służące do sterowania silnikami parowymi, czy wiatrakami, w których specjalne zawory były uruchamiane przy odpowiedniej prędkości kątowej. Zastosowanie regulatora PID pozwoliło na płynną regulację prędkości, dzięki czemu kierując takim pojazdem nie odczuwało by się dyskomfortu związanego z częstym hamowaniem podczas wykrycia przeszkody przez czujnik odległości. Aktywny tempomat, który zaprojektowano nie tylko dopasowuje prędkość i odległość do zadanych przez kierowcę, ale jest także w stanie całkowicie zatrzymać pojazd samochodowy w warunkach niebezpiecznych. Komunikacja pomiędzy użytkownikiem a pojazdem dodatkowym została przeprowadzona poprzez użycie pilota i odbiornika podczerwieni *TSOP*, za czujnik odległości posłużył czujnik ultradźwiękowy pozwalający wykryć przeszkodę do 4 metrów. Dzięki temu wyniki badań były bardziej realistyczne i w większym stopniu odzwierciedlały prawdziwe wydarzenia.

Zastosowanie trójpoziomowego systemu dało możliwość czytelniejszego przedstawienia jej działania. Trzy poziomy zostały podzielone na poziom bezpieczny-zielony, w którym żadna przeszkoda nie znajdowała się w zasięgu czujnika, poziom niebieski, w którym czujnik wykrył obecność przeszkody, dzięki czemu regulator PID zaczyna działać, ale w ograniczonym stopniu, oraz poziom czerwony, w którym pojazd musiał się natychmiastowo zatrzymać ponieważ przeszkoda znalazła się zbyt blisko czujnika. Dodatkowymi elementami makiety były diody LED wskazujące na obecny poziom wykrycia przeszkody przez czujnik odległości, oraz ekran LED służący do przedstawienia w czasie rzeczywistym działań związanych z pojazdem dodatkowym.



Rysunek 8.1. Układy sterowania pojazdami wykorzystanymi w wykonanej makiecie

Badania przeprowadzono za pomocą programu napisanego w języku JAVA przy wykorzystaniu ogólnodostępnego środowiska *Processing*. Wykorzystane środowisko programistyczne posiada bogate biblioteki oraz powiązania ze znanym pośród początkujących konstruktorów środowiskiem *Arduino IDE*. Pozwoliło to na bezproblemowe połączenie aplikacji stworzonej w programie *Processing* oraz programu sterowania wraz z zaimplementowanym regulatorem PID napisanego w programie *Arduino*. Komunikacja odbywała się za pomocą połączenia szeregowego w czasie rzeczywistym pomiędzy mikrokontrolerem a komputerem przenośnym posiadającym napisaną aplikację. Pozwoliło to na zobrazowanie rzeczywistych przebiegów sygnałów wejściowych i wyj-

ściowych dzięki czemu przeprowadzone badania przedstawiły poprawność działania całego systemu i samego regulatora PID. Analiza zrealizowanych badań pozwoliła na ustalenie wartości wzmacnień regulatora PID, aby ten działał prawidłowo w założonych warunkach.



Rysunek 8.2. Systemy sterownicze podczas przeprowadzania badań umieszczone w ochronnej obudowie pozwalającej na swobodną manipulację połączeń elektronicznych

Pojazd pomocniczy posiadał dużą powierzchnię tylną stworzoną z lekkiego materiału, który został dobrany podczas przeprowadzania wstępnych badań dotyczących odbijania się fal ultradźwiękowych od powierzchni płaskich. Pozwoliło to na dokładniejsze odbieranie sygnałów wysyłanych przez czujnik ultradźwiękowy. Pojazd główny został osadzony na specjalnie do tego stworzonej stabilizującej podporze, aby całkowicie wyeliminować siły tarcia pomiędzy kołami pojazdu, a podłożem. Celem takiego działania było uniknięcie zbyt dużych przeciążeń wykorzystanego silnika i możliwość użycia dwukanałowego sterownika L239D charakteryzującego się niskim prądem maksymalnym. Dodatkowo ułatwiło to przeprowadzenie badań i zmniejszyło koszt całej makiety. Podczas konstruowania obu układów wzięto pod uwagę możliwość ich przyszłej rozbudowy. Wykorzystanie tzw. podstawek do układów DIP pozwoliło na bezinwazyjną wymianę mikrokontrolerów podczas przeprowadzania poszczególnych badań wstępnych. Przylutowanie dodatkowych pinów uniwersalnych połączonych z większością nóżek podstawek dało możliwość na swobodne podłączanie urządzeń dodatkowych takich jak ekran LED, głośnik, czy sam czujnik ultradźwiękowy. W perspektywie czasu pozwala to na zmianę elementów elektronicznych w celu

przeprowadzenia porównań z np. pomiędzy innymi czujnikami odległości. Elementy podstawowe takie jak czujnik podczerwieni, diody LED, przyciski, potencjometr, zostały przyłutowane na stałe do płytek stykowych. Cała makietą posiadała dwa źródła zasilania, jednym z nich był akumulator dostarczający prąd stały do silników komutatorowych DC obu pojazdów, natomiast drugim źródłem zasilania był zasilacz impulsowy o stabilizowanym napięciu wyjściowym, który służył do zapewnienia energii elektrycznej potrzebnej do prawidłowego działania obu układów elektronicznych. Akumulator był wymaganym źródłem energii ze względu na duże wahania poboru prądów przez oba silniki pojazdów (głównie pojazdu głównego z zaimplementowanym regulatorem PID) co było niepożądane dla układów z mikrokontrolerami.

Długa droga czeka dzisiejsze systemy w nowoczesnych pojazdach zanim będzie można powiedzieć o nich, że są w pełni autonomiczne. Jednak warto już dziś stawiać małe kroki i starać się odnawiać istniejące systemy przy użyciu mniejszych kosztów zwiększając w ten sposób możliwość rozprzestrzenienia się takich systemów na większą skalę. Wydaje się dzisiaj, że jedynie całkowite zautonomizowanie wszystkich pojazdów pozwoli na osiągnięcie pełnego bezpieczeństwa w ruchu drogowym. W niniejszej pracy podjęto próbę zaprojektowania i wykonania laboratoryjnego modelu, który pozwoliłby na prezentację działania ważnego systemu pojazdu autonomicznego, jakim jest automatyczny układ utrzymywania odległości pomiędzy pojazdami. Ważnym aspektem pracy jest wyjaśnienie działania podstawowych systemów, oraz pokazanie możliwości wykorzystania tańszych komponentów niż tych umieszczanych w nowoczesnych pojazdach.

Podsumowanie

1. Wykonany projekt działa zgodnie z założeniami.
2. Wykorzystany czujnik ultradźwiękowy pozwala na dokładny pomiar odległości na stworzonej makiecie.
3. Komunikacja *UART* pomiędzy układami elektronicznymi i komputerem przenośnym działa stabilnie. Jest możliwość programowania mikrokontrolerów bez ingerencji w układy elektroniczne.
4. Stworzony program poprawnie wizualizuje i daje możliwość zmian wartości wzmocnień regulatora w czasie rzeczywistym.
5. Elementy dodatkowe dodają realizmu stworzonej makiecie.
6. Projekt może być rozwijany poprzez dołączanie kolejnych elementów wykonawczych.

Bibliografia

- [1] Airikka P., *Robust predictive pi controller tuning*, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 19, 2014, 9301–9306.
- [2] Åström K., Hägglund T., *Advanced PID Control*, ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society 2006.
- [3] Kim S., *Design of the adaptive cruise control systems: An optimal control approach.*, Berkeley, California, 2012.
- [4] Margolis M., Jepson B., Weldin N., *Arduino Cookbook: Recipes to Begin, Expand, and Enhance Your Projects*, O'Reilly Media 2020.
- [5] Normey-Rico J., *Control of Dead-time Processes*, Springer Science and Business Media 2007.

- [6] Rajamani R., *Vehicle Dynamics and Control*, Mechanical Engineering Series, Springer US 2006.
- [7] Sztokfisz B., *Rynek samochodów autonomicznych: wyzwanie dla gospodarki cyfrowej*, Napędy i Sterowanie, 2018, 102–106.
- [8] Visioli A., *Practical PID Control*, Advances in Industrial Control, Springer London 2006.
- [9] WHO, *Global status report on road safety 2018*, World Health Organization, 2018.
- [10] *Arduino - home*, <https://www.arduino.cc>, dostęp: 01-11-2020.

Wykorzystanie modułów bezpieczeństwa sterownika PLC

inż. Natalia Dutka
Automatyka i Robotyka

dr hab. inż. Piotr Serkies
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

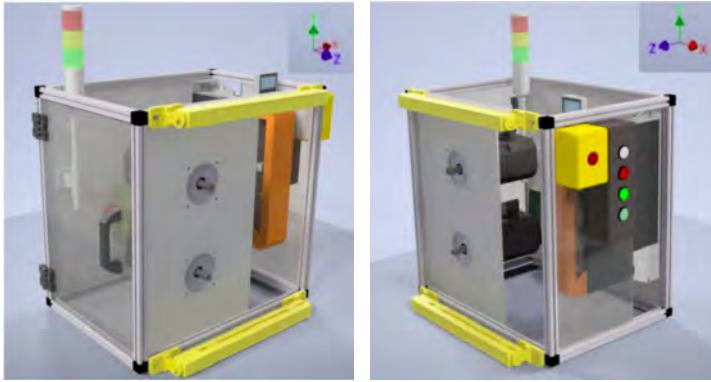
Rozwój przemysłu na przestrzeni ostatnich lat XX wieku przyczynił się do znaczącego spopularyzowania sterowników programowalnych. Obecnie można powiedzieć, że na rynku dominują zautomatyzowane procesy przemysłowe, oparte na rozwiązaniach wykorzystujących właśnie sterowniki PLC. Pomysł połączenia ich z modułami bezpieczeństwa pozwolił nie tylko na optymalizowanie kosztów procesu i zwiększenia wydajności pracy, ale także zapewnił niezbędne bezpieczeństwo maszynie i jej operatorom.

Korzyści wynikające ze stosowania takiego zintegrowanego systemu bezpieczeństwa oraz sposób jego sterowania został omówiony w pracy inżynierskiej na przykładzie projektu *ETA System* zbudowanego w dwuosobowym zespole (w składzie: N. Dutka, M. Grabowski), opartego na sterownikach serii *X20* firmy *B&R*.

Systemy *ETA* – niedużych rozmiarów stanowiska wyposażone w różne elementy elektromechaniczne – są autorskim pomysłem austriackiej firmy *B&R*. Chociaż poszczególne konstrukcje różnią się między sobą, to wszystkie opierają się na komponentach tejże firmy. Ich przeznaczenie wyjaśnia sama nazwa *ETA* będąca akronimem od *Evaluation and Training for Automation*, co można przetłumaczyć jako „szkolenie i rozwój w zakresie automatyki”.

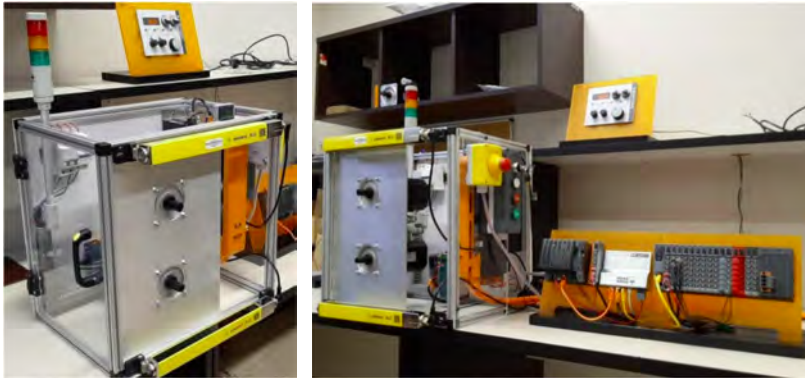
Głównym założeniem wykonanego projektu było stworzenie stanowiska dydaktycznego dla obecnych i przyszłych studentów, umożliwiającego zapoznanie się z pojęciem zintegrowanego systemu bezpieczeństwa oraz naukę programowania modułów bezpieczeństwa i napędów bezpiecznych firmy *B&R*. Chociaż samo stanowisko opracowano jako makietę dydaktyczną, na której możliwe będzie przeprowadzanie zajęć laboratoryjnych, to odzwierciedla ono praktyczne rozwiązania stosowane w przemyśle.

Rzeczywista konstrukcja o wymiarach $300 \times 440 \times 440$ mm została wykonana z profili aluminiowych. Na froncie zamontowano kurtyny bezpieczeństwa, a pomiędzy nimi płytę aluminiową z dwoma silnikami. Drzwiczki zabezpieczające, znajdujące się z lewej strony stanowiska, zabezpieczono wyłącznikiem bezpieczeństwa, natomiast na prawej ścianie umieszczono przycisk bezpieczeństwa i listwę z przyciskami dwupozycyjnymi. Do wewnętrznej, tylnej ściany przykręcono sterowniki bezpieczeństwa, serwonapęd *ACOPOS P3* oraz pozostałe elementy takie jak: sygnalizację świetlną, wyłączniki nadprądowe, filtr, zasilacz, wyłącznik ryglujący. Poza konstrukcją, na specjalnych podstawkach, zamontowano sterownik PLC i różne moduły dodatkowe, które skomunikowano ze sterownikiem bezpieczeństwa poprzez moduł rozdzielający.



(a) widok od strony drzwi zabezpieczających i frontu

(b) widok od strony ściany z przyciskami i frontu

Rysunek 9.1. Model stanowiska stworzonego w programie *Inventor Pro*

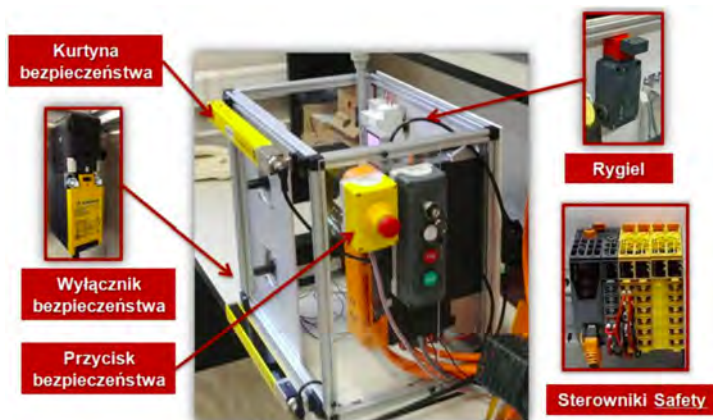
(a) widok od strony drzwi

(b) widok od strony ściany z przyciskami i frontu

Rysunek 9.2. Konstrukcja rzeczywista wykonanego projektu

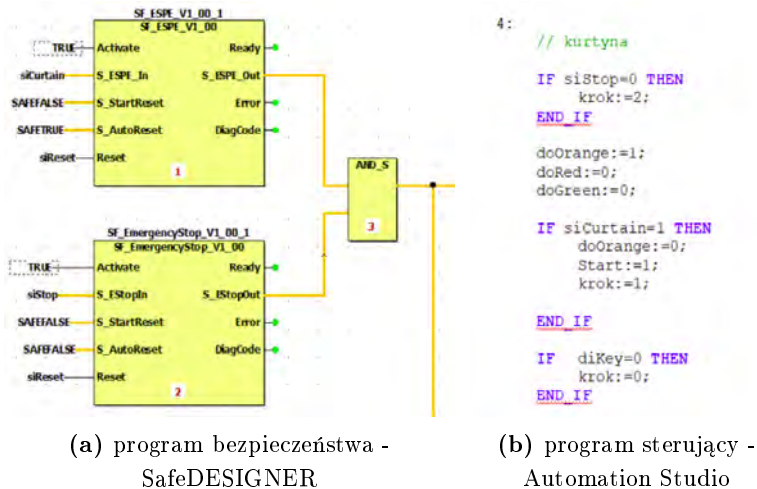
Sercem wykonanego projektu można nazwać sterowniki serii X20, ze szczególnym uwzględnieniem sterownika typu *Safety* (sterownik bezpieczeństwa). Właściwością odróżniającą go od sterownika PLC jest dostęp do logiki programu i kontrola zmian wprowadzanych w takiej logice. Wybrany w projekcie model, oprócz żółtego koloru charakterystycznego dla komponentów bezpiecznych, wyróżnia się bardzo krótkimi czasami reakcji. Opierają się one na systemie pojedynczego działania, dzięki czemu możliwe są czasy cyklu wynoszące 1 ms. Dodatkowo bezpieczeństwo zapewnia fakt, że sterowniki te w określonym przedziale czasu przeprowadzają autotest swoich wyjść, sprawdzając tym samym funkcjonalność modułu wewnętrznego, dzięki czemu może zostać wykryte np. zwarcie w przewodach i nastąpić awaryjne zatrzymanie maszyny. Sam system sterowania X20 jest innowacyjną formułą zaprezentowaną przez firmę *BEHR* w roku 2004, wyróżniającą się systemem wejść i wyjść opartym na segmentach, tj. sterowniki zbudowane są z trzech podzespołów: listwy zaciskowej, modułu elektroniki i modułu magistrali. Zaletą takiej modułowości jest prostota i wygoda przy ewentualnej rozbudowie lub przebudowie stanowiska.

Połączenie opisanego systemu (sterownik PLC ze sterownikiem *Safety*) z dostępnymi elementami bezpiecznymi niesie za sobą szereg korzyści w zakresie bezpiecznego i zoptymalizowanego przebiegu procesu przemysłowego. Za elementy bezpieczeństwa przyjęto takie komponenty, które zostały bezpośrednio podłączone do sterownika bezpieczeństwa. Ich zastosowanie umożliwiło zaprogramowanie inteligentnych reakcji różniących się zależnie od aktualnych potrzeb, dzięki którym nie jest konieczne np. zatrzymywanie całego procesu, aby zostało zapewnione niezbędne bezpieczeństwo. Przykład takiego rozwiązania prezentuje aktywowanie zamontowanych na stanowisku kurtyn – w sytuacji, gdy pomiędzy odbiornikiem a nadajnikiem znajdzie się jakiś niepożądany obiekt (np. palec), zostaną uruchomione funkcje bezpieczne kurtyn, co spowoduje zmniejszenie prędkości silników do prędkości bezpiecznej, dzięki czemu zabezpieczenie przed przypadkowym pojawieniem się obiektu w strefie zagrożenia nie będzie skutkowało koniecznością zatrzymania całego procesu. W konsekwencji ekonomiczność procesu nie jest osiągana kosztem bezpieczeństwa operatorów. Podobne rozwiązanie zastosowano w przypadku drzwi zabezpieczających, których otwarcie spowoduje aktywowanie funkcji wyłącznika kluczowego. Z kolei uruchomienie wyłącznika bezpieczeństwa (tzw. grzybkowego) załącza funkcję SS1, która umożliwia bardzo szybkie, bezpieczne dla maszyny, zatrzymanie silników, co może okazać się niezbędne w przypadku nagłych, niespodziewanych sytuacji. Przedstawione elementy bezpieczne zostały zaprogramowane w taki sposób, aby zawsze miały pierwszeństwo w działaniu, gdyż pełnią one najważniejszą rolę w systemie (pozwalają na zoptymalizowanie procesu oraz zapewnienie bezpieczeństwa nie tylko człowiekowi, ale także maszynie). Było to możliwe dzięki oprogramowaniu *SafeDESIGNER*.



Rysunek 9.3. Sterownik *Safety* i elementy do niego podłączone

SafeDESIGNER należy do środowiska programistycznego *Automation Studio* firmy *B&R*. Odbywa się w nim integracja bezpiecznych modułów przez mapowanie zmiennych wejściowych i wyjściowych na bezpieczne typy zmiennych. Dane są przesyłane przez bezpieczny protokół *OpenSAFETY* do sterownika bezpieczeństwa. Do programowania funkcji bezpieczeństwa *SafeDESIGNER* oferuje gotowe bloki funkcyjne biblioteki *PLCopen*. Pierwszeństwo ich działania wynika z faktu, że aplikacja tworzona w *SafeDESIGNERZE* jest cyklicznie przetwarzana przez sterownik bezpieczeństwa i ma priorytet nad programem sterującym. Program sterujący napisany został w programie *Automation Studio* w języku *ST*. Obejmuje on zachowanie modułów bezpieczeństwa i sterowanie napędami oraz warunkuje sygnalizowanie lampkami stanu pracy stanowiska. W środowisku tym możliwe było też dokonanie konfiguracji sprzętowej.



Rysunek 9.4. Przykładowy fragment programu

Wykonane stanowisko pełni funkcje edukacyjne, ale prezentuje rozwiązania nierzadko stosowane w przemyśle. Z tego powodu nauka oparta na tym projekcie oferuje nie tylko korzyści czerpania wiedzy teoretycznej, ale również rozwoju w kierunku praktycznym, inspirując do wymyślenia własnych rozwiązań, które mogłyby zostać wdrożone w rzeczywistym procesie przemysłowym. Projekt ETA System stworzony w ramach pracy dyplomowej został zakończony zgodnie z założeniami, ale posiada potencjał do dalszego rozwoju. Łatwość i elastyczność systemu *X20* umożliwia prostą rozbudowę i przebudowę konstrukcji o kolejne dodatkowe moduły, a same moduły obecnie zastosowane w projekcie pozwalają na podłączenie wielu nowych ciekawych urządzeń.

Możliwa jest rozbudowa projektu także w zakresie samego programu, poprzez np. wprowadzenie do niego obecnego na stanowisku wyłącznika ryglującego czy też przez przeprogramowanie wykorzystanych już komponentów. W praktyce można powiedzieć, że potencjał rozbudowy projektu stanowiska jest ograniczony tylko fantazją projektantów i ich finansami.

Bibliografia

- [1] Broel-Plater B., PWN. W.N., *Układy wykorzystujące sterowniki PLC: projektowanie algorytmów sterowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2009.
- [2] Kasprzyk J., PWN. W.N., *Programowanie sterowników przemysłowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2017.
- [3] Plamitzer A., Naukowo-Techniczne W., *Maszyny elektryczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1968.
- [4] Sałat R., Korpysz K., Obstawski P., i Łączności W.K., *Wstęp do programowania sterowników PLC*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2010.
- [5] *Centrum informacji rynku energii*, Wieland, Operating instructions, SLC-4StandardSafetyLightCurtain, dostęp: 01-11-2020.
- [6] *Wieland, operating instructions, sms 2xxx safety switch with separate actuator*, https://www.wieland-electric.com/sites/default/files/field_files/0860.1_safety_screen_en.pdf, dostęp: 01-11-2020.

Optymalizacja kosztów zużycia energii elektrycznej na przykładzie parafii pw. św. Andrzeja Apostoła w Męcince

mgr inż. Daniel Duś
Elektrotechnika

dr inż. Maciej Gwoździewicz
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Tematem pracy dyplomowej jest: „*Optymalizacja kosztów zużycia energii elektrycznej na przykładzie parafii pw. św. Andrzeja Apostoła w Męcince*”. Celem pracy była analiza kosztów zużycia energii elektrycznej w *parafii pw. św. Andrzeja Apostoła w Męcince* oraz opracowanie możliwości ich obniżenia. Zmniejszanie kosztów jest niezbędne na każdym etapie wszystkich istniejących procesów, optymalizacja jest ważna we wszystkich rodzajach gospodarki, pozwala stać się gospodarce bardziej rentownej. Postęp jest to zmiana w procesie ekonomicznym dzięki której wzrasta wydajność, oszczędność energii, materiałów i surowców, a co za tym idzie, obserwuje się powstanie większych korzyści ekonomicznych i nowocześniejszych produktów.[1]

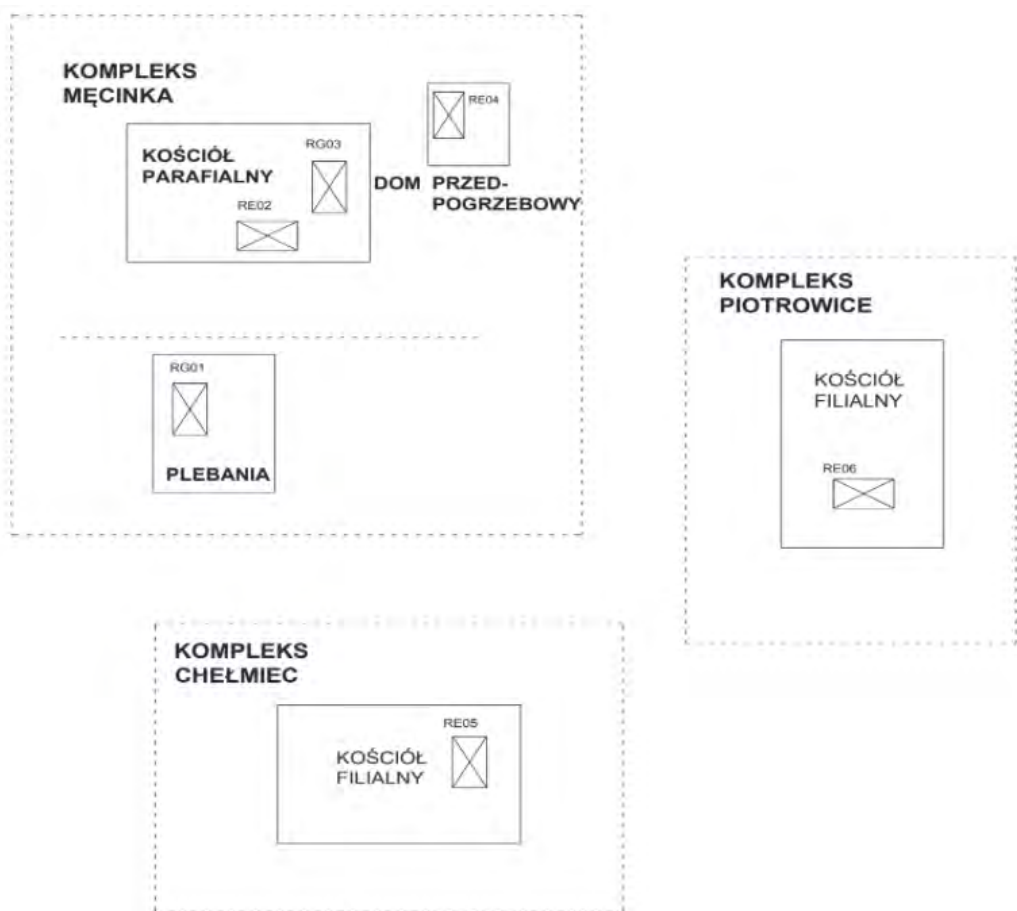
Stojąc w obliczu czwartej rewolucji przemysłowej coraz więcej procesów wymaga zasilania energią elektryczną, powszechnie mówi się o optymalizacji zużycia energii elektrycznej, o wpływie wytwarzania elektryczności na środowisko, szczególnie w kraju, gdzie największą produkcję mocy zapewnia spalanie węgla brunatnego. Ograniczenie zużycia energii elektrycznej znacząco obniży koszty związane z zasilaniem, jest bardzo korzystna przemysłowo i ekologicznie. Kolejnym krokiem jest optymalizacja kosztów, które nie są liniowo proporcjonalne do wykorzystanej energii czynnej. Są to opłaty handlowe, koszty mocy umownej, stałe opłaty niezależne od zużycia energii przejściowe, abonamentowe i dystrybucyjne. Optymalizacja dystrybucji jest ważnym elementem zarówno w gospodarstwach domowych, jak i mniejszych lub większych obiektach przemysłowych, pozwala generować niższe opłaty za energię elektryczną przy tym samym zużyciu. Problem wysokich kosztów zużycia energii elektrycznej występował w *parafii pw. Św. Andrzeja Apostoła w Męcince*, gdzie mimo niewielkiego zużycia energii czynnej średnie opłaty przekraczały 380 zł miesięcznie, w jednym punkcie poboru średnia cena kilowatogodziny dochodziła nawet do 50 zł.

1. Etap przygotowań i rozpoznania problemu

Etap pierwszy polega na zdefiniowaniu zagadnienia optymalizacji kosztów zużycia energii elektrycznej, zapoznaniu się z metodyką optymalizacji dystrybucji, poznanie planów taryfowych dystrybutorów i elementów składowych rachunku za energię elektryczną. Poddano analizie rynek

energii, rodzaje taryf i opłat za energię elektryczną w różnych regionach, skupiając się szczególnie na tabeli opłat dla powiatu jaworskiego w regionie dolnośląskim.

Następnym krokiem jest zapoznanie się z sytuacją w parafii Męcinka, analiza rachunków za energię elektryczną umiejscowienia liczników i taryf, wykonanie schematu rozmieszczenia wszystkich liczników i taryf oraz zasilanych przez nie miejsc w obiektach należących do *parafii Św. Andrzeja Apostoła*. Wynikiem tego jest definicja problemu występującego w badanym obiekcie, dotyczy on wysokich opłat za energię elektryczną przy stosunkowo niewielkim zużyciu energii elektrycznej. Wykluczono problem dużego zużycia energii elektrycznej spowodowanego energochłonnym odbiornikiem albo ciągłą pracą grupy odbiorników, wykluczono też możliwość wystąpienia przekroczeń mogących powodować naliczenia kar. Po przeprowadzeniu audytu parametrów dystrybucji pozyskano dane do optymalizacji. Rysunek 10.1 przedstawia sytuację w parafii, do której przynależą trzy budynki kościołów, dom przedpogrzebowy oraz budynek mieszkalny – plebania. W tabeli 1 zestawiono spis liczników oraz taryf, mocy umownych i mocy przyłączeniowych.



Rysunek 10.1. Szkic sytuacyjny obiektów należących do *parafii św. Andrzeja Apostoła* przed optymalizacją

Teoretyczne rozpoznanie problemu i możliwości jego rozwiązania, na podstawie wniosków wyciągniętych z audytu energetycznego, przeanalizowanie planów taryfowych i przepisów pod kątem konkretnej sytuacji w badanym obiekcie.

Tabela 10.1. Spis liczników i taryf przed optymalizacją w poszczególnych budynkach badanego obiektu

Lp.	Miejsce	Lokalizacja licznika rozdzielnica	Taryfa	Moc umowna [kW]	Zabezp [A]
1	plebania	główna	G12	15,50	25
2	kościół Męcinka	główna — zakrystia	C11	20,00	32
3	kościół Męcinka	empory	C11	15,50	25
4	kościół Męcinka	w domu p-p.	C11	4,00	20
5	Kościół Piotrowice	główna — zakrystia	C11	20,00	32
6	Kościół Chełmiec	główna — zakrystia	C11	20,00	32

Tabela 10.2 prezentuje szczegółowe zestawienie opłat za energię elektryczną na plebanii, budynek ten jest traktowany jako obiekt mieszkalny, taryfa przed optymalizacją dla użytkowników prywatnych dwustrefowa dzień/noc. Średnia cena to 48gr/kWh, przy średnim zużyciu 309 kWh w skali miesiąca.

Tabele 10.3–10.5 przedstawiają szczegółowe zestawienie opłat za energię elektryczną w kościele parafialnym w Męcince, na terenie obiektu zainstalowane są trzy liczniki, dwa w budynku kościoła (zakrystia – tab. 10.2 i empory tab. 10.3) oraz jeden w domu przedpogrzebowym (tab. 10.5).

Wszystkie liczniki w taryfie przemysłowej *C11*, średnie zużycie energii elektrycznej dla całego kompleksu to 75,67 kWh, a średnia cena to 3,13 zł/kWh. Nie zostały przedstawione tabele z rachunkami za energię elektryczną w pozostałych kompleksach – kompleksie Chełmiec oraz kompleksie Piotrowice ze względu na brak potrzeby optymalizacji dystrybucji. Na etapie audytu energetycznego w porozumieniu z Administratorem obiektu, dwa wymienione kompleksy zostały wyłączone z analizy i rozważań. Zostały tam wykonane pomiary zużycia mocy czynnej oraz napięć i prądów na poszczególnych obwodach, natomiast nie znaleziono niezgodności.

Kolejny etap realizacji pracy dyplomowej był bardziej praktyczny w jego zakresie wchodziło wykonanie pomiarów i sprawdzeń w obiekcie, oszacowanie jakie odbiorniki generują największe koszty, które liczniki są nadmiarowe, jakie taryfy są optymalne.

Odbiorniki występujące w parafii należą do grupy odbiorników takich jakie wykorzystuje się w gospodarstwach domowych. Plebania jest budynkiem mieszkalnym z pomieszczeniem biurowym, tak więc występują standardowe rodzaje odbiorników jak dla domu jednorodzinnego z ogrzewaniem gazowym. Występuje tam jeden licznik energii elektrycznej w grupie taryfowej *G12*. W budynku kościoła parafialnego główne odbiorniki to oświetlenie żarówkowe oraz nagłośnienie nienależące do klasy nagłośnienia estradowego. Przy organach jest zainstalowany kompresor do sprężonego powietrza, pompa sprężarki jest silnikiem elektrycznym niewielkiej mocy. Licznik umieszczony na emporach służył dawniej do zasilania urządzeń ściśle związanych z odprawianiem obrzędów kultu religijnego, we wcześniejszych latach istniała specjalna taryfa dla Kościoła, która mogła obsługiwać odbiorniki jedynie związane z odprawianiem nabożeństw. Obecnie taka taryfa nie istnieje, a licznik ten jest w taryfie *C11*, tak więc generuje wysokie opłaty stałe, nie wynikające z wykorzystania prądu.

W budynku kościoła zostały zainstalowane dwa liczniki energii elektrycznej, w grupie taryfowej *C11* oba. Umieszczone są one w rozdzielnicach przedstawionych na rysunku 10.2, jeden licznik umieszczony jest na emporach, a drugi licznik w pomieszczeniu zakrystii.



(a) na emporach



(b) w zakrystii

Rysunek 10.2. Fotografie rozdzielnic w kościele w Męcince

W domu przedpogrzebowym używane jest jedynie oświetlenie, składające się z żyrandola i 6 szt. kinkietów. Nie występują inne odbiorniki energii elektrycznej, nie ma instalacji nagłośnieniowej, systemów zabezpieczeń czy wentylacji, budynek nie posiada zasilanych elektrycznie organ, ani fisharmonii. Praktyczne zapotrzebowanie na moc czynną jest bardzo niewielkie, w skali roku pomijalnie małe, ponieważ budynek używany jest średnio raz w miesiącu po około 0.5 h.

Tabela 10.2. Szczegółowe zestawienie opłat za energię elektryczną - plebania, licznik w rozdzielni głównej

opłaty stałe			stawki zmienne					
dystybucyjna zł	przebiegowa zł	abonamentowa zł	suma zł	pora	energia czynna zł/kWh	dystybucyjna zł/kWh	kogeneracyjne zł/kWh	suma zł/kWh
8,00	0,33	4,56	12,89	dzień	0,3015	0,1933	0,00158	0,49638
				noc	0,1556	0,0638	0,00158	0,22098
rozliczenie z poszczególnych miesięcy								
data	średnia zł/kWh	zużycie kWh	pora	zużycie czynne kWh	energia czynna zł	dystybucyjna zł	kogeneracyjna zł	suma zł
05.2019	0,54	361	dzień	235	70,85	45,43	0,37	116,65
			noc	126	19,61	8,04	0,20	27,84
06.2019	0,64	296	dzień	271	81,71	52,38	0,43	134,52
			noc	25	3,89	1,60	0,04	5,52
07.2019	0,59	270	dzień	210	63,32	40,59	0,33	104,24
			noc	60	9,34	3,83	0,09	13,26

Tabela 10.3. Szczegółowe zestawienie opłat za energię elektryczną - kościół parafialny, rozdzielnica zakrystii

opłaty stałe				stawki zmienne					
dotyczy jm	dystybucyjna zł	przebiegowa zł	abonamentowa zł	handlowa zł	suma zł	energia czynna zł/kWh	dystybucyjna zł/kWh	kogeneracyjne zł/kWh	suma zł/kWh
59,20	1,20	4,56	21,00	85,96	0,3752	0,1495	0,00158	0,52628	
rozliczenie z poszczególnych miesięcy									
koszt									
data	średnia zł/kWh	zużycie czynne kWh	energia czynna zł	dystybuycja zł	suma zł	energia zł	dystybuycja zł	rozliczenie netto dystybuycja zł	suma zł
05.2019	2,73	51	19,14	7,62	26,84	26,84	73,07	73,07	113,20
06.2019	1,91	84	31,52	12,56	44,21	44,21	78,05	78,05	130,57
07.2019	2,69	52	19,51	7,77	27,37	27,37	73,22	73,22	113,73

Tabela 10.4. Szczegółowe zestawienie opłat za energię elektryczną - koszty parafalny, rozdzielnica empy

dotyczy jm	dysstrybucyjna		przebiegowa		opłaty state		abonamentowa		handlowa		suma		energia czynna		dysstrybucyjna		stawki zmienne		kogeneracyjne		suma				
	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl	zl			
	45,88		1,24		4,56		21,00		72,68		0,3752		0,1495		0,00158		0,52628								
rozliczenie z poszczególnych miesięcy																									
data	średnia zl/kWh	zużycie kWh	energia zl	dysstrybucja zl	koszt	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl		
05.2019	0,54	37	13,88	5,53	0,06	19,47	34,88	57,27	92,15	0,00	0,00	21,00	51,68	72,68	0,00	0,00	21,00	16,72	37,72	21,00	16,72	37,72	21,00	16,72	37,72
06.2019	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	51,68	72,68	0,00	0,00	21,00	51,68	72,68	0,00	0,00	21,00	16,72	37,72	21,00	16,72	37,72	21,00	16,72	37,72
07.2019	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	51,68	72,68	0,00	0,00	21,00	51,68	72,68	0,00	0,00	21,38	16,87	38,25	21,38	16,87	38,25	21,38	16,87	38,25
rozliczenie z poszczególnych miesięcy																									
dotyczy jm	dysstrybucyjna zl	przebiegowa zl	opłaty state zl	abonamentowa zl	handlowa zl	suma zl	energia czynna zl/kWh	dysstrybucyjna zl/kWh	kogeneracyjne zl/kWh	suma zl	energia zl	dysstrybucyjna zl/kWh	kogeneracyjne zl/kWh	suma zl	energia zl	dysstrybucyjna zl	suma zl	energia zl	dysstrybucyjna zl	suma zl	energia zl	dysstrybucyjna zl	suma zl		
	11,84	0,32	4,56	21,00	37,72	0,3752	0,1495	0,00158	0,52628																
rozliczenie z poszczególnych miesięcy																									
data	średnia zl/kWh	zużycie kWh	energia zl	dysstrybucja zl	koszt	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl	energia zl	suma zl		
05.2019	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	16,72	37,72	0,00	0,00	21,00	16,72	37,72	0,00	0,00	21,00	16,72	37,72	0,00	0,00	21,00	16,72	37,72	
06.2019	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00	51,68	72,68	0,00	0,00	21,00	51,68	72,68	0,00	0,00	21,00	16,72	37,72	21,00	16,72	37,72	21,00	16,72	37,72
07.2019	47,05	1	0,38	0,15	0,00	0,53	21,38	16,87	38,25	0,00	0,00	21,38	16,87	38,25	0,00	0,00	21,38	16,87	38,25	21,38	16,87	38,25	21,38	16,87	38,25

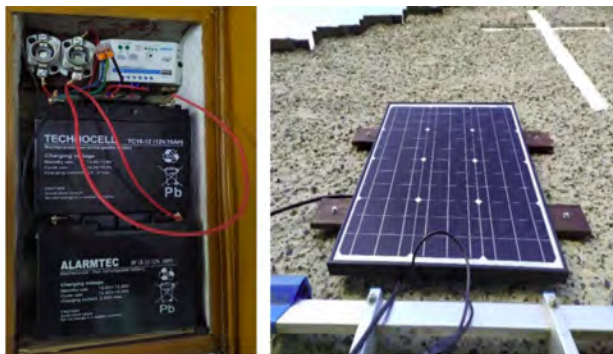
Tabela 10.5. Szczegółowe zestawienie opłat za energię elektryczną – dom przedogrzewowy

2. Optymalizacja zużycia energii elektrycznej

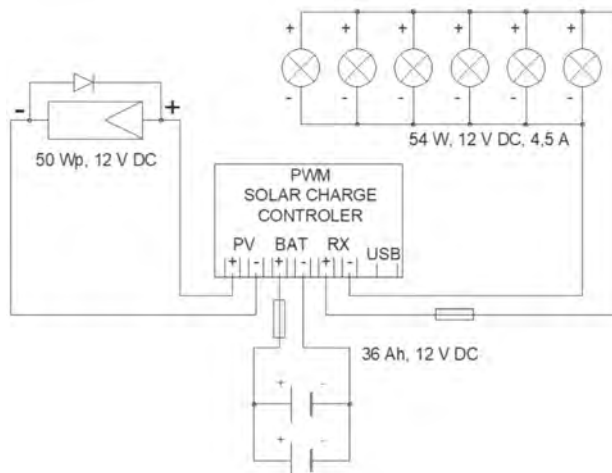
Następnym krokiem było zaproponowanie rozwiązania problemu, po wcześniejszym przygotowaniu kilku propozycji na podstawie wniosków wyciągniętych z analizy teoretycznej i badań. Po podjęciu przez Konsultanta pracy dyplomowej decyzji dotyczącej wyboru zaproponowanych działań nastąpiło wdrożenie przyjętych przez administratora obiektu propozycji rozwiązań optymalizacji kosztów zużycia energii elektrycznej.

Po wnikliwej analizie opłat i zużywanych mocy oraz natężeń prądów podczas szczytowych okresów zużycia energii elektrycznej zmieniono grupę taryfową na plebani z dwustrefowej ($G12$) na jednostrefową ($G11$). Usunięto jeden licznik w kościele – w zakrystii i przełączono wszystkie odbiorniki do licznika na emporach, do którego dochodzi przyłącze elektryczne.

W domu przedpogrzebowym usunięto przyłącze energii elektrycznej i zastąpiono je mikroinstalacją fotowoltaiczną o mocy 50 Wp oraz wymieniono oświetlenie żarówkowe na LED o napięciu 12 V.



Rysunek 10.3. Fotografia mikroinstalacji fotowoltaicznej



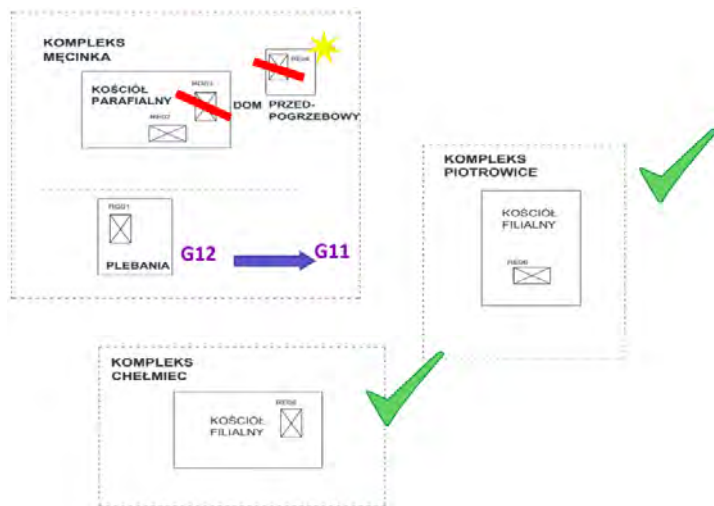
Rysunek 10.4. Schemat instalacji fotowoltaicznej zasilającej dom przedpogrzebowy

3. Podsumowanie działań optymalizacyjnych podjętych w badanym obiekcie

Nie udało się zmienić grupy taryfowej z *C* na *G* w przypadku budynków kościoła, zlikwidowano nadmiarowy licznik w budynku kościoła oraz odłączono od *SEE* budynek domu przedpogrzebowego, zainstalowano instalację fotowoltaiczną typu *off-grid*. Tabela 10.6 przedstawia nowy spis liczników i parametrów po optymalizacji, a rysunek 10.5 przedstawia szkic sytuacyjny po optymalizacji.

Tabela 10.6. Spis liczników i taryf po optymalizacji w poszczególnych budynkach badanego obiektu

Lp.	Miejsce	Lokalizacja licznika rozdzielnic	Taryfa	Moc umowna [kW]	Zab. [A]
1	plebania	główna	G11	15,50	25
2	Kościół Męcinka	główna — zakrystia	OZE	0,05	16
3	Kościół Męcinka	empory	C11	20,00	32
4	Kościół Męcinka	w domu p-p.	OZE	0,05	5,5
5	Kościół Piotrowice	główna — zakrystia	C11	20,00	32
6	Kościół Chełmiec	główna — zakrystia	C11	20,00	32



Rysunek 10.5. Szkic sytuacyjny po optymalizacji

Bibliografia

- [1] Ostwald M., *Podstawy optymalizacji konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2005.
- [2] Knosala E., *Zarys nauki administracyjnej*, Wydawnictwo Wolters Kluwer Polska 2010.
- [3] Frankowska M., *Efektywność Systemu Dystrybucji*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne 2011.

- [4] Kamińska A., *Optymalizacja parametrów dystrybucyjnych – klucz do efektywności energetycznej*, CIRE, 2015.
- [5] *Centrum informacji rynku energii*, <https://cire.pl>, dostęp: 01-11-2020.
- [6] *Optimal energy oe it sp. z o. o. dystrybutorzy energii elektrycznej w polsce*, <https://optimalenergy.pl/dystrybutorzy-zmiana-sprzedawcy-energii/>, dostęp: 01-11-2020.
- [7] *Zwiedzamy dolny Śląsk*, <https://zwiedzamydolnyslask.blogspot.pl>, dostęp: 01-11-2020.

Silnik BLDC do napędu pojazdu elektrycznego

mgr inż. Kinga Tokarska

Elektrotechnika

dr hab. inż. Marek Ciurys

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Celem pracy było opracowanie modelu obliczeniowego silnika przeznaczonego do napędu wybranego pojazdu elektrycznego. Zakres pracy obejmował zapoznanie się z zagadnieniem w zakresie budowy, zasady działania i układów sterowania bezszczotkowych silników prądu stałego, nowo opracowanych konstrukcji i rozwiązań oraz ich zastosowania do napędu pojazdów elektrycznych, wybór rozwiązania konstrukcyjnego silnika, opracowanie modelu polowo-obwodowego silnika w środowisku *ANSYS Maxwell*, wykonanie obliczeń za pomocą opracowanego modelu w zakresie doboru kształtu żłobka stojana i kąta magnesów wirnika, analizy przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych dla wybranej konstrukcji silnika oraz wyznaczenia jego charakterystyk elektromechanicznych oraz zredagowanie pracy.

Analiza aktualnych trendów wykazała, że pojazdy elektryczne są jednym z rozwiązań problemów współczesnego świata – związanych z ochroną środowiska. Jednakże pomimo widocznego rozwoju rynku pojazdów elektrycznych, malejącej ceny oraz rosnącego zasięgu samochodów elektrycznych, dla wielu ich cena jest wciąż za wysoka. Jednocześnie można zaobserwować wzrost popularności mniejszych pojazdów takich jak hulajnogi czy deski elektryczne, które są odpowiedzią na wymagania potencjalnych użytkowników – szybki i komfortowy transport przy zachowaniu kompaktowości pojazdu. W tego typu pojazdach stosowane są silniki małej mocy cechujące się niską wagą i wysoką gęstością mocy - najczęściej bezszczotkowe silniki prądu stałego (ang. *Brushless Direct Current, BLDC*). Wzrost zastosowania pojazdów elektrycznych wiąże się z większymi wymaganiami stawianymi silnikom elektrycznym, a w konsekwencji ich konstruktorom. Małe wymiary, niska waga, odpowiedni system chłodzenia czy też względnie niska cena przy wysokiej klasie sprawności to tylko część z pożądanых cech silników do napędu pojazdów elektrycznych. Na rynku oferowane są oprogramowania inżynierskie wspomagające pracę konstruktorów maszyn. Z uwagi na możliwość kompleksowej analizy zjawisk zachodzących w maszynach elektrycznych, wyeliminowanie lub zmniejszenie niedoskonałości produktu realizowane jest już na etapie projektowania. Z powyższych względów przedmiotem pracy jest silnik *BLDC* do napędu małego pojazdu elektrycznego – deski elektrycznej. Na rysunku 11.1 przedstawiono jeden z komercyjnych modeli wybranego pojazdu elektrycznego, który jest pojazdem w pełni elektrycznym (*typ BEV*). W pracy przyjęto następujące wymagania dla silnika do napędu wybranego pojazdu elektrycznego: akceptowalny (z perspektywy użytkownika) koszt, prostota konstrukcji i układu sterowania, małe wymiary, niska waga, wysoka gęstość momentu elektromagnetycznego, łatwa konserwacja oraz duża dostępność.



Rysunek 11.1. Deska elektryczna (ang. *hoverboard*) [1]

1. Wybrane rozwiązanie konstrukcyjne silnika

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej, przeglądu stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, typu wybranego pojazdu elektrycznego oraz przyjętych wymagań wybrano konstrukcję silnika *BLDC* z wirnikiem zewnętrznym przedstawioną na rysunku 11.2.



Rysunek 11.2. Modelowane rozwiązanie konstrukcyjne silnika *BLDC* do napędu deskorolki elektrycznej

2. Analiza obliczeniowa silnika *BLDC*

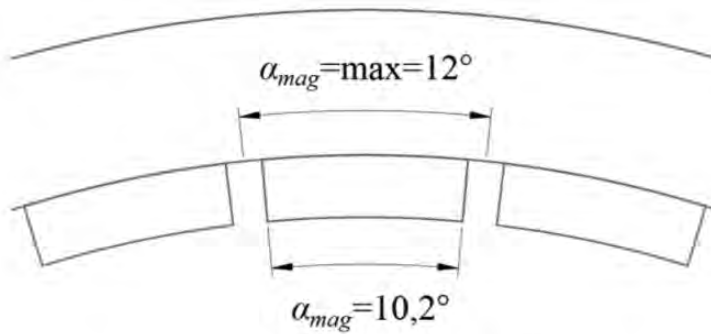
Silnik do wybranego pojazdu elektrycznego powinien zapewniać jak największą gęstość momentu elektromagnetycznego. Z tego względu przeprowadzono analizę obliczeniową pod kątem doboru wymiarów obwodu magnetycznego zapewniających maksymalną średnią wartość momentu, a przedstawioną w 3 rozdziale konstrukcję przyjęto jako bazowy model silnika.

Zakres analizy obliczeniowej obejmuje:

- analizę wpływu rozpiętości kątowej magnesów trwałych (kąta magnesów) oraz kształtu zębów stojana na wartość momentu zaczepowego i wartość momentu elektromagnetycznego przeprowadzoną dla wymuszenia prądowego odpowiadającego znamionowego momentu obciążenia modelu bazowego silnika,

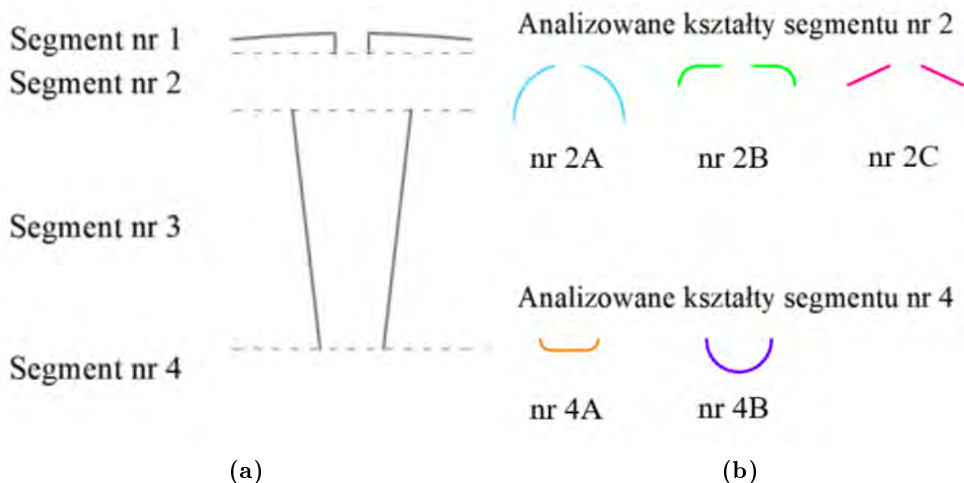
- wyznaczenie przebiegów czasowych wielkości elektrycznych i mechanicznych dla wybranej konstrukcji silnika, tj. dla wybranego kąta magnesu wirnika i kształtu żłobka stojana,
- wyznaczenie charakterystyk elektromechanicznych dla wybranej konstrukcji silnika.

Dla analizowanej konstrukcji silnika maksymalny kąt magnesów wynosi 12° , co pokazano na rysunku 11.3. Analizę wpływu kąta magnesów wykonano w zakresie od 6° do 12° .



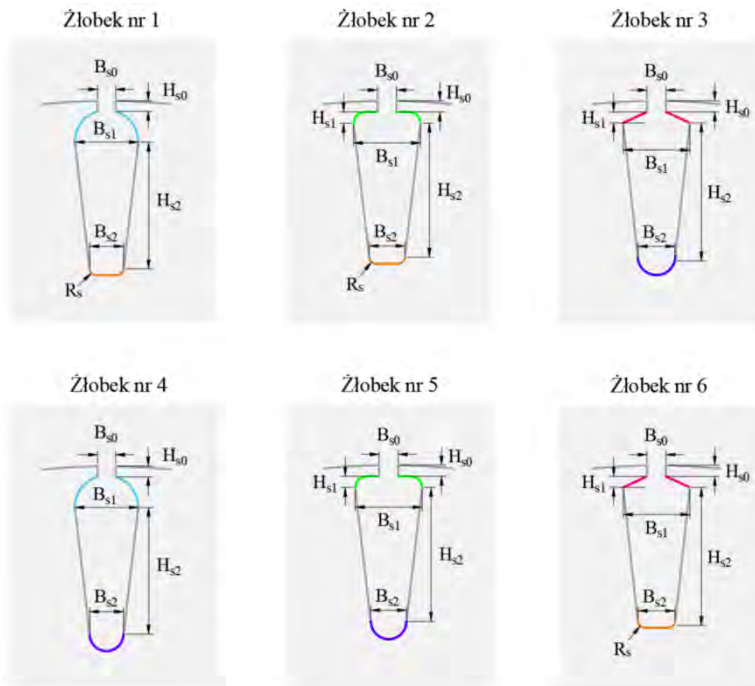
Rysunek 11.3. Przykładowe analizowane wartości kąta magnesu

W celu przeprowadzenia analizy kształtu żłobka stojana podzielono kształt żłobka modelu bazowego na cztery segmenty, przedstawiono to na rysunku 11.4a. Przeanalizowano trzy rodzaje kształtu segmentu nr 2 i dwa rodzaje kształtu segmentu nr 4 (rys. 11.4b). W celu rozróżnienia kształtu segmentów przyjęto dodatkowe oznaczenia literowe dla każdego z segmentów. W dalszych rozważaniach stosowano oznaczenia zgodne z poniższym rysunkiem.



Rysunek 11.4. Segmentacja kształtu żłobka stojana

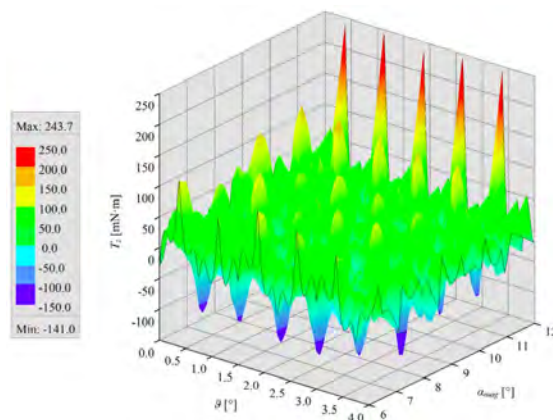
Na rysunku 11.5 przedstawiono analizowane kształty żłobków stojana. Kształt żłobka stojana modelu bazowego oznaczono jako żłobek nr 1.



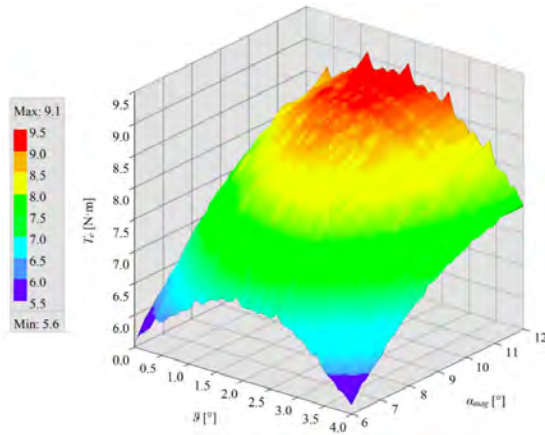
Rysunek 11.5. Analizowane typy żłobków stojana

2.1. Wpływ kąta magnesów wirnika i kształtu żłobków stojana na moment zaczepowy i moment elektromagnetyczny

Na rysunku 11.6 przedstawiono zależność momentu zaczepowego silnika od kąta obrotu i kąta magnesów wirnika dla żłobka nr 6 (rys. 11.5). Z kolei zależność momentu elektromagnetycznego silnika od kąta obrotu i kąta magnesu wirnika przy wymuszeniu prądowym odpowiadającym znamionowemu momentowi obciążenia modelu bazowego silnika dla żłobka nr 6 (rys. 11.5) przedstawiono na rysunku 11.7.

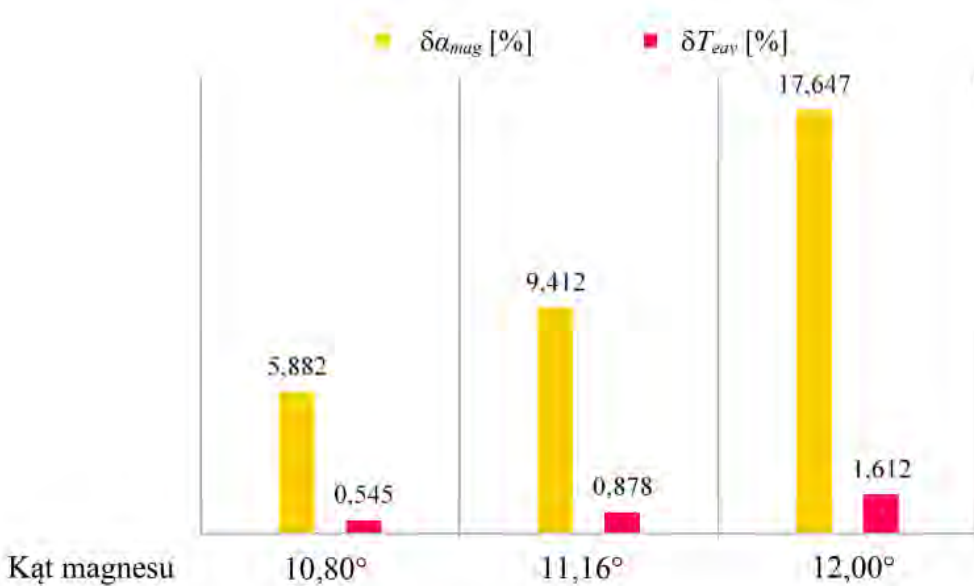


Rysunek 11.6. Zależność momentu zaczepowego od kąta obrotu wirnika ϑ i kąta magnesu ϑ_{mag} dla żłobka nr 6



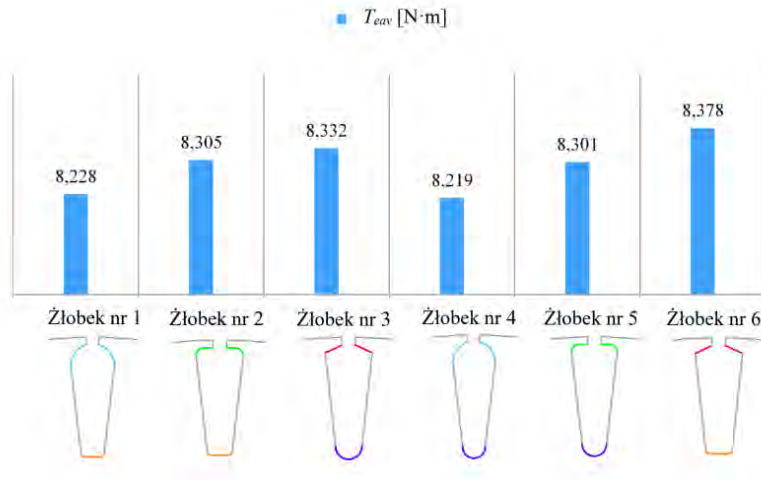
Rysunek 11.7. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta obrotu wirnika ϑ i kąta magnesu ϑ_{mag} dla żłobka nr 6

Rysunek 11.8 przedstawia zestawienie względnego przyrostu kąta magnesu i średniej wartości momentu elektromagnetycznego w odniesieniu do kąta magnesu równego $10,2^\circ$ dla kształtu żłobka nr 6.

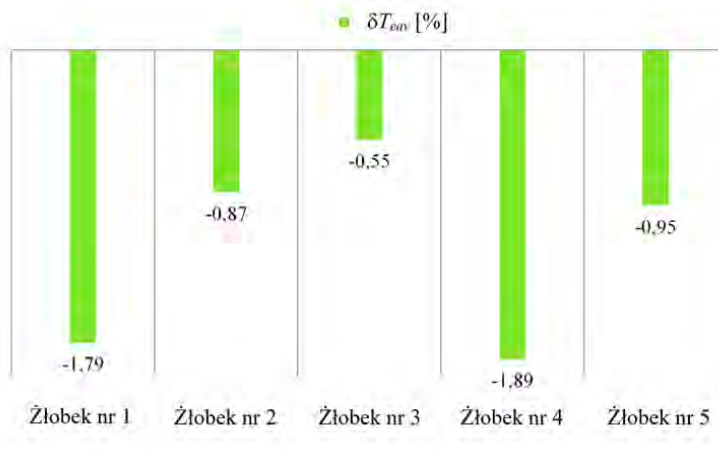


Rysunek 11.8. Zestawienie względnego przyrostu kąta magnesu $\delta\alpha_{mag}$ i średniej wartości momentu elektromagnetycznego δT_{eav} w odniesieniu do kąta magnesu równego $10,2^\circ$ dla żłobka 6

Rysunek 11.9 przedstawia zestawienie średniej wartości momentu elektromagnetycznego silnika dla analizowanych kształtów żłobka stojana. Natomiast na rysunku 11.10 przedstawiono jej względny przyrost w odniesieniu do wartości uzyskanych dla żłobka nr 6 i kąta magnesu równego $10,2^\circ$.

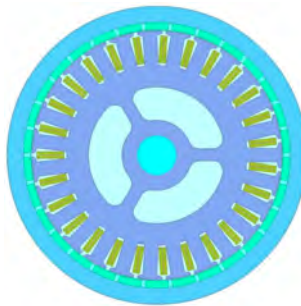


Rysunek 11.9. Zestawienie średniej wartości momentu elektromagnetycznego T_{eav} i zaczepowego T_{zav} dla kąta magnesu równego $10,2^\circ$



Rysunek 11.10. Zestawienie względnego przyrostu średniej wartości momentu elektromagnetycznego δT_{eav} w odniesieniu do wartości dla kształtu żłobka nr 6 i kąta magnesu równego $10,2^\circ$

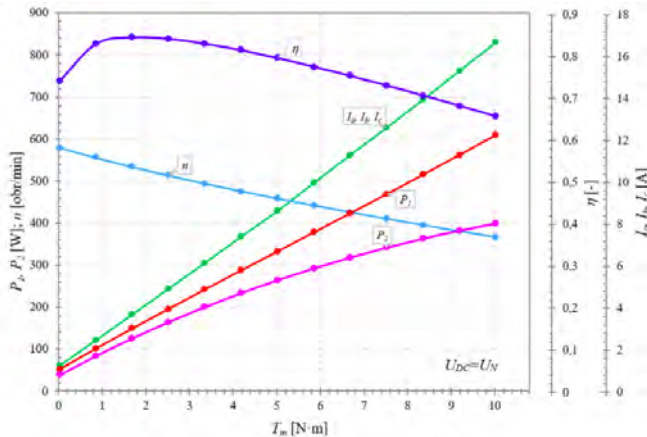
Z rysunków 11.8–11.10 wynika, że przy przyjęciu kryterium jakim jest maksymalna średnia wartość momentu elektromagnetycznego najmniej korzystnym rozwiązaniem spośród analizowanych kształtów żłobka stojana jest kształt żłobka nr 4, a najkorzystniejszym – kształt żłobka nr 6. Z badań wynika także, że przy przyjęciu kryterium maksymalnej średniej wartości momentu elektromagnetycznego kąt magnesu równy 12° jest najlepszym rozwiązaniem spośród analizowanych, a najgorszym – kąt magnesu równy 6° . Z tych względów dalszą analizę obliczeniową przeprowadzono dla wybranej konstrukcji silnika przedstawionej na rysunku 11.11, tj. dla kąta magnesu równego $10,2^\circ$ i kształtu żłobka stojana nr 6.



Rysunek 11.11. Wybrana konstrukcja silnika BLDC

2.2. Charakterystyki elektromechaniczne silnika

Na podstawie wyznaczonych przebiegów czasowych wybranych wielkości elektrycznych i mechanicznych wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne silnika. Na rysunku 11.12 zestawiono wyznaczone charakterystyki przy znamionowej wartości napięcia zasilania.

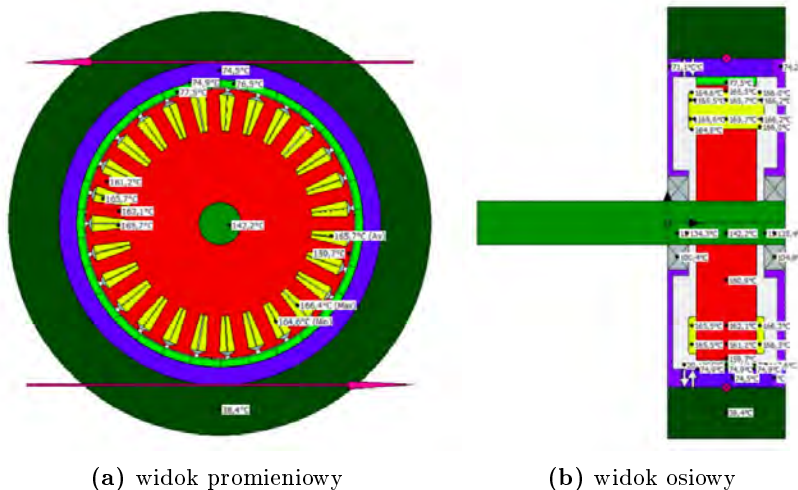


Rysunek 11.12. Charakterystyki elektromechaniczne silnika dla znamionowej wartości napięcia zasilania

2.3. Wstępna analiza termiczna silnika

W pracy zwrócono uwagę na główną wadę związaną z konstrukcją silnika do napędu elektrycznego zabudowaną w kole, co stanowi problem technologiczny dla ich projektantów. Z tego względu zapoznano się z narzędziem ANSYS MotorCAD w celu określenia krytycznych danych projektowych oraz elementów konstrukcji bezszczotkowego silnika prądu stałego wzorowanego na analizowanej konstrukcji zabudowanej w kole. Z rysunków 11.13 wynika, że krytycznym elementem konstrukcji silnika jest uzwojenie stojana, dla którego średnia wartość wynosi $165,7^{\circ}\text{C}$. Jest to temperatura akceptowalna przy klasie H izolacji uzwojenia. Na podstawie wyników obliczeń projektant może sprawdzić wpływ zwiększenia klasy izolacji na przyrost temperatury czy też zastosować jeden lub kilka sposobów chłodzenia. Niemniej jednak zaimplementowanie systemów chłodzenia jest utrudnione w lekkich pojazdach elektrycznych z uwagi na ograniczoną masę oraz wymiary. Należy

także zwrócić uwagę, że silnik ten pracował w sposób ciągły przez 48 minut przy znamionowej prędkości obrotowej. W przypadku projektowania silników do lekkich pojazdów elektrycznych należy dysponować odpowiednim cyklem pracy silnika.



Rysunek 11.13. Temperatura elementów konstrukcyjnych silnika po 48 minutach pracy z prędkością równą 400 obr/min

3. Podsumowanie

W dostępnej literaturze brakuje prac związanych z analizą bezszczotkowego silnika prądu stałego do napędu deski elektrycznej, szczególnie z analizą zjawisk elektromagnetycznych. Z tego względu w pracy dyplomowej zajęto się tym zagadnieniem. W ramach pracy przeprowadzono analizę literaturową w zakresie budowy, zasady działania i układów sterowania bezszczotkowych silników prądu stałego, nowo opracowanych konstrukcji silnika oraz ich zastosowania do napędu pojazdów elektrycznych. Na podstawie analizy literaturowej oraz przyjętych wymagań wybrano konstrukcję silnika. Na jej podstawie opracowano model połowo obwodowy w środowisku *ANSYS Maxwell*, za pomocą którego przeprowadzono analizę obliczeniową silnika.

Najważniejszymi cechami analizowanej konstrukcji bezszczotkowego silnika prądu stałego są: wirnik zewnętrzny, zintegrowanie silnika z kołem pojazdu, jarmo wirnika scalone z obudową silnika, skupione uzwojenie stojana, neodymowe magnesy trwałe, o promieniowym namagnesowaniu, naklejone na wirniku oraz sterowanie z wykorzystaniem czujników hallotronowych polegające na 120-stopniowym przewodzeniu prądu przez jedną fazę oraz komutacji faz co 60° elektrycznych.

Dodatkowo w ramach pracy dyplomowej opracowano obliczeniowy model cieplny o parametrach skupionych. Na podstawie wykonanej wstępnej analizy termicznej silnika wykazano, że uzwojenie stojana jest elementem konstrukcji silnika, które cechuje się największą wartością temperatury podczas pracy silnika. Analiza zjawisk cieplnych jest bardzo złożonym zagadnieniem. Oprogramowania takie jak *MotorCAD* wspomagają projektantów, przy czym wymagają od nich pewnego doświadczenia. Krytycznymi danymi wejściowymi w kontekście analizy termicznej z wykorzystaniem programu *MotorCAD* są: parametry cieplne elementów konstrukcyjnych silnika (w tym izolacji), wartość i rozkład strat mocy oraz zastosowany system chłodzenia wraz z wymaganymi parametrami.

Najważniejszymi osiągnięciami autora wynikającymi z realizacji pracy są:

- wybór pojazdu elektrycznego do napędu z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego na podstawie analizy opublikowanych prac,
- wybór bazowej konstrukcyjny silnika na podstawie przeglądu dostępnych rozwiązań (w tym opatentowanych wynalazków) oraz przyjętych wymagań dla wybranego pojazdu elektrycznego, tj. dwukołowej deski elektrycznej,
- wybranie wielobiegunowego silnika o zredukowanym momencie zaczepowym będącego przedmiotem opisu patentowego o numerze PL 218930 B1,
- zastosowanie sposobu wykonania uzwojenia skupionego bezszczotkowego silnika prądu stałego zmniejszającego długość połączeń czołowych będącego przedmiotem opisu patentowego o numerze PL 235129 B1,
- oparcie analizy o metodę symulacji komputerowej z wykorzystaniem oprogramowania *ANSYS Maxwell*,
- opracowanie obliczeniowego modelu połowo-obwodowego układu: źródło zasilania – przekształtnik energoelektroniczny (elektroniczny komutator) – silnik bezszczotkowy prądu stałego przeznaczony do napędu deski elektrycznej,
- zastosowanie połowo-obwodowej metody obliczeniowej analizy zjawisk zachodzących w analizowanym bezszczotkowym silniku prądu stałego,
- analiza wpływu rozpiętości kątowej magnesów trwałych oraz kształtu żłobków stojana na średnią wartość momentu elektromagnetycznego,
- dobór kąta magnesów wirnika i kształtu żłobków stojana na podstawie wykonanej analizy obliczeniowej,
- analiza wpływu momentu obciążenia na przebiegi czasowe wybranych wielkości elektrycznych i mechanicznych,
- analiza wpływu napięcia zasilania na przebiegi czasowe wybranych wielkości elektrycznych i mechanicznych,
- wyznaczenie i analiza charakterystyk elektromechanicznych silnika.

Bibliografia

- [1] Aldosry A., Zulkifli R., Aizon W.G., *Heat transfer enhancement of liquid cooled copper plate with oblique fins for electric vehicles battery thermal management*, World Electric Vehicle Journal, 12, 2021, 55.
- [2] Mazan B., Detka T., *Eksperymentalne badanie wpływu temperatury ogniwa litowo-jonowego na pojemność i dokładność obliczeń stopnia naładowania*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2, 2019, 185–190.
- [3] Fujita H., Itoh A., Urano T., *Newly developed motor cooling method using refrigerant*, World Electric Vehicle Journal, 10, 2019, 38.
- [4] Wiśniewski J., Kania A., Witkowski I., *Kompedium elektromobilności*, https://elektromobilni.pl/pdf/kompedium_elektromobilnosci_raport_2020_S.pdf, dostęp: 02-06-2020.
- [5] Emadi A., Lee Y.J., Rajashekara K., *Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55, 6, 2008, 2237–2245.

- [6] Radwański W., Dukalski P., *Koncepcja budowy silnika elektrycznego zabudowanego w piaście koła pojazdu*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2, 2014, 139–144.
- [7] Zhu Z.Q., Howe D., *Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles*, Proceedings of the IEEE, 95, 4, 2007, 746–765.
- [8] Chau K.T., Chan C.C., Liu C., *Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55, 6, 2008, 2246–2257.
- [9] Król E., *Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2, 2014, 23–27.
- [10] Shrivastava N., Brahmin A., *Design of 3-phase bldc motor for electric vehicle application by using finite element simulation.*, Engineering, 2014.
- [11] Taberski M., Kłos A., Cieślak D., Kisielewski P., Gwoździejewicz M., *Pojazd elektryczny z napędem bezpośrednim*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 1, 2019, 111–115.
- [12] Echle A., Gong Y., Terfurth J., Parspour N., *Fea-based comparison of bldc and blac modes for an axial flux motor with trapezoidal bmf*, [w:] *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2020*, 2694–2701.
- [13] Ho T.Y., Huynh K., Lin T.H., Yang S.W., *The design and implementation of a sensorless power tool based on a microcontroller*, Electronics, 9, 2020, 921.

Tests and diagnostics of HV power cables — best practice in line with current standards

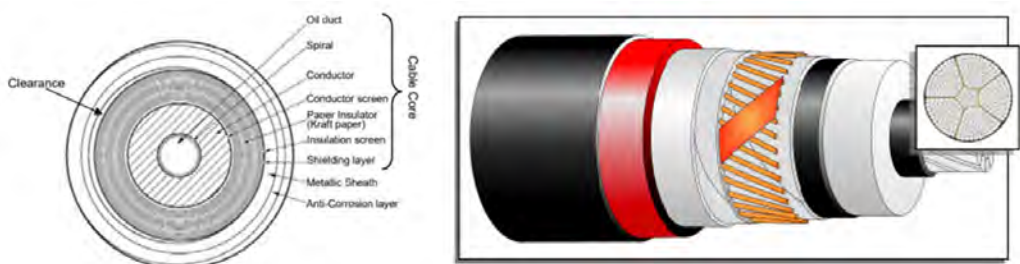
mgr inż. Artur Witaszewski
Elektrotechnika

dr hab. inż. Krzysztof Wieczorek
Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

The diploma thesis is focused on an on-site electric test of high voltage power cables. The main reason for choosing the subject is the increase in both the share and the absolute amount of cables in the power system. It results from the rapid development of transmission network infrastructure driven by the increasing demand for electricity, renewable energy sources and social factors. Additionally, cables in service also require testing. Therefore, there is a high demand for good quality condition assessments. The thesis introduces the most used types of cables and their construction (Fig. 12.1), SCOF Cables (Self-Contained Oil Filled) and Extruded Insulated Cables. On this basis, the defects occurring in the insulation are discussed which cause a reduction of local dielectric strength, leading to voltage breakdown and decreased service life. These material weaknesses may occur in every stage of cable lifespan. They are a direct cause of the ageing of the insulation in the cable.

Due to the source, they can be classified as [1, 2]:

- **electrical** – caused by voltage stress,
- **thermal** – caused by current,
- **mechanical** – caused by accidental damage, poor installation workmanship and
- **environmental** – material degradation, soil movement.

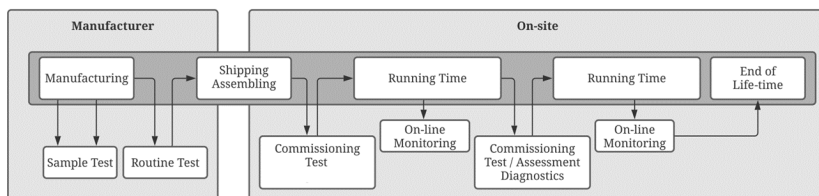


Rysunek 12.1. Cross-section of typical SCOF cable (left) [3] and XLPE cable (right) [4]

In SCOF cables, ageing-related failures are only 12% and only 7% regarding extruded insulated cables. The overwhelming part of all breakdowns is third party damage. It is 67%, where 12% is caused by oil leakage in SCOF cables. In extruded cables, 65% is poor installation, 13% manufacturing and 13% construction. Therefore, it is very important to properly examine the quality of the cable before putting it into service. The condition evaluation process has been described. based on current standards, research, and practice, Condition evaluation is critical mainly in two aspects. The new cable proves the absence of any defect in cable insulation and accessories after installation and transport. Even 12% of all newly installed cables breakdown during the test. In the service cables after repair to check the quality of workmanship or after a period of service to check the ageing process status. It is imperative to properly assess the condition of the cable to prepare an appropriate operating strategy [1, 2, 5, 6]

To assess the condition, various tests are performed (Fig. 12.2). In the case of high voltage power cables, the first tests are performed at the factory by the manufacturer. The on-site tests may be divided into online and offline types of testing. In the online methods, there is no need to take the cable out of the operation. The thesis is focused on offline methods. In general, there are two ways of diagnostic techniques [6]:

- Acceptance Test or Commissioning Test where the cable (newly installed or after repair) is checked, in general, if it is suitable for connection to the power grid. Therefore, the main criterion is pass or fail. An integral and crucial part of the is Voltage Withstand Test.
- Assessment Diagnostics is performed on cables routinely. The more important function is to check the health of the cable rather than pass or fail criterion. In this case, the Partial Discharges at different voltage levels and Dielectric Losses are measured.

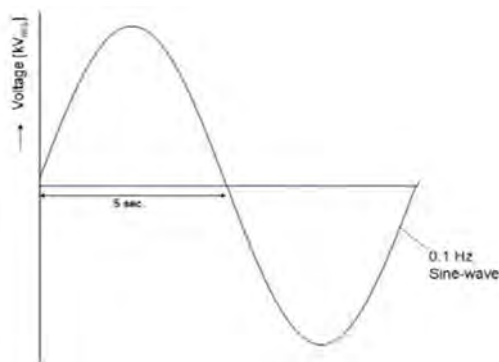


Rysunek 12.2. Test cycle of power cables [5, 7]

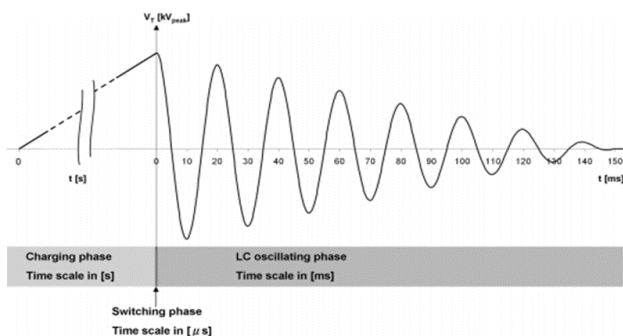
For comparison of tests methods, these 3 approaches or measurements are discussed in the thesis. The Voltage Withstand Test (VWT) involves applying the predefined type of voltage, e.g., continuous AC with a given voltage level and time duration. It can be extinguished nonmonitored VWT, where we have only pass or fail criterion. Essentially, if the cable withstands a predefined level of voltage at a particular time, it passes the test, if not it fails. In monitored VWT besides the pass or fail criterion we monitor Partial Discharge (PD) activity and Dielectric Loss (DL). PD is a discharge localized in a small part of electrical insulation, but it does not entirely bridge between points with a high potential difference. DL quantifies the dissipation of electromagnetic field energy, in the form of heat, in cables insulation. PD and DL are parameters determining the quality of insulation [5, 6, 8–10]

The four main methods due to voltage type generation have been presented. For each of these methods, DC Voltage, Continuous AC Voltage, Very Low Frequency (VLF) Voltage (Fig.3), and Damped AC (DAC) Voltage (Fig.4), the physical principles, measurement system, and test procedure were described. Due to the fact, that AC cables have a much larger share in already installed HV and EHV cables, the thesis is focused on the comparison of the Continuous AC Voltage and the Damped AC Voltage method – DC Voltage is only used in HVDC Cables

(sometimes can be also used in SCOF cables) and VLF is recommended for MV cables (up to 69 kV) [5].



Rysunek 12.3. Sinus wave at 0.1 Hz (VLF) [11]



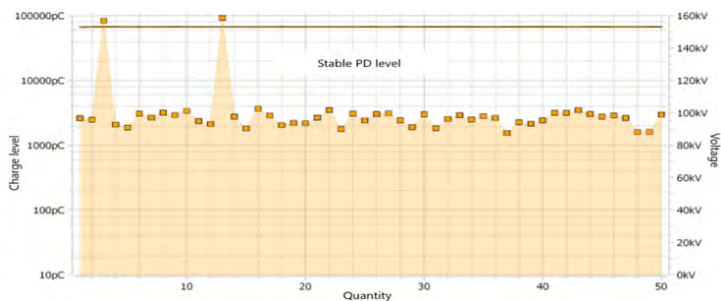
Rysunek 12.4. DAC excitation [10]

In both methods, Continuous AC and DAC, the resonance phenomena are used. The main difference is sustaining resonance in the test object. Due to energy losses in the cable, the Resonance AC (Continuous AC) method need to replenish energy to sustain resonance phenomena. The DAC method does not sustain oscillation and allows the oscillation to expire. Thus, the power demand of the test setup is significantly lesser. The DAC system can be powered by a small portable generator or directly from the power socket. In the case of the Resonance system, it might be powered only by a large diesel generator. Therefore, the DAC test system has 10 times lesser mass and volume comparing to the Resonance system. This is a crucial parameter in on-site testing. Access to the cable termination at power stations is often difficult due to the lack of space for equipment or even the lack of access to an unsuitable road for heavy trucks. Even worse access may be in the case of terminations mounted on power poles. The DAC system has much better mobility than the Resonance system. Therefore, it can be applied in much more cable circuits, and test costs are significantly lesser (e.g., no need to build a special road, dismantle the fences). Both methods, the DAC and the Continuous AC may be successfully applied for testing HVAC cables with both SCOF and extruded types of insulation. Also, both methods can be applied for PD and DL measurement in the case of HVDC cables. The Continuous AC Voltage and DAC Voltage methods are based on sinusoidal test voltage. Therefore, it reflects the actual operating conditions of the cable [5, 12–14].

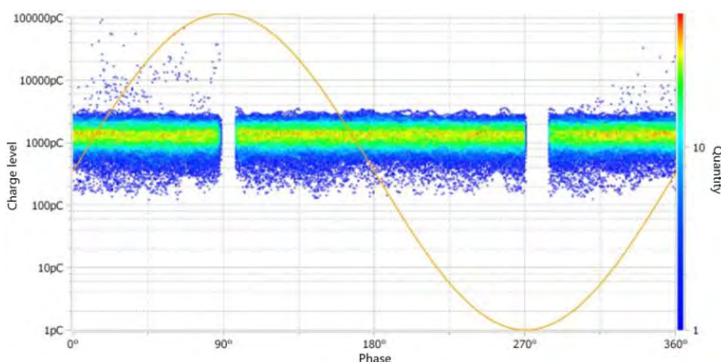
Continuous AC Voltage method is recommended in every standard for testing HVAC cables in Commissioning Test and Assessment Diagnostics. This is because it has an extensive database

of performed tests and the voltage type is the same as operational voltage. The DAC Voltage method is recommended in IEEE 400.4 standard. However, IEC does not recommend it. The reason might be that the DAC Voltage is a relatively new method, and it has significantly less experience in on-site testing [10].

The thesis includes on-site cable test data in natural conditions using the DAC method. The analysis of two cable circuits condition is presented. The first circuit with high quality installed cable with no defects as a reference to next, where we can observe the occurrence of partial discharges in insulation (shown in Figs. 12.5–12.7). Both cables are compared in many angles to show how complicated this analysis is. Below on figure 12.5 we can observe Voltage Withstand phase, where the PD level are quite stable, they are not rising thus the situation does not get worse and the breakdown does not occur. The result is that cable is good to go in term of only pass and fail criterion. We can observe two events of high magnitude PD discharge, however it can be classified as distortions. The PRPDs pattern shown in figure 12.6 shows PD occurrence in the first and fourth quarter of the spectrum. That suggests that the PD source is in the outer part of inner insulations or on the surface. The PD mapping in figure 12.7 shows the concentration of PD on 950-970m of cable length for phase L2. The number of PDs is relatively low. The PDs activity was measured in each phase, and the first signs of insulation degradations were noticed. The PD occurrence measured above the nominal voltage. Thus, the degradation should not proceed quickly. The detailed analysis is included in the thesis. To properly assess the condition of the cable the expert knowledge and much experience is needed for the tester. Additionally, it has been described how the performance of the DAC test looks in practice.

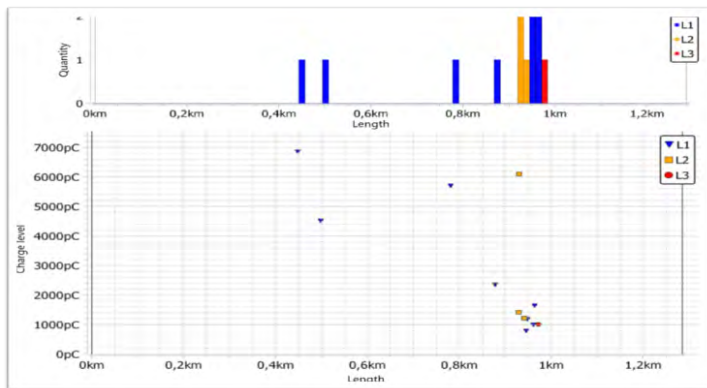


Rysunek 12.5. Withstand voltage test of phase L2



Rysunek 12.6. Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) pattern of phase L2

Every offline method described in this thesis allows performing Voltage Withstand Test, Partial Discharge and Dielectric Loss measurements. However, there is no one suitable test method



Rysunek 12.7. PD mapping

for every power cable circuit. The selection of the appropriate method depends, among others, on the type of cable insulation, length, type of operating voltage, economic aspect and even accessibility of cable termination for on-site measurement systems. Also, the measuring database of a given cable is crucial. Due to technological development methods evolves and crucial reason of selecting a method may have gathered earlier database. The comparison of measurement data of different methods is very difficult or even impossible. It results from the fact of different voltage stress characteristics, voltage levels, PD characteristics.

Each method has its pros and cons for a specific cable circuit. In addition, situations may arise in which the tested object breakdown just after being switched under the load. Thus, diagnostic tests do not always provide precise or even correct results. In the whole process, not only the method is essential, but also the quality of the equipment and service. External disturbances, e.g., from active lines next to the tested object or weather conditions, may have an enormous impact on the quality and sometimes the possibility of performing diagnostics.

The economic factor in choosing the best test method is critical. Mobility significantly affects this factor because it can significantly shorten the preparation time for measurements. The need to prepare special access for heavy trucks, space for measuring equipment and setting it up takes a significant part of the time, therefore it generates high costs.

Bibliografia

- [1] international des grands réseaux électriques. Comité d'études B1 C., *Remaining Life Management of Existing AC Underground Lines*, CIGRÉ 2008.
- [2] Pultrum E., Verhoeven S., *Testing of extruded cables: Experience in type testing, pq testing and test after installation. what do we learn from it?*, [w:] *CIGRE Working Group B1.104* 2004.
- [3] Matsuya Y., Kaya T., Soga M., Tsutsumi T., Okamoto G., Itabashi H., Mitsuyama Y., *Degradation mechanism of scof cable due to cable core movement*, [w:] *9th International Conference on Insulated Power Cables* 2015.
- [4] *Telefonika kable. hv and ehv cable catalog*, <https://www.tfkable.com/>, dostęp: 01-11-2020.
- [5] Cichecki P., *esting and Diagnosis of High Voltage and Extra Voltage Power Cables with Damped AC Voltages*, rozprawa doktorska, TU Delft University 2018.

- [6] *Ieee std 400-2012. ieee guide for field testing and evaluation of the insulation of shielded power cable systems rated 5 kv and above*, <https://standards.ieee.org/project/400.html>, dostęp: 01-11-2020.
- [7] Schikarski P., Gamlin M., Rickmann J., Peeters P., Nienwendijk P., Koning R., *Two years of experience with a mobile resonant test system for testing of installed medium- and high voltage power cables*, [w:] *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*, 5 1999, 236 – 239.
- [8] Eigner A., Rethmeier K., *An overview on the current status of partial discharge measurements on ac high voltage cable accessories*, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 32, 2, 2016, 48–55.
- [9] Normalizacyjny P.P.K., *High voltage test techniques - Part 3: Definitions and requirements for on-site tests (IEC 60060-3: 2006)*, PKN 2006.
- [10] IEEE, *Ieee guide for field testing of shielded power cable systems rated 5 kv and above with damped alternating current (dac) voltage*, *IEEE Std 400.4-2015*, 2016, 1–62.
- [11] Putter H., Goetz D., Petzold F., Oetjen H., *The evolution of vlf testing technologies over the past two decades*, [w:] *2012 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*) 2012, 1–4.
- [12] Cichecki P., Gulski E., Smit J., Chmura L., Jongen R., *On-site diagnosis of xlpe transmission power cables with damped ac technique*, [w:] *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* 2010, 1–5.
- [13] W H., S S., Chrzan K., *Hv on-site testing on cables by alternating voltage of variable frequency*, [w:] *International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM* 2001.
- [14] B1.07. C.W.G., *Statistics of ac underground cable in power networks*, 2007.

Część III

Wydział Podstawowych
Problemów Techniki

Opracowanie układu kondycjonowania sygnału w pomiarach bioimpedancji tkanek metodą tomografii impedancyjnej

inż. Janusz Janaszek

Inżynieria Biomedyczna

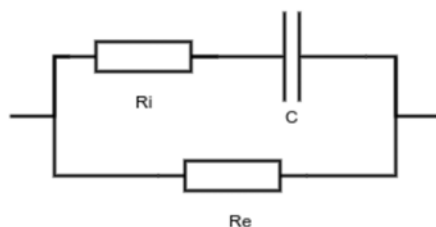
dr inż. Zdzisław Szczepanik

Katedra Inżynierii Biomedycznej

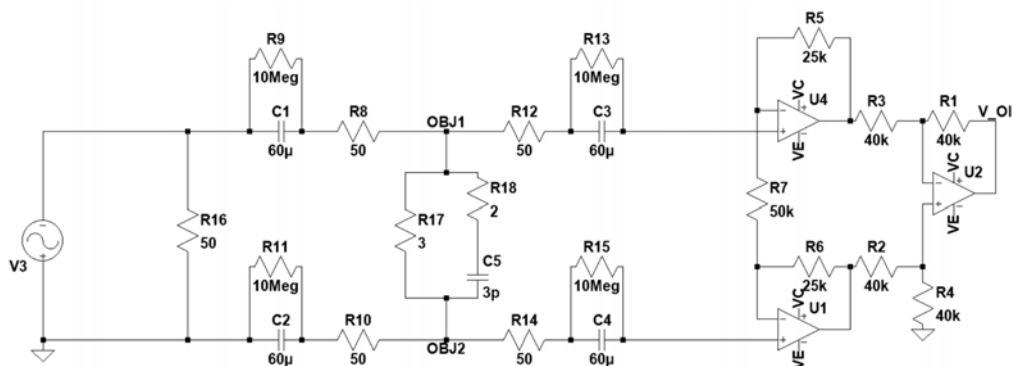
Celem pracy było zaprojektowanie oraz konstrukcja prototypu układu kondycjonowania przeznaczonego do zastosowania w pomiarach impedancji tkanek metodą tomografii impedancyjnej z opcją spektroskopii impedancyjnej. Projekt rozszerzono o moduł multipleksujący, zdolny do przełączania sygnałów pomiędzy szeregiem elektrod, a układem kondycjonującym. Zakres pracy obejmuje przegląd literatury z dziedziny impedancji, bioimpedancji i ich zastosowań, ale także wykonanie symulacji komputerowych na elektrycznych modelach zastępczych obiektów biomedycznych, projektu i praktycznej realizacji układu przeznaczonego do pomiarów impedancyjnych oraz zbadanie parametrów tego układu.

Istotą pomiaru impedancji elektrycznej obiektów biomedycznych jest pobudzenie badanego obiektu prądem, najczęściej zmiennym, o znanych parametrach (dobranych tak by nie spowodować uszkodzenia obiektu) i pomiar reakcji obiektu na pobudzenie. Przepływ prądu elektrycznego, w każdym obiekcie przewodzącym, w tym w tkance, odbywa się po drogach możliwie najmniejszego oporu. W ciele ludzkim jego przepływ jest możliwy głównie przez płyny (np.: płyn międzykomórkowy, krew, cytoplazmę). Ze względu na zmienny charakter środowiska, które reprezentuje organizm ludzki, niemożliwa jest dokładna ocena drogi, którą pokonuje sygnał elektryczny. Zależna jest ona, obok cech obiektu badanego, również od natężenia prądu, oraz jego częstotliwości. Najprostszy trójelementowy elektryczny model zastępczy tkanki przedstawiono na rysunku 13.1, gdzie rezystor R_e odwzorowuje impedancję płynu międzykomórkowego, a układ rezystora R_i i kondensatora C odwzorowuje impedancję komórek, gdzie R_i modeluje rezystancję cytoplazmy, a C pojemność błony komórkowej. Dla przepływu prądu o niskiej częstotliwości C cechuje się skrajnie wysoką impedancją (którą można uznać za nieskończenie wielką), której wartość maleje wraz ze wzrostem częstotliwości powodując przepływ prądu również przez wnętrza komórek.

Na etapie symulacji prowadzono rozważania na temat potencjalnych modeli zastępczych układu pomiarowego. Przetestowano szereg proponowanych w literaturze schematów zastępczych tkanki oraz układów wzmacniaczy w różnych konfiguracjach. W symulacjach wzięto również pod uwagę wpływ impedancji styku elektroda-skóra na mierzone wartości. Na rysunku 13.2 przedstawiono jeden z testowanych układów z modelami styku elektroda-skóra oraz tkanki badanej, a także schemat układu pomiarowego wzmacniacza instrumentalnego.



Rysunek 13.1. Trójelementowy model zastępczy tkanki



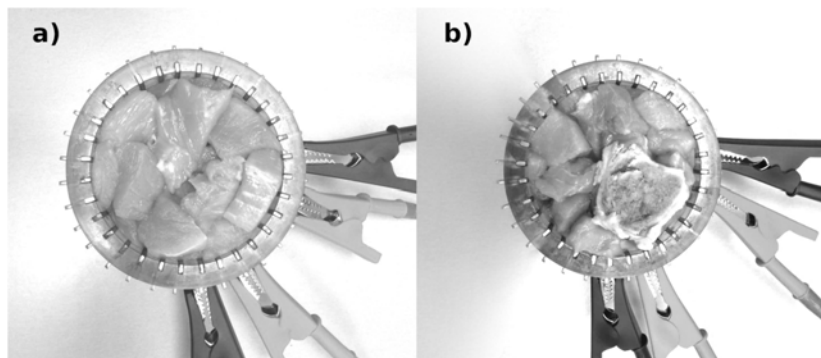
Rysunek 13.2. Schemat układu pomiaru wzmacniaczem instrumentalnym - symulacje

Po zakończeniu etapu symulacyjnego przeprowadzono serię poglądowych pomiarów z wykorzystaniem wektoromierza Solartron Schlumberger 1253A. Urządzenie umożliwia pomiar odpowiedzi obiektu na pobudzenie w dziedzinie rzeczywistej i zespolonej. Ponieważ urządzenie to nie posiada izolacji galwanicznej na stopniu pomiarowym, niemożliwe było przeprowadzenie pomiarów z wykorzystaniem żywego obiektu. Z tego powodu posłużono się modelem, najpierw niebiologicznym (w postaci walca aluminiowego zanurzonego w wodzie wodociągowej), a dalej biologicznym (w postaci zwierzęcej tkanki mięśniowej oraz tej samej tkanki mięśniowej z zanurzonym w niej fragmentem kości).

Stanowisko pomiarowe, oprócz przyrządu pomiarowego *Solartron Schlumberger 1253*, zawierało wieloelektrodowy czujnik impedancyjny. Był to skonstruowany z *PMMA* walec o średnicy podstawy 8 cm i wysokości 8 cm z 32 elementami metalowymi pełniącymi rolę elektrod (umieszczonymi po wewnętrznej stronie jego bocznej ściany na całym obwodzie). Zdjęcie czujnika z biologicznym obiektem badanym przedstawiono na rysunku 13.3.

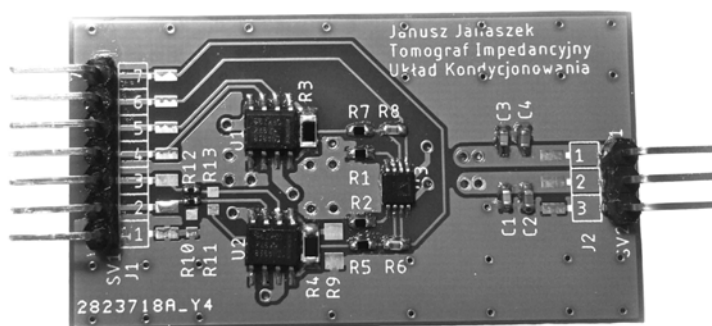
Dokonano pomiarów płynącego w układzie prądu oraz napięcia w celu wyznaczenia impedancji obiektu umieszczonego w czujniku. W eksperymentach wykorzystano tryb „*sweep*” przyrządu *Solartron*, który zapewniał inkrementację częstotliwości sygnału pobudzającego o określony krok pomiędzy każdym pomiarem, co pozwoliło na wykorzystanie otrzymanych wyników do analizy spektralnej odpowiedzi badanych obiektów. Zebrane wyniki przedstawiono na wykresach jako zmiany impedancji w dziedzinie zespolonej (wykresy Cole-Cole) oraz zmiany wartości modułu impedancji w dziedzinie częstotliwości sygnału pobudzającego.

Zasadniczą część pracy stanowiła konstrukcja układu kondycjonowania, który można wykorzystać w pomiarach bioimpedancji. Zdecydowano się na przyjęcie formy układu podzielonego na dwa tory wzmacniające, każdy o dwóch stopniach wzmocnienia. Jeden z kanałów był przeznaczony



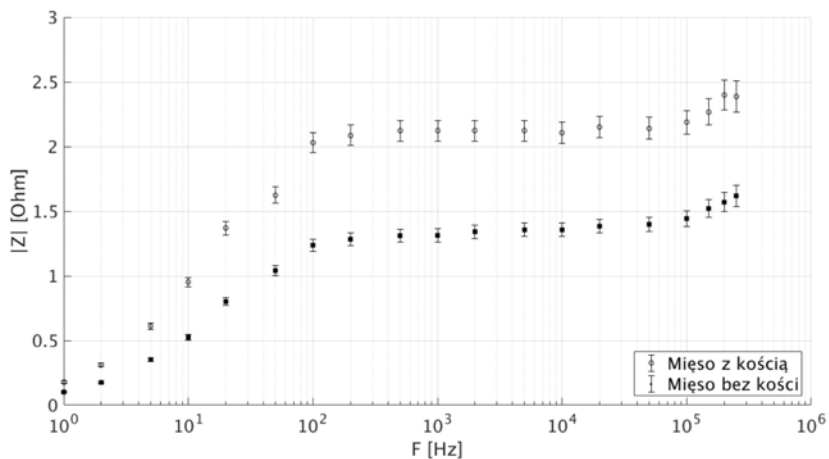
Rysunek 13.3. Czujnik z tkanką wieprzową: a — bez kości, b — z kością

ny do pomiaru napięcia na obiekcie badanym, a drugi - napięcia na rezystorze wykorzystywanym do pomiaru prądu. Dwa stopnie wzmocnienia zapewniają natomiast większą wartość wzmocnienia przy szerszym paśmie przenoszenia niż w przypadku wzmacniacza jednostopniowego. Zdjęcie płytki drukowanej z układem kondycjonowania zamieszczono na rysunku 13.4. W pracy przeprowadzono również szereg pomiarów parametrów skonstruowanego układu i wyznaczono niepewności pomiarów prowadzonych przy jego pomocy. Wyniki pomiarów modułu impedancji prowadzonych za pomocą skonstruowanego układu na mięsie wieprzowym oraz mięsie z fragmentem kości przedstawiono na rysunku 13.5.

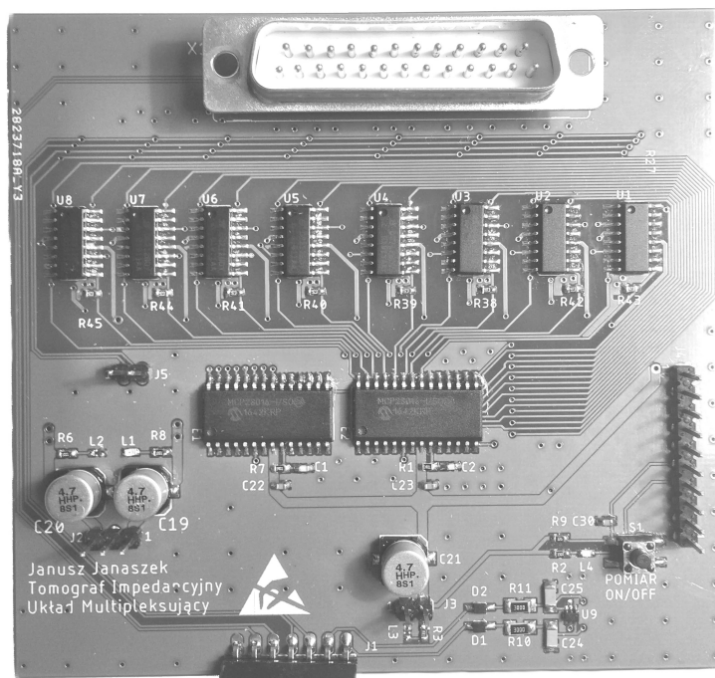


Rysunek 13.4. Ilustracja płytki PCB układu kondycjonowania

W pracy zdecydowano się rozszerzyć projekt o dodatkowy moduł zwiększający jego możliwości pomiarowe, umożliwiając (po zaprogramowaniu odpowiedniego algorytmu) przeprowadzenie serii pomiarów, które można wykorzystać jako dane wejściowe algorytmu rekonstrukcyjnego, w efekcie składając się na kompletny pomiar techniką Elektrycznej Tomografii Impedancyjnej. Skonstruowano więc dołączane do układu urządzenie odpowiadające za pomiar napięć wyjściowych z wzmacniaczy układu oraz przełączanie (multipleksing) sygnałów elektrod i zewnętrznego generatora w taki sposób, by umożliwić pomiar metodą tomografii impedancyjnej. Zdjęcie płytki PCB układu multipleksującego przedstawiono na rysunku 13.6.

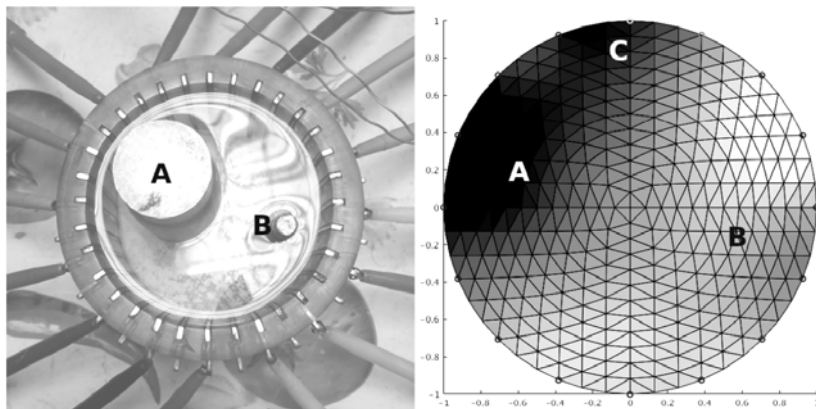


Rysunek 13.5. Charakterystyka częstotliwościowa mierzona zrealizowanym układem wzmacniacza (wygenerowano w środowisku Matlab 2015)



Rysunek 13.6. Ilustracja płytki PCB układu multipleksującego

Do przeprowadzenia rekonstrukcji obrazu wykorzystano oprogramowanie *EIDORS 3.9.1* licencjonowane na podstawie *GNU General Public License v2.0*. Oprogramowanie zostało stworzone i jest rozwijane przez badaczy z University of Manchester. Wynik rekonstrukcji obrazu na podstawie przykładowego pomiaru skonstruowanymi urządzeniami przedstawiono na rysunku 13.7. Można na nim zauważyć wyróżniające się obszary A i B związane z obecnością obiektów o innej impedancji (A — walec aluminiowy, B — pręt gwintowany ze stali nierdzewnej). Na rekonstrukcji obrazu widoczny jest również obszar C, zidentyfikowany jako wadliwa elektroda.



Rysunek 13.7. Porównanie obrazu EIT i obiektu badanego (użyte programy: *GIMP 2.10* i *Matlab 2015*)

Bibliografia

- [1] Sherwood A., Allen M., Fahrenberg J., Kelsey R., Lovallo W., Doornen L., *Methodological guidelines for impedance cardiography*, *Psychophysiology*, 27, 1990, 1–23.
- [2] Pietrobelli A., FS R., St-Onge M.P., Heymsfield S., *New bioimpedance analysis system: Improved phenotyping with whole-body analysis*, *European journal of clinical nutrition*, 58, 2004, 1479–84.
- [3] Ho W., Krause S., McNeil C., Pritchard J., Armstrong R., Athey D., Rawson K., *Electrochemical sensor for measurement of urea and creatinine in serum based on ac impedance measurement of enzyme-catalyzed polymer transformation*, *Analytical Chemistry*, 71, 1999, 1940–1946.
- [4] Stewart G.N., *The charges produced by the growth of bacteria in the molecular concentration and electrical conductivity of culture media.*, *Journal of Experimental Medicine*, 4, 2, 1899, 235–243.
- [5] Scully J., *Electrochemical impedance of organic-coated steel: Correlation of impedance parameters with long-term coating deterioration*, *Electrochem. Soc*, 136, 1989, 979–990.
- [6] Beck M., Williams R., *Process tomography: A european innovation and its applications*, *Measurement Science and Technology*, 7, 1999, 215.
- [7] Hollaus K., Stollberger R., Wagner B., Gerstenberger K., Magele C., Hutten H., *Simulation of the bio-impedance of the human thigh by the finite element method in 3d*, [w:] *Tagungsband des 48. Wissenschaftlichen Kolloquiums 2003*, 425–426.
- [8] Wang G., Holder D., *Holder david s: Electrical impedance tomography.1st edition. institute of physics publishing*, *Biomedical Engineering Online - BIOMED ENG ONLINE*, 4, 2005, 1–2.
- [9] Buendía R., Seoane F., Lindecrantz K., Bosaes I., Gil-Pita R., Johannsson G., Ellegård L., Ward L., *Estimation of body fluids with bioimpedance spectroscopy: State of the art methods and proposal of novel methods*, *Physiological Measurement*, 36, 2015, 2171–2187.

- [10] Rigaud B., Hamzaoui L., Frikha M., Chauveau N., Morucci J., *In vitro tissue characterization and modelling using electrical impedance measurements in the 100 hz-10 mhz frequency range*, Physiological measurement, 16, 1995, A15–28.
- [11] Osypka M., Gersing E., *Tissue impedance spectra and the appropriate frequencies for eit*, Physiological measurement, 16, 1995, A49–55.
- [12] Fraczek M., CICKI T., ORON Z., NIA A., CIEPKA J., UCKI Z., Szczepanik Z., *Measurements of electrical impedance of biomedical objects*, Acta of bioengineering and biomechanics / Wrocław University of Technology, 18, 2016, 11–17.
- [13] Dalziel C.F., *Effects of electric shock on man*, IRE Transactions on Medical Electronics, PGME-5, 1956, 44–62.

Projekt i wykonanie bezprzewodowego masażera do mięśni

inż. Krzysztof Bober
Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Andrzej Grobelny
Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki

W pracy inżynierskiej opisano kolejne etapy projektowania, a następnie wykonania bezprzewodowego masażera do mięśni. Urządzenie umożliwia wykonywanie masażu relaksacyjnego.

Przedmiotowa praca dyplomowa zawiera wstęp, w którym przedstawiono zarys czego dotyczy motywację dlaczego taki masażer został wykonany, a następnie cel oraz założenia projektowe dotyczące konstruowanego urządzenia. Głównym celem pracy jest zaprojektowanie i wykonanie prototypu masażera bezprzewodowego, który inspirowany jest rozwiązaniami występującymi na rynku. Najważniejszym zadaniem urządzenia jest umożliwienie masażu wszystkich partii mięśniowych kończyn oraz pleców przy użyciu głowicy z czterema powierzchniami masującymi, co wpływa na zwiększenie wydajności i efektywności jego funkcjonowania.

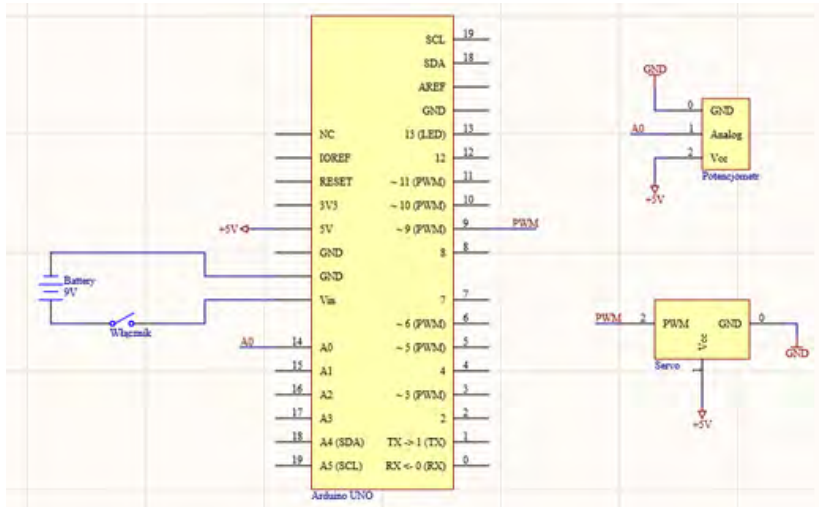
Następnie dokonano przeglądu literaturowego, gdzie w sposób szczegółowy opisano kolejno, czym jest zabieg masażu i jak wpływa na tkanki oraz układy. Sprawdzono urządzenia dostępne na rynku i opisano ich parametry, m.in. częstotliwość wibracji, możliwość regulacji częstotliwości, waga, pojemność baterii, żywotność baterii, a także ich zdjęcia. Na końcu przeglądu literaturowego opisano technologię druku 3D, gdzie zawarto informacje o tym z jakich materiałów można drukować, a także w jakich gałęziach przemysłu stosowana jest ta technika druku.

W dalszej części skupiono się na pokazaniu procesu projektowania układu elektronicznego. Przedstawiono wszystkie elementy układu, tzn. ich nazwę, funkcję oraz zdjęcie, a na koniec zestawiono parametry elementów w tabeli 14.1.

Następnie układ elektroniczny opisano za pomocą schematu elektrycznego tzw. ideowego, co w graficznej formie ukazało połączenia wszystkich elementów układu. Schemat ukazuje rysunek 14.1.

Tabela 14.1. Parametry elementów zaprojektowanego układu elektronicznego

Element	Parametr	Wartość
Klon płytki Arduino UNO	Wersja modułu	Rev3
	Mikrokontroler	ATmega328
	Napięcie zasilania (rekomendowane)	7-12 V
	Napięcie zasilania (limit maksymalny)	6-20 V
Serwomechanizm SG90	Piny cyfrowe I/O	14 (w tym 6 PWM)
	Piny analogowe	6
	Prąd stały na pinach I/O	40 mA
	Częstotliwość zegara	16 MHz
Potencjometr obrotowy	Napięcie zasilania (rekomendowane)	4,8-6 V
	Kąt obrotu wału	0-180°
	Waga	14,7 g
Bateria	Rezystancja	10 kΩ
	Moc	0,125 W
	Charakterystyka	Linijowa
	Tolerancja liniowości	±20%
Przełącznik kołkowy	Rodzaj baterii	Alkaliczna
	Napięcie nominalne	9 V
	Pojemność maksymalna	540 mAh
Przewody połączeniowe	Natężenie pracy maksymalne	6 A
	Napięcie pracy maksymalne	230 V
	Ilość pozycji	Dwupozycyjny
Przewody połączeniowe	Kształt	Okrągły
	Typy złącz	męsko-męskie; żeńsko-męskie
	Długości przewodów	10; 15; 18,5; 20 cm



Rysunek 14.1. Schemat ideowy przedstawiający połączenia między blokami elektronicznymi

W kolejnej części skupiono się na przedstawieniu oprogramowania modułu sterującego, gdzie pokazano kod programu oraz jego analizę. Kod źródłowy programu sterującego urządzeniem został napisany w środowisku Arduino IDE i przedstawiono go na poniższym listingu.

```
// dodanie zawartosci biblioteki Servo.h do kodu zrodlowego
#include <Servo.h>
Servo silnik;
// zmienne globalne
int i = 0;
int alpha = 30;
int potencjometr = 0;

void setup() {
// serwomechanizm na pin 9
  silnik.attach(9);
}

void loop() {
//wart. analog. z pinu A5 przypisywana do zmiennej potencjometr
  potencjometr = analogRead(A5);
  delay(5); // opoznienie 5 ms

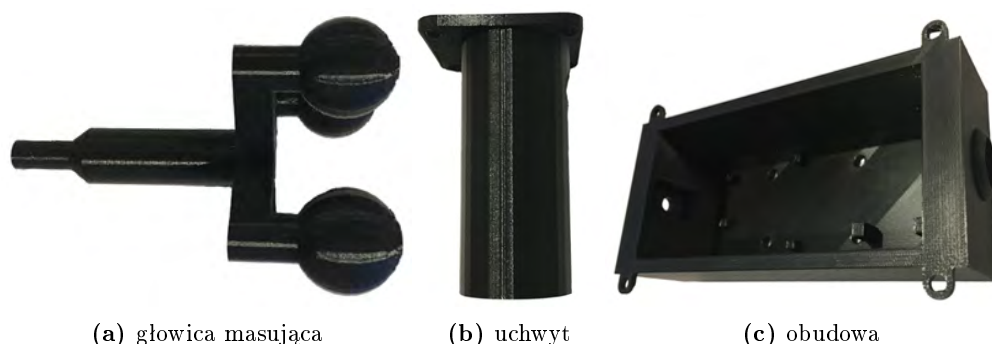
//petla poruszajaca walem serwomechanizmu od 0 do 30 stopni
  for(i=0;i<alpha;i++){
    silnik.write(i);
    // opoznienie w zaleznosci od zmiennej potencjometr
    delay(potencjometr*4/1023+2);
  }
//petla poruszajaca walem serwomechanizmu od 30 stopni do 0
  for(i=alpha;i>=1;i--){
    silnik.write(i);
  }
}
```

```

// opoznienie w zaleznosci od zmiennej potencjometr
delay ( potencjometr *4/1023+2);
}
}

```

Część konstrukcyjna dotyczy zamodelowanych, a następnie wykonanych elementów mechanicznych urządzenia. W skład elementów mechanicznych urządzenia wyprodukowanych w technologii druku 3D wchodzi: głowica masująca, uchwyt, obudowa oraz pokrywa zamykająca. Każdy z elementów dokładnie opisano pod kątem funkcjonalności, przedstawiono jego wymiary, wagę, a także umieszczono zdjęcia, które widoczne są na rysunku 14.2.



Rysunek 14.2. Zdjęcia elementów mechanicznych wykonanego urządzenia

W kolejnym podrozdziale zaprezentowano drukarkę 3D, którą użyto do wytworzenia bezprzewodowego masażera. Pod koniec umieszczono informacje dotyczące sposobu montażu prototypu, a także jego parametrów, co widać w tabeli 14.2. Wygląd kompletnego urządzenia, przedstawiono na rysunku 14.3.

Tabela 14.2. Parametry stworzonego masażera

Parametr	Masażer
Zasilanie	Bateria 9V, wymienna
Regulacja prędkości	Tak
Zakres częstotliwość wibracji	170–500 drgań/min
Waga całkowita	579 g
Wymiary	250 × 104 × 185 mm
Partie ciała	Szyja, plecy, pośladki, uda, łydki



Rysunek 14.3. Stworzony masażer bezprzewodowy

Zawarto również krótką instrukcję obsługi dla użytkownika wykonanego urządzenia, czyli informacje o jego włączaniu i wyłączaniu, zmianie częstotliwości drgań głowicy i wymianie baterii zasilającej, a na sam koniec przedstawiono kosztorys wykonania tego masażera.

Podsumowanie pracy zawiera informacje o zrealizowanych założeniach projektowych. Porównano stworzony prototyp z masażerami komercyjnymi, a na sam koniec przedstawiono kilka możliwości dalszego rozwoju urządzenia.

Bibliografia

- [1] Puszczalowska-Lizis E., Bober N., *Effectiveness of the massage treatments in therapy of chronic pain in the lumbosacral spine [skuteczność zabiegów masażu w terapii przewlekłych bólów lędźwiowo-krzyżowej części kręgosłupa]*, Zamojskie Studia i Materiały, 18, 2016, 79–88.
- [2] Cichoń D., Demczynak I., Spyrka J., *Wybrane zagadnienia z termoterapii*, Kolegium Karkonoskie w Jeleniej Górze 2010.
- [3] Garbarczyk E., Józefowicz K., Rybarczyk A., *Technologia druku 3d na zajęciach laboratoryjnych*, Computer Applications in Electrical Engineering, 80, 2014, 245–251.
- [4] Plichta J., Plichta S., *Komputerowo zintegrowane wytwarzanie*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 1999.
- [5] Sarecka-Hujar B., Ostróżka-Cieślak A., Banyś A., *Innowacyjne technologie w medycynie i farmacji*, Acta Bio-Optica et Informatica Medica, Inżynieria Biomedyczna, 2016.
- [6] CICHON K., *Zastosowanie drukarek 3d w przemyśle*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 1, 2017, 158–160.
- [7] Dupaix R., Boyce M., *Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (pet) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (petg)*, Polymer, 46, 2005, 4827–4838.

Zbadanie transmisji kodowanej w metodzie przepuszczania fali ultradźwiękowej przez struktury tkankopodobne

inż. Anna Iluk

Inżynieria Biomedyczna

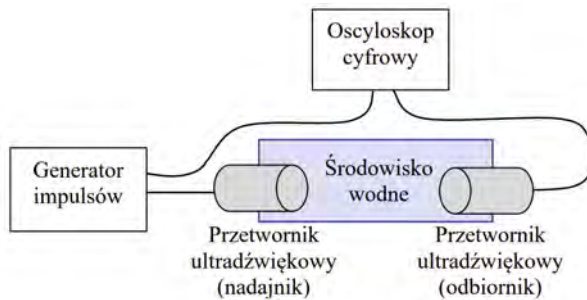
prof. dr hab. inż. Krzysztof Opieliński

Katedra Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów

Celem pracy dyplomowej było zbadanie wpływu transmisji kodowanej na jakość otrzymanych sygnałów w metodzie przepuszczania impulsów fali ultradźwiękowej przez strukturę tkankopodobną za pomocą kodowania sygnałów ultradźwiękowych. Zakres pracy obejmował opracowanie fantomu tkankopodobnego, zaprojektowanie stanowiska badawczego umożliwiającego rejestrację pomiarów transmitowanych sygnałów ultradźwiękowych, odpowiedni dobór sygnałów nadawczych oraz przetworzenie i analizę sygnałów odbiorczych.

Kodowanie sygnałów ma na celu zwiększenie stosunku sygnału do szumu, poprzez zwiększenie energii sygnału, nie przekraczając dopuszczalnych mocy szczytowych oraz ostatecznie przy zachowaniu dobrej rozdzielczości. Nadając impulsy o długim czasie trwania, oczekuje się zwiększenia energii sygnału, co skutkuje większą amplitudą sygnału odbiorczego. Równocześnie, kodowanie ma na celu umożliwienie skrócenia czasu trwania zarejestrowanego już impulsu odbiorczego, za pomocą operacji korelacji z sygnałem nadawczym. W efekcie otrzymuje się dużą amplitudę sygnału użytecznego, co zapewnia dobrą wykrywalność zmian patologicznych w tkance, oraz dobrą rozdzielczość, dzięki ostatecznie krótkim impulsom.

W celu wykonania pomiarów umieszczano kolejne pary przetworników w wodzie tak, aby płaszczyzny nadawcza i odbiorcza były równoległe do siebie i aby przetworniki znajdowały się w tej samej osi, naprzeciw siebie. Do przetwornika nadawczego podłączano generator funkcyjny, a sygnał nadawczy i odbiorczy rejestrowano przy pomocy oscyloskopu cyfrowego. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 15.1.



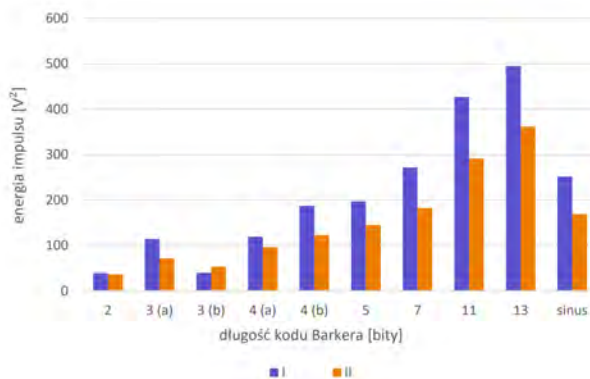
Rysunek 15.1. Układ pomiarowy do badania ultradźwiękowej transmisji kodowanej

W pracy zdecydowano się na zastosowanie algebraicznych kodów Barkera i Golaya, bazujących na kluczowaniu fazy sygnału. Natomiast procedurę filtracji dopasowanej opisuje wzór (15.1).

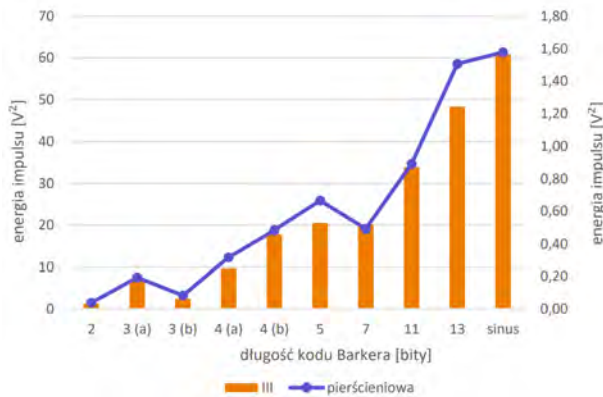
$$y[n] = \sum_{k=0}^n x[k] \cdot h[n - k] \quad (15.1)$$

Polega ona na cyfrowym przetwarzaniu odebranego sygnału $x[n]$, poprzez zastosowanie splotu z filtrem dopasowanym $h[n]$ – sygnałem nadawczym odwróconym w czasie. W ten sposób powstaje sygnał wynikowy $y[n]$. Zamiast splotu z odwróconym w czasie sygnałem nadawczym, można dokonać bezpośrednio korelacji z sygnałem nadawczym.

Dzięki wykonanym badaniom sprawdzono efekty ultradźwiękowej transmisji kodowanej przeprowadzonej przy pomocy dostępnego sprzętu. Mimo starań co do wyboru głowic o jak najmniejszej dobroci, ich pasma względne były wciąż dosyć wąskie (kilkanaście procent). W diagnostyce ultradźwiękowej istotna jest mała dobroć przetworników, gdyż jest ona odwrotnie proporcjonalna do szerokości względnego pasma przenoszenia i wprost proporcjonalna do długości impulsu. Wąskie pasmo powoduje nie tylko zmniejszenie amplitudy sygnału oraz jego rozciągnięcie w czasie, ale także zniekształcenie. Wpływ dobroci został pokazany m.in. przy porównaniu energii odebranych impulsów, co zaprezentowano na rysunkach 15.2 i 15.3.



Rysunek 15.2. Energia impulsów odebranych dla przetworników o mniejszej dobroci. Dobroć I to 5,8, a dobroć II to 6,3



Rysunek 15.3. Energia impulsów odebranych dla przetworników o większej dobroci. Dobroć III to 7,3, a dobroć przetworników głowicy pierścieniowej to 9,5. Wartości serii głowicy pierścieniowej odniesiono do osi pomocniczej po prawej stronie

W przypadku głowic o mniejszej dobroci (5,7 i 6,3) i dłuższych kodów Barkera (≥ 7 bitów), udało się osiągnąć energię większą od energii impulsu sinusoidalnego o maksymalnej amplitudzie, natomiast w parach głowic o większej dobroci (7,3 i 8,01 oraz 9,5 i 9,5), zniekształcenia sygnału kodowanego i spadek jego amplitudy spowodowały, iż żaden z impulsów kodowanych, nawet ponad dwukrotnie dłuższy od impulsu sinusoidalnego (13-bitowy) nie miał energii większej od niego. Widać zatem, że zastosowanie długiego czasu trwania impulsu w celu uzyskania większej energii nie zawsze będzie skuteczne. Nagłe zmiany fazy między okresami powodują, że przekazywanie energii jest trudniejsze i, jak się okazało w przypadku głowic o większej dobroci, nie otrzymano zysku energetycznego.

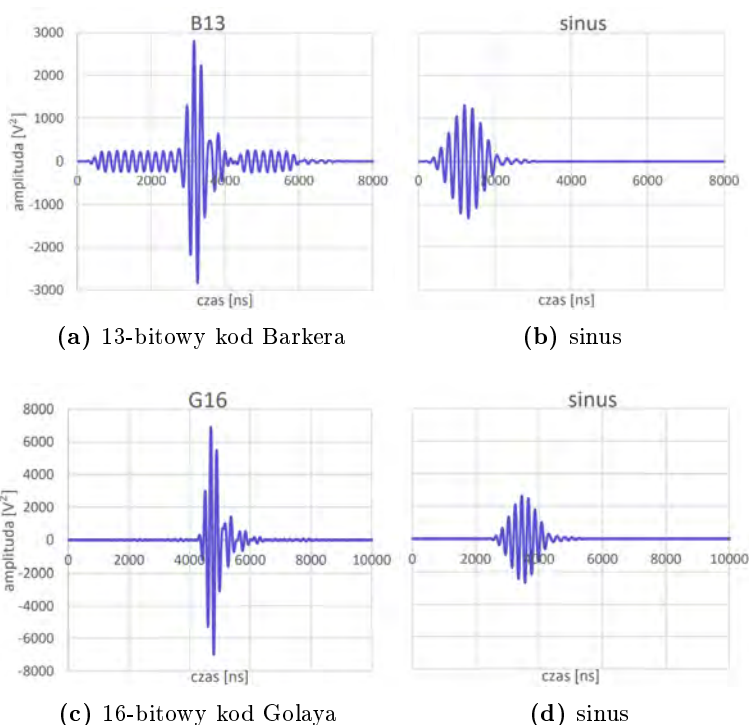
Aby wyznaczyć umowny czas trwania impulsu, opracowano algorytm, biorący pod uwagę jego energię całkowitą oraz maksymalną (równą kwadratowi maksymalnej amplitudy). Obliczono ten czas t korzystając ze wzoru (15.2).

$$t = \frac{\sum_{i=0}^n E_i \cdot dt}{E_{max}} \quad (15.2)$$

gdzie E_i - wartość energii i -tej próbki, równa kwadratowi jej amplitudy, dt - interwał próbkowania, E_{max} - maksymalna energia próbki w całym sygnale. Pozwolił on na łatwe obliczenie wartości tej wielkości dla wszystkich sygnałów bez konieczności arbitralnej oceny początku i końca impulsu. Uwzględnił on energię listków bocznych, która jest duża w przypadku korelacji sygnału sinusoidalnego, a mniejsza przy korelacji impulsów kodowanych, co jest ich zaletą.

Ustalono, że bardziej efektywna jest filtracja dopasowana polegająca na korelacji sygnału odbiorczego z tą postacią sygnału nadawczego, która występuje przed podłączeniem przetwornika nadawczego do generatora. Może to wynikać z faktu, że po podłączeniu przetwornika następuje obciążenie generatora i spada amplituda sygnału nadawczego. Wobec tego wynik korelacji również ma mniejszą amplitudę, co wiąże się z gorszą wykrywalnością. Natomiast zmiany czasu trwania impulsów na skutek korelacji z różnymi postaciami sygnału nadawczego nie wykazały szczególnej tendencji.

Mimo zniekształceń sygnału udało się zaobserwować korzystne cechy sygnałów kodowanych po filtracji dopasowanej, zwłaszcza przy dłuższych kodach, co zaprezentowano na rysunku 15.4. Sygnały kodowane kodami Barkera miały listki boczne o małej, jednakowej energii i dużą amplitudę listka głównego, a kodowanie Golaya sprawiło, że długie kody skutkowały zwiększeniem amplitudy sygnału, przy niezmiennie krótkim czasie trwania.



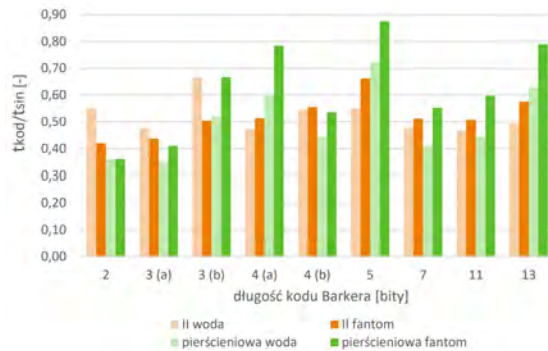
Rysunek 15.4. Postać impulsów odbiorczych po filtracji dopasowanej

Celem pracy było zbadanie, czy transmisja kodowana przyniesie lepsze rezultaty niż transmisja impulsów zwykłego sygnału sinusoidalnego. W związku z tym wartości amplitudy oraz czasu trwania impulsów kodowanych odnoszono każdorazowo do wartości tej wielkości w impulsie sinusoidalnym, który został tak dobrany, aby sygnał odbiorczy miał największą możliwą amplitudę. Zatem zwiększając liczbę okresów sinusa nie dałoby się osiągnąć większej amplitudy sygnału odbiorczego. Natomiast stosując kodowanie, udało się to osiągnąć, a po filtracji zysk wzrósł jeszcze bardziej. W przypadku przetworników o mniejszej dobroci (5,7 i 6,3), filtrowane impulsy kodowane kodami o długości ≥ 7 bitów osiągały większą amplitudę niż impuls sinusoidalny poddany filtracji, zarówno przy kodowaniu Golaya (nawet o 176% większa amplituda) jak i Barkera (o 128% większa amplituda). Przetworniki o większej dobroci (7,3 i 8,01 oraz 9,5 i 9,5) potrzebowały kodów o większej długości (≥ 13 bitów), aby ich amplituda po filtracji była większa od amplitudy sinusa, jednak również w ich wypadku udało się osiągnąć pożądany efekt. Wyjątek stanowi głowica pierścieniowa z zastosowaniem kodów Golaya. Kody te wymagają określonej relacji między postaciami sygnałów komplementarnych A i B, a głowica ta, mając największą dobroć spośród badanych, tak zniekształciła sygnały, że nie była możliwa efektywna kompresja impulsów odbiorczych. Widać zatem, że aby kodowanie Golaya było skuteczne, konieczna jest mała dobroć przetworników. Choć różnice przy różnych wartościach dobroci mechanicznej widać również w kodowaniu Barkera, to nie jest ono aż tak wymagające pod tym względem.

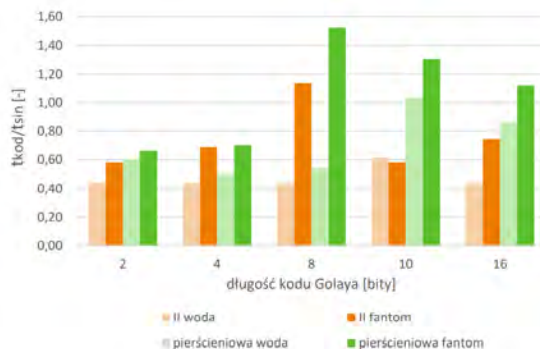
Również w kryterium czasu trwania impulsów po filtracji dopasowanej, kodowane impulsy wypadły lepiej niż sygnał sinusoidalny. Wszystkie kody Barkera i Golaya (wyjątek stanowi znów głowica pierścieniowa z kodami Golaya) skutkowały krótszym czasem trwania impulsów niż przy braku kodowania. W przypadku impulsów kodowanych po filtracji, czas ten stanowił przeważnie od 40% do 60% czasu trwania impulsu sinusoidalnego, co jest znacznym sukcesem. Należy

jednak pamiętać, że brana pod uwagę wartość czasu bardzo zależy od sposobu jego wyznaczenia. Zastosowany w tej pracy algorytm uwzględnia maksymalną amplitudę impulsu odbiorczego oraz jego całkowitą energię, a więc także energię listków bocznych. Ważne jest, aby była ona jak najmniejsza, uznano więc, że taki algorytm będzie wartościowy. Nie wymaga on również arbitralnego wyznaczania początku i końca impulsu – bierze się pod uwagę cały zarejestrowany fragment sygnału, gdyż małe wartości na jego początku i końcu nie mają znaczącego wpływu na energię całkowitą, a więc nie zaburzają wyników. Jednak gdyby do wyznaczania czasu trwania impulsów zastosowano inny algorytm, wyniki mogą okazać się różne od zaprezentowanych w tej pracy. Należy więc za każdym razem zwrócić uwagę jakie właściwości sygnału bierze pod uwagę stosowany sposób.

Sprawdzono też jakie efekty daje transmisja kodowana przy przepuszczaniu fali ultradźwiękowej przez fantom tkankopodobny. W tkankach występuje większe tłumienie niż w wodzie, co mogłoby mieć wpływ na uzyskane wyniki. Badania przeprowadzono przy użyciu głowicy pierścieniowej, o najmniejszej częstotliwości spośród wykorzystywanych w tej pracy przetworników, oraz przetwornika II, o najmniejszej dobroci. Wyniki przedstawiono na rysunkach 15.5 i 15.6.



Rysunek 15.5. Stosunek czasu trwania impulsów odbiorczych kodowanych kodami Barkera do czasu trwania impulsu sinusoidalnego, po filtracji dopasowanej, przy przepuszczaniu fali ultradźwiękowej przez fantom i przez wodę. Dane dla głowicy pierścieniowej i przetwornika II



Rysunek 15.6. Stosunek czasu trwania impulsów odbiorczych kodowanych kodami Golaya do czasu trwania impulsu sinusoidalnego, po filtracji dopasowanej, przy przepuszczaniu fali ultradźwiękowej przez fantom i przez wodę. Dane dla głowicy pierścieniowej i przetwornika II

Jak wynika z badań, obecność fantomu obniża skuteczność kodowania. Potrzeba było dłuż-

szych kodów, niż w przypadku wody jako medium, aby osiągnąć większą amplitudę niż w filtrowanym sygnale sinusoidalnym. Mimo to udało się osiągnąć ten efekt, zatem kodowanie impulsów można uznać za skuteczne również przy transmisji przez tkankę. Jeśli wziąć pod uwagę czas trwania impulsów kodowanych, to był on dłuższy niż w wodzie i również jego stosunek do czasu trwania impulsu sinusoidalnego był większy, choć w przypadku kodów Barkera, wciąż mniejszy od 1. Kody Golaya rzadziej okazały się skuteczne, jednak przetwornik II pozwolił na uzyskanie impulsów krótszych i o większej amplitudzie niż w sygnale sinusoidalnym.

Podsumowując, można stwierdzić, że ultradźwiękowa transmisja kodowana może być dobrym rozwiązaniem problemu pogodzenia dobrej rozdzielczości i wykrywalności w technikach diagnostycznych, wykorzystujących transmisję fal ultradźwiękowych, takich jak UTT. Zarówno algebraiczne kody Golaya jak i Barkera, połączone z zastosowaniem filtracji dopasowanej, pozwalają osiągnąć większą amplitudę analizowanego sygnału odbiorczego, co poprawia wykrywalność, oraz skrócić jego czas, a to z kolei daje lepszą rozdzielczość. Jednak trzeba mieć również na uwadze, że ograniczona podatność ośrodka na wprowadzenie w drgania oraz niedoskonałość urządzeń wchodzących w skład układu pomiarowego może powodować, że zastosowanie dłuższych impulsów kodowanych może nie przynieść spodziewanego zysku energetycznego względem sygnału niekodowanego, a efekt w dużej mierze zależy od dobroci zastosowanej głowicy.

Bibliografia

- [1] Opieliński K., *Zastosowanie transmisji fal ultradźwiękowych do charakteryzowania i obrazowania struktury ośrodków biologicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2011.
- [2] Opieliński K., Pruchnicki P., Gudra T., Podgórski P., Kraśnicki T., Kurcz J., Sasiadek M., *Ultrasound transmission tomography imaging of structure of breast elastography phantom compared to us, ct and mri*, Archives of Acoustics, Vol. 38, 2013, 321–334.
- [3] Opieliński K., Gudra T., *Bioacoustic range equation*, Hydroacoustics, 19, 2016, 307–318.
- [4] Nowicki A., Techniki P.A.N.I.P.P., *Ultrasonografia: wprowadzenie do obrazowania i metod dopplerowskich*, Biblioteka Akustyki i Ultradźwięków, Wydawnictwo Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN 2016.
- [5] Ng A., Swanevelder J., *Resolution in ultrasound imaging*, Continuing Education in Anaesthesia, Critical Care and Pain, 11, 2011, 186–192.
- [6] Misaridis T., Gammelmark K., Jørgensen C., Lindberg N., Thomsen A., Pedersen M., Jensen J., *Potential of coded excitation in medical ultrasound imaging*, Ultrasonics, 38, 2000, 183–9.
- [7] Lewandowski M., *Ultrasonografia kodowana: transmisja i kompresja w czasie rzeczywistym*, Prace IPPT, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk 2009.
- [8] Trots I., Nowicki A., Secomski W., Litniewski J., *Golay sequences - side-lobe - canceling codes for ultrasonography*, Archives of Acoustics, 29, 2004, 87–97.
- [9] Jin C., Chen S., Qin Z.d., Wang T.f., *A new scheme of coded ultrasound using golay codes*, Journal of Zhejiang University - Science C, 11, 2010, 476–480.
- [10] Nowicki A., *Ultradźwięki w medycynie: wprowadzenie do współczesnej ultrasonografii*, Biblioteka Akustyki i Ultradźwięków, Wydawnictwo Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN 2010.

- [11] Zhou S., Wang X.C., Yang J., Ji J.J., Wang Y.Q., *Barker-coded excitation in ophthalmological ultrasound imaging*, International journal of clinical and experimental medicine, 7, 2014, 2413–24.
- [12] Lewandowski M., Nowicki A., *Universal coded ultrasound imaging system with software processing*, Archives of acoustics, 2007, 81–86.
- [13] Zapf M., Derouiche B., Ruitter N., *Evaluation of chirp and binary code based excitation pulses for 3d usct*, Proceedings - IEEE Ultrasonics Symposium, 2009, 1996 – 1999.

Projekt i realizacja przenośnego urządzenia do monitorowania parametrów oświetlenia wewnętrznego

inż. Anna Gybej
Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Tomasz Grysiński
Katedra Inżynierii Biomedycznej

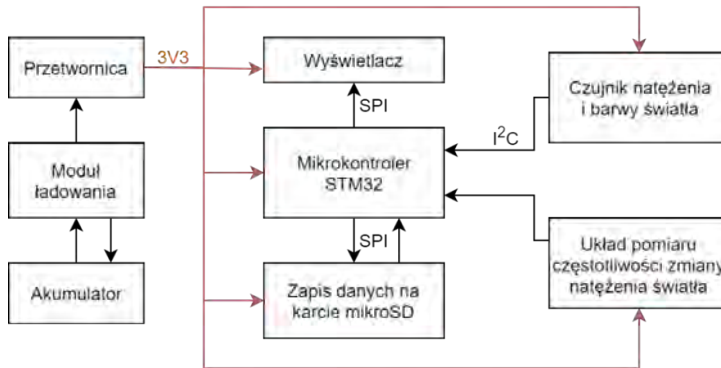
W pracy inżynierskiej podjęto się zaprojektowania oraz zrealizowania przenośnego urządzenia, którego zadaniem jest mierzenie natężenia i barwy światła oraz przedstawienie zmienności natężenia światła w czasie, z funkcją wyznaczenia częstotliwości modulacji. Urządzenie zostało zrealizowane w formie przenośnego modułu elektronicznego. Otrzymane pomiary umożliwią weryfikację parametrów oświetlenia w pomieszczeniach celem poprawy komfortu użytkowników.

Oświetlenie jest jednym z ważniejszych aspektów do rozważenia podczas aranżacji wnętrz. Rozwój technologii oświetleniowej sprawił, że obecnie na rynku oferuje się wiele produktów o różnej budowie, zasadzie działania oraz parametrach dlatego też aby dobrać optymalne rozwiązanie, projekt oświetlenia powinien uwzględnić między innymi natężenie światła, barwę czy ewentualne występowanie migotania. Barwa zastosowanego oświetlenia potrafi wpłynąć na samopoczucie użytkownika. Pomieszczenia będą wydawać się bardziej przytulne im cieplejsze światło zastosujemy. W takim otoczeniu łatwiej jest się zrelaksować i odprężyć, ale z drugiej strony zastosowanie takiego światła w biurze obniży wydajność pracowników. Ważna jest też intensywność światła. W zbyt ciemnym pomieszczeniu, podczas pracy wzrok szybciej się męczy. Jeśli zastosowane oświetlenie dodatkowo cyklicznie zmienia wartość natężenia, spowoduje to zwiększony dyskomfort. Pracownicy znajdujący się w takich warunkach często skarżą się na bóle głowy, zmęczony wzrok i problemy z koncentracją.

W rezultacie praca w takich warunkach jest nieprzyjemna i niewydajna. Według badań podniesienie natężenia światła z 300lx do 500lx pozwala na zwiększenie produktywności nawet o 11% [1]. Dodatkowo dostosowanie oświetlenia w poszczególnych pomieszczeniach do norm pozwala zapewnić lepszy komfort pracowników o (10 – 15)% [2]. Należy więc postarać się przygotować pomieszczenia do użytkowania poprzez wykonanie pomiarów jakości zastosowanego oświetlenia oraz otrzymane wartości porównać do norm [3] i sugerowanych wartości parametrów, aby określić czy zastosowane rozwiązania są trafne czy wymagają poprawy.

W pracy poruszono temat czym jest światło oraz jakie są dostępne źródła światła na rynku. Porównano parametry poszczególnych rozwiązań, ich wady i zalety oraz przeanalizowano możliwości detekcji światła. Zapoznano się z normami, które powinny być spełnione podczas projektowania wnętrz o określonej funkcji oraz z wpływem poszczególnych parametrów źródeł światła na stan użytkowników.

Realizację prototypu urządzenia rozpoczęto od zdefiniowania założeń funkcjonalnych. Główne założenia obejmowały: pomiar natężenia światła w zakresie (0 – 25000) [lx], pomiar temperatury barwowej w zakresie (1800 – 9000) [K], pomiar częstotliwości zmian wartości natężenia oświetlenia (migotania) w zakresie (0 – 3000)[Hz] oraz dopasowanie czułości widmowej czujnika do krzywej czułości ludzkiego oka. Częstotliwość migotania zdecydowano się mierzyć w zakresie do 3kHz, ponieważ powyżej tej wartości migotanie nie powinno wpływać na samopoczucie użytkowników [4]. W urządzeniu zdecydowano się również uwzględnić ekran umożliwiający podgląd wyników, zasilane z akumulatora umożliwiającego działanie przez przynajmniej 24 godziny, możliwość zapisu wyników pomiarów na karcie microSD. Na rysunku 16.1 przedstawiono schemat urządzenia.



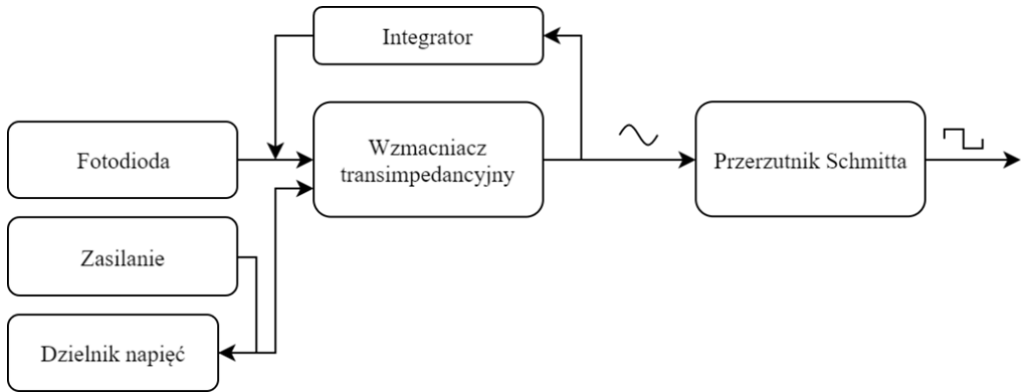
Rysunek 16.1. Schemat blokowy projektowanego urządzenia

W kolejnym kroku dokonano analizy czujników natężenia światła aby wybrać rozwiązanie najlepiej odpowiadające założeniom zdefiniowanym w pracy. Dobór mikrokontrolera do finalnego układu został zrealizowany po wykonaniu prototypu urządzenia. Podjęto taką decyzję ze względu na możliwość zweryfikowania ilości potrzebnych wyjść z mikrokontrolera oraz wymaganych peryferiów. Dodatkowo wstępnie napisano kod programu, który pozwolił na oszacowanie ilości potrzebnej pamięci *FLASH* i *RAM*. Do celów prototypowania wykorzystana została płytka *Nucleo* wyposażona w mikrokontroler *STM32F401re*.

Wybrany czujnik *TCS34725*, do pomiarów natężenia światła i temperatury barwowej, komunikuje się z mikrokontrolerem za pomocą dwukierunkowej magistrali *I²C*. Uruchomienie go wymagało więc zaimplementowania biblioteki w języku *C* pozwalającej na przesyłanie danych i obliczenie wartości parametrów na podstawie informacji zwartych w dokumentacji. Uwzględniono również fakt, że sygnał z fotodiod przekazywany jest do kontrolera wzmocnienia, który można programowo ustawić na wartości $\times 1$, $\times 4$, $\times 16$ lub $\times 60$. W czujniku istnieje również możliwość zmiany czasu pomiaru, który ustawia się jednocześnie dla wszystkich diod i ma on wpływ na rozdzielczość oraz czułość odczytu.

Projektowany układ pomiaru częstotliwości zmian natężenia światła wymagał zastosowania fotodiody *BPW 21*, wzmocnienia sygnału oraz zarejestrowania jego zmiany w postaci cyfrowej, która będzie mogła zostać przekazana na mikrokontroler. Sygnał optyczny, który dotrze do fotodiody zmieniony zostanie na sygnał prądowy. Następnie zaprojektowany obwód elektroniczny pozwolił na otrzymanie sygnału napięciowego, wzmocnionego i ostatecznie przekształconego na sygnał prostokątny. W związku z tym, że podczas wykonywania pomiarów parametrów światła, mogą wystąpić przypadki gdy pomiar częstotliwości zmian natężenia, będzie wykonywany w obecności innego stałego źródła światła w tle, zdecydowano się na wyeliminowanie niepożą-

danej wartości stałego światła aby układ wykrywał wyłącznie zmiany natężenia. Zrealizowanie takiej funkcji wymaga użycia integratora, który steruje wzmacniaczem transimpedancyjnym. Rozwiązanie zobrazowano na rysunku 16.2.



Rysunek 16.2. Schemat blokowy układu do pomiaru częstotliwości zmian natężenia światła

Wyznaczono doświadczalnie wartości graniczne przerzutnika Schmitta, a następnie dobrano elementy wzmacniacza umożliwiające pomiar z użyciem fotodiody. W celu poznania wartości prądów otrzymywanych z fotodiody w zależności od natężenia światła padającego na nią, postanowiono zbudować układ wykorzystujący fotodiode oraz wzmacniacz transimpedancyjny z użyciem rezystora o wartości $100\text{k}\Omega$. Zbadano wartość napięcia wyjściowego układu w zależności od poziomu natężenia światła halogenu. Pomiar powtórzono również dla luksomierza *LXP-2* firmy *Sonel*. Porównanie wyników z obu pomiarów oraz wykorzystanie wyliczonych wartości pozwala na wyznaczenie wykresu zależności natężenia światła wyrażonego w luksach od wartości prądu fotodiody. Przy użyciu równania trendu wyznaczonego na wykresie, obliczono prąd fotodiody, co pozwoliło otrzymać wartość rezystora, który należy użyć we wzmacniaczu transimpedancyjnym. Obliczenie częstotliwości zmian natężenia światła możliwe jest dzięki wykorzystaniu układów czasowo-licznikowych mikrokontrolera. Impulsy z przerzutnika *Schmitta* podawane są na wejście ETR pierwszego timera, gdzie sygnał z układu posłuży jako zewnętrzny sygnał zegara. Drugi timer odliczający jedną sekundę będzie miał za zadanie wołać pierwszy timer aby odczytać ilość wykrytych zboczy narastających podanego sygnału prostokątnego. W rezultacie co sekundę odczytana będzie wartość częstotliwości zmian natężenia światła.

Do urządzenia dodano również wyświetlacz OLED firmy *Waveshare* o rozdzielczości 96 pikseli na 64 piksele. Wyświetlacz umożliwia komunikację z mikrokontrolerem za pomocą interfejsu *SPI*. Dane, które są wyświetlone na wyświetlaczu OLED są również uśredniane i zapisywane na kartę *microSD* po każdej minucie pomiaru. Urządzenie wymagało, więc zamontowania gniazda pozwalającego na komunikację z kartą. Komunikacja między mikrokontrolerem a modulem karty możliwa jest poprzez interfejs *SPI*.

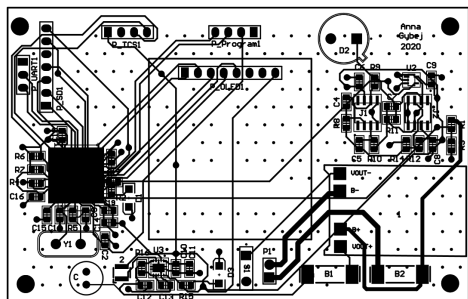
W założeniach projektowych urządzenia podkreślono potrzebę zasilania układu przy pomocy akumulatora. Zamontowanie układu ładowania w urządzeniu pozwoli na ponowne naładowanie akumulatora w przyszłości, więc ograniczy to generowanie odpadów w postaci zużytych baterii. W projekcie zdecydowano się skorzystać z akumulatora *Li-Pol 3,7 V* z pojedynczą celą, który może zostać naładowany przy użyciu specjalnego modułu *TP4056* firmy *NanJing Top Power ASIC Corp*.

Zrealizowanie prototypu pozwoliło na podłączenie urządzenia do zasilacza laboratoryjnego aby oszacować pobór prądu. Dzięki tej informacji wybrano akumulatora o pojemności 2400mAh

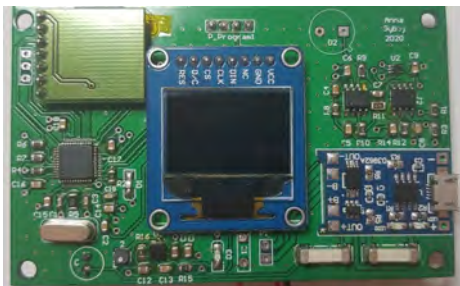
aby urządzenie mogło pracować zgodnie z założeniami minimum 24 h. Przy użyciu *ADC* sprawdzano również stan akumulatora aby udostępnić tą informację użytkownikowi. Urządzenie aby rozróżniać 3 stany naładowania potrzebowało mieć zdefiniowane zakresy według krzywej zmian napięcia na akumulatorze podczas rozładowywania.

Program do urządzenia został napisany z wykorzystaniem biblioteki HAL oraz graficznego kreatora służącego do konfiguracji peryferiów *STM32CubeMX*. Podsumowując wymagania prototypu dotyczące peryferiów i ilości pamięci wybrano mikrokontroler *STM32F100C8TX*.

Na podstawie prototypu zaprojektowano płytkę, dwuwarstwową PCB w programie Altium (rys. 16.3). Płytkę posiada elementy SMD, THT oraz 4 otwory montażowe, aby zabezpieczyć ją przed przesuwaniem w obudowie. Gotową płytkę przedstawiono na rys. 16.4.



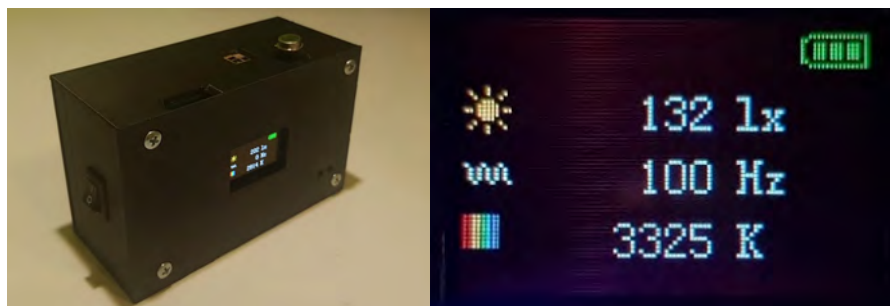
Rysunek 16.3. Warstwa top płytki PCB



Rysunek 16.4. Zlutowane urządzenie

Ze względu na możliwość ustawienia wzmocnienia oraz czasu pomiaru dla czujnika barwy i natężenia światła, wykonane zostały pomiary dla wszystkich ustawień aby określić najlepszą konfigurację. Urządzenie umożliwia wybór czterech stanów wzmocnienia oraz sześciu czasów pomiaru. Pomiary wartości natężenia zostały wykonane dla zbudowanego urządzenia i lukso mierza *LXP-2* firmy *Sonel*. Na podstawie pomiarów wybrano ustawienia najkorzystniejsze. Ze względu na potrzebę zastosowania różnych ustawień, do programu wprowadzono automatyczną kalibrację. Oprócz zmiany ustawień wzmocnienia i czasu, wprowadzono również równania odczytane z wcześniej przygotowanych wykresów z pomiarów z lukso mierzem *LXP-2*. Pozwoliło to na wprowadzenie podzakresów pomiarowych co zmniejszy błąd pomiarowy.

Wykonany układ umieszczono w obudowie, aby ułożyć czujniki w stałej pozycji oraz ułatwić przenoszenie urządzenia. Do stworzenia modelu 3D użyto programu *Autodesk Inventor 2020*. Projekt został zrealizowany na drukarce *Creativity Ender 3*.



(a) urządzenie w obudowie

(b) wyniki pomiarów na wyświetlaczu OLED

Rysunek 16.5. Gotowe urządzenie

W ramach pracy udało się zrealizować monitor parametrów oświetlenia wewnętrznego. Urządzenie spełniło założenia, które były zdefiniowane przed przystąpieniem do projektu. Projekt umożliwia monitorowanie natężenia światła, częstotliwości zmienności natężenia światła oraz temperatury barwowej oświetlenia w pomieszczeniu. Układ posiada wyświetlacz OLED prezentujący wartości parametrów co sekundę, informując użytkownika o aktualnych warunkach. Pomiar częstotliwości zmian natężenia światła realizowany jest w zakresie od 7 Hz do 25000 Hz. Pomiar natężenia światła jest możliwy w zakresie od 1 lx do 24422 lx. W tym wypadku zakres jest o 500lx mniejszy niż we wstępnych założeniach. Biorąc pod uwagę wartości natężenia światła podawane w normach, osiągnięte możliwości pomiarowe powinny w zdecydowanej większości przypadków wystarczyć do monitorowania tego parametru w pomieszczeniach. Kalibracja czujnika zastosowanego w urządzeniu pozwoliła na realizowanie pomiarów z różnicą względem wskazań luksomierza nie przekraczającą 5.33%. Przez zastosowanie podzakresów korzystających z niezależnych krzywych kalibracyjnych różnica wskazań została zmniejszona nawet sześciokrotnie. Zaprojektowane urządzenie posiada większy zakres niż komercyjne rozwiązanie, z którym był zestawiany, a więc należałoby w przyszłości ponownie sprawdzić poprawność pomiarów w zakresie od 20 klx do 24,4 klx. Zakres mierzonych temperatur barwowych teoretycznie wynosi (1800 – 9000)[K] jednak ze względu na brak odpowiedniego wzorca nie udało się tego zakresu potwierdzić w praktyce. Przy użyciu trzech różnych źródeł światła udało się sprawdzić możliwości wykonania pomiarów dla wybranych wartości temperatury barwowej z zakresu (2700 – 4000)[K]. Otrzymane wyniki były zbliżone do informacji podanych przez producentów i różnica wynosiła poniżej 4% wskazania. Urządzenie poprawnie realizuje również funkcje niezależnego monitora parametrów oświetlenia w czasie 24 godzin. Oznacza to, że zrealizowany projekt może pomóc w projektowaniu i doborze optymalnych źródeł światła do stworzenia odpowiednich warunków oświetleniowych w pomieszczeniu. Urządzenie zgodnie z założeniami jest przenośne i zasilanie za pomocą akumulatora. Akumulator pozwala na monitorowanie oświetlenia przez 62,5 godziny. Jego ładowanie przy pomocy wbudowanego modułu zajmuje 2,5 godziny. Układ umożliwia również zapis danych z 24 godzin pomiarów na karcie microSD w formacie „csv”.

Bibliografia

- [1] Ismail A.R., Rani M., Mohd Makhbul Z., Deros B., *The effect of lighting on the worker productivity: a study at malaysia electronics industry*, 2007.
- [2] Jones C., Gordon K., *Efficient lighting design and office worker productivity*, 2021.
- [3] Lehman B., Wilkins A., *Designing to mitigate effects of flicker in led lighting: Reducing risks to health and safety*, Power Electronics Magazine, IEEE, 1, 2014, 18–26.
- [4] *Dn40 lux and cct calculations using ams color sensors*, https://ams.com/documents/20143/80162/ColorSensors_AN000166_1-00.pdf/c0b4a4b4-9948-f2a7-f8a1-36a8208bd0a9, dostęp: 10-12-2020.

Projekt urządzenia do obrazowania fantomu piersi

inż. Mateusz Olek
Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Iwona Hołowacz
Katedra Inżynierii Biomedycznej

Głównym celem pracy jest zaprojektowanie układu badawczego – urządzenia do obrazowania fantomu piersi, bazującego na innowacyjnej metodzie mammografii laserowej. Dodatkowo w środowisku *MATLAB* przygotowano uniwersalne narzędzie – aplikację do analizy obrazu z mammografii laserowej i w ten sposób dokonano oceny przykładowego obrazu, wyznaczając jego histogram i profil. Na początku pracy przedstawiono także podstawowe informacje na temat anatomii i fizjologii piersi, występujących patologii tego gruczołu, jak również dostępnych metod diagnostycznych zmian w obrębie piersi. Ponadto zebrano informacje dotyczące obrazowania metodą mammografii laserowej i jej możliwości aplikacyjnych w diagnostyce, terapii i profilaktyce zmian nowotworowych piersi.

1. Wstęp

W pracy podjęto tematykę nowotworów piersi oraz możliwości ich diagnozy. Zagadnienie to ma duże znaczenie, przede wszystkim ze względu na swoją aktualność, wysoką częstość występowania i sporą problematyczność dla pacjentów.

Obecnie nowotwory stanowią istotny problem zdrowotny i społeczny. Można stwierdzić, że są jednym z największych obszarów zainteresowania współczesnej medycyny, ale także biotechnologii, inżynierii biomedycznej oraz nauk pokrewnych. Rak stał się, obok chorób takich, jak cukrzyca lub otyłość, chorobą cywilizacyjną. Jednym z typów nowotworów, który najczęściej dotyka kobiety, jest nowotwór piersi. Dane Krajowego Rejestru Nowotworów dostarczają informacji, że u kobiet nowotwory piersi stanowią blisko 22% wszystkich zachorowań na raka, powodując około 14% zgonów nowotworowych. Rocznie na świecie raka piersi rozpoznaje się szacunkowo u 1,5 miliona kobiet, a około 400 tysięcy z tego powodu umiera. Jest to więc obecnie jeden z największych problemów w onkologii [1, 2].

Obrazowanie medyczne, będące jednym z obszarów zainteresowania inżynierii biomedycznej, odgrywa bardzo ważną rolę w profilaktyce, diagnostyce oraz leczeniu chorób nowotworowych, także nowotworów piersi. Umożliwia wizualizację zmian patologicznych, ocenę stopnia zmian chorobowych, ale także kontrolę stanu tkanki. W celu profilaktyki i uniknięcia dotkliwych skutków choroby niezbędne jest regularne badanie piersi m.in. za pomocą dostępnych metod diagnostycznych np. mammograficznych. Techniki obrazowania medycznego pozwalają również na

monitorowanie efektów prowadzonego leczenia np. poprzez obserwację minimalizacji rozmiarów zmiany, skuteczności stosowanych leków lub ocenę powodzenia zabiegów chirurgicznych. Istotne jest, aby wykorzystywana metoda obrazowania zapewniała możliwie wysoką jakość i dokładność uzyskiwanych wyników, aby prowadzona analiza była efektywna i dostatecznie czuła. Obrazowanie powinno być równocześnie możliwie wygodne, bezbolesne oraz bezpieczne dla pacjenta. Trzeba zaznaczyć, że dostępne obecnie metody diagnostyczne raka piersi nie są w pełni optymalne, wykazując różne niedoskonałości i ograniczenia, jak np. konieczność ekspozycji pacjentki na promieniowanie jonizujące lub niekomfortowy ucisk podczas mammografii *RTG*.

2. Metoda mammografii laserowej

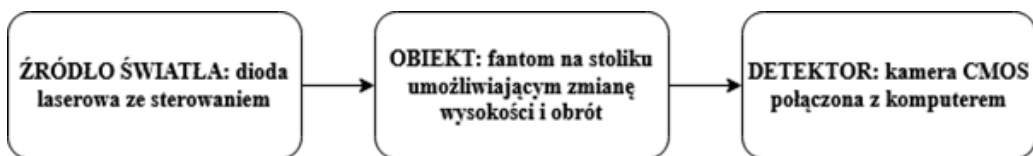
Przedmiot analizy oraz punkt wyjścia do projektu urządzenia stanowiła metoda mammografii z użyciem światła laserowego znajdująca zastosowanie w wizualizacji zmian nowotworowych w piersi, wykorzystując charakterystyczne właściwości optyczne i fizjologiczne struktur tkankowych i patologicznych:

- Po pierwsze różne struktury tkankowe wykazują zróżnicowaną absorpcję przy określonej długości fali promieniowania. Dla głównych chromoforów w tkankach gruczołu piersiowego, przy długości fali około 800–808 nm w rejonie bliskiej podczerwieni (*NIR*), przy znikomej absorpcji wody i tłuszczu, występuje punkt wspólny — ten sam współczynnik absorpcji promieniowania dla hemoglobiny utlenowanej i nieutlenowanej. W tym obszarze spektralnym prowadzone jest obrazowanie metodą mammografii laserowej [3–6].
- Po drugie nowotwór w piersi posiada zwiększone parametry absorpcyjne w porównaniu z otaczającymi tkankami. Wynika to z faktu intensywnej neowaskularyzacji w obrębie nowotworu. Proces ten pozwala na zaopatrywanie komórek nowotworowych w tlen i substancje odżywcze oraz uzyskiwanie energii. Naturalnym rezultatem dużej neowaskularyzacji jest zwiększony przepływ krwi, a tym samym wyższa koncentracja hemoglobiny. Skutkuje to w efekcie większą absorpcją promieniowania świetlnego niż w przypadku zdrowej tkanki o prawidłowym ukrwieniu i umiarkowanym stężeniu obu rodzajów hemoglobiny. Obserwacja obszarów o zwiększonej absorpcji promieniowania leży więc u podstaw mammografii laserowej i identyfikacji zmian nowotworowych, a ściślej detekcji obszaru angiogenezy nowotworu [4, 7].

Przykładem praktycznej realizacji idei mammografii laserowej, pozostającym jednak wciąż w fazie oceny klinicznej, jest system *CTLM* (ang. *Computed Tomography Laser Mammography*), czyli komputerowo tomograficzna mammografia laserowa. Rozwiązanie to łączy mammografię laserową z metodami tomografii komputerowej, umożliwiając uzyskiwanie obrazów gruczołu piersiowego w różnych projekcjach. Wśród głównych zalet tego rozwiązania wymienić można: brak konieczności stosowania szkodliwego promieniowania jonizującego, jak również intuicyjność, bezpieczeństwo i wygodę procedury badania oraz jego niezależność od charakterystyki gruczołu piersiowego pacjenta. Wśród głównych problemów wskazuje się konieczność dużego doświadczenia w celu poprawnej analizy i wnioskowania na podstawie uzyskiwanych mammogramów. Badania pokazują, że dostępna obecnie skuteczność wykrywania zmian nowotworowych za pomocą mammografii laserowej (*CTLM*) jest w zakresie 50%–70% [4, 8–10].

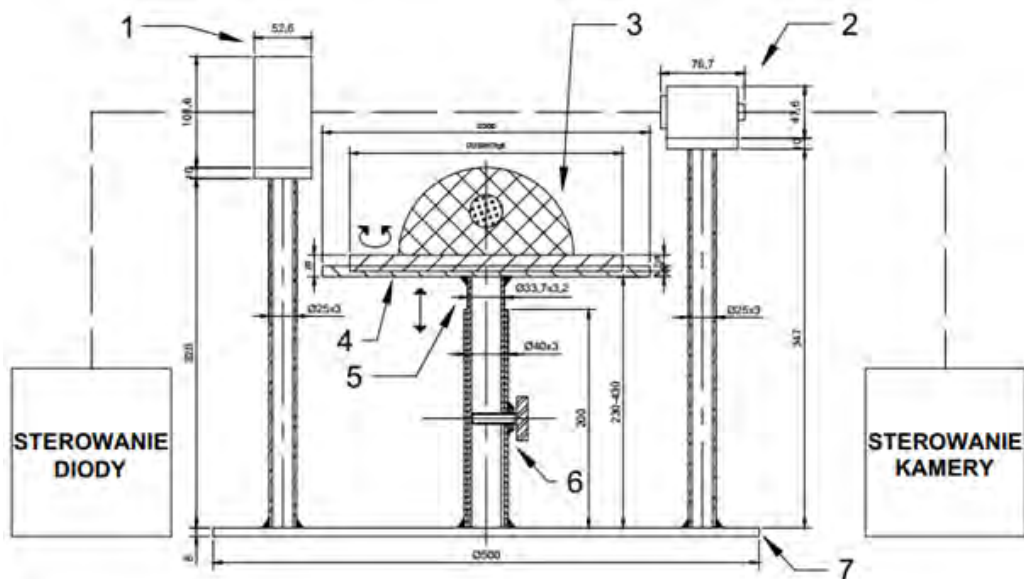
3. Projekt urządzenia do obrazowania fantomu piersi

Zaprojektowano urządzenie umożliwiające obrazowanie fantomu piersi w oparciu o metodę mammografii laserowej. Na rysunku 17.1 przedstawiono schemat blokowy urządzenia.



Rysunek 17.1. Schemat blokowy urządzenia do obrazowania fantomu piersi

Na rysunku 17.2 ukazano fragment rysunku projektowego – widok z boku urządzenia do obrazowania fantomu piersi. W tabeli 17.1 zebrano krótkie opisy poszczególnych podzespołów urządzenia – oprócz zaprojektowanych elementów składowych (część mechaniczna), dobrano również podzespoły dostępne komercyjnie (źródło światła, detektor) z uwzględnieniem ich parametrów (m.in.: moc diody, wydajność kwantowa kamery, wymiary sensora) tak, aby zapewnić poprawne i efektywne działanie całego urządzenia, zgodnie z założeniami metody.



Rysunek 17.2. Widok z boku urządzenia do obrazowania fantomu piersi

Tabela 17.1. Elementy składowe urządzenia do obrazowania fantomu piersi

1	źródło światła	wymiennie dwie diody laserowe – 808 nm (zakres bliskiej podczerwieni) i 637 nm (zakres widzialny, światło czerwone), moduł diody laserowej (<i>Thorlabs</i>) z mocowaniem diody, połączony ze sterowaniem (kontrolery zasilania i temperatury), przyłączony do stalowej rury (statywu)
2	detektor promieniowania, obrazowanie	kamera <i>CMOS</i> (<i>Thorlabs</i>) przymocowana do rury stalowej, połączona z komputerem (USB) z dedykowanym oprogramowaniem do kontroli procesów obrazowania i akwizycji wyników
3	prześwietlany fantom żelowy piersi z centrum absorpcyjnym (imitującym zmianę patologiczną) umieszczony na obrotowej platformie	
4	stabilna platforma – podstawa z podziałką kątową (0° – 360°) do obrotu fantomu	
5	wysuwana rura z podziałką liniową umożliwiającą zmianę wysokości platformy i obrazowanie fantomu na określonej wysokości	
6	noga stolika – stabilna rura, z której wysuwana jest ruchoma, z pokrętkiem gwiazdowym M10 umożliwiającym dokręcenie rur i ustalenie wysokości	
7	stabilna podstawa układu umożliwiająca przemieszczanie całego urządzenia i jego ustawienie na stole laboratoryjnym	

Przebieg procedury pomiarowej wynika bezpośrednio z przedstawionych powyżej funkcjonalności podzespołów urządzenia. Pierwszym krokiem jest ustawienie badanego fantomu w centrum stolika. Następnie uruchomiona może zostać kamera wraz z oprogramowaniem. Po umieszczeniu diody w module połączonym ze sterowaniem zasilania i temperatury należy ostrożnie ją uruchomić, ustalając prąd pracy i napięcie. Prześwietlanie fantomu może być prowadzone, rozpoczynając od jego górnej części (podwyższenie stolika) lub od jego podstawy (obniżanie stolika). Skok, czyli zmianę wysokości stolika determinuje wymiar sensora (matrycy) w pionie, który zgodnie z danymi katalogowymi wynosi w przybliżeniu 1 cm. Po ustaleniu wysokości „płata”, w którym obrazowany jest fantom przeprowadzone może zostać jego sondowanie poprzez obrót platformy, na której spoczywa. Wyniki obserwowane są na bieżąco w komputerowym interfejsie użytkownika kamery. Mogą zostać zarejestrowane i zapisane jako pojedyncze zdjęcia dla obszaru zainteresowania lub jako seria obrazów bądź nagranie. Podczas rejestracji obrazów warto zaznaczyć, których obszarów fantomu dotyczą. Obrazy wynikowe mogą następnie posłużyć jako podstawa do dalszej obróbki i analizy, jak również graficznej rekonstrukcji całej struktury fantomu.

Obrazowanie opiera się o metodę mammografii laserowej, a więc podstawą badania będzie detekcja różnic w absorpcji promieniowania w poszczególnych rejonach fantomu, a w efekcie różnej intensywności uzyskiwanych obrazów. W przypadku zasymulowania przez centrum absorpcyjne wystąpienia zmiany nowotworowej piersi i obszaru jej angiogenezy w określonym miejscu fantomu, biegnące promieniowanie laserowe zostanie silnie zaabsorbowane (analogicznie do wysokiej absorpcji przez hemoglobinę), co poskutkuje ciemnym obszarem na uzyskiwanych obrazach.

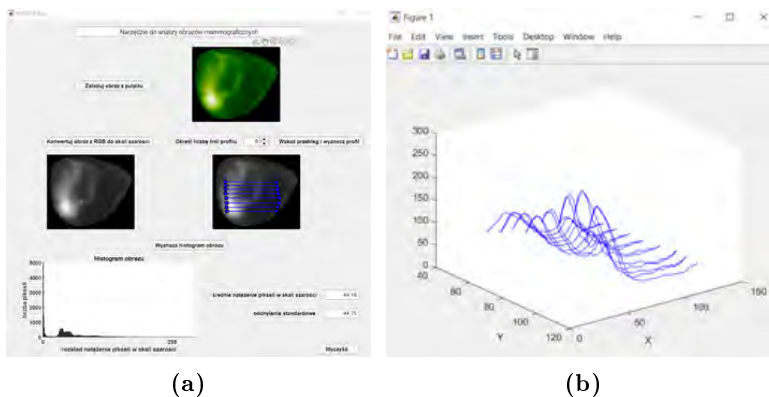
W przypadku struktury prawidłowej (lepszej transmisji wiązki) obrazy będą miały wyższą jednorodność, jasność i intensywność pikseli. Podczas prześwietlania fantomu za pomocą urządzenia wykorzystane mogą zostać wymiennie dwa źródła światła: o długości fali 808 nm, zgodnie z założeniami metody mammografii laserowej, jak również o długości fali z zakresu światła widzialnego 637 nm, co ułatwi ocenę wyników poprzez uzyskiwanie obrazu w kolorze.

4. Możliwości zastosowania urządzenia

Zaprojektowane w takim kształcie urządzenie mogłoby znaleźć zastosowanie w pracach badawczych związanych z metodą mammografii laserowej, przy testowaniu alternatywnych metod diagnostycznych zmian patologicznych w piersi, testowaniu konstruowanych fantomów mających odwzorowywać pierś zdrową i ze zmianami, a także w charakteryzowaniu właściwości optycznych gruczołu piersiowego, nowotworów i ukrwienia tych struktur. W przypadku prób zastosowania urządzenia na organizmie pacjenta konieczne jest dostosowanie układu pomiarowego np. poprzez zastosowanie stabilnego stołu, na którym spoczywa pacjent, z otworem na gruczoł piersiowy. Ponadto potrzebne jest zapewnienie wszystkich norm bezpieczeństwa związanych z oddziaływaniem promieniowania laserowego na organizm oraz uzyskanie zgody organów nadzorczych na prowadzenie tego typu badań.

5. Narzędzie do analizy obrazów mammograficznych

W środowisku *MATLAB* przygotowano narzędzie w formie programu z graficznym interfejsem użytkownika, które ma ułatwić analizę i ocenę obrazów mammograficznych. Zastosowane może zostać w przypadku różnych mammogramów np. obrazów otrzymywanych podczas badania metodą mammografii laserowej *CTLM*. Program ten może okazać się również skuteczny jako uzupełnienie zaprojektowanego urządzenia do obrazowania fantomu piersi, podczas oceny stopnia absorpcji wiązki w poszczególnych rejonach fantomu na podstawie natężenia pikseli uzyskiwanych zdjęć. Na rysunku 17.3 przedstawiono wynik działania aplikacji po wprowadzeniu obrazu i wykorzystaniu dostępnych, widocznych na ilustracji funkcji programu. Wybrany obraz wejściowy uzyskany został za pomocą metody *CTLM* i ukazuje w 3D gruczoł piersiowy pacjentki, u której stwierdzono raka przewodowego inwazyjnego piersi [4].



Rysunek 17.3. Okno aplikacji po wprowadzeniu obrazu CTLM i wykorzystaniu dostępnych funkcji wraz z wyznaczonym profilem natężenia

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę statystyki zachorowań na nowotwory piersi oraz niedoskonałości dostępnych obecnie powszechnie metod diagnostycznych, można stwierdzić, że konieczne jest poszukiwanie i testowanie nowych, wydajnych rozwiązań obrazowania gruczołu piersiowego dla jak najszybszej i najefektywniejszej profilaktyki, diagnozy i terapii chorób nowotworowych piersi. Korzystne okazuje się także stosowanie metod uzupełniających dla konwencjonalnych połączone z ich ciągłym rozwojem i udoskonalaniem tak, jak na obecną chwilę ma to miejsce w przypadku mammografii laserowej.

Bibliografia

- [1] *Zachorowalność, umieralność - nowotwory złośliwe - zdrowegeny.pl*, <https://zdrowegeny.pl/poradnik/zachorowalnosc-umieralnosc-na-nowotwory-zlosliwe-polsce>, dostęp: 26-11-2020.
- [2] *Piersi u kobiet / krn*, <http://onkologia.org.pl/rak-piersi-kobiet/>, dostęp: 26-11-2020.
- [3] Shah N., Cerussi A., Wisner D., Hsiang D., Butler J., Tromberg B., *The role of diffuse optical spectroscopy in the clinical management of breast cancer*, Disease markers, 19, 2004, 95–105.
- [4] *Specyfikacja techniczna urządzenia cilm imaging diagnostic systems inc., informacje producenta*, http://www.edomed.cz/download/ctlm_datasheet.pdf; <https://imds.com/>, dostęp: 14-12-2020.
- [5] Zapora E., Jarocka I., *Hemoglobin - source of reactive oxygen species*, Postępy higieny i medycyny doświadczalnej (Online), 67, 2013, 214–220.
- [6] Jarosz P., Woźniak B., *Angiogeneza w chorobach nowotworowych*, Przegląd Medyczny Uniwersytetu Rzeszowskiego i Narodowego Instytutu Leków w Warszawie, 4, 2012, 498–507.
- [7] Ślubowski T., Ślubowska M., Wojciechowski A., *Techniki diagnostyczne w raku piersi. część I: Metody obrazowe i ich modyfikacje; diagnostic techniques in breast cancer detection. part I: Imaging methods and their modifications*, Ginekol. Pol., 78, nr 5, 2007, 388–392.
- [8] Poellinger A., Martin J., Ponder S., Freund T., Hamm B., Bick U., Diekmann F., *Near-infrared laser computed tomography of the breast. first clinical experience*, Academic radiology, 15, 2009, 1545–1553.
- [9] Qi J., Ye Z.X., *Cilm as an adjunct to mammography in the diagnosis of patients with dense breast*, Clinical imaging, 37, 2013, 289–294.
- [10] Bobek-Billewicz B., Jurkowski M., Steinhof K., Stobiecka E., *Evaluation of laser computer mammography (cilm) usefulness in differentiation benign and malignant breast lesions*, Polish Journal of Radiology, 73, 2008, 27–31.

Część IV

Wydział Elektroniki,
Mikrosystemów i Fotoniki

Elektrodynamiczne pułapkowanie mikrocząstek

inż. Szymon Matczak

Mechatronika

dr hab. inż. Tomasz Grzebyk

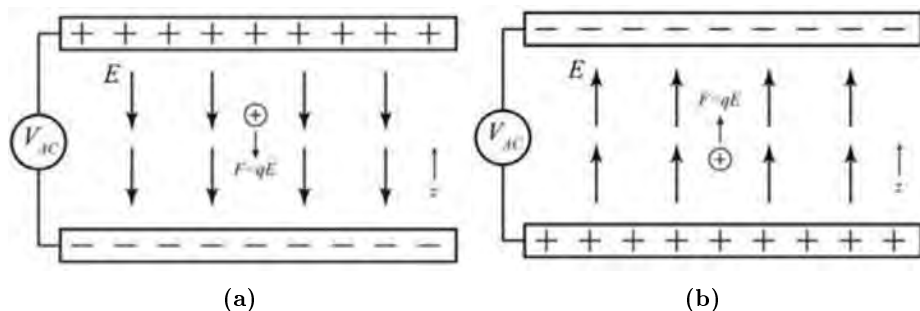
Katedra Mikrosystemów

Pułapki elektrodynamiczne znajdują swoje zastosowanie w informatyce kwantowej, spektrometrii mas, oraz umożliwiają manipulowanie cząsteczkami wykorzystując do tego pole elektryczne wytwarzane przez elektrody. Odpowiednio oddziałując napięciem stałym i zmiennym możliwe jest skupianie w określonym miejscu oraz kontrolowane poruszanie złapanych mikrocząstek.

Praca obejmuje zakres projektowania oraz modelowania 3D różnych wariantów pułapek elektrodynamicznych, a następnie wykonanie ich w rzeczywistości wykorzystując technologię druku 3D. W celu obserwacji badanych mikrocząstek sporządzono stanowisko pomiarowe, które służyło do wykonania pomiarów dla każdego rodzaju pułapek. Obiektem badań były zróżnicowane mikrocząsteczki, co miało służyć porównaniu ich zachowania w polu elektrycznym, oraz sprawdzenie możliwości manipulacji cząsteczkami, wykorzystując w tym celu napięcie zmienne i stałe. W pracy przyjrano się uważnie poszczególnym typom pułapek elektrodynamicznych, zwracając uwagę na ich możliwości, wady i zalety.

Pułapki elektrodynamiczne składają się z elektrod, których zadaniem jest utrzymanie cząstek posiadających ładunek, w wytworzonym przez elektrody polu elektrycznym. Pole elektryczne między elektrodami powstaje dzięki przyłożonemu napięciu zmiennemu AC , co skutkuje utrzymaniem naładowanych cząstek w przestrzeni między elektrodami [1].

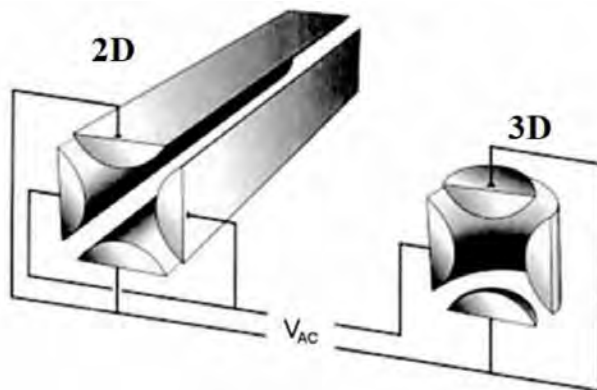
Ruch cząstek w polu elektrycznym powstałym w liniowej pułapce elektrodynamicznej można opisać na przykładzie idealnego kondensatora (rys. 18.1). Zakładając, że między płytkami jest próżnia, a napięcie AC przyłożone do płytek wytwarza jednolite oscylujące pole elektryczne $E(t)$ między płytkami.



Rysunek 18.1. Schemat pokazujący zachowanie naładowanej cząstki w próżniowym, równoległym kondensatorze [1]

Oscylujące w czasie pole elektryczne AC powstałe między płytkami kondensatora powoduje zmianę pozycji cząstki. W przypadku, gdy polaryzacja elektrod określona jest od elektrody posiadającej ładunek dodatni do elektrody posiadającej ładunek ujemny, dodatnio naładowana cząstka porusza się ruchem w dół (rys. 18.1a). Kiedy jednak polaryzacja jest odwrócona, pole elektryczne wymusza ruch cząstki w górę (rys. 18.1b). Zakłada się, że cząsteczka posiadająca ładunek q , umieszczona pomiędzy okładkami kondensatora jest w danej pozycji z , a jej prędkość początkowa jest równa 0.

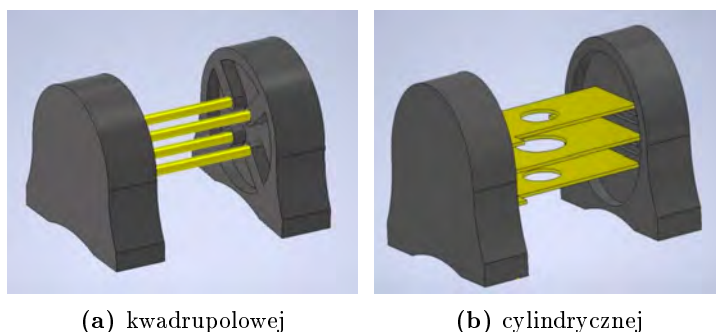
Kwadrupolowa pułapka elektrodynamiczna opiera swoje działanie na zależnościach opisanych powyżej. Niezależnie czy weźmiemy pod uwagę pułapkę dwu- czy trzymiwarową (rys. 18.2), zasada ich działania jest taka sama [1].



Rysunek 18.2. Ilustracja przedstawiająca ułożenie elektrod kwadrupolowej pułapki elektrodynamicznej i sposób podłączenia napięcia [1]

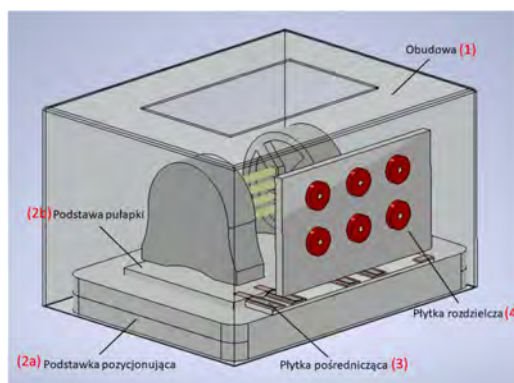
Pułapka elektrodynamiczna typu kwadrupolowego składa się z zestawu czterech elektrod, sprzężonych na krzyż parami. Przy zastosowaniu takiego układu, cząsteczki znajdujące się w polu elektrycznym wytworzonym między elektrodami będą utrzymywały się wzdłuż centralnej osi pułapki. Dodatkowo, na końcach tego typu pułapek bardzo często umieszczane są dwie elektrody mające za zadanie stabilizację mikrocząstek w obszarze pułapkowania przez przyłożenie do nich napięcia stałego. Kolejnym typem pułapek elektrodynamicznych są pułapki cylindryczne. Składają się one z trzech równoległych do siebie elektrod. W tym konkretnym przypadku są to dwa miedziane talerze i jeden miedziany pierścień. Napięcie zmienne AC przyłożone do pierście-

nia ma na celu wytworzenie zmiennego pola elektrycznego, w którym będą skupiały się badane cząsteczki. Rolą miedzianych talerzy jest utrzymanie cząsteczek w pierścieniu, przy pomocy napięcia stałego DC. Manipulacja tym napięciem powoduje kompensację wpływu grawitacji (dolna elektroda) na unoszące się w pierścieniu cząsteczki, oraz ogranicza zakres ruchu cząsteczek (górną elektrodą). Bazując na zdobytej wiedzy teoretycznej w obszarze elektrodynamicznego pułapkowania wykonano projekt kwadrupolowej i cylindrycznej pułapki elektrodynamicznej (rys. 18.3). Pułapka kwadrupolowa składa się z czterech równoległych względem siebie elektrod, oraz dwóch uchwytych których zadaniem jest utrzymanie elektrod w poziomie i zapewnienie im stabilności.



Rysunek 18.3. Projekt pułapki elektrodynamicznej

Wytworzono dwa warianty pułapki kwadrupolowej, w zależności od odległości elektrod od siebie. Pierwszym wariantem jest kwadrupolowa pułapka elektrodynamiczna o odległości elektrod równej 10 mm, natomiast drugim wariantem jest struktura o odległości elektrod równej 6 mm. Przewidziano dwa warianty, aby sprawdzić wpływ zmiany odległości między elektrodami na właściwości pułapkowania się mikrocząsteczek. Elektrody zaprojektowano w postaci liniowych wałków o średnicy równej 4 mm i długości równej 10 mm. Do elektrod przewidywano przyłożenie napięcia w sposób bezpośredni, wykorzystując technologię lutowania.



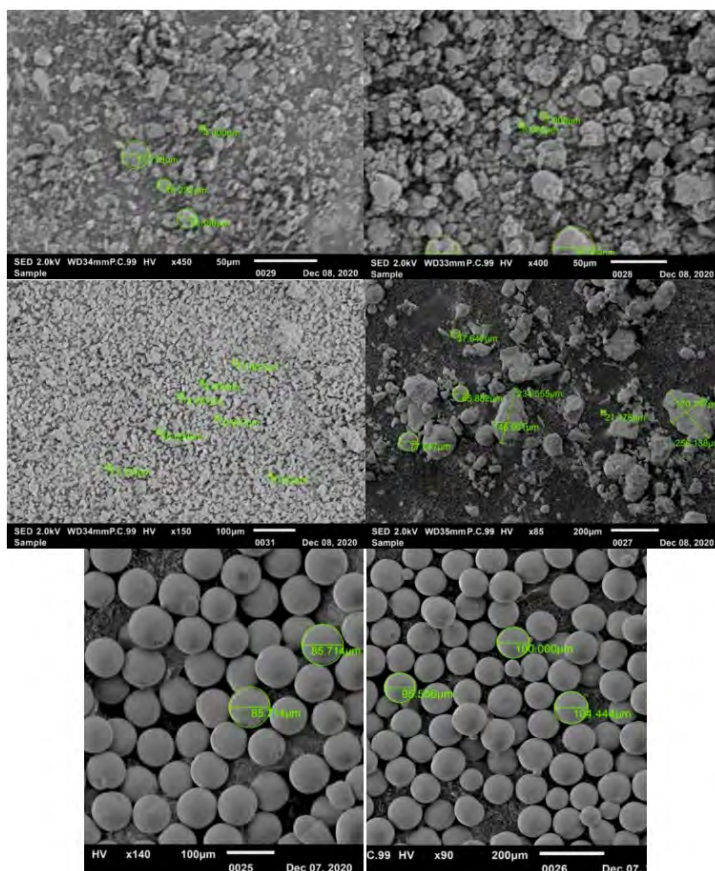
Rysunek 18.4. Schemat ideowy obudowy i elementów składowych

Następnym projektem, który został wykonany był projekt pułapki elektrodynamicznej cylindrycznej. Pułapka składa się z trzech płaskich, miedzianych elektrod, które są utrzymywane w poziomie dzięki uchwytem. Uchwyty zostały zaprojektowane w taki sposób, żeby była możliwość dopasowania odpowiedniej odległości elektrod od siebie. Elektrody zaprojektowano w postaci

prostokątnych płytek z otworami na środku. Przewidziano w projekcie różne warianty wielkości otworów. W projekcie również przewidziano pole lutownicze w postaci małego kwadracika, które miałyby umożliwić przyłożenie napięcia do każdej z elektrod. Aby zapewnić użytkownikowi bezpieczeństwo podczas badań nad pułapkami elektrodynamicznymi zaprojektowano obudowę. Głównym niebezpieczeństwem było porażenie prądem elektrycznym podczas domniemanego, przypadkowego przebiecia na strukturze pułapki elektrodynamicznej.

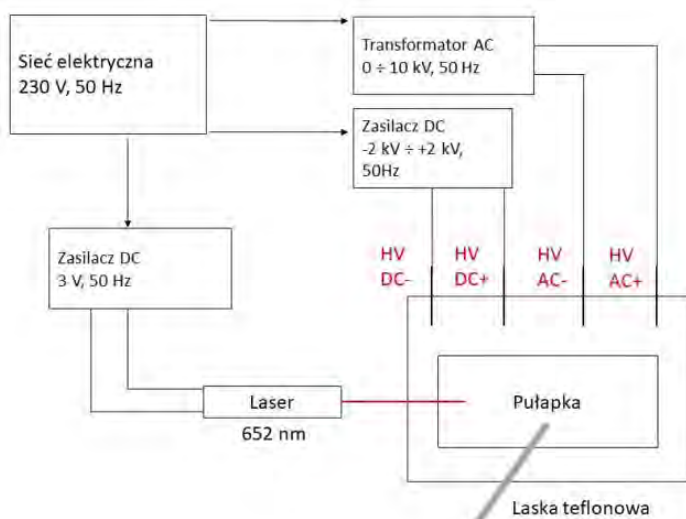
Dobierając obudowę zabezpieczającą najbliższe otoczenie pułapek elektrodynamicznych kierowano się dużą rezystywnością materiału, z którego obudowa miałaby być wykonana. Zdecydowano się na użycie obudowy wykonanej z polipropylenu. Polipropylen jako materiał cechuje się rezystywnością na tyle dużą, aby zapewnić bezpieczeństwo podczas pracy. Całość składa się z: obudowy (1), podstawki pozycjonującej (2a), podstawy pułapki (2b), płytki pośredniczącej (3) i płytki rozdzielczej (4) (rys. 18.4).

Do przeprowadzenia badań wykonanych struktur pułapek elektrodynamicznych wykorzystano cząsteczki o charakterze pylistym. W doborze analizowanych cząsteczek kierowano się niewielkim rozmiarem cząsteczki, małą wagą, oraz łatwą dostępnością. Aby przybliżyć charakter badanych cząsteczek wykonano zdjęcia za pośrednictwem mikroskopu elektronowego. Zdecydowano się na wykorzystanie cząsteczek: jednościennych i wielościennych nanorurek węglowych, pyłu kawy rozpuszczalnej, kryształów ZnO i mikrokulek polimerowych (rys. 18.5).



Rysunek 18.5. Wyselekcjonowane cząsteczki pod powiększeniem mikroskopowym

Posiadając kompletne struktury pułapek elektrodynamicznych oraz zróżnicowane mikrocząsteczki do badań, przystąpiono do kompletowania stanowiska pomiarowego (rys. 18.6).

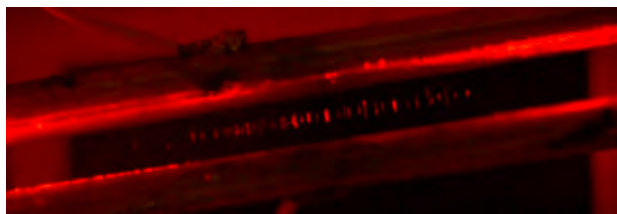


Rysunek 18.6. Stanowisko pomiarowe wykorzystane do badań

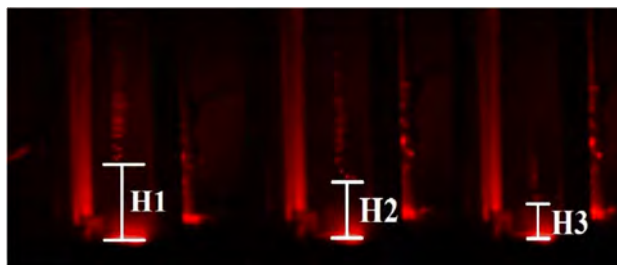
Przeprowadzono serię pomiarową na wszystkich wykonanych strukturach. Zbadano właściwości pułapkowania się wszystkich wybranych mikrocząsteczek. Właściwości, które badano to: populacja złapanych cząsteczek [%], zakres drgań cząsteczek [mm], oraz wysokość na jakiej utrzymywały się cząsteczki [mm] w zależności od przyłożonego napięcia [V]. W przypadku kwadrupolowej pułapki elektrodynamicznej pomiary przeprowadzono w orientacji poziomej i pionowej (rys. 18.7). Cylindryczna pułapka badana była badana jedynie w orientacji poziomej.

Badając zaprojektowane i wykonane struktury okazało się, że pomimo poparcia teoretycznego, nie wszystkie pułapki działają poprawnie. Ze wszystkich struktur najlepszym działaniem wykazała się kwadrupolowa pułapka elektrodynamiczna o odległości elektrod równej 10 mm w orientacji pionowej. Mimo nowatorskich rozwiązań, zastosowanych przy pomiarach tego typu pułapki, udało się osiągnąć najlepsze wyniki, a przede wszystkim z powodzeniem udało się spuławpować wszystkie mikrocząsteczki. Gorzej wypadła jednak ta struktura w orientacji poziomej, kiedy to złapaniu uległy tylko 3 typy cząsteczek. Dodatkowo okazało się, że duże znaczenie ma tutaj odległość elektrod, co pozwala na osiąganie większych wartości napięć. Kluczowe było to w przypadku badań w orientacji pionowej, ponieważ wtedy struktura o odległości elektrod równej 6 mm nie podołała stawianym jej oczekiwaniom i na powierzchni pułapki powstawały przebiecia, co uniemożliwiło pomiary na tej strukturze.

Podczas pomiarów na kwadrupolowych pułapkach elektrodynamicznych w orientacji poziomej przeprowadzono badania na strukturach o odległości elektrod równej 10 mm i 6 mm. Działanie tych struktur było jednakowe. Głównymi podobieństwami były to, że zarówno w przypadku odległości elektrod równych 10 mm i 6 mm populacja cząsteczek i ich amplituda drgań malała wraz z przyłożonym napięciem. W dodatku, każdy rodzaj badanych mikrocząsteczek zachowywał stabilność w polu elektrycznym, przy konkretnym napięciu. Przykładowo dla wielościennych nanorurek węglowych napięcie takie wynosiło 4200 V. W przypadku pomiarów badających zmianę wysokości cząsteczek w polu elektrycznym, wykazano, że wszystkie badane cząsteczki początkowo unoszą się na podobnej wysokości, która maleje wraz z zmniejszaniem napięcia stałego. Znacząca różnica występuje w momencie, gdy zbliżano się do wartości $-0,4 \text{ kV}/-0,6 \text{ kV}$. Na przełomie



(a) w orientacji poziomej



(b) w orientacji pionowej i zmiana wysokości złapanych cząsteczek

Rysunek 18.7. Pomiar struktury kwadrupolowej pułapki elektrodynamicznej

tych punktów pomiarowych, zmiana wysokości była diametralnie większa i wynosiła od 1,2 mm, aż do 2,6 mm. Niepowodzeniem okazała się być cylindryczna pułapka elektrodynamiczna, która całkowicie nie spełniła założeń projektowych. Nie udało się przeprowadzić żadnych sensownych pomiarów, z wyjątkiem momentu, gdy złapaniu uległa pojedyncza cząsteczka jednościennej nanorurki węglowej, która unosiła się nad górną elektrodą przez kilka godzin. Problemem najprawdopodobniej był wpływ grawitacji, która zgodnie z założeniami powinna być kompensowana przez górną i dolną elektrodę, jednak nie zadziałało to w taki sposób.

Praca dyplomowa miała charakter badawczy, a cele postawione na początku zostały osiągnięte. Zaprojektowano i opracowano technologicznie różne struktury pułapek elektrodynamicznych, stworzono stanowisko pomiarowe umożliwiające prowadzenie i obserwację badań, oraz wykonano pomiary i przeanalizowano uzyskane wyniki.

Bibliografia

- [1] Libbrecht K., Black E., *Improved microparticle electrodynamic ion traps for physics teaching*, American Journal of Physics, 86, 2018, 539–549.
- [2] Mihalcea B., Giurgiu L., Stan C., Visan G., Ganciu M., Filinov V., Lapitsky D., Deputatova L., Syrovatka R., *Multipole electrodynamic ion trap geometries for microparticle confinement under standard ambient temperature and pressure conditions*, Journal of Applied Physics; arXiv: 1512.05503v4, 119, 2016, 114303.
- [3] Trigg G., Vera E., Greulich W., *Encyclopedia of Applied Physics: Combustion to diamagnetism. Volume 4*, VCH Publ 1991.
- [4] Iijima S., Ichihashi T., *Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter*, Nature, 363, 1993, 603–605.

-
- [5] Laird E., Kuemmeth F., Steele G., Grove-Rasmussen K., rd J., Flensberg K., Kouwenhoven L., *Quantum transport in carbon nanotubes*, Reviews of Modern Physics, 87, 2014.
- [6] Hong S., Myung S., *Nanotube electronics: A flexible approach to mobility*, Nature nanotechnology, 2, 2007, 207–208.
- [7] Iijima S., *Helical microtubules of graphitic carbon*, Nature, 1991, 35456–35458.
- [8] Green N., Frederickson A., Dennison J., *Experimentally derived resistivity for dielectric samples from the crres internal discharge monitor*, Plasma Science, IEEE Transactions on, 34, 2006, 1973 – 1978.
- [9] Wacker W., *Euglena: An experimental organism for biochemical and biophysical studies*, JAMA, 181, 1962, 1150–1150.
- [10] Özgür ., Alivov Y., Liu C., Teke A., Reshchikov M., Dogan S., Avrutin V., Cho S.J., Morkoç H., *A comprehensive review of zno materials and devices*, Journal of Applied Physics, 98, 2005, 041301–041301.
- [11] Diaz A., Felix-Navarro R., *A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties*, Journal of Electrostatics - J ELECTROSTAT, 62, 2004, 277–290.
- [12] Hernández Battez A., González Rodríguez R., Viesca J., Fernández J., Fernandez J., Machado A., Chou R., Riba J., *Cuo, zro2 and zno nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants*, Wear, 265, 2008, 422–428.

Aktuacja elektromagnetyczna w drukowanych mikrosystemach

inż. Pratyush Kainth
Mechatronika

dr hab. inż. Rafał Walczak
Katedra Mikrosystemów

Praca inżynierska dotyczy aktuacji elektromagnetycznej w drukowanych mikrosystemach. Przy użyciu technologii druku strumieniowego zostały wydrukowane struktury mikromechaniczne. Do aktuacji elektromagnetycznej potrzebne są dwa elementy: cewka oraz magnes stały. w pracy dobrano jak najmniejszą cewkę z jak największą ilością zwojów tak, aby natężenie pola magnetycznego było jak największe. Analogicznie do cewki, starano się również dobrać jak najmniejszy magnes, ale z silnym polem magnetycznym. Zdecydowano się na stały magnes neodymowy. Aby można było mówić o akuatorze, konieczne jest także uwzględnienie części mikromechanicznej. Do wytworzenia tej części wykorzystany został druk 3D, który do tej pory był wykorzystywany w różnych pracach nad drukowanymi przetwornikami energii mechanicznej na elektryczną [1, 2]. Celem pracy było przeprowadzenie badań dotyczących aktuacji elektromagnetycznej w mikrosystemach przy wykorzystaniu technologii strumieniowego druku 3D. Przeprowadzone zostały:

- **testy statyczne** – badano zachowanie struktur pod wpływem doprowadzania prądu stałego do cewki akuatora,
- **testy zmiennoprądowe** – do struktur doprowadzono prąd zmienny i badano ich zachowanie,
- **testy powtarzalności** – badano te same struktury w celu oceny wiarygodności pomiarów i ich powtarzalności.

Ostatnim etapem było zaprojektowanie urządzenia wykorzystującego aktuację elektromagnetyczną. Zdecydowano się na przełącznik światłowodowy wydrukowany w technologii strumieniowego druku 3D.

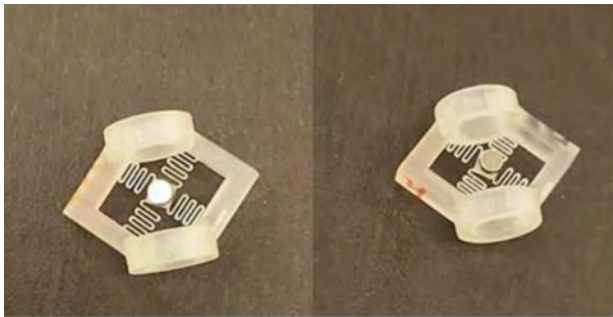
1. Charakterystyka mikromechaniczna struktur: stałoprądowa aktuacja elektromagnetyczna

Wszystkie struktury zostały wydrukowane w technologii 3D (druk strumieniowy) na drukarce *ProJet 3510*. Druk ten charakteryzuje się wysoką rozdzielczością, co pozwoliło na dokładne odwzorowanie zaprojektowanych struktur. Materiałem budulcowym był fotopolimer *VisiJet M3*

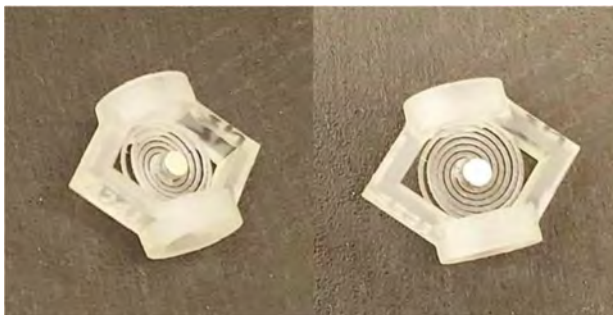
Crystal, natomiast materiałem podporowym był wosk *VisiJet S300*. Wszystkie badane struktury wyglądały podobnie, jednak nie były identyczne. Każda z nich miała wymiary zewnętrzne $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Strukturę zewnętrzną tworzyła ramka, na środku której znajdowała się płytka o wymiarach $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$, na której umieszczony był stały magnes neodymowy, i która była przymocowana do zewnętrznej ramki sprężynami o różnych wymiarach i kształtach (rys. 19.1, 19.2). Badano struktury o sprężynach kolistych, których szerokość mieściła się w przedziale $200\text{--}500 \mu\text{m}$ o współczynniku „zakręcenia” spirali równym 1,62 lub 0,75. w celu odróżnienia struktur zostały one ponumerowane zgodnie z schematem: pierwsza cyfra to liczba punktów mocowania (lub ilość sprężyn), druga cyfra to szerokość sprężyny, trzecia cyfra to wysokość sprężyny, a czwarta cyfra to wersja struktury (tab. 19.1).

Tabela 19.1. Zestawienie zbadanych struktur

Lp.	Struktura	Ilość odnóg	szerokość [μm]	Wysokość [μm]	Współczynnik zakręcenia	Typ struktury
1	4531	4	500	300	1,62	spiralna
2	3152	3	100	500	-	3 sprężyny
3	4441	4	400	400	1,62	spiralna
4	4174	4	100	700	-	4 sprężyny
5	4541	4	500	400	1,62	spiralna
6	4241	4	200	400	1,62	spiralna

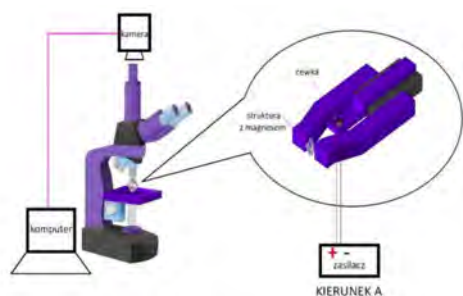


Rysunek 19.1. Zdjęcie struktury o numerze 4174

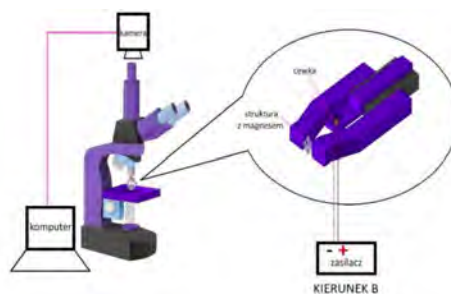


Rysunek 19.2. Zdjęcie struktury o numerze 4241

Na środku każdej ze struktur znajdują się 2 stałe magnesy neodymowe o łącznej grubości 1,5 mm (jeden 0,5 mm, a drugi 1 mm). w układzie pomiarowym użyto zasilacza (*DC Power Supply AX-3005D-3*), miniaturowej cewki (*SMD 812* o indukcyjności równej 7,36 mH), kamery do rejestrowania obrazu, mikroskopu, dedykowanego oprogramowania, za pomocą którego analizowano zarejestrowane dane, podstawki do pozycjonowania mierzonych struktur oraz cewki. Cewka została umieszczona 2 mm nad środkiem struktury w taki sposób, aby kierunki oddziaływania pól (cewki i magnesu) były równoległe. Cewkę zasilano prądem stałym lub zmiennym. Kamery zamontowano na podkładce uchwytem z firmy *Thorlabs* na takiej wysokości, aby kadr był ustawiony na badaną strukturę (rys. 19.3 oraz 19.3).

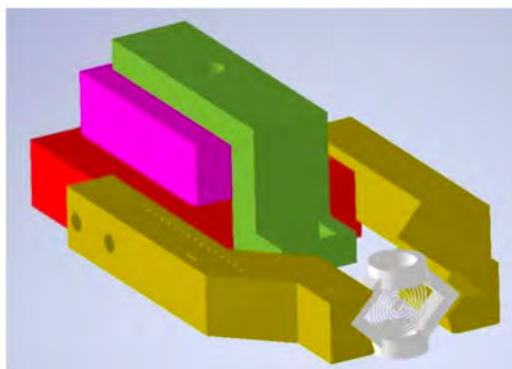


Rysunek 19.3. Schemat układu pomiarowego do badań pod mikroskopem z kierunkiem przepływu prądu: kierunek A



Rysunek 19.4. Schemat układu pomiarowego do badań pod mikroskopem z kierunkiem przepływu prądu: kierunek B

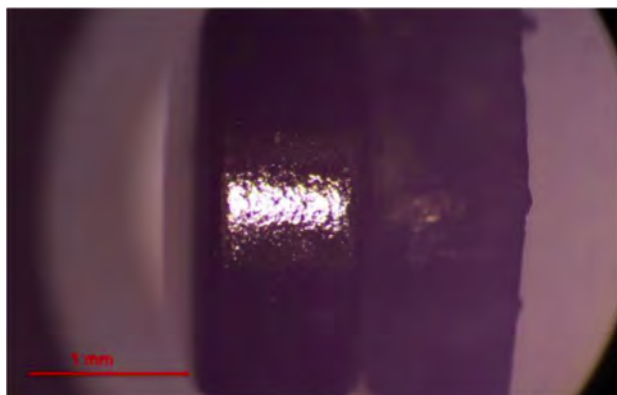
Pomiary wykonywano pod mikroskopem firmy *Delta Optical*, natomiast zdjęcia rejestrowano dedykowaną kamerą do mikroskopu (*DLT-Cam PRO 6,3 MP*). Wydrukowano specjalnie zaprojektowany uchwyt do mikroskopu, który służył do przytrzymywania badanych struktur. Zaprojektowano go w programie *Autodesk Inventor*, a wydrukowano metodą druku *FDM*. Na zielonym wysięgniku (rys. 19.5) została zamontowana cewka, a złote elementy podtrzymywały badaną strukturę tak, aby środki cewki i magnesu były w jednej osi. w miejsce fioletowej bryły prostopadłościowej dodano miniaturową jednoosiową platformę translacyjną, dzięki której możliwa była regulacja odległości cewki od sprężynki.



Rysunek 19.5. Dedykowana obudowa do pomiarów pod mikroskopem

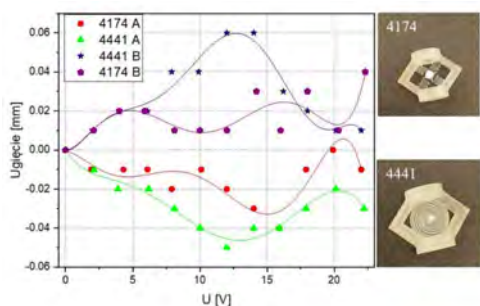
Do pomiarów użyto soczewki powiększającej obraz czterokrotnie. Ugięcia struktury określono za pomocą dedykowanej aplikacji *DLT Cam-Viewer*. w celu odczytu wartości ugięć ze zdjęć konieczne było ustalenie podziałki adekwatnej do powiększenia (rys. 19.6). Wartość 1 mm była

znana, ponieważ tyle wynosiła grubość jednego z magnesów. Ugięcia określano poprzez porównanie zdjęć przed i po zasilaniu aktuatora. Cewkę zasilano napięciem od 2 V do 22 V ze skokiem co 2 V. Wartość natężenia prądu zmieniała się od 10 mA do 60 mA. w celu weryfikacji czy sprężyna w obie strony ugina się tak samo, cewkę zasilano takimi samymi wartościami napięcia, ale z odwróceniem kierunku przepływu prądu (kierunek A lub kierunek B).

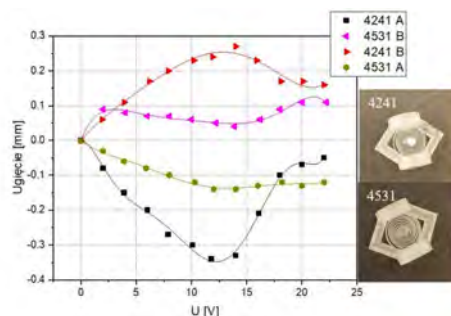


Rysunek 19.6. Przykład wykonywania pomiaru ugięć struktury

Zbadano 6 rodzajów mikroaktuatorów. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach (Rys 19.7, 19.8), gdzie A i B oznaczają kierunki przepływu prądu. Po analizie wyników zauważono, że największe ugięcie następuje dla wartości napięcia około 12–14 V. Odnotowano również, że wraz ze wzrostem napięcia, po osiągnięciu wartości maksymalnej, ugięcie zaczyna spadać do wartości 0. Największe ugięcie odnotowano dla sprężyn o numerach 4241 (0,33 mm dla napięcia 11,8 V) oraz 4531 (0,14 mm dla napięcia 14 V). Niektóre sprężyny miały ugięcia równe prawie 0, pozostałe natomiast uginały się w granicach od 0 do 80 μm . Dla struktur o numerach 4441 oraz 4174 można zauważyć, że wartości bezwzględne są do siebie zbliżone, natomiast wykresy są bardzo podobne pod względem kształtu. Rozbieżność między wartościami bezwzględnymi danych struktur wynika z kierunku przepływu prądu: w zależności od tego, czy płynie on w kierunku A czy odwróconym w cewce, magnes neodymowy w sprężynie jest przyciągany lub odpychany. w momencie kiedy jest przyciągany, zbliża się on do cewki, czyli „wchodzi” w głąb pola magnetycznego jakie wywarza cewka, natomiast gdy magnes jest odpychany wówczas odbiega on od pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę, co powoduje mniejsze odchylenie całej sprężyny.



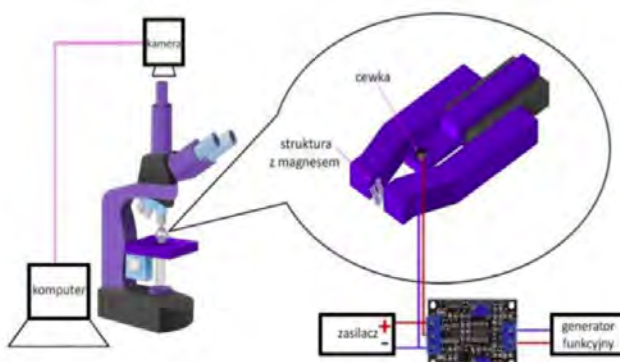
Rysunek 19.7. Zależność ugięcia od napięcia dla struktur o numerach 4174 oraz 4441



Rysunek 19.8. Zależność ugięcia od napięcia dla struktur o numerach 4241 oraz 4531

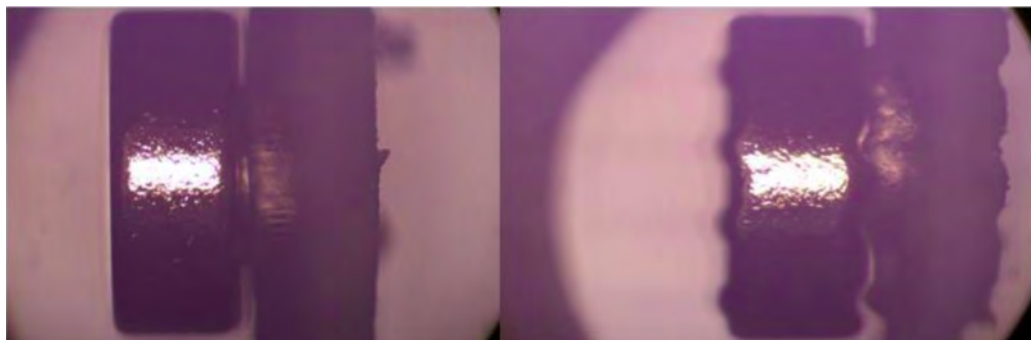
2. Charakterystyka mikromechaniczna struktur: zmiennoprądowa aktuacja elektromagnetyczna

Układ pomiarowy Po analizie i sprawdzeniu poprawności działania aktuacji elektromagnetycznej dla trybu stałego zasilania, rozpoczęto pomiary zmiennoprądowe. Aby wykonać tę część należało zmienić układ pomiarowy tak, aby cewka była zasilana prądem o zmiennej częstotliwości. w tym celu użyty został gotowy przetwornik napięcie-prąd (rys. 19.9). Częstotliwość i typ sygnału pobudzającego zadawane były generatorem funkcyjnym. Na wejściu przetwornika napięcie-prąd podłączony został generator funkcyjny, natomiast na wyjściu podłączono zasilacz wraz z cewką.



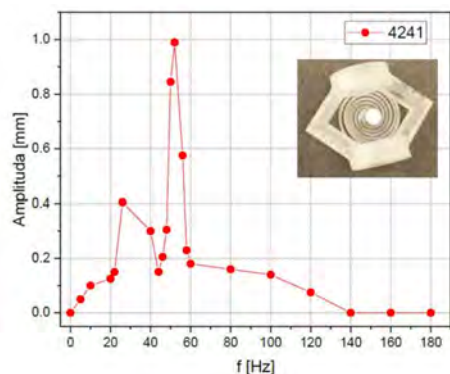
Rysunek 19.9. Schemat układu pomiarowego dla zmiennoprądowej aktuacji elektromagnetycznej

Częstotliwość sygnału sterującego wynosiła od 5 Hz (rys. 19.10) do około 200 Hz w zależności od struktury. Badano amplitudy drgania sprężyny z wykorzystaniem wcześniej opisanego systemu mikroskopowego i metodologii pomiaru. w pierwszych testach stosowano sygnał sinusoidalny, w późniejszych również sygnał prostokątny, sygnał typu puls, sygnał typu „ramp”. Częstotliwość zwiększano, aż do uzyskania rezonansu drgającej struktury. w tym zakresie zmiana częstotliwości następowała ze skokiem od 2 do 20 Hz. Mniejszy skok stosowano w pobliżu częstotliwości rezonansowej. Dla niektórych struktur przeprowadzono również testy powtarzalności uzyskanych wyników.

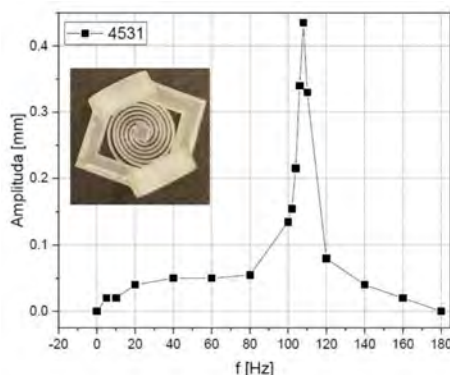


Rysunek 19.10. Widok aktuatora: po lewej: brak sygnału sterującego, po prawej: sygnał o częstotliwości 5 Hz

Amplituda drgań każdej struktury była inna i zależała od częstotliwości sygnału pobudzającego oraz od wymiarów geometrycznych danej sprężyny. Zaobserwowano, że w wypadku niektórych struktur udało się zarejestrować dwie częstotliwości rezonansowe (rys. 19.11), a u niektórych jedną (rys. 19.12). Zauważono również, że doprowadzając inny rodzaj sygnału dla częstotliwości rezonansowej zwiększa się amplituda (tab. 19.2). Dla struktury o numerze 4331 można zauważyć, że sygnał prostokątny daje większą wartość amplitudy niż sygnał sinusoidalny. Zauważono również, że częstotliwość rezonansowa jest inna dla każdego przebiegu, np. zachowanie przy przebiegu prostokątnym dla sprężyny 4541 jest inne niż dla przebiegu sinusoidalnego. Największą amplitudę osiągnięto dla struktury 4241 (aż 1 mm) (rys. 19.11). Można również zauważyć, że dla poszczególnych sprężyn wartość drugiej częstotliwości rezonansowej jest dokładnie dwa razy wyższa niż pierwsza wartość.



Rysunek 19.11. Zależność amplitudy drgań od zadawanej częstotliwości dla struktury 4241



Rysunek 19.12. Zależność amplitudy drgań od zadawanej częstotliwości dla struktury 4531

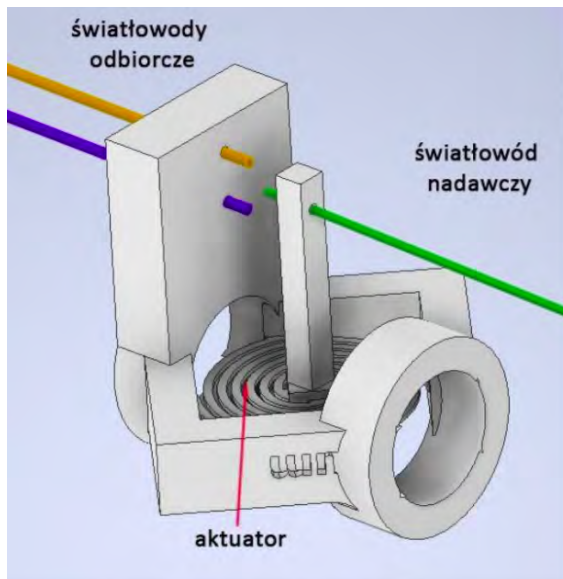
Tabela 19.2. Zestawienie amplitud drgań struktur dla różnych zadawanych sygnałów przy częstotliwościach rezonansowych

Struktura 4241			Struktura 4331			Struktura 4541		
f	A	sygnał	f	A	sygnał	f	A	sygnał
[Hz]	[mm]	–	[Hz]	[mm]	–	[Hz]	[mm]	–
50	1,05	sinus	68	0,57	sinus	140	0,027	sinus
	0,735	prostokąt		0,84	prostokąt		0,235	prostokąt
	0,685	rampa		0,485	rampa		0,235	pulse
	0,92	pulse		0,815	pulse		0,135	rampa

3. Przełącznik światłowodowy – projekt wykorzystujący aktyzację elektromagnetyczną

Na podstawie otrzymanych wyników przedstawionych w zdecydowano się zaprojektować urządzenie wykorzystujące w praktyce aktyzację elektromagnetyczną w połączeniu z mikrosystemami drukowanymi w technologii druku strumieniowego. w programie *Autodesk Inventor* wykonano

projekt przełącznika światłowodowego. Urządzenie jest rozwinięciem badanych struktur (4241, 4331). Po przeciwnej stronie niż magnes dodano do nich prostopadłościenną podpórę z dwoma otworami dla światłowodów oraz po tej samej stronie, na środkowej podstawie, zaprojektowano wydłużony słupek z otworem. Słupek pod wpływem siły elektromagnetycznej porusza się w dwie strony podobnie jak niezmodyfikowana struktura. Tym samym światłowód umieszczony na słupku może być przełączany pomiędzy dwoma światłowodami (rys. 19.13).



Rysunek 19.13. Wizualizacja zaprojektowanego przełącznika

4. Wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono projekt, wykonanie oraz wyniki badań nad strukturami aktuatorów elektromagnetycznych drukowanych w technologii druku strumieniowego 3D. Do cewki aktuatora doprowadzano napięcie w określonym przedziale i rejestrowano ugięcia struktur używając do tego kamery mikroskopowej. Zanotowane pomiary naniesiono na wykresy. Odnotowano maksymalne wartości ugięć. Następnie przeprowadzono testy powtarzalności. Wartości ugięć struktur zależały od ich typu oraz ich geometrii. Warto zauważyć, że w wypadku struktur spiralnych im mniejsza szerokość ramienia struktury tym te ugięcia było większe. W kolejnej części przeprowadzono podobne badania, jednak użyto prądu o zmiennej częstotliwości. Zauważono, że w badanym zakresie częstotliwości niektóre struktury posiadają dwie częstotliwości rezonansowe. Amplitudy drgań do momentu osiągnięcia pierwszego rezonansu miały tendencję wzrastającą, następnie po osiągnięciu maksimum, zaczynały maleć. Analogicznie odbywało się w przypadku drugiego rezonansu. Podobnie jak w części stałoprądowej przeprowadzone zostały testy powtarzalności trzech struktur. Przebiegi charakterystyk były bardzo zbliżone do siebie. Na podstawie wyników badań zaprojektowano przełącznik światłowodowy wykorzystujący akcję elektromagnetyczną oraz druk 3D. Przełącznik taki może być rozszerzeniem wykonanych już badań, ale dla wartości napięcia w mV. Zadając wartość kilku mV na zasilaczu jesteśmy w stanie odczytać odległość za pomocą odchyłeń światłowodów. Mając różnice w rozstawie światłowodów można odwrócić zadanie i manipulować odległością, a nie napięciem.

Bibliografia

- [1] Dou R., Wang T., Guo Y., Derby B., *Ink-jet printing of zirconia: Coffee staining and line stability*, Journal of the American Ceramic Society, 94, 2011, 3787 – 3792.
- [2] Kawa B., Śliwa K., Lee V., Shi Q., Walczak R., *Inkjet 3d printed mems vibrational electromagnetic energy harvester*, Energies, 13, 2020, 2800.
- [3] Gross B., Meisel J., Lockwood S., Chen C., Spence D., *Evaluation of 3d printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences*, Analytical chemistry, 86, 2014.
- [4] Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T., Hui D., *Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges*, Composites Part B: Engineering, 143, 2018, 172–196.
- [5] Zolfagharian A., Kaynak A., Khoo S., Zhang J., Nahavandi S., Kouzani A., *Control-oriented modelling of a 3d-printed soft actuator*, Materials, 12, 2018, 71.
- [6] Wang G., Cheng T., Do Y., Yang H., Tao Y., Gu J., An B., Yao L., *Printed paper actuator: A low-cost reversible actuation and sensing method for shape changing interfaces*, [w:] *CHI '18: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* 2018, 1–12.
- [7] Miller C., Montgomery D., Black M., Schnetler H., *Thermal expansion as a precision actuator*, [w:] *Proceedings Volume 9912, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II* 2016, 991269.
- [8] Neumann W., Schad L., Zöllner F., *A novel 3d-printed mechanical actuator using centrifugal force for magnetic resonance elastography*, Conference proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference, 2017, 2017, 3541–3544.
- [9] Andò B., Marletta V., *An all-inkjet printed bending actuator with embedded sensing feature and an electromagnetic driving mechanism*, Actuators, 5, 2016, 21.
- [10] Yuan K., *A 3d printing and moulding method of the fabrication of a miniature voice coil motor actuator*, rozprawa doktorska, University of British Columbia 2015.

Synteza termiczna tlenków metali do zastosowań w gazowych sensorach chemicznych

inż. Afrodyta Daskalakis

Mechatronika

dr hab. inż. Ryszard Korbutowicz

Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii

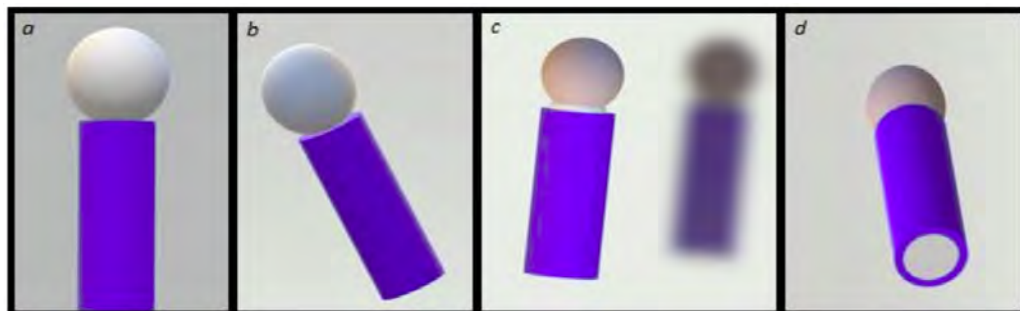
Szybka industrializacja obserwowana w ostatnich dwóch dziesięcioleciach, której konsekwencją jest znaczny wzrost zagrożenia środowiska, wywołała zaostrenie przepisów środowiskowych. Większe wymogi bezpieczeństwa wzmogły zapotrzebowanie na urządzenia przeznaczone do detekcji oraz analizy składu badanej atmosfery. Prowadzenie stałego monitoringu w pobliżu źródeł emisji niebezpiecznych gazów, sprawia iż zagrożenie związane ze skażeniem, wybuchem, czy też awaryjnością urządzeń, staje się zdecydowanie mniejsze. Narzędziami przeznaczonymi do monitorowania obszarów zagrożonych skażeniem są sensory, które powinny charakteryzować się maksymalną niezawodnością, dużą czułością, krótkim czasem odpowiedzi, mając przy tym niewielkie wymiary. Na świecie obserwowalny jest dynamiczny rozwój nurtu technologicznego, dążącego do miniaturyzacji wszelkiego rodzaju struktur elektronicznych, gdzie aktualnie na skalę globalną rozpatrywane są już nie tylko te w skali mikro, a również nano. Autorka, w ramach pracy dyplomowej zaprezentowała hodowlę nanodrutów, bazujących na cynie i galu, oraz ich połączeniu tzw. *core-shell*, które poddano badaniom. Nanodrutu SnO_2 przeniesiono nowatorską metodą o roboczej nazwie *lift-off* na elektrody pomiarowe sensorów chemicznych i wykonano ich pomiary.

Nanotechnologia stanowi niejako ogniwo spajające wszelkie dziedziny nauki i technologii. Materiały oraz struktury w takiej małej skali charakteryzują się wyjątkowymi właściwościami. Pierwszy raz myśl o świecie, w którym tworzenie z pojedynczych cząsteczek nie stanowiłoby trudności, pojawiła się już w 1959 roku [1]. Wtedy też, Richard Feynman amerykański fizyk oraz zdobywca nagrody Nobla, na corocznym spotkaniu Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego, w przemówieniu *There's Plenty of Room at the Bottom* stwierdził, że w bliskiej przyszłości świat się zmieni, a wytwórstwo maszyn, części, elementów elektronicznych i tym podobnych, w skali nano będzie całkowitym standardem w przemyśle. Feynman przedstawił teorię mówiącą o wytworzeniu samopowtarzalnych nanokonstruktorów [1], których zakres działania miał obejmować między innymi oczyszczanie planety, wykorzystując odpady w realizacji nowych konstrukcji, czy leczenie na zaawansowanym poziomie. W obecnej erze szybkiego rozwoju, ludzie dokonują już prostych działań w tej tematyce, badania są coraz szerzej prowadzone, a ich rezultaty obiecujące.

Pierwszy sensor został opracowany w latach dwudziestych ubiegłego wieku przez Jonsona i nazwany polistor (katalityczny detektor gazów palnych)[2]. Na przełomie lat nazwa uległa ewaluacji do ostatecznej formy sensora, czy też w języku polskim używanych zamiennie czujnika

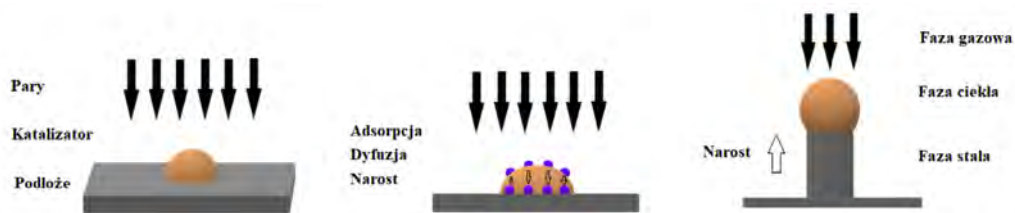
i detektora. Ze względu na eksplozję gazu w japońskich zakładach petrochemicznych w 1961 r. (jezioro Kawaguchi)[3] nastąpiły intensywne prace nad opracowaniem miernika gazów wybuchowych i palnych. Jako pierwszy materiał gazoczuły posłużył tlenek cynku. Na przestrzeni lat zastosowano polikrystaliczny dwutlenek cyny, który od prawie 40 lat jest najpowszechniej stosowany, a także został wykorzystany w omawianej pracy. Czułość chemicznych czujników gazu zwiększano dzięki zastosowaniu dodatkowo: irydu, palladu, platynorodu, czy też różnych kombinacji tlenków metali w tym tlenku galu, który również zastosowano w omawianej pracy[2]. Pomiar stężenia gazów są ważne zarówno w technologiach przemysłowych, jak i bezpośrednio w gospodarstwie domowym. Sensory, których zadaniem jest wykrywanie i pomiar stężenia gazów, powinny cechować się w szczególności dużą czułością, selektywnością, krótkim czasem odpowiedzi i stabilnością [2]. Bazę działania chemicznych sensorów gazowych stanowi zmiana konduktancji materiału tlenkowego wynikająca ze zmiany składu badanej atmosfery.

Omawianą pracę poświęcono gazowym sensorom chemicznym, o warstwie gazoczułej stanowiącej zsyntezowane termicznie nanodrutu na bazie dwutlenku cyny, trójtlenku galu oraz ich połączenie *core-shell*. Nanostruktury typu rdzeń/powłoka (*core-shell*) składają się z co najmniej dwóch różnych faz (rys. 20.1) [4]: Jedną z faz stanowi rdzeń, który jest otoczony zewnętrzną warstwą powłoki (druga faza). Charakterystyczną cechą takich struktur jest jednoczesne wykazywanie właściwości rdzenia, jak i powłoki (bądź powłok). Wpływa to na ich unikatowość i wielofunkcyjność. Atutem takiej realizacji nanodrutów jest możliwość zabezpieczenia rdzenia przed niekorzystnym wpływem otoczenia zewnętrznego, a także możliwość zmiany powierzchniowych właściwości rdzenia. Wspomniane zmiany w konsekwencji mogą wzmoczyć stabilność koloidów wytwarzanych przez układ, ładunek powierzchniowy, powinowactwo chemiczne, luminescencję czy cytotoxyczność nanomateriałów.



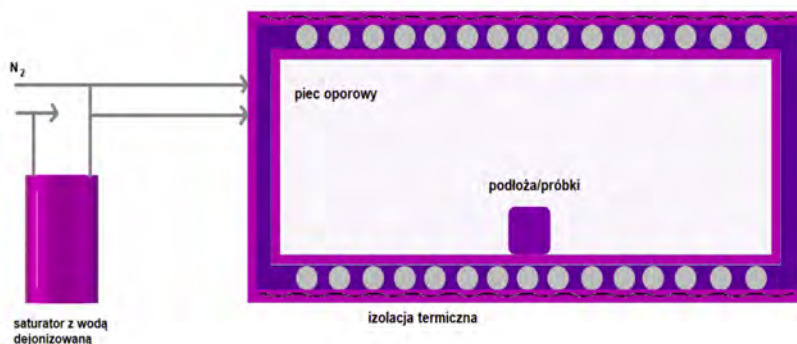
Rysunek 20.1. Przykładowe rodzaje heterostruktur w nanodrutach: (a, b) nanodrut wytworzony przy użyciu mechanizmu para–ciecz–ciało stałe z kroplą metaliczną na wierzchołku, (c, d) heterostruktura radialna typu rdzeń/otoczka (*core-shell*)

Nanostruktury wzrastały z zastosowaniem mechanizmu *VLS* (*Vapor Liquid Solid*). Mechanizm *VLS* para–ciecz–ciało stałe (rys. 20.2) – służy do wytwarzania struktur jednowymiarowych. Proces z wykorzystaniem mechanizmu *VLS* zachodzi trój etapowo. Katalizatorem wzrostu zastosowanym w pracy było nanozłoto koloidalne (wybrane po wcześniejszych badaniach w laboratorium) nanoszone pędzelkiem w postaci cienkiej warstwy. Charakterystyczną cechą tego mechanizmu jest zwyczajowa obecność kropli na końcach powstałego nanodrutu. Nie jest to jednak zjawisko, które występuje każdorazowo przy zastosowaniu tego mechanizmu.



Rysunek 20.2. Schemat narostu nanodrutów przy mechanizmie VLS

Nanodrutu omówione przez autorkę w pracy, syntetyzowano metodą sublimacji termicznej przy ciśnieniu atmosferycznym w trójstrefowym piecu oporowym (rys. 20.3). Reaktorem horyzontalnym była okrągła rura kwarcowa. Do reaktora doprowadzono azot z możliwością regulacji przepływu gazu. Czynnikiem utleniającym była woda dejonizowana, dozowana z gorącego saturatora, przez który przepływał azot.



Rysunek 20.3. Schemat pieca strefowego wykorzystanego w pracy

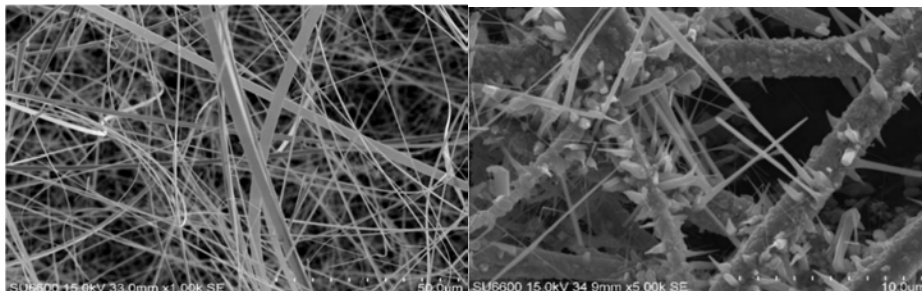
W strefie syntezy utrzymywano temperaturę $1012^{\circ}C$. Wytwarzano nanodrutu SnO_2 , Ga_2O_3 , i struktury typu *core-shell*: SnO_2/Ga_2O_3 oraz Ga_2O_3/SnO_2 . Parametrami stałymi były: metoda wykonania, mechanizm, ciśnienie otoczenia, nastawy pieca i przepływy azotu głównego oraz przepływającego przez saturator z wodą dejonizowaną. Zmienne w czasie badania to: czas syntezy próbek, typ struktury, źródło prekursora oraz sposób nanoszenia katalizatora. Dokładne dane dotyczące realizacji syntezy nanodrutów zawarto w tabeli 20.1.

Tabela 20.1. Zestawienie informacji dotyczących próbek nanodrutów wytworzonych metodą odparowywania termicznego, mechanizm VLS

Typ struktury	T004 NWS SnO ₂	T0005 NWS SnO ₂	T360 NWS core-shell Ga-Sn	T362 NWS core-shell Sn-Ga	T356 NWS core-shell Ga-Sn	T355 NWS core-shell Sn-Ga	T101 NWS core-shell Ga-Sn	T175 NWS core-shell Ga-Sn	T207 NWS core-shell Ga-Sn	T214 NWS core-shell Ga-Sn	T81 NWS core-shell Ga-Sn
Nastawy	917/1012/948°C										
Gaz no- śny	N ₂ - azot główny										
Katalizator	N ₂ sat - azot przez saturator z wodą dejonizowaną										
	200 ppm Au kolo- idalnego złota	200 ppm Au kolo- idalnego złota	200 ppm Au kolo- idalnego złota (podłoże)	200 ppm Au kolo- idalnego złota (podłoże)	2×200 ppm Au koloïd. (pod- łoże), 1×200 ppm Au kol. (NWS),	3×200 ppm Au koloïd. (pod- łoże), 1×200 ppm Au kol. (NWS),	Au kolo- idalne	Au pa- rowane grubość ok. 5nm	Au pa- rowane grubość ok. 5 mm	Au gru- bość ok. 5nm	2×100 ppm Au koloïd. (podło- że),
Podłoże	Ceramika	Ceramika	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm	Cienko utleniony krzem 40 nm
Metoda nano- szenia kataliza- tora	malowanie	malowanie	malowanie na pod- łożu	malowanie na pod- łożu	malowanie podłoża ×2, NWS zakrapia- ne ×1	malowanie podłoża ×2, NWS zakrapia- ne ×2	zauważane	parowane	parowane	parowane	malowanie
Czas syntezy	30 min	60 min	gal - 30 min, cy- na - 60 min	cy-na - 60 min, gal - 30 min	gal - 30 min, cy- na - 60 min	cy-na - 60 min, gal - 30 min	eutektyka - 60 min	cy-na+gal - 30 min	cy-na+gal - 40 min	cy-na+gal - 40 min	gal - 2×60 min, cy-na - 40 min

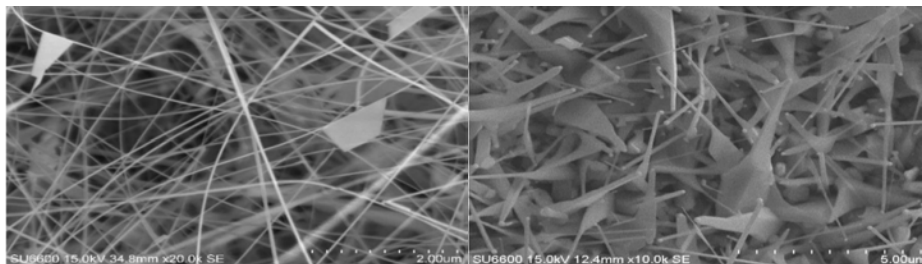
Po wykonanym procesie i ostudzeniu gotowych nanodrutów przeprowadzono ich obserwacje poczynając od oględzin wizualnych. Następnie obserwowano wytworzone struktury za pomocą:

- skaningowego mikroskopu elektronowego *SEM* (*Scanning Electron Microscope*) (rys. 20.4),



(a) nanodrutu SnO_2 (T004)

(b) nanodrutu $\text{SnO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ (T355)

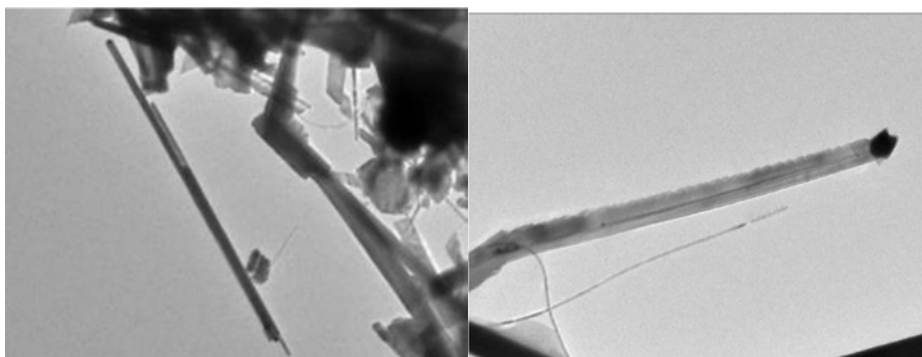


(c) nanodrutu $\text{SnO}_2/\text{Ga}_2\text{O}_3$ (T356)

(d) nanodrutu $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ (T175)

Rysunek 20.4. Przykładowe zdjęcia z *SEM*

- transmisyjnego mikroskopu elektronowego *TEM* (*Transmission Electron Microscopy*) (rys. 20.5),

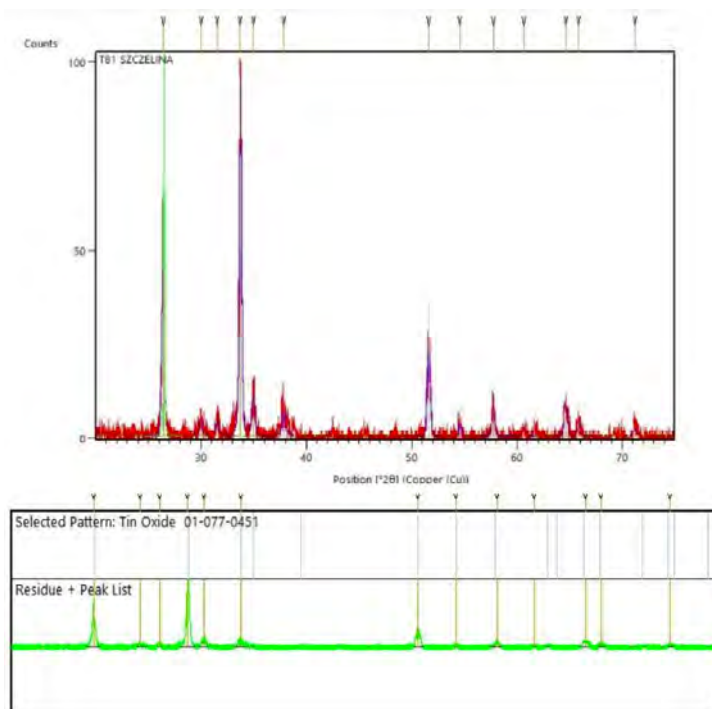


(a) obraz pojedynczego nanodrutu SnO_2

(b) obraz pojedynczego nanodrutu Ga_2O_3

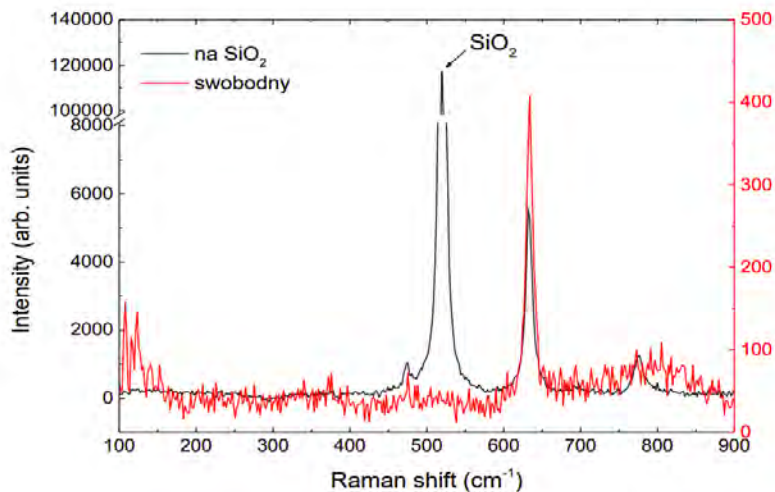
Rysunek 20.5. Przykładowe zdjęcia z *TEM*

- dyfrakcji rentgenowskiej (*X-Ray Diffraction*) (rys. 20.6),



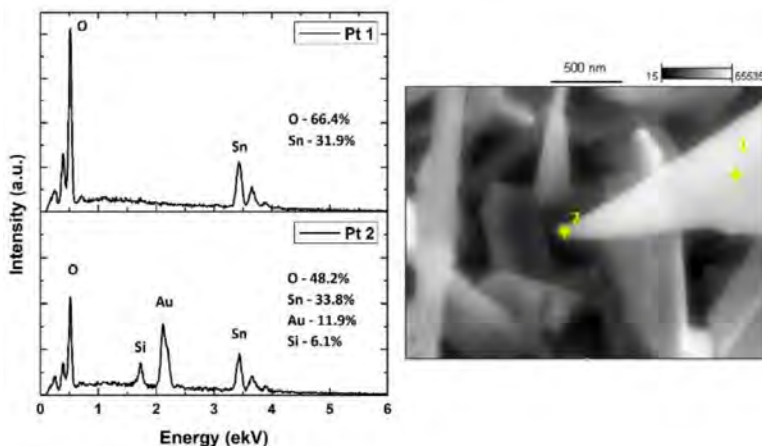
Rysunek 20.6. Dyfraktogram *XRD* nanodrutów z rdzeniem Ga_2O_3 i powłoką SnO_2

- powierzchniowo wzmocnionej spektroskopii *Ramana* (*Surface Enhanced Raman Spectroscopy*) (rys. 20.7),



Rysunek 20.7. Widmo spektroskopii *Ramana* próbka *T81*

- spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego *EDS* (*Energy Dispersive Spectroscopy*) (rys. 20.8).



Rysunek 20.8. Wynik analizy *EDS* *NWs* SnO_2 wykonanej w dwóch punktach pomiarowych oznaczonych na obrazie *SEM*

Wykonane próbki charakteryzowały się zróżnicowaną aglomeracją i barwą narostów, różnorodnymi formami (poza nanodrutami zaobserwowano także nanowstęgi, nanoflagi, czy nanogałęzie), długościami, kształtami i średnicami nanodrutów. Nanodrutu SnO_2 wykonane przez autorkę, zostały wykorzystane przez zespół profesor Heleny Teterycz z Katedry Mikrosystemów Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki w dwóch czujnikach, a pomiary z nich przedstawiono w pracy. Wyhodowane nanodrutu SnO_2 , przeniesiono na czujniki gazowe metodą *lift-off* (rys. 20.9). Proces polega na „przeklejeniu” nanodrutów na czujnik. W pierwszym etapie transferu nanoszony jest klej z dodatkiem *PVP*, na obszar pełniący funkcję warstwy gazoczułej, po czym *NWs* znajdujące się na podłożu, na którym były syntezowane dociskają się do tego obszaru i odsuwa podłoże, zapewniając przejście nanodrutów na warstwę gazoczułą. Gotową strukturę poddaje się procesowi wypalania w piecu muflowym.



Rysunek 20.9. Proces przenoszenia nanodrutów techniką *lift-off*

Czujniki rezystancyjne na które przeniesiono nanodrutu były alundowe i miały przybliżone wymiary 25,5 mm na 2,5 mm (rys. 20.10). Ścieżki oraz grzejnik platynowy nadrukowano na nie metodą sitodruku, gdzie na wierzchu znalazły się złote elektrody palczaste. Od spodniej strony wykonany został meander platynowy. Symetryczna konstrukcja jaką charakteryzuje się grzejnik pozwala uzyskać równomierny rozkład temperatury. Czujniki sprawdzono pod kątem wykrywania etanolu, izopropanolu i acetonu. Wykonane pomiary pozwoliły określić parametry obu sensorów tj. czułość, selektywność i czas powrotu do stanu pierwotnego po procesie wykrywania. Zrealizowane w pracy badania wykonano przy różnych stężeniach zadawanych gazów w zakresie



Rysunek 20.10. Obraz konstrukcji czujnika rezystancyjnego, bez warstwy gazoczułej, widok z góry i z

100 – 400 ppm. W tabeli 20.2. Przedstawiono dane dotyczące czułości czujników *T004* i *T0005* w zależności od wykrywanego gazu oraz jego stężenia, przy temperaturze 450°C .

Tabela 20.2. Czułości badanych sensorów przy zmiennym stężeniu wykrywanych gazów przy 450°C

Wykrywany gaz	Stężenie gazu (ppm)	Sensor T004	Sensor T0005
etanol	100	11,32	20,01
	200	14,62	40,45
	400	17,15	56,48
aceton	100	–	4,75
	400	4,28	–
izopropanol	100	–	289,95
	400	15,13	–

Omówione i wykonane w pracy wyniki badań i pomiarów wykazały szczególny wpływ temperatury, czasu syntezy, metody syntezy oraz ilości nanoszonego katalizatora na hodowane nanostruktury. Wymienione parametry warunkują rodzaj zsyntezowanych struktur, ich wielkość, budowę, a także rozmieszczenie. Rezultaty wykonanych badań świadczą o przyszłościowości zagadnienia, które dalej będzie rozwijane na wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, Politechniki Wrocławskiej.

Bibliografia

- [1] Feynman R., *There's plenty of room at the bottom*, Microelectromechanical Systems, Journal of, 1, 1992, 60 – 66.
- [2] Teterycz H., *Grubowarstwowe chemiczne czujniki gazów na bazie dwutlenku cyny*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2005.
- [3] Bajpai V.K., Kamle M., Shukla S., Mahato D., Chandra D.P., Seung Kyu H., Kumar P., Huh Y.S., Han Y.K., *Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security*, Journal of Food and Drug Analysis, 26, 2018.
- [4] Song L., Yang L., Wang Z., Liu D., Luo L., Zhu X., Xi Y., Yang Z., Han N., Wang F., Chen Y., *One-step electrospun $\text{SnO}_2/\text{MoS}_2$ heterostructured nanomaterials for highly selective gas sensor array integration*, Sensors and Actuators B: Chemical, 283, 2018.

Badanie właściwości wydruków 3D realizowanych w technologii *FDMk*

mgr inż. Paweł Chodasewicz

Elektronika i Telekomunikacja

dr hab. inż. Artur Wiatrowski

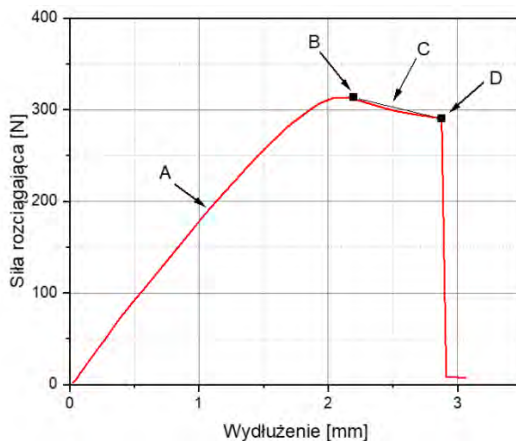
Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii

W ostatnich latach obserwuje się coraz większe zainteresowanie technikami przyrostowymi. Niskie ceny urządzeń oraz duża dostępność darmowego oprogramowania bez wątpienia wpływają na popularność druku 3D. Techniki addytywne pozwalają przełamać granice świata rzeczywistego i wirtualnego. Dla konstruktorów najbardziej istotną właściwością wydruku 3D jest jego wytrzymałość mechaniczna. Nie bez znaczenia jest także jakość modeli przestrzennych. Tego typu właściwości zależą przede wszystkim od rodzaju materiału oraz od urządzenia, za pomocą którego drukowany jest model. Jednak niezależnie od stopnia zaawansowania konstrukcyjnego drukarki 3D właściwości wydruków zależą także od parametrów procesu druku. Odpowiedni dobór parametrów pozwala uzyskać wydruki o bardzo dużej rozdzielczości i wytrzymałości mechanicznej, nawet przy użyciu taniej drukarki 3D. Parametry te są definiowane podczas przygotowywania modelu 3D do druku – jest to najistotniejszy etap wytwarzania wydruków przestrzennych. Celem pracy dyplomowej była analiza wpływu wybranych parametrów procesu druku 3D na właściwości mechaniczne wydruków oraz ich ocena wizualna. W ramach prac własnych przygotowano serię próbek, które zostały poddane testom wytrzymałościowym oraz ocenie wizualnej mającej na celu określenie jakości otrzymanych powierzchni. Ponadto, na podstawie analizy wartości wybranych parametrów przygotowano model uchwytu, który stanowi element systemu optycznej spektroskopii widma promieniowania wyładowania jarzeniowego. Podczas realizacji pracy dyplomowej przeprowadzono analizę dziesięciu wybranych parametrów procesu druku 3D. Badane parametry to m.in.: wysokość warstwy, liczba obrysów zewnętrznych, wzór oraz gęstość wypełnienia, prędkość posuwu, temperatura dyszy, współczynnik przepływu. Dla każdego parametru wybrano trzy różne wartości, a następnie dla każdej wartości wydrukowano po sześć próbek testowych, które zostały poddane statycznej próbie rozciągania. Ponadto, przygotowane zostały próbki, które zostały poddane ocenie wizualnej.

1. Statyczna próba rozciągania

Badanie wytrzymałości na rozciąganie to pomiar naprężenia odpowiadającego sile rozciągającej, która została zmierzona podczas statycznej próby rozciągania. Najważniejszym warunkiem prawidłowego pomiaru wytrzymałości na rozciąganie jest zapewnienie powtarzalności kolejnych

testów. Statyczne próby rozciągania przeprowadza się za pomocą zrywarek. W trakcie próby rejestrowana jest zależność siły rozciągającej w funkcji przyrostu długości próbki. Na rysunku 21.1 przedstawiono krzywą rozciągania charakterystyczną dla tworzyw sztucznych. Na wykresie można zaobserwować kilka charakterystycznych punktów. Początkowo w materiale powstają odkształcenia sprężyste (A). Im bardziej stromy jest przebieg krzywej w tym zakresie, tym mniejszy jest współczynnik sprężystości. Odkształcenia sprężyste występują aż do momentu osiągnięcia maksymalnej siły rozciągającej (B). Po przekroczeniu maksymalnej siły rozciągającej w materiale powstają odkształcenia plastyczne (C). Wystąpienie odkształceń plastycznych sprawia, że próbka staje się bardziej ciągliwa. W tym czasie w najslabszym punkcie próbki powstaje przewężenie. Odkształcenia plastyczne występują aż do momentu zerwania próbki (D).

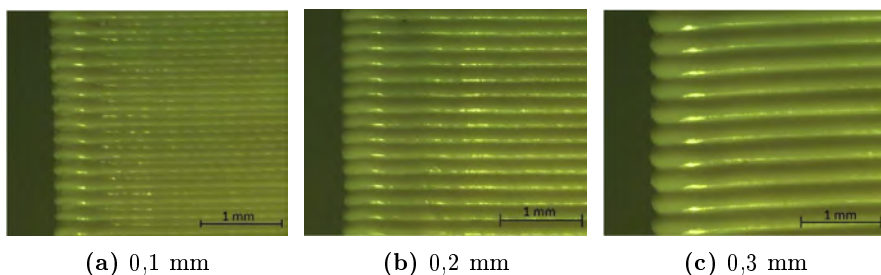


Rysunek 21.1. Krzywa rozciągania charakterystyczna dla tworzyw sztucznych

Podczas przygotowywania stanowiska pomiarowego niezbędne okazało się przeprowadzenie pewnych modyfikacji, m. in. dostosowano wymiary próbek tak, aby zwiększyć powierzchnię płaszczyzny mocującej próbkę w uchwycie zrywarki.

2. Wysokość warstwy

Wysokość warstwy to parametr, który można zdefiniować jako grubość pojedynczej płaszczyzny 2D, będącej jedną z części modelu trójwymiarowego. Parametr ten ma duży wpływ na czas wydruku modelu. Im mniejsza jest wysokość warstwy tym dłużej trwa proces druku modelu. Wysokość warstwy definiuje także rozdzielczość pionową wydruku. Większość programów typu *slicer* daje możliwość modyfikacji wysokości warstwy w obrębie każdego szczegółu modelu 3D. Oznacza to, że elementy modelu charakteryzujące się dużą szczegółowością można wydrukować przy stosunkowo małej wartości wysokości warstwy, natomiast elementy mniej szczegółowe można wydrukować przy większej wartości tego parametru. W ten sposób optymalizowany jest czas wydruku. Oprogramowanie, za pomocą którego modele 3D są przygotowywane do druku umożliwia także zmianę wysokości pierwszej warstwy. Dzięki temu możliwe jest kompensowanie nierówności wynikających np. z niedoskonałości stołu roboczego. Wysokość warstwy jest także ściśle powiązana ze średnicą dyszy zainstalowanej w głowicy drukującej. W praktyce wartość wysokości warstwy nie powinna przekraczać połowy wartości średnicy dyszy. Na rysunku 21.2 przedstawiono fotografie trzech modeli, które zostały wydrukowane dla trzech różnych wartości wysokości warstwy.



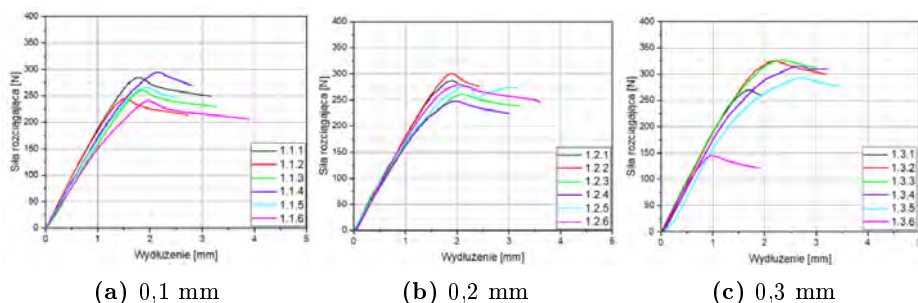
(a) 0,1 mm

(b) 0,2 mm

(c) 0,3 mm

Rysunek 21.2. Modele testowe wydrukowane dla trzech wartości wysokości warstwy

Model wydrukowany przy wysokości warstwy równej 0,1 mm charakteryzuje się dużą gładkością powierzchni w osi pionowej. Obserwując wydruk „gołym okiem” trudno zauważyć kolejne warstwy modelu. Im większa jest wartość wysokości warstwy tym bardziej chropowata jest pionowa powierzchnia próbki. Analizując zdjęcia przedstawione na rysunku 21.2 można zauważyć, że krawędzie wybranych modeli są bardziej gładkie, im mniejsza jest wartość wysokości warstwy. Na rysunku 21.3 przedstawiono krzywe rozciągania dla wydruków testowych o wysokości warstwy 0,1 mm, 0,2 mm oraz 0,3 mm. W tabeli 21.1 przedstawiono zbiorcze wyniki z wyliczoną wartością średnią maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} oraz wartością średnią maksymalnego wydłużenia W_{MAX} , dla której nastąpiło zerwanie próbki. W analizie statystycznej pominięta została próbka o oznaczeniu 1.3.6, ponieważ wartości zmierzone podczas statycznej próby rozciągania dla tej próbki istotnie odbiegają od wartości zmierzonych dla pozostałych próbek.



(a) 0,1 mm

(b) 0,2 mm

(c) 0,3 mm

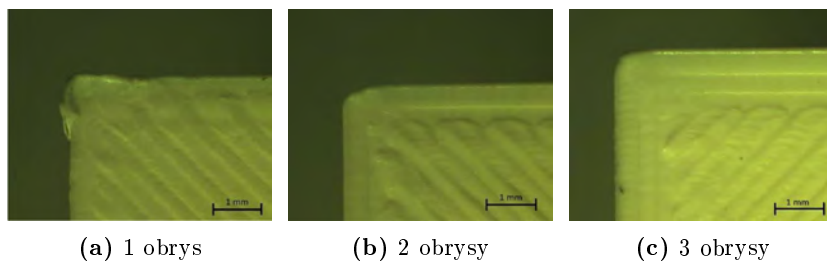
Rysunek 21.3. Krzywe rozciągania dla próbek o wysokości warstwy**Tabela 21.1.** Wartość średnia maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} oraz wartość średnia maksymalnego wydłużenia W_{MAX} , dla której nastąpiło zerwanie próbek dla modeli o wysokości warstwy [mm]: 0,1; 0,2; 0,3

Wysokość [mm]	F_{MAX} [N]	$S(F_{MAX})$ [N]	W_{MAX} [mm]	$S(W_{MAX})$ [mm]
	(śr. arytmetyczna)	(odch. st.)	(śr. arytmetyczna)	(odch. st.)
0,1	265,03	21,13	3,05	0,49
0,2	275,65	18,87	2,90	0,58
0,3	305,84	24,41	2,96	0,59

Wraz ze wzrostem wartości wysokości warstwy wzrasta wytrzymałość mechaniczna modelu 3D. Maksymalna siła rozciągająca dla próbek o wysokości warstwy 0,3 mm jest większa średnio o 40,84 N w porównaniu z próbkami o wysokości warstwy równej 0,1 mm. Wysokość warstwy to parametr, który nieznacznie wpływa na wartość wydłużenia, dla której nastąpiło zerwanie próbek.

3. Liczba obrysów

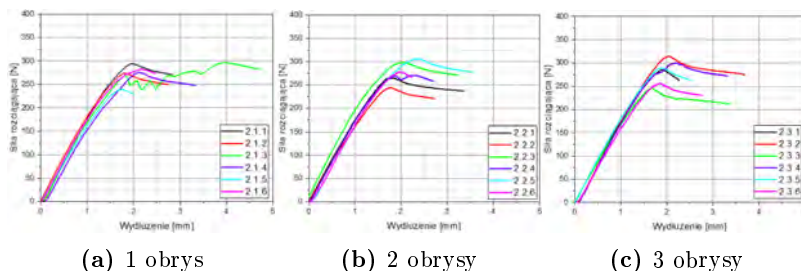
Liczba obrysów to parametr, który definiuje minimalną liczbę obrysów, które tworzą zewnętrzną ścianę modelu. Zwiększenie liczby obrysów wpływa na poprawę wytrzymałości wydruków oraz istotnie poprawia szczelność modeli 3D. Programy przeznaczone do przygotowywania struktur 3D do druku umożliwiają automatyczny wybór liczby obrysów dla poszczególnych warstw wydruku. Odpowiednia grubość ścian zewnętrznych poprawia także walory estetyczne modeli 3D. Z parametrem tym bardzo ściśle powiązany jest inny parametr – minimalna grubość obrysów zewnętrznych. W praktyce parametr ten określa grubość obrysów zewnętrznych i wyrażany jest w jednostkach metrycznych (najczęściej w mm). Minimalna zalecana liczba obrysów zewnętrznych wynosi 2. Wyjątkiem od tej reguły jest specjalny tryb wazy umożliwiający wydruk modeli bez wypełnienia wewnętrznego. W tym wypadku drukowany jest tylko jeden obrys. W trybie wazy obrys tworzony jest w sposób ciągły, dzięki płynnemu przechodzeniu głowicy drukującej wwyż, wzdłuż osi pionowej Z. Na rysunku 21.4 przedstawiono fotografie modeli, które zostały wydrukowane z różną liczbą obrysów zewnętrznych: jednym, dwoma oraz trzema obrysami zewnętrznymi.



Rysunek 21.4. Modele testowe wydrukowane z różną liczbą obrysów

W wypadku modelu, który został wydrukowany z tylko jednym obrysem zewnętrznym można zauważyć, że pionowe ściany tego modelu zostały zniekształcone. Trudno także zaobserwować przebieg samego obrysu, ponieważ pokrywa się on z wypełnieniem wewnętrznym. Modele, które zostały wydrukowane z dwoma lub trzema obrysami zewnętrznymi charakteryzują się dużą gładkością ścian pionowych. Ponadto, kształt tych modeli (2 i 3 obrysy) został znacznie lepiej odwzorowany. W modelu z jednym obrysem zewnętrznym ściany zewnętrzne zostały rozparte przez wypełnienie wewnętrzne.

Na rysunku 21.5 przedstawiono krzywe rozciągania dla modeli testowych, które zostały wydrukowane z jednym, dwoma, oraz trzema obrysami zewnętrznymi. W tabeli 21.2 przedstawiono zbiorcze wyniki z wyliczoną wartością średnią maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} oraz wartością średnią maksymalnego wydłużenia W_{MAX} , dla której nastąpiło zerwanie próbki. W analizie statystycznej pominięta została próbka o oznaczeniu 2.1.3, ponieważ wartości zmierzone podczas statycznej próby rozciągania dla tej próbki istotnie odbiegają od wartości zmierzonych dla pozostałych próbek. Wszystkie próbki zostały wydrukowane dla gęstości wypełnienia równej 15%.



Rysunek 21.5. Krzywe rozciągania dla próbek z różną liczbą obrysów

Tabela 21.2. Wartość średnia maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} oraz wartość średnia maksymalnego wydłużenia W_{MAX} , dla której nastąpiło zerwanie próbek dla modeli z jednym, dwoma i trzema obrysami zewnętrznymi

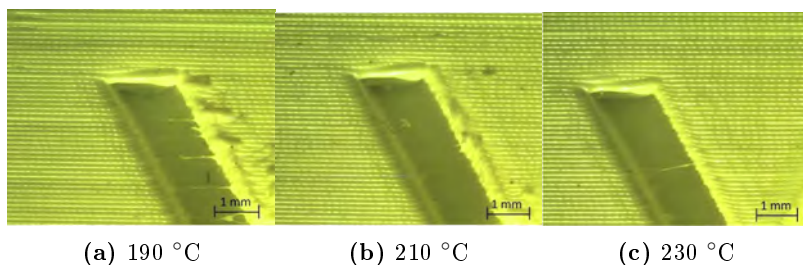
Liczba obrysów zewnętrznych	F_{MAX} [N] (śr. arytmetyczna)	$S(F_{MAX})$ [N] (odch. st.)	W_{MAX} [mm] (śr. arytmetyczna)	$S(W_{MAX})$ [mm] (odch. st.)
1	272,02	20,47	2,67	0,48
2	267,78	22,82	2,97	0,50
3	281,52	25,71	2,98	0,54

Wraz ze wzrostem liczby obrysów zewnętrznych wzrasta wytrzymałość mechaniczna próbek. Maksymalna siła rozciągająca F_{MAX} dla modeli z trzema obrysami zewnętrznymi jest większa średnio o 9,5 N w porównaniu z modelami z jednym obrysiem zewnętrznym. Ponadto, zwiększenie liczby obrysów zewnętrznych powoduje, że próbka staje się bardziej ciągliwa.

4. Temperatura dyszy

Temperatura dyszy zainstalowanej w głowicy drukującej to jeden z najistotniejszych parametrów procesu druku 3D. Zbyt niska temperatura dyszy może doprowadzić do zablokowania filamentu w głowicy drukującej. W skrajnym wypadku niska temperatura dyszy może spowodować uszkodzenie ekstrudera. Zbyt wysoka temperatura dyszy może doprowadzić do zwęglenia filamentu, w efekcie czego materiał straci swoje właściwości. Ważnym zagadnieniem związanym z drukiem 3D jest stabilizacja temperatury dyszy. Większość współczesnych drukarek 3D w technologii *FDM* umożliwia stabilizację temperatury za pomocą dedykowanych regulatorów *PID* (ang. *proportional-integral-derivative controller*). Temperatura dyszy jest ściśle powiązana z materiałem, z którego drukowany jest model 3D. Na rysunku 21.6 przedstawiono fotografie modeli, które zostały wydrukowane z różnymi wartościami temperatury dyszy: 190°C, 210°C oraz 230°C. Temperatura dyszy zalecana przez producenta filamentu (*Fiberlogy PLA*) powinna mieścić się w zakresie: 200 – 220°C.

W obrisie modelu, który został wydrukowany dla temperatury dyszy o wartości 190°C można zaobserwować charakterystyczne nitki. Ponadto na krawędziach modelu znajduje się nadmiarowa ilość materiału. Na modelu, który został wydrukowany dla temperatury dyszy o wartości 210°C również można zaobserwować nierównomiernie rozłożony materiał na krawędziach wydruku. Model, który został wydrukowany dla temperatury dyszy 230°C charakteryzuje się najlepszą



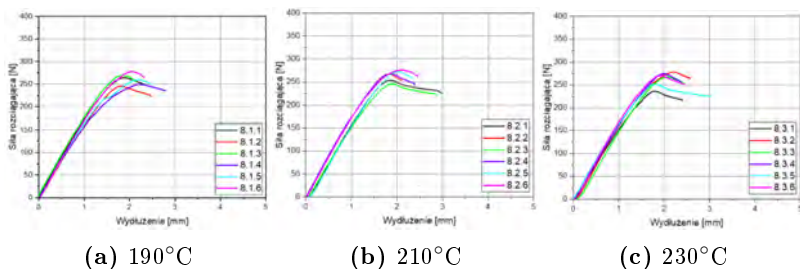
Rysunek 21.6. Modele wydrukowane z różnymi wartościami temperatury dyszy

jakością – materiał jest rozłożony równomiernie. Co ciekawe, najlepszą jakość wydruku uzyskano dla wartości temperatury dyszy powyżej zakresu zaleconego przez producenta filamentu. W świetle dziennym model, który został wydrukowany przy najniższej wartości temperatury ma matowe wykończenie, natomiast modele, które zostały wydrukowane przy wyższych wartościach temperatury dyszy charakteryzują się satynowym (połyskliwym) wykończeniem. Matowe wykończenie świadczy o słabym przetopieniu materiału, co może mieć wpływ na właściwości mechaniczne wydruku.

Na rysunku 21.7 przedstawiono krzywe rozciągania dla próbek testowych, które zostały wydrukowane dla różnych wartości temperatury dyszy: 190°C, 210°C oraz 230°C, natomiast w tabeli 21.3 przedstawiono zbiorcze wyniki z wyliczoną wartością średnią maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} oraz wartością średnią maksymalnego wydłużenia W_{MAX} , dla której nastąpiło zerwanie próbki. Wszystkie modele zostały wydrukowane z gęstością wypełnienia o wartości 20%.

Tabela 21.3. Wartość średnia maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} oraz wartość średnia maksymalnego wydłużenia W_{MAX} , dla której nastąpiło zerwanie próbek dla modeli wydrukowanych przy temperaturze dyszy [°C]: 190; 210; 230

Temperatura [°C]	F_{MAX} [N]	$S(F_{MAX})$ [N]	W_{MAX} [mm]	$S(W_{MAX})$ [mm]
	(śr. arytmetyczna)	(odch. st.)	(śr. arytmetyczna)	(odch. st.)
190	261,17	12,17	2,42	0,22
210	264,18	11,78	2,52	0,33
230	263,32	16,16	2,54	0,24

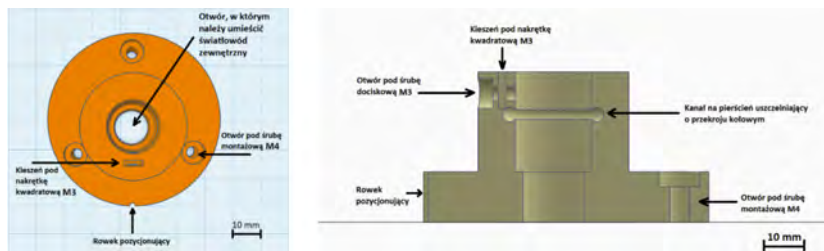


Rysunek 21.7. Krzywe rozciągania próbek wydrukowanych dla różnych wartości temperatury

Temperatura dyszy to parametr, który wpływa nieznacznie na właściwości mechaniczne wydruków 3D. Wraz ze wzrostem temperatury dyszy próbki stają się bardziej ciągliwe. Największa wartość maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} została uzyskana dla próbek, które wydrukowane zostały dla temperatury dyszy, która mieściła się w zakresie zalecanym przez producenta filamentu.

5. Projekt uchwytu do światłowodu

Optyczna spektroskopia widma emisyjnego *OES* (ang. *Optical Emission Spectroscopy*) to nieinwazyjna metoda badania plazmy wyładowania jarzeniowego. Technika ta jest powszechnie wykorzystywana do analizy procesu rozpylania. Widmo spektralne plazmy zawiera informację na temat składu chemicznego substancji, które biorą udział w procesie technologicznym. *OES* to metoda, która ułatwia dobór parametrów procesu rozpylania oraz umożliwia ocenę powierzchni i warstw otrzymywanych podczas procesu technologicznego. W ramach realizacji pracy dyplomowej przygotowano projekt uchwytu do światłowodu, który stanowi element systemu optycznej spektroskopii widma promieniowania wyładowania jarzeniowego. Na rysunku 21.8 przedstawiono widok uchwytu do światłowodu wraz z opisem poszczególnych elementów.



Rysunek 21.8. Model uchwytu do światłowodu (opis elementów)



Rysunek 21.9. Uchwyt do światłowodu połączony z uchwytem tulei do ustalania położenia światłowodu wewnętrznego

Po opracowaniu modelu uchwytu przystąpiono do jego wydruku. Model zaimportowano do programu *PrusaSlicer*, w którym zdefiniowano parametry procesu druku 3D. Wydrukowano pięć modeli, które różniły się gęstością oraz wzorem wypełnienia. Pozostałe parametry dobrano w taki sposób, aby uzyskać jak najlepsze odwzorowanie kształtu, przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej. Kolejnym etapem oceny modeli było badanie transmisji światła względem osi pionowej modelu. W tym celu modele oświetlono lampą halogenową. Trzy modele okazały się

transparentne dla światła emitowanego przez lampę halogenową. Oznacza to, że takie uchwyty nie mogą zostać wykorzystane jako część stanowiska do spektroskopii widma promieniowania jarzeniowego. Na rysunku 21.9 przedstawiono fotografię uchwytu, który został połączony z uchwytem tulei do ustalania położenia światłowodu wewnętrznego.

6. Podsumowanie

Dobór parametrów procesu druku 3D polega na poszukiwaniu kompromisu między wytrzymałością mechaniczną wydruku, jakością wydruku, zużyciem materiału oraz czasem wydruku. Parametry procesu można podzielić na trzy podstawowe kategorie:

- parametry, które mają istotny wpływ na jakość wydruków (np. prędkość wentylatora chłodzącego wydruk),
- parametry, które mają istotny wpływ na wytrzymałość mechaniczną modeli 3D (np. gęstość wypełnienia),
- parametry, które wpływają na jakość i wytrzymałość mechaniczną wydruków (np. wysokość warstwy).

Statyczna próba rozciągania to metoda, która umożliwia wyznaczenie wytrzymałości mechanicznej badanych próbek. Na podstawie zmierzonych wartości maksymalnej siły rozciągającej F_{MAX} , maksymalnego wydłużenia W_{MAX} , dla którego nastąpiło zerwanie próbek oraz na podstawie ich odchyłek standardowych należy stwierdzić, że statyczna próba rozciągania to technika, która nie jest wolna od wad. Bardzo istotnym problemem związanym z pomiarem krzywych rozciągania jest sposób montażu próbki w uchwycie pomiarowym. Niewłaściwy sposób montażu próbki może powodować wystąpienie w próbce pewnych naprężeń, już przed samym pomiarem. Ponadto, nawet niewielki ruch próbki w uchwycie może mieć istotny wpływ na wartość zmierzonego wydłużenia. Krzywe rozciągania, które zostały wyznaczone w trakcie realizacji pracy dyplomowej mogą zostać w przyszłości wykorzystane do szybkiego odnajdywania kompromisu między jakością wydruku i jego wytrzymałością mechaniczną.

Bibliografia

- [1] Ligon S., Liska R., Stampf J., Gurr M., Mülhaupt R., *Polymers for 3d printing and customized additive manufacturing*, Chemical Reviews, 117, 2017.
- [2] Horvath J., *A Brief History of 3D Printing*, Apress, Berkeley, CA 2014, 3–10.
- [3] Li Z., Rathore A., Song C., Wei S., Wang Y., Xu W., *Printracker: Fingerprinting 3d printers using commodity scanners*, [w:] *CCS '18: Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security 2018*, 1306–1323.
- [4] Mueller B., *Additive manufacturing technologies – rapid prototyping to direct digital manufacturing*, Assembly Automation, 32, 2012.
- [5] Barletta M., Vesco S., Puopolo M., Tagliaferri V., *High performance composite coatings on plastics: Uv-curable cycloaliphatic epoxy resins reinforced by graphene or graphene derivatives*, Surface and Coatings Technology, 272, 2015.
- [6] Ćwikła G., Grabowik C., Kalinowski K., Paprocka I., Ociepka P., *The influence of printing parameters on selected mechanical properties of fdm/fff 3d-printed parts*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 227, 2017, 012033.

Charakteryzacja metalicznych mikrogeneratorów termoelektrycznych z wykorzystaniem zmodyfikowanego systemu pomiarowego

mgr inż. Szymon Wójcik
Elektronika i Telekomunikacja

prof. dr hab. inż. Andrzej Dziedzic
Katedra Mikrosystemów

1. Wstęp

Obecny rynek elektroniki, coraz bardziej dąży do miniaturyzacji układów scalonych, a co za tym idzie do zmniejszenia zapotrzebowania na energię. Jest to proces, który pozwala na rozwój cywilizacyjny, gdyż coraz mniejsze i szybsze procesory/mikrokontrolery mogą pracować dłużej i wydajniej przy braku stałego, sieciowego zasilania. Pozwala to na opracowywanie coraz ciekawszych i bardziej skomplikowanych zastosowań, gdzie technologia pozwala na usprawnianie, każdej z gałęzi życia człowieka [1]. Aktualnie zaawansowane systemy elektroniczne znajdziemy wszędzie od fabryk przez medycynę, aż po zwykłego konsumenta, któremu elektronika może służyć do usprawnienia określonych operacji lub po prostu do rozrywki [2]. Patrząc na dzisiejsze społeczeństwo, każdy posiada smartfon (ang. *smartphone*), którego moc obliczeniowa jest olbrzymia, a który potrafi przez cały dzień pracować i wykonywać miliony operacji. Jest to mocno związane z miniaturyzacją i zapewnianiem coraz większej energooszczędności przez producentów komponentów.

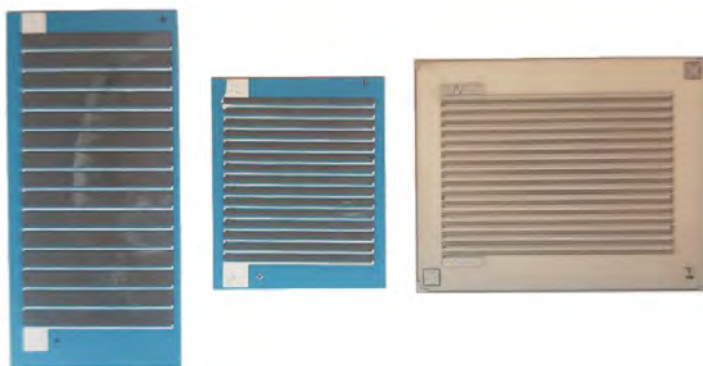
Wraz z rozwojem elektroniki niskonapięciowej, coraz bardziej zasadne okazują się systemy odzyskiwania energii z otoczenia, przez co potencjalnie mały układ może być samowystarczalny przez wiele lat. Aktualnie najpopularniejszym i najbardziej wydajnym źródłem energii do pozyskania jest energia słoneczna, której pozyskanie jest niezwykle proste i stosunkowo tanie. Pomimo wielu wad jak np. produkowany odpad, szkodliwy dla przyrody czy brak ciągłej ekspozycji na światło dzienne, jest to nadal najefektywniejsza metoda pozyskiwania energii z alternatywnych źródeł. Najefektywniejsza pod warunkiem, że mamy dostęp do światła dziennego, tutaj pojawia się problem, gdyż często tego dostępu niema i w tym momencie należy zastanowić się nad innymi dostępnymi sposobami konwersji energii otoczenia na energię elektryczną. Można wyróżnić kilka najważniejszych źródeł energii do konwersji [3]:

- przetwarzanie energii słonecznej na elektryczną,

- przetwarzanie energii mechanicznej na elektryczną,
- przetwarzanie energii magnetycznej na elektryczną,
- przetwarzanie energii termicznej na elektryczną.

Podczas realizacji pracy, skupiono się nad wykorzystaniem zjawiska Seebecka, które pozwala na pozyskanie energii elektrycznej z energii termicznej. Przy utworzeniu obwodu z dwóch metali i połączeniu w dwóch punktach, możliwe jest wygenerowanie siły termoelektrycznej, która jest zależna od gradientu temperatury pomiędzy złączami metali. Wynika to dokładnie z zachodzenia zjawiska Seebecka [4].

Na Wydziale Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki wykonuje się eksperymentalne mikrogeneratory termoelektryczne, czyli układy zawierające termostopy termopar. Przez zastosowanie wielu termopar zbudowanych z dwóch różnych metali, pozwalają one na wzmocnienie efektu termoelektrycznego i generację odpowiednio większej siły elektromotorycznej. Pozwala to na uzyskanie wystarczającej energii do zasilania bardzo małych układów czujnikowych.



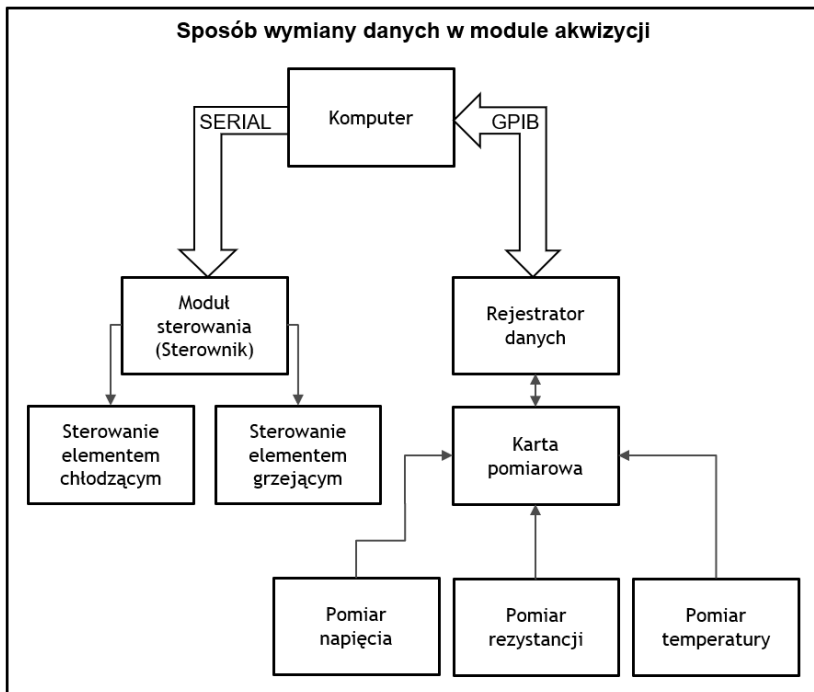
Rysunek 22.1. Mikrogeneratory termoelektryczne

W ramach pracy skupiono się nad systemem umożliwiającym charakteryzację mikrogeneratorów, przy zapewnieniu chłodzenia z jednej strony do -50°C i grzania z drugiej do 200°C . Pozwalało to na uzyskanie teoretycznego gradientu pomiędzy złączami ciepłymi i zimnymi do 250°C . System aby mógł prawidłowo scharakteryzować mikrogenerator, musiał być w stanie określić:

- temperaturę po zimnej stronie,
- temperaturę po ciepłej stronie,
- generowaną siłę termoelektryczną,
- rezystancję,
- współczynnik Seebecka dla pojedynczej termopary.

2. Realizacja układu pomiarowego

W celu umożliwienia realizacji wszystkich założonych zadań, określono drogę wymiany danych w układzie pomiarowym tak aby umożliwić odpowiednie działanie systemu. Sam projekt cechował się konstrukcją mechatroniczną i zawierał część mechaniczną, elektroniczną oraz programistyczną (zawierając elementy wykonawcze, pomiarowe oraz sterowania) [5].



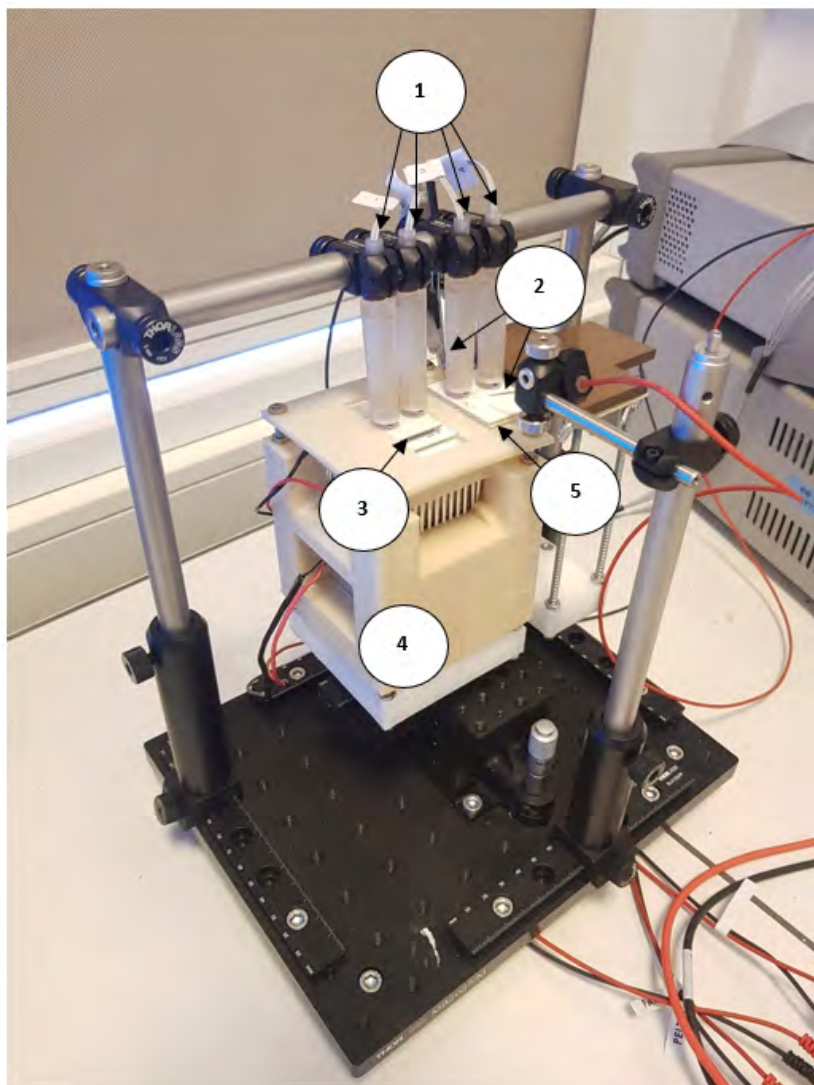
Rysunek 22.2. Schemat wymiany danych w stanowisku

Na podstawie schematu wymiany danych, określono niezbędne moduły do realizacji projektu. Zgodnie z rysunkiem 22.2, komputer uznano za jednostkę centralną, odpowiedzialną za całą logikę systemu. Komputer na podstawie ustawień użytkownika miał wysyłać specjalną ramkę danych do modułu sterowania, która miała zawierać nastawy dla ogniwa Peltiera oraz grzejnika grubowarstwowego (elementy zapewniające gradient pomiędzy metalicznymi złączami mikrogeneratora). Następnym zadaniem komputera po rozpoczęciu generowania gradientu, miało być wydawanie poleceń *SCPI* rejestratorowi danych za pomocą magistrali *GPIB*. Komendy wysyłane miały odpowiadać za precyzyjny pomiar siły termoelektrycznej oraz rezystancji struktury termoelektrycznej oraz temperatur, mierzonych w czterech punktach stanowiska. W związku z dużą ilością operacji jakie miało wykonywać stanowisko, podzielono projekt na 3 części:

- modernizacja części mechanicznej,
- sterownik do kontroli stanowiska,
- moduł akwizycji danych.

2.1. Modernizacja części mechanicznej

Projekt mechaniki został oparty na gotowych elementach konstrukcyjnych firmy *Thorlabs*, do których wykonano odpowiednie uchwyty dla czujników temperatury oraz sond pomiarowych metodą druku 3D. Po złożeniu układu, część mechaniczna zapewniała pewny docisk czujników Pt1000 oraz sond do struktury termoelektrycznej, możliwość regulacji miejsca wykonywanych pomiarów oraz odległości pomiędzy elementami generującymi gradient. Dodatkowo metodą druku 3D wykonano specjalną obudowę dla ogniwa Peltiera w celu dobrego odprowadzania ciepła z jego gorącej strony.



Rysunek 22.3. Zmodernizowana część mechaniczna stanowiska do badania mikrogeneratorów termoelektrycznych. 1 – Czujniki Pt1000 w obudowach; 2 – sondy pomiarowe; 3 – ogniwo Peltiera; 4 – Obudowa integrująca część chłodzącą; 5 – grzejnik grubowarstwowy

2.2. Sterownik do kontroli stanowiska

Sterownik został zaprojektowany jako dedykowany system wbudowany oparty o mikrokontroler Atmega32, zaprogramowany w języku C [6, 7]. Zrealizowano to w taki sposób aby za pośrednictwem portu szeregowego, sterownik mógł przyjmować odpowiednio przygotowaną ramkę danych (ramka wysyłana z komputera). Ramka zawierała takie informacje jak załączenie lub wyłączenie grzejnika/ ogniwa Peltiera; wartość początkowa podawanego napięcia na elementy; wartość końcowa podawanego napięcia na elementy; krok narostu napięcia podawanego na elementy; czas narostu, kiedy napięcie ma zwiększyć się o dany krok. Ramka miała przygotowaną sekcję dla ogniwa oraz grzejnika przez co oba układy były niezależne od siebie.

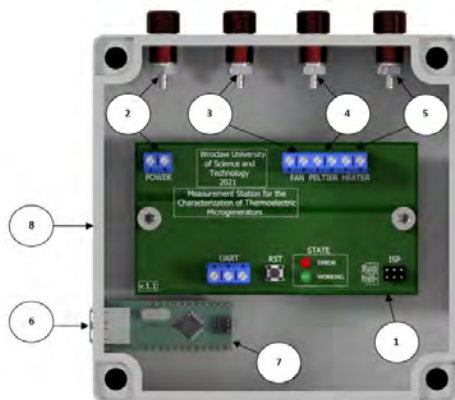


Rysunek 22.4. Projekt modułu sterowania



Rysunek 22.5. Wykonany moduł sterowania

Aby zapewnić poprawne sterowanie elementami wykonawczymi, zaprojektowano cały układ elektroniczny oparty o mikrokontroler Atmega32. Mikrokontroler po odebraniu ramki danych, parsował ją, a następnie odpowiednio kluczował tranzystory. Ze względu na stosunkowo duże prądy pobierane przez ogniwo oraz grzejnik, zapewniono odpowiedni stopień odizolowania elementów pod napięciem od potencjalnego operatora stanowiska.



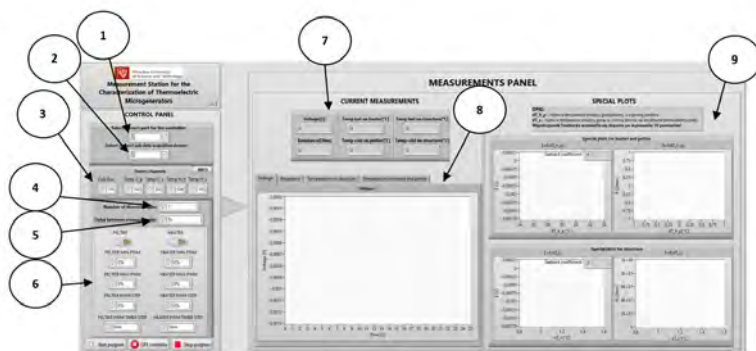
Rysunek 22.6. Projekt rozmieszczenia elementów wewnątrz obudowy. 1 – płytka PCB; 2 – złącza zasilające 12V; 3 – złącza dla wentylatora do chłodzenia ogniwa; 4 – złącza do ogniwa Peltiera; 5 – złącza grzejnika; 6 – złącze USB do komputera; 7 – konwerter ft232; 8 – konstrukcja bazowa obudowy

2.3. Moduł akwizycji danych

Moduł akwizycji danych obejmował głównie sposób wymiany danych pomiędzy komputerem, modulem sterowania i rejestratorem danych. Do obsługi komunikacji i wizualizacji danych, wykonano aplikację w *LabView*, która na podstawie wybranych parametrów przez użytkownika, układała ramkę danych dla modułu sterowania, a następnie wysyłała ją poprzez port szeregowy. W tym momencie rozpoczynał się pomiar i aplikacja wysyłała komendy *SCPI* do rejestratora danych *Keysight 34972A* (z kartą pomiarową *Keysight 34901A*), a następnie zbierała pomiary i tworzyła na żywo szereg istotnych wykresów z punktu widzenia charakteryzowania struktur termoelektrycznych. Wszystkie dane były również zapisywane w pliku tekstowym w celu umożliwienia późniejszego odtworzenia wykresów w programach typu *Excel* lub *Origin*.

Na rysunku 22.7 zaprezentowano przedni panel aplikacji na którym można wyróżnić: 1 – wybór portu szeregowego dla modułu sterowania; 2 – port do którego połączony jest rejestrator

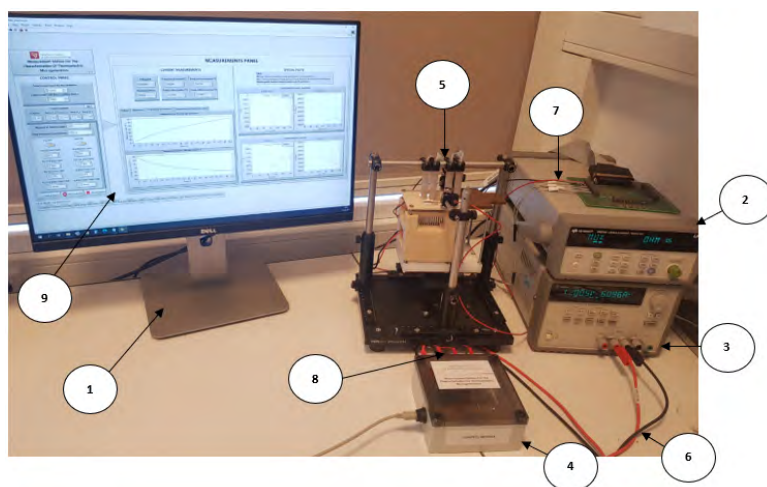
tor danych; 3 – kanały pomiarowe, do których podłączone są czujniki temperatury oraz sondy pomiarowe; 4 – liczba termopar znajdujących się na badanym mikrogeneratorsie (potrzebne do wyliczenia na żywo współczynnika Seebecka dla 1 termopary); 5 – przerwa między pomiarami; 6 – wszystkie parametry potrzebne do ułożenia ramki danych dla modułu sterowania (związane z pracą ogniwa Peltiera oraz grzejnika); 7 – aktualnie zmierzone wartości; 8 – wykresy wszystkich mierzonych parametrów w czasie; 9 – wykresy specjalne (siła termoelektryczna oraz rezystancja od gradientu temperatury).



Rysunek 22.7. Panel przedni aplikacji

3. Zrealizowane stanowisko

Zrealizowane stanowisko pozwalało w pełni charakteryzować mikrogeneratory termoelektryczne w szerokim zakresie.



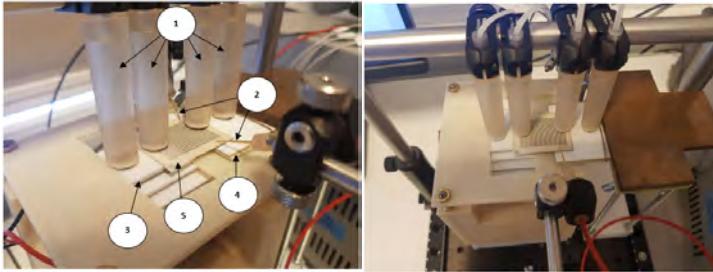
Rysunek 22.8. Stanowisko pomiarowe. 1 – komputer; 2 – rejestrator danych z kartą pomiarową; 3 – sterownik stanowiska pomiarowego; 5 – konstrukcja mechaniczna stanowiska; 6 – przewody zasilające moduł sterowania; 7 – przewody pomiarowe; 8 – przewody dla układów sterowanych (ogniwo, grzejnik, wentylator); 9 – program do sterowania stanowiskiem oraz akwizycji danych

4. Wyniki

W ramach drugiej części pracy, przeprowadzono pomiary dla wybranych mikrogeneratorów w celu zweryfikowania poprawnej charakteryzacji przez stanowisko. Do pomiarów wybrano trzy struktury. Podczas pomiarów struktury były zamontowane w sposób przedstawiony na rysunku poniżej.

Tabela 22.1. Wybrane mikrogeneratory termoelektryczne

Nazwa	Materiał termopary		Liczba termopar na strukturze	Wymiary [mm ²]	Rezystancja Ω
	Pierwszy	Drugi			
Struktura 1	Nikiel	Srebro	15	20 × 43	12,96
Struktura 2	Nikiel	Srebro	15	20 × 25	26,73
Struktura 3	Konstantan	Srebro	16	34 × 27	1470

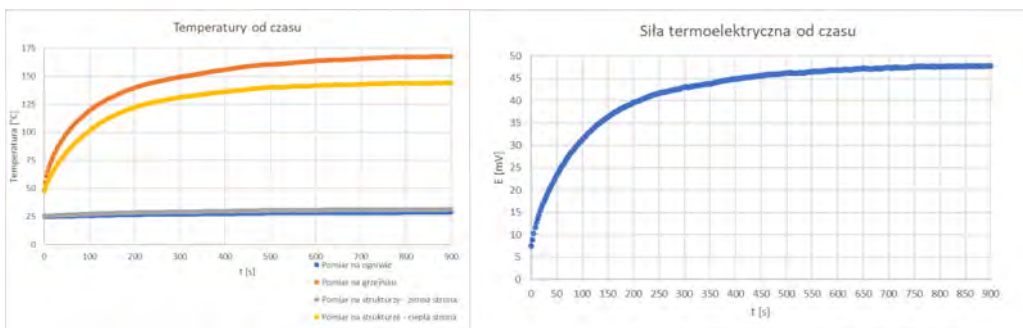


(a) widok z przodu

(b) widok z góry

Rysunek 22.9. Metoda pomiaru. 1 – czujniki temperatury; 2 – sondy pomiarowe, 3 – ogniwo Peltiera, 4 – grzejnik, 5 – struktura termoelektryczna

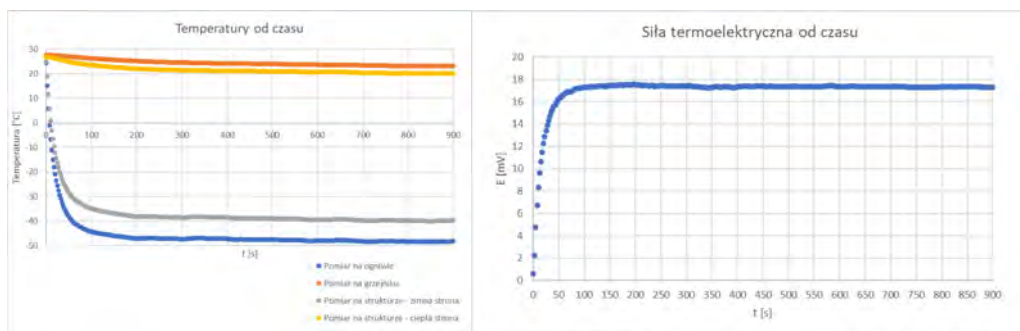
Dla każdej z struktur przygotowano serię testów w których pierwszy test polegał na grzaniu z jednej strony, drugi na chłodzeniu z jednej strony, natomiast ostatni na grzaniu oraz chłodzeniu przy stopniowym naroście napięcia podawanego na ogniwo oraz grzejnik. Poniżej zaprezentowano wyniki dla drugiej struktury.



(a) zależność temperatury od czasu

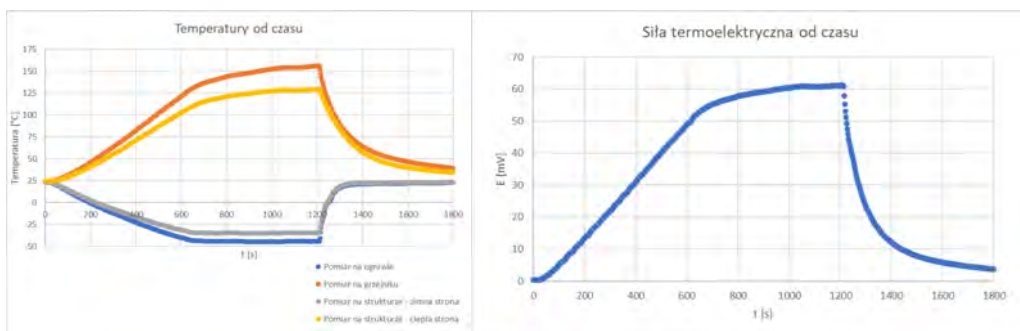
(b) zależność generowanej siły termoelektrycznej od czasu

Rysunek 22.10. Pomiar — grzanie jednej strony



(a) zależność temperatury od czasu

(b) zależność generowanej siły termoelektrycznej od czasu

Rysunek 22.11. Pomiar — chłodzenie jednej strony

(a) zależność temperatury od czasu

(b) zależność generowanej siły termoelektrycznej od czasu

Rysunek 22.12. Pomiar — grzanie i chłodzenie

5. Wnioski

Prezentowe stanowisko pozwala na charakteryzację mikrogeneratorów termoelektrycznych w szerokim zakresie, co zostało potwierdzone przeprowadzonymi pomiarami. Podczas pomiarów ustalono, że rzeczywista temperatura grzejnika osiąga maksymalnie do 175°C , natomiast ogniwa około -50°C zgodnie z oczekiwaniami.

Cały układ został zaprojektowany z dużym zapasem obciążeniowym, przez co przyszłe modyfikacje będą stosunkowo proste i nie ma przeciwwskazań do zastosowania wydajniejszego ogniwa Peltiera lub grzejnika. Moduł sterowania został zaprojektowany do pracy przy maksymalnym obciążeniu do 16 A, natomiast aktualna konfiguracja pobiera w granicy 6,5 A.

Wykonane stanowisko pozwala w szybki sposób na sprawdzenia wykonanego mikrogeneratora i określenie jego parametrów. Aktualnie cały proces ogranicza się do włączenia stanowiska, umieszczenia mikrogeneratora, wybrania na komputerze odpowiednich parametrów i rozpoczęcia pomiarów. System jest stosunkowo prosty i intuicyjny co zapewnia duże możliwości badawcze, zwłaszcza przy dokładaniu coraz to wydajniejszych układów generujących gradient termoelektryczny.

Bibliografia

- [1] Masuhara T., *The Future of Low-Power Electronics* 2016, 21–50.
- [2] Kumar S., Tiwari P., Zymbler M., *Internet of things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review*, *Journal of Big Data*, 6, 2019.
- [3] Bogue R., *Energy harvesting: A review of recent developments*, *Sensor Review*, 35, 2015, 1–5.
- [4] Rowe D., *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC-Press 1995.
- [5] Falkowski K., *Wprowadzenie do mechatroniki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2010.
- [6] Skalski Ł., *Linux: podstawy i aplikacje dla systemów embedded*, Wydawnictwo BTC 2012.
- [7] Francuz T., Helion W., *Język C dla mikrokontrolerów AVR: od podstaw do zaawansowanych aplikacji*, Helion 2015.

Wpływ wygrzewania na właściwości optyczne, elektryczne i sensorowe cienkich warstw tlenku wanadu wytworzonych metodą rozpylania magnetronowego

mgr inż. Szymon Kielczawa

Mechatronika

dr. hab. inż. Michał Mazur

Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii

Praca poświęcona jest cienkim warstwom na bazie tlenku wanadu (V_xO_y), które mogą znaleźć zastosowanie w transparentnej elektronice. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu wygrzewania na właściwości cienkich warstw V_xO_y wytworzonych metodą impulsowego rozpylania magnetronowego. Cienkie warstwy zostały naniesione z metalicznego targetu wanadu przy stosunku gazu roboczego (argonu) oraz reaktywnego (tlenu) równym 2:1. Bezpośrednio po naniesieniu, oraz po wygrzewaniu w 150 °C, 200 °C i 300 °C zostały one poddane badaniom strukturalnym, optycznym, elektrycznym i sensorowym. Wygrzewanie spowodowało przejście z fazy amorficznej do nanokrystalicznej. Współczynnik transmisji cienkich warstw po wygrzewaniu zmniejszył się z około 70% na 50%. Z kolei rezystancja cienkiej warstwy tlenku wanadu po naniesieniu wynosiła 85,2 MΩ, natomiast powłok po wygrzewaniu: 918 kΩ w 150 °C, 390 kΩ w 200 °C oraz 1,78 MΩ w 300 °C. Badania współczynnika Seebecka wykazały, że wraz ze wzrostem różnicy temperatury między kontaktami elektrycznymi następuje zmiana typu przewodnictwa z dziurowego na elektronowy, a wygrzewanie warstwy spowodowało uwydatnienie elektronowego typu przewodnictwa.

1. Wprowadzenie

Tlenki wanadu V_xO_y charakteryzują się tym, że ich właściwości ulegają znacznej zmianie w wysokiej temperaturze. Zmiany te spowodowane są przejściem z fazy amorficznej do fazy nanokrystalicznej V_2O_5 . Przejście fazowe skutkuje znaczącymi zmianami we właściwościach elektrycznych, optycznych i sensorowych tych materiałów [1]. Dynamiczny rozwój tlenków wanadu podyktowany jest możliwością wykorzystania ich jako przełączniki optyczne, powłoki dla ogniw słonecznych, sensorów gazów czy wilgotności [2]. Szczególnym zainteresowaniem cieszą się pięć-tlenki wanadu jako czujniki gazu, co jest związane z częściową redukcją $V5+$ do $V4+$, co skutkuje powstawaniem wakansów tlenowych, a co za tym idzie zwiększeniem przewodności warstwy [3].

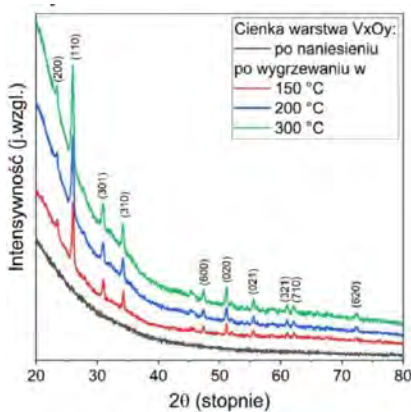
Do wytwarzania V_xO_y można zastosować różnego rodzaju techniki, takich jak napyłanie termiczne [4], ablacja laserowa [5, 6], rozpylanie [6, 7], metody zol-żel [8]. Najczęściej wykorzystywaną techniką w produkcji seryjnej jest rozpylanie magnetronowe. Właściwości strukturalne

można modyfikować stosując termiczną obróbkę poprocesową [7]. Warstwy V_xO_y charakteryzują się przewodnictwem typu n , mając przerwę wzbronioną (E_g) równą około 2,3 eV [9]. Niniejsza praca przedstawia wpływ wygrzewania warstwy tlenku wanadu (V_xO_y) w 150°C, 200°C oraz 300°C.

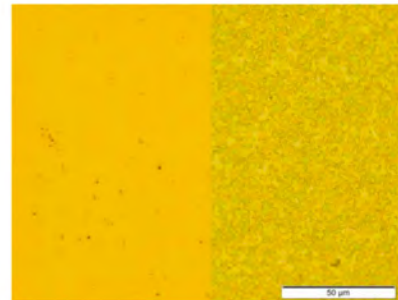
2. Część eksperymentalna

Warstwy na bazie tlenku wanadu zostały naniesione metodą impulsowego rozpylania magnetronowego na podłoża z krzemionki amorficznej, które były wykorzystywane do pomiarów właściwości strukturalnych i optycznych, oraz na podłoża alundowe zawierające elektrody, które były przystosowane do pomiarów właściwości sensorowych i elektrycznych. Cienkie warstwy były nanoszone na podłoże przez 45 minut, przy ciśnieniu w komorze roboczej wynoszącej $5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Atmosfera w komorze roboczej była mieszaniną Ar:O₂, a odległość target-podłoże wynosiła 100 nm. W pracy prowadzono badania wpływu wygrzewania poprocesowego na właściwości wykonanych powłok V_xO_y . Powłoki te były wygrzewane w atmosferze powietrza w temperaturze 150°C, 200°C oraz 300°C w piecu rurowym. Profil wygrzewania był liniowy o nachyleniu 200°C/h, po uzyskaniu zadanej temperatury próbka była w niej utrzymywana przez 4 h, następnie piec chłodził się konwekcyjnie do temperatury pokojowej. Grubość uzyskanych warstw została zmierzona przy użyciu profilometru optycznego i wyniosła 400 nm. Właściwości strukturalne zostały określone na podstawie wyników *XRD*. Właściwości optyczne zostały zbadane używając metody spektrofotometrii, a właściwości elektryczne zostały zbadane na stanowisku składającym się z charakterografu oraz kontrolera temperatury.

3. Wyniki



Rysunek 23.1. Wyniki badań dyfrakcji rentgenowskiej (*XRD*)

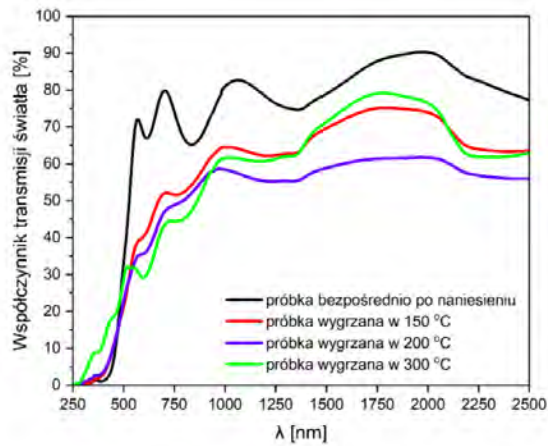


Rysunek 23.2. Obraz powierzchni z mikroskopu optycznego przed oraz po procesie wygrzewania

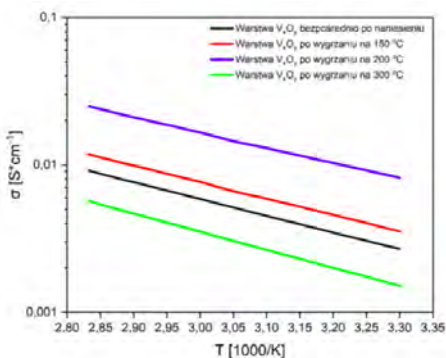
Dzięki przeprowadzeniu badań za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej (*XRD*) pokazanych na rysunku 23.1 zauważono, że wygrzanie warstw już w temperaturze 150°C spowodowało przejście fazowe struktury z fazy amorficznej do nanokrystalicznej V_2O_5 o wielkości krystalitów około 25,2 nm. Dalszy wzrost temperatury wygrzewania spowodował proporcjonalne zwiększanie się

rozmiarów krystalitów (27,5 nm dla temperatury 200°C, oraz 31,3 nm dla temperatury wygrzewania równej 300°C). Wspomniane przejście fazowe można było również zobaczyć na obrazach topografii warstwy (przy użyciu mikroskopu optycznego), bowiem na powierzchni widoczne były aglomeraty krystalitów (rys. 23.2). Podejrzewa się, że dalszy wzrost temperatury wygrzewania miał niewielki wpływ na wielkość krystalitów ze względu na przejście struktury amorficznej w rombową strukturę tlenku V_2O_5 , a więc maksymalny, możliwy stopień utlenienia warstwy.

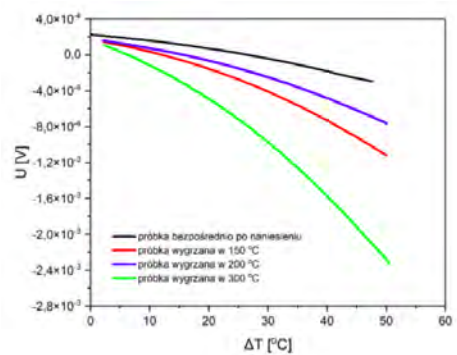
Prowadząc analizę spektralną współczynnika transmisji światła zaobserwowano spadek współczynnika transmisji światła z około 70% do około 40% dla zakresu światła widzialnego poddaniu warstwy obróbce termicznej. Dodatkowo zaobserwowano nieznaczne przesunięcie się długości fali odcięcia w stronę fal krótszych (rys. 23.3). Zjawisko to jest podyktowane rozpraszaniem światła na powstałych w strukturze, w wyniku wygrzewania poprocesowego, aglomeratach krystalitów.



Rysunek 23.3. Charakterystyki współczynnika transmisji światła cienkich warstw tlenku wanadu



Rysunek 23.4. Charakterystyki Arrheniusa cienkich warstw tlenku wanadu

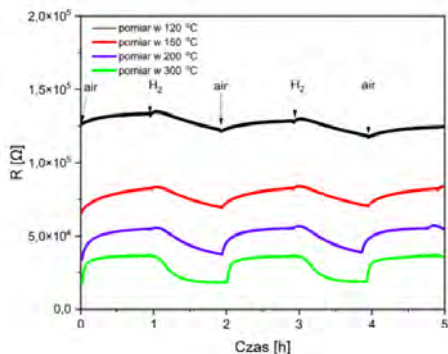


Rysunek 23.5. Charakterystyki napięcia termoelektrycznego cienkich warstw tlenku wanadu

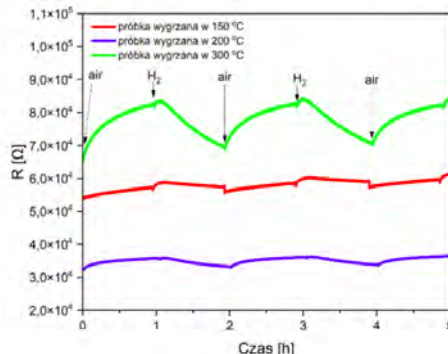
Badania właściwości elektrycznych pokazały, że proces wygrzewania wpłynął na zmniejszenie się rezystancji warstwy kilkukrotnie, natomiast dalsza obróbka termiczna w 300°C spowodowała

spadek przewodności warstwy o rząd wielkości. Charakterystyki przewodności w funkcji temperatury pomiarowej wykazały, że warstwy te miały charakter półprzewodnikowy (rys. 23.4). Pomiar napięcia termoelektrycznego pokazały, że wzrost temperatury wygrzewania spowodował uwydatnienie się elektronowego typu przewodnictwa (rys. 23.5).

Właściwości sensorowe warstwy zostały określone na podstawie odpowiedzi rezystancyjnej warstwy. Zauważono, że wzrost temperatury pomiarowej powodował zwiększenie się odpowiedzi rezystancyjnej warstwy (rys. 23.6). Zaobserwowano również znaczącą poprawę właściwości sensorowych wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania poprocesowego próbek (rys. 23.7). Badania te potwierdziły również elektronowy typ przewodnictwa warstwy, bowiem próbki charakteryzował spadek rezystancji w odpowiedzi na atmosferę rozrzedzonego wodoru, natomiast podczas odtruwania próbki w powietrzu powrót rezystancji do wartości początkowej.



Rysunek 23.6. Charakterystyki odpowiedzi rezystancyjnej na atmosferę rozrzedzonego wodoru dla próbki wygrzewanej w 300°C



Rysunek 23.7. Charakterystyki odpowiedzi rezystancyjnej na atmosferę rozrzedzonego wodoru w temperaturze pomiarowej 150°C

4. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu wygrzewania na właściwości strukturalne, optyczne, elektryczne i sensorowe cienkich warstw tlenku wanadu, które zostały wytworzone metodą rozpylania magnetronego. Próbki charakteryzowały się strukturą amorficzną, natomiast proces wygrzewania spowodował przejście fazowe w rombowa strukturę tlenku V_2O_5 . Po obróbce termicznej nastąpił spadek współczynnik transmisji światła o około 20%, co jest skutkiem powstania aglomeratów ziaren o mikrometrowej wielkości na powierzchni warstwy. Pomiar współczynnika Seebecka wykazały, że wraz ze wzrostem różnicy temperatur między elektrodami uwidacznia się typ n przewodnictwa. Wygrzewanie poprocesowe wpłynęło na zwiększenie odpowiedzi rezystancyjnej warstwy na zadany gaz.

Bibliografia

- [1] Wu X., Lai F., Lin L., Li Y., Lin L., Qu Y., Huang Z., *Influence of thermal cycling on structural, optical and electrical properties of vanadium oxide thin films*, Applied Surface Science - APPL SURF SCI, 255, 2008, 2840–2844.
- [2] Fang G., Liu Z., Wang Y., Liu Y., Yao K., *Synthesis and structural, electrochromic characterization of pulsed laser deposited vanadium oxide thin films*, Journal of Vacuum Science and Technology A, 19, 2001.

- [3] Nunes D., Pimentel A., Gonçalves A., Pereira S., Branquinho R., Barquinha P., Fortunato E., Martins R., *Metal oxide nanostructures for sensor applications*, Semiconductor Science and Technology, 34, 4, 2019, 043001.
- [4] Santos R., Loureiro J., Nogueira A., Elamurugu E., Pinto J., Veiga J., Busani T., Fortunato E., Martins R., Ferreira I., *Thermoelectric properties of v2o5 thin films deposited by thermal evaporation*, Applied Surface Science, 282, 2013, 590–594.
- [5] Ramana C., Smith R., Hussain O., Julien C., *Growth and surface characterization of v2o5 thin films made by pulsed-laser deposition*, Journal of Vacuum Science and Technology A, 22, 2004, 2453–2458.
- [6] Castro M., Ferreira C., de Avillez R., *Vanadium oxide thin films produced by magnetron sputtering from a v2o5 target at room temperature*, Infrared Physics and Technology, 60, 2013, 103–107.
- [7] Meng L., Silva R., Cui H.N., Teixeira V., Dos Santos M., Xu Z., *Optical and structural properties of vanadium pentoxide films prepared by d.c. reactive magnetron sputtering*, Thin Solid Films, 515, 2006, 195–200.
- [8] Mandouh Z., Selim M., *Physical properties of vanadium pentoxide sol-gel films*, Thin Solid Films, 371, 2000, 259–263.
- [9] Perez A., Acosta D., Castañeda-Guzmán R., Cruz Manjarrez H., Rodríguez-Fernandez L., Pineda J., Aguilar M., *Evidence of the semiconductor-metal transition in v2o5 thin films by the pulsed laser photoacoustic method*, Journal of Applied Physics, 113, 2013.



Oficyna Wydawnicza
Politechniki Wrocławskiej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
ISBN: 978-83-7493-190-8

