

Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Wrocławski im. prof. Kazimierza Idaszewskiego

Stowarzyszenie Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej

**Trendy i rozwiązania technologiczne
w elektrotechnice**



edycja 2020

Stowarzyszenie Elektryków Polskich
w Politechnice Wrocławskiej 2020.
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 hab. inż. Artur Wiatrowski
- 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

Skład i łamanie

Remigiusz Mydlikowski

Projekt okładki

Dominika Osadców-Będkowska

Wydrukowano na podstawie dostarczonych materiałów przez autorów.

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

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2020

© Copyright by Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Wrocławski, Wrocław 2020

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-155-7

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

Spis treści

I Wydział Elektroniki	7
1. Sterowanie komfortem cieplnym w budynku jednorodzinny z zastosowaniem pompy ciepła	
<i>inż. Aleksandra Rzeszowska, opiekun: dr inż. Andrzej Jabłoński</i>	9
2. Automatyczne skanowanie pomieszczenia z wykorzystaniem robota z dalmierzem ultradźwiękowym	
<i>mgr inż. Patryk Dąbrowa, opiekun: dr inż. Piotr Pruchnicki</i>	19
3. Budowa robota mobilnego klasy NANOSUMO	
<i>inż. Michał Piotrowicz, opiekun: dr inż. Robert Muszyński</i>	27
II Wydział Elektryczny	33
4. Modernizacja wirnika silnika synchronicznego wysokoobrotowego do napędu skrzętkarki drutu wolframowego	
<i>inż. Jakub Pawlak, opiekun: dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski</i>	35
5. Sterowanie dystrybutorem do napojów za pomocą wybranego mikrokontrolera	
<i>inż. Piotr Szalega, opiekun: dr inż. Piotr Derugo</i>	41
6. Ocena efektywności energetycznej instalacji fotowoltaicznej dla gospodarstwa agroturystycznego	
<i>inż. Anna Ostrowska, opiekun: dr inż. Kazimierz Herlender</i>	45
7. Modułacja szerokości impulsów trójpoziomowego falownika napięcia	
<i>mgr inż. Damian Radek, opiekun: dr inż. Grzegorz Tarchala</i>	49
8. Opracowanie układu automatycznego przykręcania śrub z wykorzystaniem sterownika PLC i serwonapędów ACOPOS	
<i>mgr inż. Tomasz Gielzak, opiekun: dr inż. Piotr Serkies</i>	55
9. Mikroprocesorowy zasilacz laboratoryjny prądu przemiennego	
<i>mgr inż. Piotr Kurowski, opiekun: dr inż. Marcin Pawlak</i>	59

III Wydział Podstawowych Problemów Techniki	65
10. Projekt mioelektrycznej protezy dłoni	
<i>inż. Katarzyna Sokół, opiekun: dr inż. Andrzej Grobelny</i>	67
11. Projekt urządzenia do ciągłego pomiaru parametrów fizjologicznych kierowcy	
<i>inż. Dominik Dziulka, opiekun: dr inż. Andrzej Grobelny</i>	73
12. Projekt symulatora mikrogravitacji do badań bioinżynieryjnych	
<i>inż. Amanda Solaniuk, opiekun: dr hab. Krystian Kubica</i>	81
IV Wydział Elektroniki, Mikrosystemów i Fotoniki	89
13. Układ zasilania dla miniaturowego kwadrupolowego separatora jonów	
<i>inż. Bartosz Pośpiech, opiekun: dr hab. inż. Tomasz Grzebyk</i>	91
14. Zminiaturyzowane laboratorium do hodowli grzybów w stanie nieważkości	
<i>inż. Tymon Janisz, opiekun: dr hab. inż. Tomasz Grzebyk</i>	97
15. Projekt i wykonanie stanowiska pomiarowego do charakteryzacji materiałów, struktur i mikrogeneratorów termoelektrycznych	
<i>inż. Szymon Wójcik, opiekun: prof. dr hab. inż. Andrzej Dziedzic</i>	103
16. Badanie właściwości elektrycznych cienkich warstw na bazie tlenków półprzewodnikowych	
<i>mgr inż. Patrycja Pokora, opiekun: dr hab. inż. Damian Wojcieszak</i>	109
17. Opracowanie technologii i badanie właściwości trójwymiarowych elektrod na potrzeby celi elektrochemicznej wykonanej w oparciu o druk 3D	
<i>mgr inż. Piotr Śliwiński, opiekun: dr inż. Karolina Laszczyk</i>	115
18. Wytwarzanie i właściwości kompozytu na bazie żywicy epoksydowej i nanocząstek na potrzeby druku 3D	
<i>mgr inż. Aleksandra Chudzyńska, opiekun: dr inż. Damian Nowak</i>	121

Przedmowa

Oddajemy w Państwa ręce podsumowanie naukowej obecności Stowarzyszenia Elektryków Polskich na Politechnice Wrocławskiej w 2020 roku. Stowarzyszenie od lat organizuje konkursy dla absolwentów Politechniki na najlepsze prace inżynieryjno-badawcze. Konkursy ogłaszane są na czterech wydziałach uczelni i łączy je wspólna dyscyplina naukowa związana z automatyką, elektrotechniką i elektroniką.

Naukowe Komitety Konkursowe powoływane na każdym z Wydziałów oceniają zgłoszone prace pod względem:

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

Konkurs SEP każdego roku cieszy się dużym zainteresowaniem, a zgłaszane prace stoją na wysokim poziomie merytorycznym. Prezentują najnowsze trendy i rozwiązania technologiczne stosowane w szeroko rozumianej elektrotechnice.

Niniejsza monografia przedstawia podsumowania tegorocznych prac inżynieryjno-badawczych prowadzonych na poszczególnych Wydziałach PWr. Każdy z autorów prezentujących swoje osiągnięcia w monografii jest laureatem Konkursu SEP edycji 2020 roku.

dr inż. Remigiusz Mydlikowski
Komisja Młodzieży i Studentów
SEP oddział Wrocławski

Część I

Wydział Elektroniki

Sterowanie komfortem cieplnym w budynku jednorodzinnym z zastosowaniem pompy ciepła

inż. Aleksandra Rzeszowska

Automatyka i Robotyka

dr inż. Andrzej Jabłoński

Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania

Celem niniejszej pracy było opracowanie modelu symulacyjnego ogrzewania w domu jednorodzinym wykorzystującym jako źródło energii cieplnej pompę ciepła. Praca zakłada stworzenie założeń projektowych, prezentację typu i struktury domu mieszkalnego, opracowanie modelu symulacyjnego badanego obiektu, opracowanie projektu koncepcyjnego systemu ogrzewania w domu jednorodzinym z uwzględnieniem profili użytkownika, przeprowadzenie symulacyjnych testów poprawności zaimplementowanych rozwiązań, oraz opracowanie wniosków i zaleceń wdrożeniowo-eksploatacyjnych. Przejście do części badawczej pracy poprzedzone zostało wstępem teoretycznym, ułatwiającym zrozumienie opisywanych dalej zjawisk oraz powtórzenie badań na dowolnym obiekcie.

1. Pompy ciepła

Z prowadzonych przez Polską Organizację Rozwoju Technologii Pomp Ciepła (PORT PC) badań jednoznacznie wynika, że zastosowanie pomp ciepła w systemach centralnego ogrzewania i podgrzewania ciepłej wody użytkowej staje się coraz bardziej popularne. Technologia ta korzysta w znacznej większości (około 75%) z odnawialnych źródeł energii, zachowując wysoką efektywność energetyczną. Dzięki takiemu rozwiązaniu, możliwe jest zmniejszenie udziału węgla wykorzystywanego w sektorze ogrzewania.

1.1. Zasada działania pomp ciepła

Zadaniem pompy ciepła jest przetworzenie energii uzyskanej z odnawialnych źródeł energii (powietrze, grunt, woda) na ciepło możliwe do przekazania do obiegu grzewczego mieszkania. W schemacie jej działania wyróżnia się trzy podstawowe obiegi:

- **POBÓR CIEPŁA Z OTOCZENIA** - niezamarzająca ciecz o temperaturze niższej od temperatury otoczenia pobiera ciepło ze środowiska, które układem przewodów dostarczane jest do drugiego obiegu,

- **PODNIESIENIE TEMPERATURY NOŚNIKA** - w tym obiegu krąży parująca w niewielkiej temperaturze ciecz (środek chłodniczy), która przejmuje ciepło uzyskane w pierwszym obiegu i podnosząc swoją temperaturę, paruje. Sprężarka spręża powstałą w tym procesie parę, zwiększając w ten sposób temperaturę. Powstała w ten sposób para jest na tyle gorąca, by umożliwić wykorzystanie ciepła w kolejnym obiegu,
- **WYKORZYSTANIE UZYSKANEGO CIEPŁA** - wytworzone ciepło uzyskane z poprzedniego obiegu zostają wykorzystane w do podgrzania wody znajdującej się w grzewczym obiegu domu oraz ciepłej wody użytkowej. Po oddaniu ciepła środek chłodzący zmniejszył swoją temperaturę, przechodząc na powrót w stan ciekły, ciągle jednak pozostaje pod dużym ciśnieniem oraz ma zbyt wysoką temperaturę, by po raz kolejny rozpocząć pobieranie ciepła z otoczenia, dlatego w zaworze rozprężnym spada ciśnienie, w konsekwencji temperatura środka chłodzącego gwałtownie spada, a środek chłodniczy nadaje się do ponownego poboru ciepła.

Istnieje wiele różnych kryteriów podziału pomp ciepła, jednak najszerzej stosowanym jest kryterium rozróżniające pompy według dolnego źródła ciepła. Zgodnie z tym podziałem wyróżnia się pompy w typie **solanka-woda** (najczęściej występujące, energia jest pobierana z gruntu za pomocą wymiennika ciepła, przez który płynie niezamarzająca ciecz (solanka). Pompy tego typu charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami eksploatacyjnymi i niezależnością od zmian temperatury zewnętrznej. Rolę wymiennika gruntowego może grać płaski kolektor zakopany na głębokości 1,5m lub kolektor pionowy. W dobrze zaprojektowanym systemie ogrzewania opartym o ten typ pompy ciepła możliwe jest jej poprawne działanie nawet przy temperaturze zewnętrznej $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.), **woda-woda** (konstrukcyjnie niewiele różnią się od pomp typu solanka-woda, choć w wymienniku, zamiast niezamarzającej cieczy płynie woda gruntowa, która jest schładzana, ale nigdy poniżej punktu zamarzania.) oraz **powietrze-woda** (pompy tego typu wykorzystują energię słoneczną zgromadzoną w powietrzu. Przy wykorzystaniu tej pompy możliwe jest odbieranie energii z powietrza nawet wtedy, gdy ma ono temperaturę $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, jednak ilość uzyskanej energii jest wtedy znacząco mniejsza.).

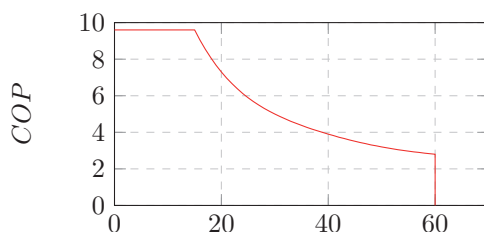
Większa część układu składającego się na pompę ciepła znajduje się wewnątrz budynku. Oprócz podstawowych elementów wymienionych w powyższym opisie działania pompa ciepła zawiera również urządzenia pomocnicze, tj. pompy obiegowe, zawory termostaticzne, układy sterowania oraz aparaturę zabezpieczającą, do których prawidłowego działania niezbędna będzie energia pobrana z sieci elektrycznej. Stosunek ilości energii przekazywanej do obiegu cieplnego oraz energii pobieranej z sieci elektrycznej stanowi jeden z najważniejszych parametrów pozwalających na klasyfikację pomp ciepła.

$$COP = \frac{q}{q_{el}} \quad (1.1)$$

gdzie COP - efektywność pompy, q - ilość energii przekazywanej do obiegu grzewczego, q_{el} - ilość energii pobranej z sieci elektrycznej.

Przy wyborze pompy ciepła odpowiedniej dla budynku, w którym ma działać, warto wziąć pod uwagę również wiele innych czynników, tj. opory hydrauliczne w wymiennikach pompy ciepła, łagodny rozruch, hałaśliwość.

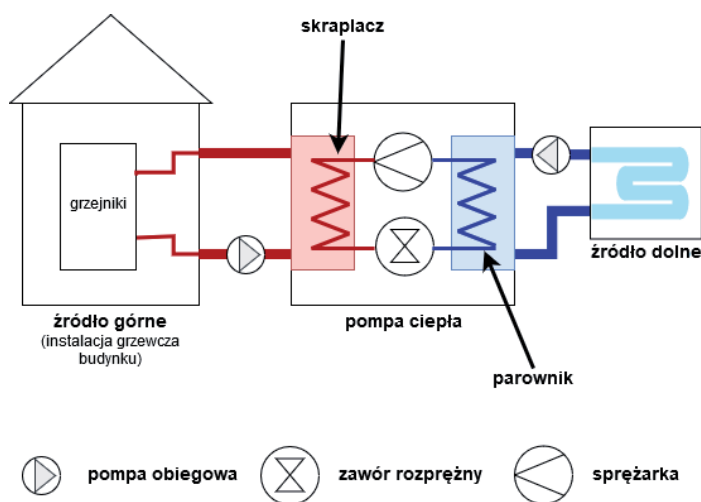
Współczynnik efektywności COP nie jest wartością stałą w funkcji różnicy temperatur między dolnym źródłem, a obiegiem grzewczym. Zależność tę obrazuje przedstawiony obok wykres.



ΔT : dolne źródło-obwód grzewczy [$^{\circ}C$]

2. Założenia przyjęte do badań

Obiektem badawczym, dla którego przygotowano projekt systemu ogrzewania, stanowi jednopiętrowy dom jednorodzinny o łącznej powierzchni użytkowej $192.52m^2$ ($101.20m^2$ na parterze oraz $91.32m^2$ na poddaszu). W każdym z pomieszczeń na parterze, poza kotłownią, zamontowany został grzejnik centralnego ogrzewania o wielkości dostosowanej do wielkości pomieszczenia. Wysokość pomieszczeń umiejscowionych na parterze to $2,7m$. Ściany w budynku wykonane są z betonu, zaś w rurach instalacji centralnego ogrzewania płynie woda. Schemat blokowy instalacji centralnego ogrzewania przedstawia poniższy rysunek.



Rysunek 1.1: Schemat blokowy instalacji centralnego ogrzewania

W każdym z pomieszczeń, poza poddaszem i kotłownią, znajduje się regulator temperatury PI z odpowiednio dobranymi nastawami. Wymiana ciepła następuje pomiędzy powietrzem w pomieszczeniach, a ścianą, powietrzem w pomieszczeniach a sufitem, pomiędzy ścianami a powietrzem na zewnątrz oraz poprzez dach, z poddasza na zewnątrz. Pojemności cieplne (C_v) zostały wyznaczone w oparciu o wymiary związanych z nimi elementów (objętość pomieszczenia/ścian/grzejnika) oraz znajdującej się w nich substancji (powietrze, beton, woda) zgodnie z zależnością:

$$C_v = c_p \cdot \rho \cdot V \quad (1.2)$$

Wartości współczynników określających przewodnictwo cieplne pomiędzy dwoma sąsiadującymi magazynami ciepła (K_c) określono przy zachowaniu nominalnych wartości.

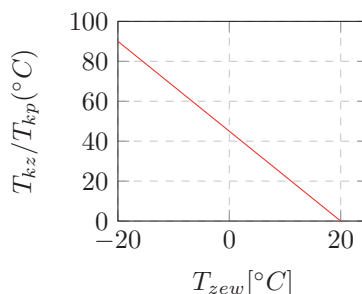
2.1. Model symulacyjny

Model symulacyjny do badań utworzony został przy wykorzystaniu pakietu *Simulink* oraz równań różniczkowych opisujących badany obiekt. Wartości współczynników niezbędnych do nastrojenia regulatora PI zostały dobrane przy użyciu *PidTuner*a dostępnego w pakiecie *MATLAB*. W pracy zaproponowano dwa podejścia do regulacji: regulację pogodową, oraz regulację opartą o zapotrzebowanie na ciepło.

Regulacja pogodowa

Zadaniem umieszczonego wewnątrz budynku kotła grzewczego jest dostarczenie do niego takiej ilości ciepła, by pokryć straty związane z jego ucieczką przez ściany/dach/okna. W regulacji pogodowej na podstawie odczytu wartości temperatury z zewnątrz budynku regulator dobiera pożądaną temperaturę zasilania lub powrotu wody do kotła. Gdy na zewnątrz robi się zimniej, podnosi się wartość temperatury zasilania/powrotu z kotła, by zapobiec wychłodzeniu pomieszczeń. Aby sprecyzować zależność temperatury zewnętrznej od temperatury zasilania/powrotu z kotła wprowadza się tzw. krzywe grzewcze.

Sterowanie w oparciu o krzywe pogodowe wymaga pomiaru temperatury zewnętrznej oraz temperatury wody wpływającej z kotła.



Regulacja oparta o q_t

Drugim proponowanym sposobem regulacji możliwym do zrealizowania w obrębie budynku mieszkalnego jest regulacja oparta o aktualne zapotrzebowanie na moc produkowaną przez kocioł. Przepływ nośnika ciepła przez grzejnik umieszczony w pomieszczeniu wraz z temperaturą wody wpływającej i wypływającej z grzejnika, definiują aktualne zapotrzebowanie pomieszczenia na ciepło zgodnie ze wzorem:

$$q_g = f_m g c_w (T_z - T_p) \quad (1.3)$$

Suma aktualnych zapotrzebowań na ciepło w każdym z pomieszczeń, w których umieszczone zostały grzejniki jednoznacznie określa pożądaną moc kotła. Takie rozwiązanie jednak wymaga pomiaru zarówno przepływów, jak i temperatur zasilania i powrotu z grzejnika dla każdego z pomieszczeń, w których znajduje się grzejnik, a także odpowiedniego ich przetworzenia, jednakże zbędny okazuje się regulator 'centralny'.

3. Badania symulacyjne

Wybór jednego z dwóch proponowanych sposobów regulacji wymaga zdefiniowania kryterium oceny oraz scenariuszy badań. Ważnym jest, by kryterium skupiło się na tym, co

jest najbardziej istotne dla użytkownika (czyli jak najszybsze osiągnięcie zadanej temperatury w pomieszczeniach). Scenariusze badań powinny zaś w miarę precyzyjnie określać rzeczywisty sposób użytkowania, oraz wymagać wielu reakcji systemu na różne wartości. Aby badania można było odnieść do rzeczywistych warunków, przyjęto, że temperatura zewnętrzna nie jest stałą w czasie funkcją, lecz odzwierciedla rzeczywiste wahania temperaturowe w ciągu doby (punkty pomiarowe z rzeczywistej stacji meteorologicznej aproksymowane wielomianem szóstego stopnia).

3.1. Komfort cieplny

Weryfikacja poprawności zaproponowanego rozwiązania wymaga zdefiniowania kryteriów jakości sterowania. Wśród kryteriów służących do oceny jakości regulacji niewątpliwie najistotniejszym dla użytkownika jest zużycie energii określane w kilowatogodzinach. Drugim wskaźnikiem, równie istotnym dla użytkownika jest jego własny komfort definiowany jako stan zrównoważonego bilansu cieplnego. Ze względu na fakt, że w przeprowadzanej symulacji zdefiniowane zostały trzy profile użytkownika, wskaźnik komfortu cieplnego musi uwzględniać komfort każdego trzech użytkowników, pod warunkiem, że przebywa on w domu. Przy wyznaczaniu wskaźnika komfortu cieplnego przyjęte zostały następujące założenia:

- wartość wskaźnika dyskomfortu jest minimalizowana,
- zbyt niska i zbyt wysoka temperatura są traktowana tak samo.

Niech ε oznacza odchylenie od zadanej temperatury. Wtedy funkcja oceny braku komfortu cieplnego może zostać zdefiniowana jako:

$$K(\varepsilon) = -e^{\frac{-\varepsilon^2}{2 \cdot 1,2^2}} + 1 \quad (1.4)$$

3.2. Profile użytkowników

W badaniach uwzględniono trzech użytkowników, z których każdy ma preferowaną inną pożądaną temperaturę oraz ilość wymian powietrza w pomieszczeniu.

Tabela 1.1: Profile użytkowników

użytkownik	T_{komf} [°C]	T_{ekon} [°C]	start komfortowej	start ekonomicznej	wentylacja
1	23	19	6:00	23:00	2
2	21	18	6:00	22:00	1
3	22	16	8:00	20:00	2

3.3. Scenariusze badań

Do oceny jakości regulacji, a tym samym uzyskania wartości wskaźnika jakości regulacji użyte zostały przedstawione niżej scenariusze. Wartości umieszczone w komórkach

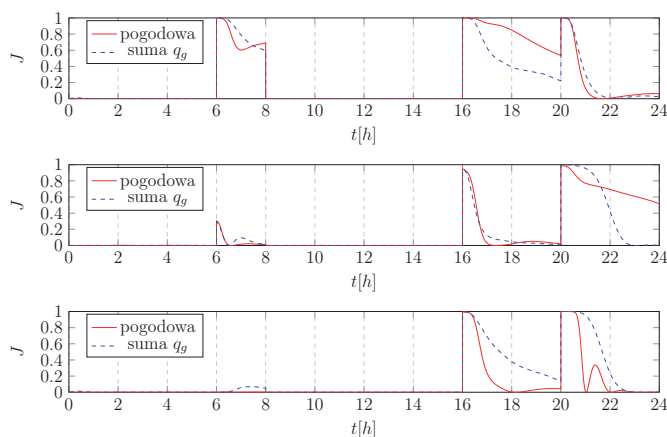
na przecięciu numeru użytkownika i danego zakresu godzin odpowiadają pomieszczeniu, w którym aktualnie się on znajduje. Numer 0 odpowiada sytuacji, gdy danego użytkownika nie ma w domu w badanym zakresie czasowym. Poniższa tabela wprowadza definiowane na potrzeby badań scenariusze.

Tabela 1.2: Scenariusze badań - obecność użytkowników

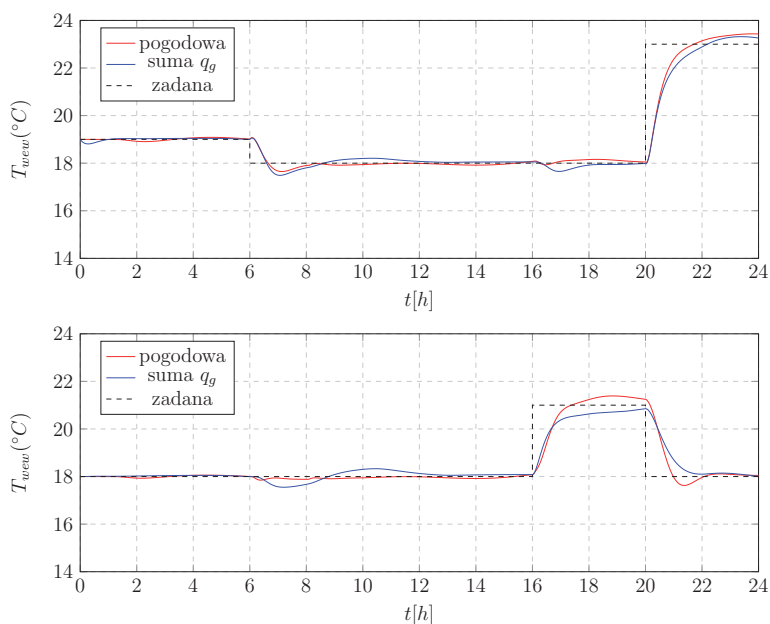
L.p.	użytkownik	0:00-6:00	6:00-8:00	8:00-16:00	16:00-20:00	20:00-0:00
1	1	1	6	0	7	1
	2	2	5	0	2	7
	3	3	3	0	3	3
2	1	1	5	7	6	1
	2	2	6	0	7	2
	3	3	7	3	3	7
3	1	1	1	7	7	7
	2	2	6	2	6	2
	3	3	5	0	3	3

3.4. Wyniki symulacyjne algorytmów sterowania

Dla każdego z opisanych powyżej scenariuszy wykonane zostały badania. Przebiegi czasowe temperatury w pomieszczeniu 1 i 2 przedstawiono poniżej, zaś wartość dyskomfortu odczuwanego przez każdego z użytkowników w trakcie przeprowadzania badania ilustruje znajdujący się obok rysunek. Wykresy w kolejności odpowiadają numerowi użytkownika.

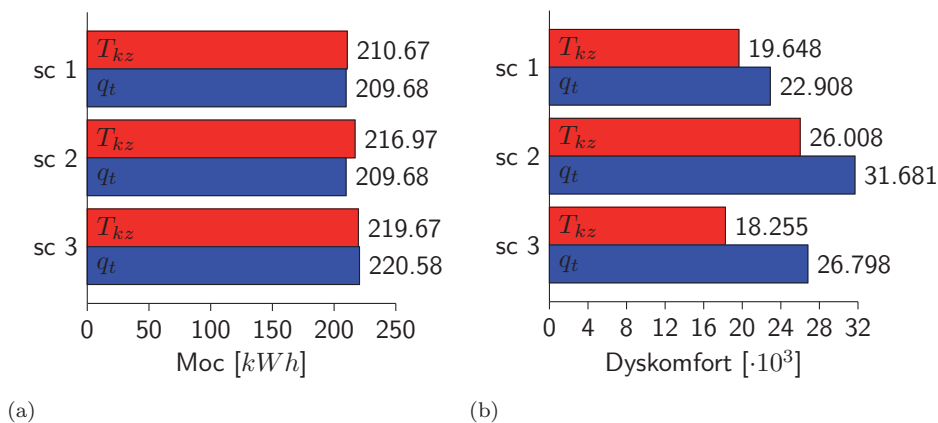


Rysunek 1.2: Przebieg czasowy dyskomfortu użytkowników - scenariusz 1



Rysunek 1.3: Przebiegi zmienności temperatury wewnętrznej - scenariusz 1

Wyznaczona wartość dyskomfortu oraz sumarycznej mocy kotła (w przyszłości odpowiadającej za koszty poniesione przy realizacji ogrzewania) w każdym z trzech scenariuszy posłużył do wyboru jednego z dwóch sposobów regulacji. Wartości te umieszczone zostały na wykresie.



Rysunek 1.4: Porównanie sposobów regulacji

Z przedstawionych powyżej wykresów można wywnioskować, że najlepszym sposobem regulacji w badanych scenariuszach jest system regulacji pogodowej opartej o temperaturę wody wypływającej z kotła (T_{kz}) - generuje najmniejszy dyskomfort użytkowników. Moc zużyta w obu przypadkach niewiele się różni, zatem nie została uznana za czynnik decyzyjny w wyborze sposobu regulacji.

4. Wdrożenie w domu jednorodzinym

Wybór odpowiedniego urządzenia do zastosowania w analizowanym budynku wymaga wykonania przeglądu rynkowego oraz analizy porównawczej istniejących na rynku produktów. Analizie poddano trzech wiodących na rynku producentów pomp ciepła, a sama analiza wykonana została w dwójaki sposób:

- **HIERARCHIA PARAMETRÓW** - parametry zostały ustawione w hierarchii, niespełnienie warunku wyższego skutkuje nienaliczaniem punktów w warunkach niższych,
- **ŚREDNIA WAŻONA** - do każdego z parametrów dobrana została waga odpowiadająca jego istotności przy wyborze konkretnego urządzenia. Dzięki temu rozwiązaniu można wyznaczyć dla każdego z proponowanych urządzeń jednoznaczną wartość, definiującą jego przydatność w projektowanym systemie ogrzewania.

W każdym z przypadków wyodrębnione zostały istotne parametry (takie jak wartość COP, hałas, łagodny rozruch, oferowana moc), a wyniki wykonanej analizy zbiera poniższa tabela:

Tabela 1.3: Wyniki analizy porównawczej pomp ciepła

nazwa pompy	producent	analiza hierarchiczna	analiza ważona
DHP-H 10 OptiPro	Danfoss	6	3.05
DHP-H 12 OptiPro	Danfoss	6	5.81
Vitocal 200-G	Viessmann	2	2.65
Vitocal 330-G	Viessmann	7	7.77
F1126	Nibe	2	6.54
F1245	Nibe	6	7.25

Po wyborze najlepszej pompy ciepła przedstawione zostały schematy określające połączenie elektryczne w domu, schemat połączeń pompy ciepła (zgodny z zaleceniami producenta), oraz proponowany wybór miejsca instalacji.

5. Podsumowanie

Pompy ciepła są coraz częściej stosowanym sposobem do ogrzewania i klimatyzacji budynków, przygotowywania ciepłej wody użytkowej czy nawet przygotowywania wody basenowej. Ogrzewanie domu jednorodzinego z wykorzystaniem pompy ciepła pozwala na wprowadzenie znacznych oszczędności. Ciepło pobierane z otoczenia (gruntu) zostaje przekazane do budynku z niewielką pomocą energii elektrycznej (służącej do napędu części składowych pompy ciepła).

Rosnąca tendencja sprzedaży pomp ciepła pozwala dedukować, że rozwiązanie ogrzewania oparte o to urządzenie spełnia swoje założenia i jeszcze przez wiele lat jego udział w systemach ogrzewania budynków będzie wzrastał.

Przed wyborem urządzenia, które będzie używane do ogrzewania budynku warto zrobić rozeznanie wśród dostępnych na rynku technologii, a także wykonać analizę porównawczą znalezionych rozwiązań. W analizie takiej warto zastanowić się, które parametry są bardziej, a które mniej istotne, by uniknąć sytuacji, że zdecydujemy się na wybór pompy o niewystarczającej mocy, a znacznie niższej cenie. Warto również tak ustalić funkcję oceny każdego z parametrów badanych urządzeń, by połączyć oba sposoby prezentowanych w obrębie niniejszego projektu analiz porównawczych. Taki sposób przeprowadzenia analizy wymaga zdefiniowania przedziałów, w których wartość parametru powinna się mieścić.

Zdefiniowanie modelu symulacyjnego obiektu przed rozpoczęciem jakichkolwiek działań na realnym obiekcie jest dobrym działaniem pozwalającym na zasymulowanie reakcji obiektu. Na rzeczywistym obiekcie czas oczekiwania na określone działanie jest znacząco większy niż czas oczekiwania na wykonanie symulacji. Należy jednak pamiętać, że zachowanie rzeczywistego obiektu prawdopodobnie nie będzie takie samo jak zachowanie modelu symulacyjnego, ale zbliżone do niego (nie jest możliwe określenie czy reakcja obiektu będzie lepsza czy gorsza od reakcji modelu na to samo pobudzenie).

Wybór jednego z proponowanych sposobów regulacji następuje po wykonaniu analizy. W tym przypadku czynnikiem decydującym był dyskomfort użytkownika a także całkowite zużycie mocy. W przeprowadzonych badaniach lepszą okazała się regulacja pogodowa, która generuje wyniki o 27% lepsze (pod względem dyskomfortu użytkownika) niż regulacja oparta o sumę zapotrzebowań na ciepło.

Producent pompy ciepła zawsze dołącza pełną dokumentację techniczną, z której można odczytać czy takie rozwiązanie nadaje się do danego budynku. Istnieje szereg różnych parametrów, które powinien uwzględniać projekt. Należy również zaznaczyć, że instalacji pompy ciepła może dokonać tylko w pełni wykwalifikowana osoba.

Literatura

- [1] Czemplik Anna, Modele dynamiki układów fizycznych dla inżynierów. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
- [2] Oszczak Wojciech, Ogrzewanie domów z zastosowaniem pomp ciepła. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, 2015.
- [3] Strzyżewski Janusz, Pompy ciepła – zasady działania i wybór rozwiązań. Wiedza i Praktyka, 2017.
- [4] <http://www.instsani.pl/235/obliczanie-i-dobor-grzejnikow>[dostęp: 03.11.2019]
- [5] http://portpc.pl/pdf/raporty/Raport_PORTPC_wersja_final_2019.pdf (dostęp:10.11.2019)
- [6] <https://instalreporter.pl/porady/krzywe-grzewcze-czy-stala-...>(dostęp: 12.11.2019)

Automatyczne skanowanie pomieszczenia z wykorzystaniem robota z dalmierzem ultradźwiękowym

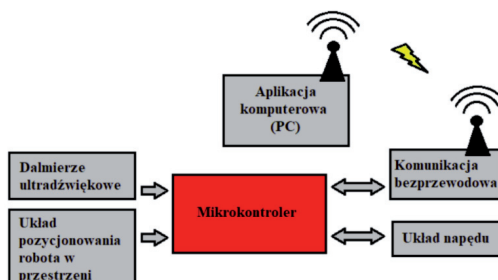
mgr inż. Patryk Dąbrowa
Elektronika

dr inż. Piotr Pruchnicki
Katedra Akustyki, Multimediów i Przetwarzania Sygnałów

W niniejszej pracy podjęto się opracowania algorytmu automatycznego skanowania pomieszczenia z wykorzystaniem robota z dalmierzem ultradźwiękowym. Opracowanie i wykonanie modelu systemu automatycznego skanowania pomieszczenia pozwoliło na analizę reprezentacji środowiska pracy urządzenia na analizę algorytmu poruszania się robotem w nieznannej przestrzeni w określonym miejscu i czasie.

1. Projekt systemu

Postawione zadanie opracowania algorytmu automatycznego skanowania pomieszczenia wymagało dodatkowo opracowania konstrukcji prototypu robota z dalmierzem ultradźwiękowym, napisanie aplikacji komputerowej do obsługi urządzenia i komunikacji pomiędzy aplikacją a robotem. Schemat blokowy budowy systemu został przedstawiony poniżej.

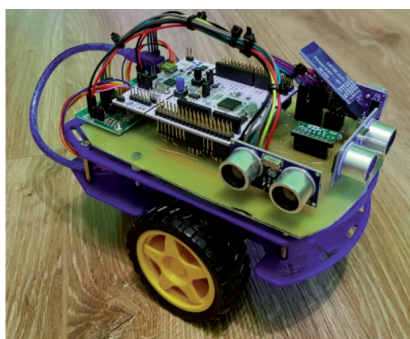


Rysunek 2.1: Schemat blokowy budowy systemu

1.1. Robot z dalmierzem ultradźwiękowym

Opracowanie prototypu robota wymagało dobrania podzespołów oraz sprecyzowaniu jak wszystko ma prawidłowo funkcjonować. Dobranie odpowiedniej jednostki sterującej oraz elementów elektronicznych składających się na budowę robota pozwoliło na zrealizowanie założeń:

- prawidłowy pomiar odległości przy pomocy dalmierzy ultradźwiękowych,
- dokładne określenie pozycji robota w przestrzeni 2D,
- działająca bez komplikacji komunikacja bezprzewodowa,
- układ napędu robota charakteryzujący się wysoką dokładnością przemieszczania.



Rysunek 2.2: Widok opracowanego prototypu robota

Jednym z ważniejszych elementów składających się na budowę prototypu robota był dalmierz ultradźwiękowy. Przeanalizowano funkcjonowanie czujnika na całym zakresie pomiarowym podanym w dokumentacji czujnika. Głównym celem było sprawdzenie dokładności i stabilności pomiarów odległości. Kolejnym ważnym elementem składowym robota był żyroskop do pozycjonowania robota w przestrzeni 2D, który umożliwił przy wyznaczaniu przemieszczenia kąтового wyliczenie kątu obrotu pojazdu.

1.2. Aplikacja okienkowa na PC

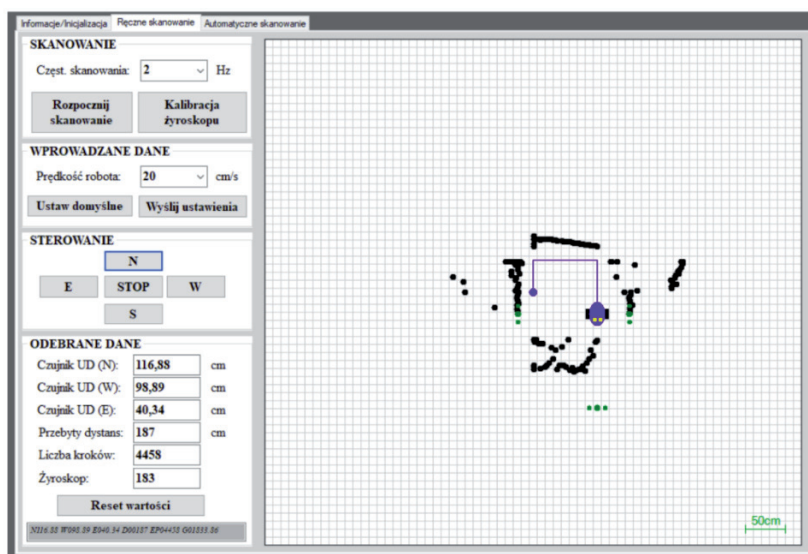
Sterowanie robotem z poziomu komputera oraz przetwarzanie danych zbieranych przez prototyp robota wymagało opracowania aplikacji okienkowej, która miała spełniać również zadania głównej jednostki obliczeniowej. Graficzny interfejs użytkownika składa się z trzech części: podstawowych informacji wraz z inicjalizacją połączenia z robotem (rys. 3), ręcznego skanowania (rys. 4) oraz automatycznego mapowania badanych obszarów (rys. 5). Główne funkcje aplikacji okienkowej:

- sterowanie robotem z poziomu komputera,
- odbiór i przetwarzanie danych zbieranych przez robota,
- obsługa aplikacji przy pomocy zaprojektowanego GUI,

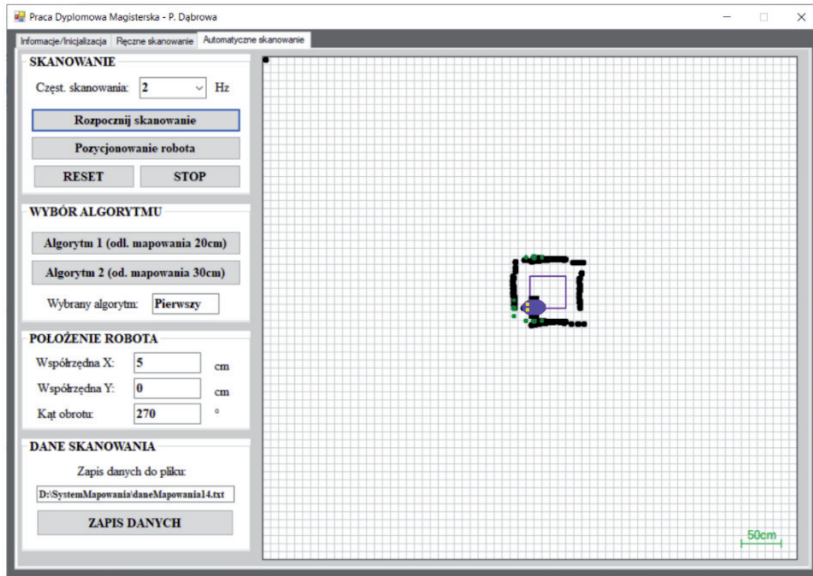
- wizualizacja mapowanych pomieszczeń oraz przebytej drogi robota,
- możliwość ręcznego i automatycznego mapowania pomieszczeń,
- zapis danych pomiarowych.



Rysunek 2.3: Widok aplikacji okienkowej po ręcznym skanowaniu pomieszczenia



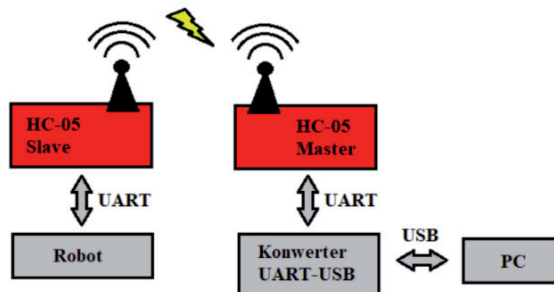
Rysunek 2.4: Widok zakładki „Ręczne skanowanie” aplikacji



Rysunek 2.5: Widok zakładki „Automatyczne skanowanie” aplikacji

1.3. Komunikacja pomiędzy robotem a komputerem

Komunikacja pomiędzy prototypem robota a komputerem odbywa się przy wykorzystaniu standardu komunikacji bezprzewodowej krótkiego zasięgu Bluetooth. W skonstruowanym prototypie robota wykorzystano gotowe moduły HC-05. Schemat blokowy opracowanej komunikacji systemu został przedstawiony na rys. 2.6.



Rysunek 2.6: Schemat blokowy opracowanej komunikacji bezprzewodowej

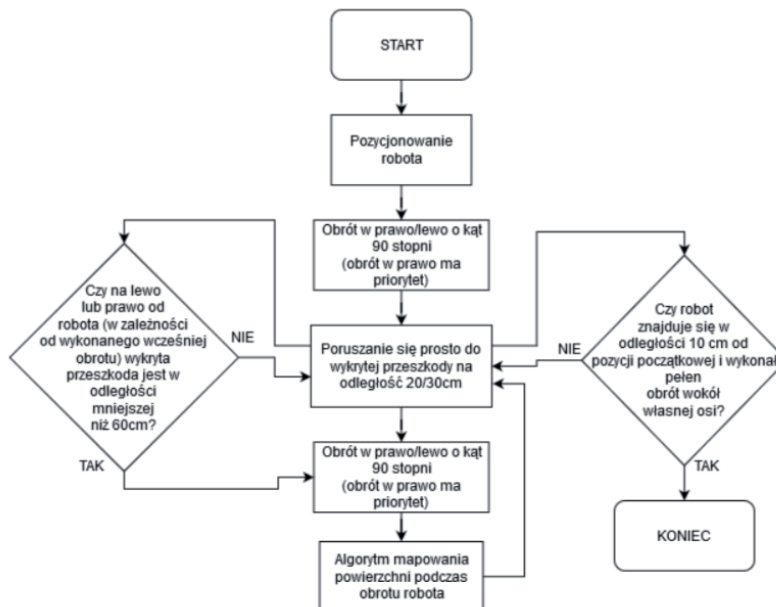
2. System mapowania pomieszczenia

System mapowania pomieszczenia bazuje na opracowanym algorytmie automatycznego skanowania. Schemat funkcjonowania algorytmu dostosowany jest do charakterystyki pracy opracowanego prototypu robota. Zakłada on przede wszystkim pomiar odległości ro-

бота od wykrytych przeszkód w trzech kierunkach, wykonywanie pomiarów przy pomocy dalmierzy ultradźwiękowych w czasie ciągłym oraz poruszanie się pojazdu bazujące na obrotach pojazdu o kąt 90 stopni. Do wizualizacji procesu mapowania pomieszczeń wykorzystano opracowaną aplikację okienkową na PC. Schemat blokowy algorytmu został przedstawiony na rysunku 2.7.

Podczas opracowywania algorytmu przeanalizowano:

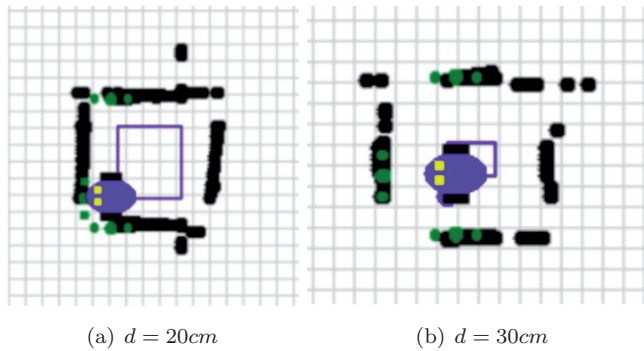
- pozycję w jakiej robot może rozpocząć mapowanie (punkt odniesienia mapowania),
- algorytm poruszania się robotem,
- odległości w jakich może poruszać się robot w odniesieniu do przeszkód z możliwie wysoką dokładnością skanowania,
- określanie kątów prostych badanych pomieszczeń,
- interpretacja przeszkód o różnych kształtach i powierzchniach.



Rysunek 2.7: Schemat blokowy algorytmu automatycznego mapowania pomieszczeń

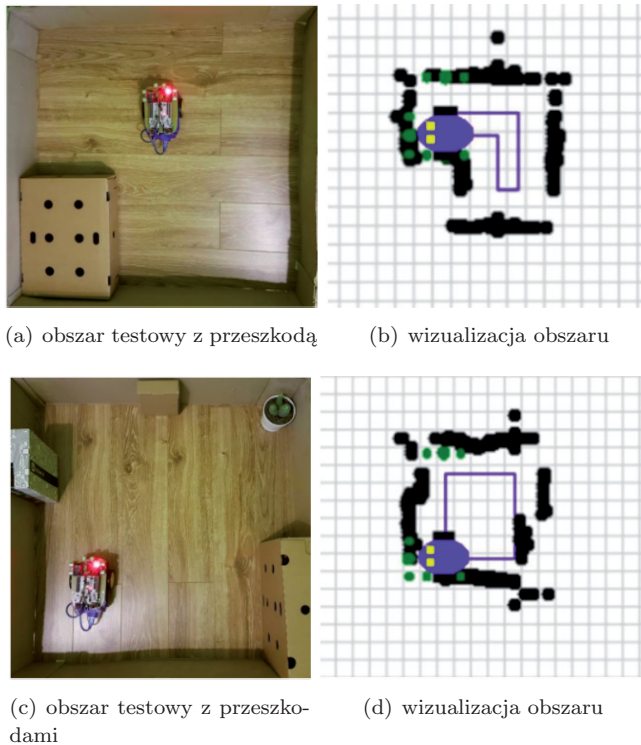
Analizę pracy opracowanego algorytmu postanowiono przetestować na przygotowanych powierzchniach do mapowania oraz rzeczywistych pomieszczeniach. Wstępne testy na przyszykowanych zamkniętych obszarach miały na celu wykonanie pomiarów i interpretację badanych elementów. Pozwoliło to na określenie z jaką dokładnością przebiega proces mapowania. W izualizacje wykonanych pomiarów można było dodatkowo zestawzić z rzeczywistym wyglądem. Schemat mapowania analizowano w odmiennych przestrzeniach przy różnych odległościach jazdy od przeszkód.

Na rysunku 2.8 przedstawiono wynik wizualizacji przygotowanego testowego obszaru przy pomocy dwóch przykładowych odległości skanowania. Uzyskana dokładność skanowania na obszarze testowym wyniosły +/- 5 cm.



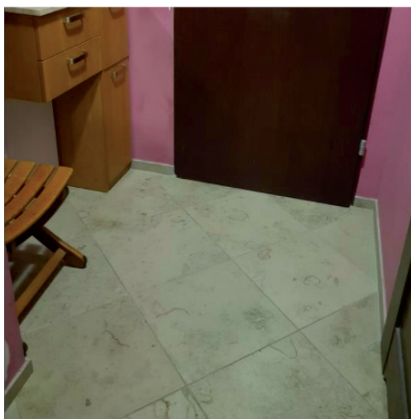
Rysunek 2.8: Wynik wizualizacji mapowania obszaru testowego przy pomocy odległości poruszania się od przeszkód d

Dodatkowo wykonywano skanowania obszaru testowego przy wykorzystaniu różnych przeszkód oraz zmiennych punktów początkowych skanowania. Na rysunku 2.9 przedstawiono przykładowe skanowania badanych obszarów wraz z wynikami wizualizacji.



Rysunek 2.9: Wynik skanowania

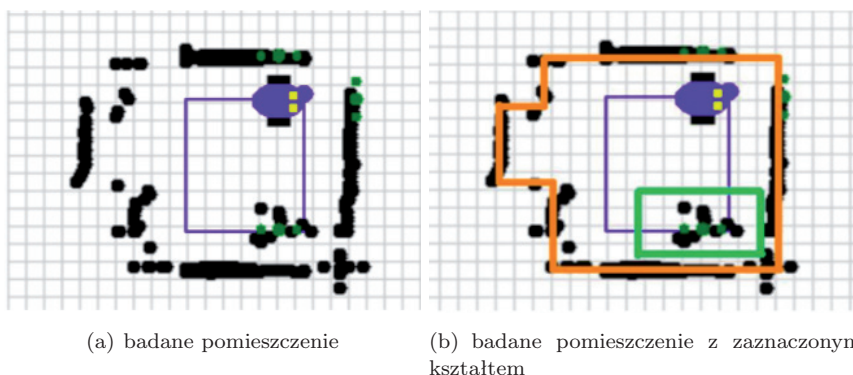
Głównym celem analizy działania opracowanego algorytmu było sprawdzenie funkcjonowania podczas skanowania rzeczywistego pomieszczenia. W ykorzystano w tym celu przykładowe pomieszczenie przedstawione na rysunku 2.10.



Rysunek 2.10: Widok badanego pomieszczenia

Na rysunku 2.11a przedstawiono wynik wizualizacji badanego pomieszczenia przy pomocy systemu automatycznego mapowania. Jak można zauważyć opracowany system bez problemu poradził sobie ze zlokalizowaniem płaskich powierzchni oraz w miarę prosto przemieszczał się po badanym obszarze. W nęka po lewej stronie mimo, że robot nie skręcił w jej kierunku również została wykryta przez robota i wyznaczone zostały współrzędne przeszkody. W trakcie automatycznego mapowania postanowiono w rogu pomieszczenia ulokować dodatkową przeszkodę. Po pokonaniu około połowy trasy przez robota na przebytej już drodze położono przeszkodę o nienaturalnym kształcie w celu sprawdzenia czy system poradzi sobie ze zlokalizowaniem przeszkody.

Na rysunku 2.11b kolorem zielonym zaznaczono oznaczenia wykrytej przeszkody w przestrzeni 2D. System poradził sobie ze zlokalizowaniem przeszkody , która pojawiła się w trakcie automatycznego mapowania. Opracowany system automatycznego mapowania bez problemów wizualizuje kształty rzeczywistych badanych pomieszczeń.



Rysunek 2.11: Wizualizacja

3. Podsumowanie

Celem pracy było opracowanie automatycznego skanowania pomieszczenia z wykorzystaniem robota z dalmierzem ultradźwiękowym, który udało się zrealizować. Skonstruowano robota poruszającego się poprawnie w zadanych kierunkach oraz wyznaczającego kąt obrotu na podstawie przemieszczenia kąowego. Dodatkowo urządzenie precyzyjnie wykonuje pomiary odległości do wykrytych przeszkód. Robot sterowany jest przy pomocy opracowanej aplikacji okienkowej i komunikuje się z komputerem przy pomocy standardu bezprzewodowej komunikacji Bluetooth. Dane wysyłane przez robota są odbierane przez komputer, a następnie analizowane i przetwarzane w aplikacji okienkowej.

Literatura

- [1] S. Ambroszkiewicz, „Reprezentacja przestrzenna środowiska na podstawie kognitywnych map obiektowych”, /www.robotyka.com (dostęp: maj 2020).
- [2] B. Siemiątkowska, A. Borkowski, R. Chojecki, M. Gnatowski, W. Mokrzycki, J. Szklarski, „Reprezentacja otoczenia robota mobilnego”, Akademska Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2011.
- [3] M. Garbac, „Planowanie ścieżki dla robota mobilnego na podstawie informacji z czujników odległościowych”, AUTOMATYKA, 2006, Tom 10, Zeszyt 3.
- [4] C. Hughes, T. Hughes, „Programowanie robotów. Sterowanie pracą robotów autonomicznych”, Helion, 2017.
- [5] Kardaś M., „Mikrokontrolery AVR. Język C – podstawy programowania”, Atnel, Szczecin 2013.
- [6] A. Engst, G. Fleishman, „The Wireless Networking Starter Kit. Second Edition”, Peachpit Press, Berkeley 2004.
- [7] Elektronika praktyczna, „Bluetooth. Bezprzewodowa transmisja danych na niewielkie odległości.”, www.ep.com.pl (dostęp: maj 2020).
- [8] John Koon, „LoRaWAN Empowers Very Low-power, Wireless Applications.”, Tech Idea, California 2020.

Budowa robota mobilnego klasy NANOSUMO

inż. Michał Piotrowicz

Automatyka i Robotyka

dr inż. Robert Muszyński

Katedra Cybernetyki i Robotyki

1. Motywacja i cel pracy

Obecnie na świecie ogromną rolę odgrywają szeroko pojęte innowacyjne technologie. Ich rozwój już od kilkunastu lat wiąże się z postępującą w zaskakującym tempie miniaturyzacją. Zjawisko to jest obecne dosłownie wszędzie, od sprzętów gospodarstwa domowego do urządzeń wykorzystywanych przez służby specjalne.

Pewną ogólnodostępną inicjatywą prezentującą postęp technologiczny w zastosowaniach hobbyistycznych elektroniki są zawody robotyczne. W Polsce organizowane są one od kilku lat, przybierając coraz większe rozmiary i niejednokrotnie przyciągając uczestników z całego świata. Również w tym przypadku można zaobserwować zainteresowanie konstruowaniem coraz mniejszych robotów mobilnych spełniających postawione im konkretne zadania. Liczną grupę konkurencji na owych wydarzeniach stanowią roboty klasy xSumo. Wydzielone arbitralnie kategorie wagowe tychże konstrukcji przedstawia tabela 3.1. Jak można w niej zauważyć, klasa nanosumo jest najmniejszą spośród wymienionych. Pomimo pozornego braku widowiskowości przyciąga ona oczy wielu widzów podczas zawodów robotycznych. Z drugiej jednak strony można zauważyć mało dynamiczny wzrost reprezentantów, których konstrukcje stają do walki. Pewną motywacją do napisania pracy pod tytułem „Budowa robota mobilnego klasy nanosumo” była właśnie popularyzacja tej dziedziny robotyki wśród potencjalnych przyszłych zawodników, początkujących robotyków czy też bardziej doświadczonych osób, dla których budowa funkcjonalnego urządzenia tak małych rozmiarów stanowiłaby pewnego rodzaju wyzwanie.

Praca miałaaby także stanowić poradnik dla osób stawiających swoje pierwsze kroki w dziedzinie robotyki mobilnej. Zawarte w niej wskazówki powinny być możliwe do wdrożenia w szerszym zbiorze konstrukcji, nie tylko w przypadku budowy robota klasy nanosumo. W szczególności jej celem było stworzenie obszernego przeglądu rozwiązań możliwych przy realizacji funkcjonalności robotów o stosunkowo niewielkich rozmiarach.

Tabela 3.1: Kategorie xSumo

Kategoria	Limit masy [g]	Limit szerokości i długości [mm]	Limit wysokości [mm]	średnica dohy-o [mm]	szerokość białej linii [mm]
megasumo	3000	200	nieograniczona	1490	50
sumo	3000	200	nieograniczona	1490	50
minisumo	500	100	nieograniczona	770	25
microsumo	100	50	50	385	12.5
nanosumo	25	25	25	192.5	6.25

Osobnym, praktycznym założeniem pracy dyplomowej inżynierskiej było wykorzystanie kilkuletniego doświadczenia w dziedzinie konstruowania robotów rywalizujących. Biorąc to pod uwagę, wyznaczono podstawowy cel, jakim była budowa przykładowego robota, z uwzględnieniem doboru części zapewniających poprawne działanie bloków funkcjonalnych i jak najbardziej wydajną realizację postawionego zadania. Robot miał zatem w założeniu być konstrukcją efektywnie walczącą w swojej kategorii wagowej na arenie krajowej i międzynarodowej.

2. Założenia projektowe

Główne założenia projektowe dotyczące praktycznej części pracy dyplomowej inżynierskiej pod tytułem „Budowa robota mobilnego klasy nanosumo” zostały sformułowane w oparciu o wymagania postawione przez regulamin kategorii. Przepisy te występują w przemiennej formie na całym świecie. Według nich przede wszystkim wysokość, szerokość i długość konstrukcji nie mogą wykraczać poza 25mm. Dodatkowo masa ograniczona jest do 25g, jednak małe rozmiary robota utrudniają przekroczenie tej wartości. W pracy podkreślano pewnego rodzaju wyzwanie jakie stanowi budowa konstrukcji tak, aby jej masa była jak największa. Ponadto robot musi działać w pełni autonomicznie oraz być wyposażony w elementy pozwalające na nawiązanie efektywnej walki z przeciwnikiem.

W związku z powyższymi wymaganiami wyznaczono założenia projektowe dotyczące realizacji poszczególnych bloków funkcjonalnych robota Misio. Postanowiono skonstruować układ jezdny bazujący na zastosowaniu dwóch niezależnie sterowanych silników. Miały one zostać ułożone niewspółosiowo, co pozwoliłoby na wybór jak największych jednostek napędowych, a więc takich, które cechowałyby się możliwie dużym momentem obrotowym oraz szybkością. Założono, że elektronika konstrukcji podzielona zostanie na moduły zrealizowane z użyciem osobnych płytek PCB. Dwa moduły miały być dedykowane dwóm układom sensorycznym. Ostatnia część elektroniki miała łączyć w sobie mikrokontroler obsługujący sygnały wejściowe i dobierający odpowiednie stany na swoich wyjściach, sterownik silników, a także interfejs użytkownika, zapewniający podstawową obsługę robota podczas zawodów.

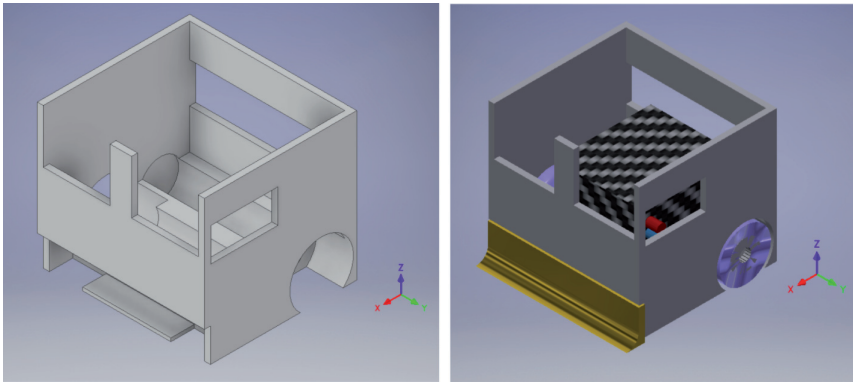
3. Zawartość pracy

Rozdział 2 pracy wprowadza czytelnika w tematykę robotów rywalizujących klasy xSumo, opisuje zasadę ich działania i podaje wytyczne narzucone przez regulamin konkurencji. Dla efektywnego działania każdego robota tejsze rodziny wyróżniono odpowiednie bloki funkcjonalne:

- układ jezdny i konstrukcję mechaniczną,
- układ detekcji przeciwnika,
- układ detekcji krawędzi ringu,
- interfejs zawodnika.

Czytelnik może zapoznać się także z charakterystyką poszczególnych sekcji wraz z proponowanymi sposobami ich realizacji. Spośród wymienionych części można wydzielić te najbardziej istotne do poprawnego działania robota oraz takie, których nieobecność w konstrukcji nie musi przekładać się w sposób znaczący na efektywność działania. Do pierwszych należy na pewno zaliczyć układ sensoryki pozwalający na wykrycie przeciwnika oraz układ napędowy. Odpowiednie dopracowanie tych bloków funkcjonalnych w każdej z klas xSumo przełoży się bezpośrednio na większą skuteczność robota w walce. Mniejsze znaczenie będzie miał układ detekcji białej linii oraz interfejs użytkownika. Można z nich zrezygnować szczególnie w niewielkich konstrukcjach, gdy zbyt dużą przeszkodą staje się ograniczona przestrzeń wewnątrz robota. Oczywiście implementacja tychże elementów przyniesie pewne korzyści, więc nie należy ich całkowicie odrzucać na etapie wstępnych założeń projektowych. Na końcu rozdziału 2 znaleźć można charakterystykę robotów klasy nanosumo w odniesieniu do bliźniaczych większych konstrukcji. Podano tam wszelkie różnice, które należy uwzględnić przy budowie robota tej klasy, a które wynikają ściśle z jego miniaturowych rozmiarów.

W rozdziale 3 zaprezentowano sposób realizacji poszczególnych układów składowych robota Misio klasy nanosumo. Ponadto przez prezentację alternatywnych podejść wszędzie tam, gdzie mogłyby być one rozważane, wprowadza on czytelnika w bardziej szczegółowy przegląd dostępnych rozwiązań. Zawartość rozdziału rozpoczyna spis wykorzystanych narzędzi i środowisk komputerowych. Model obudowy oraz lemiesza został utworzony w aplikacji Autodesk Inventor Professional 2017. Ten sam program okazał się przydatny przy projektowaniu części koniecznych do wykonania felg oraz silikonowych opon. Szczególnie przydatna okazała się funkcjonalność związana z eksportowaniem modeli do formatów przetworzonych przez kolejny z programów – Voxelizer. Proces ten umożliwił w kolejnych krokach wykonanie części mechanicznych z wykorzystaniem polilaktydu i technologii druku 3D. Gotowy model obudowy przedstawia rysunek 3.1a natomiast projekt całego złożonego robota zobrazowano na rysunku 3.1b.



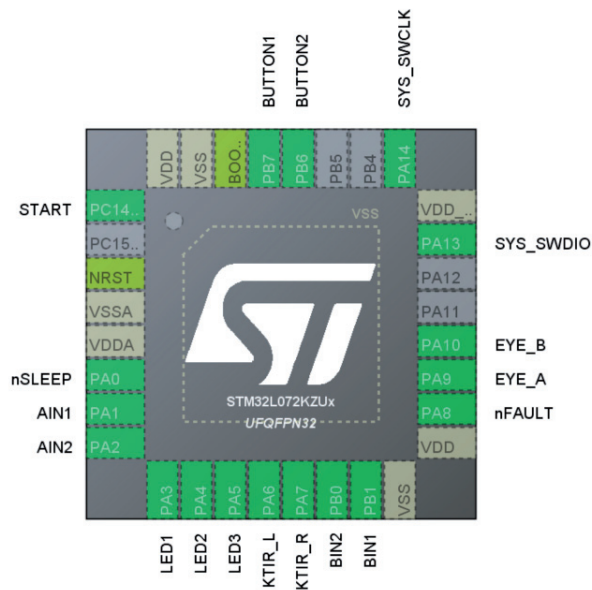
(a) Model korpusu robota Mizio

(b) Złożenie mechaniki robota z trwale połączonymi do niej elementami

Rysunek 3.1: Projektowanie robota

Do zaprojektowania elektroniki robota posłużyło środowisko KiCad. Wyposażone jest ono w szereg narzędzi, takich jak:

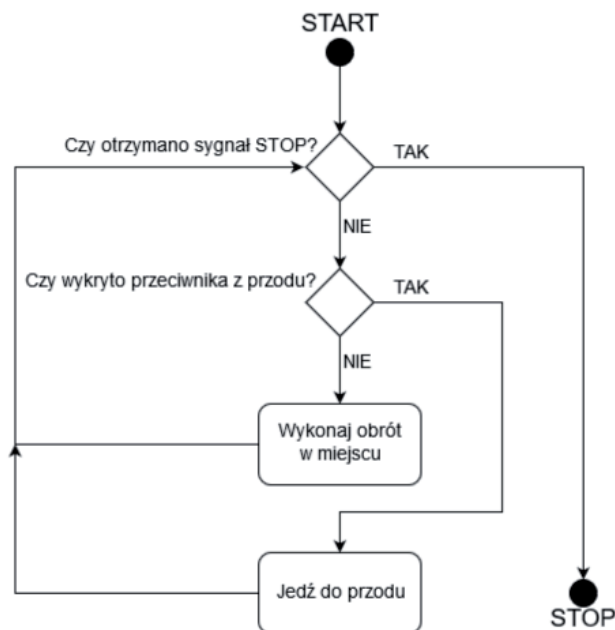
- eeschema – do tworzenia schematów ideowych obwodów elektronicznych i połączeń między modułami,
- cvpcb – przypisujące poszczególnym elementom wybrane przez użytkownika obudowy (tak zwane footprints),
- pcbnew – do tworzenia i edycji projektów płytek drukowanych.



Rysunek 3.2: Konfiguracja STM32L072KZU6 w programie STM32CubeMX

Części elektroniczne zostały umieszczone na wydzielonych modułach, zgodnie z przyjętymi wcześniej założeniami. Przy okazji doboru konkretnych modeli czujników kluczowy był chociażby rozmiar dohy-o. Zasięg czujników odpowiedzialnych za detekcję przeciwnika nie może być bowiem za mały ani za duży (aby robot nie kierował się wykryciem obiektów znajdujących się poza obszarem walki). Zarówno w przypadku układów sensorycznych, jak i przy doborze mikrokontrolera, układu scalonego sterownika silników czy realizacji interfejsu użytkownika podano szereg alternatywnych rozwiązań rozważanych w procesie projektowania i budowy robota nanosumo Misio. Równocześnie przedstawiono argumenty, które zadecydowały o wyborze konkretnych elementów składowych. W ten sposób zrealizowano założenie pracy, jakim było stworzenie przeglądu różnych dostępnych ścieżek prowadzących do osiągnięcia jednego celu – konstrukcji efektywnie działającego robota klasy nanosumo.

Na końcu rozdziału 3 pracy opisano sposób podłączenia do układu mikrokontrolera oraz zaprogramowanie go, a także obsługę interfejsu użytkownika. Do pełnej konfiguracji mikrokontrolera użyto programu STM32CubeMX. Ustawienia poszczególnych peryferiów przedstawia rysunek 3.2. Właściwy program został napisany w środowisku Atollic TrueSTUDIO. Dodatkowo wykorzystano aplikację ST-LINK Utility w celu przesyłania wygenerowanego pliku binarnego na mikrokontroler oraz narzędzia STMStudio przydatnego w procesie uruchamiania i pierwszych testów robota. Interfejs zawodnika zbudowano tak, aby pozwalał na wygodne i intuicyjne ustawienie trybu startu robota przed walką bez konieczności zmiany programu mikrokontrolera. Uwzględniono różne wersje regulaminów występujące na największych zawodach robotycznych na świecie.



Rysunek 3.3: Podstawowy algorytm sterowania robota xSumo

Rozdział 4 opisuje metodologię pierwszego uruchomienia robota Misio, podstawowych testów wszystkich jego bloków funkcjonalnych oraz implementację stopniowo coraz bardziej zaawansowanych algorytmów sterowania. Taki układ ma zapewnić czytelnikowi możliwość dokładnego poznania zagadnień związanych z programowaniem mikrokontrolerów i obsługą poszczególnych peryferiów, zamiast podania gotowego kompletnego rozwiązania zastosowanego w przykładowej konstrukcji. Najprostszy algorytm, który można zaimplementować w każdym robocie klasy xSumo przedstawia rysunek 3.3. Ostatecznie, w ramach pracy pod tytułem „Budowa robota mobilnego klasy nanosumo” udoskonalono go o algorytm poszukiwania przeciwnika w oparciu o jego ostatnie znane położenie na dohy-o oraz o funkcjonalność związaną z różnymi wariantami wykrycia obecności białej linii przed robotem. Kompletnie oprogramowanie zaimplementowane w robocie zostało załączone w dodatku B do pracy.

4. Wnioski i efekty pracy

Robot Misio, powstały na potrzeby pracy, został zbudowany za pomocą łatwo dostępnych narzędzi. Jednakże cały proces wymagał stosunkowo dużej precyzji i cierpliwości. Oprogramowanie zostało zrealizowane w taki sposób, aby zapewnić możliwie dużą uniwersalność robota Misio. Zaimplementowano w nim możliwość wyboru jednego z czterech trybów startu.

Sposób w jaki robot został skonstruowany oraz zaprogramowany okazał się być dość skutecznym. Konstrukcja zajęła pierwsze miejsce podczas międzynarodowych zawodów Sumo Challenge, mierząc się z przeciwnikami mogącymi pochwalić się wieloma sukcesami na arenie krajowej i międzynarodowej.

W przyszłości konstrukcję można usprawnić rozbudowując sekcję detekcji przeciwnika. Zdecydowanie lepsze parametry powinny zapewnić czujniki wykorzystujące technologię Time of flight. Te oraz podobne wnioski może wykorzystać potencjalny czytelnik chcący zrekonstruować robota Misio równocześnie usprawniając wszelkie jego niedoskonałości. Poza tym praca dyplomowa umożliwia wybór dowolnej konfiguracji elementów składowych tworzących bloki funkcjonalne. Dzięki temu daje ona nadzieję na rozwój konkurencji nanosumo w Polsce.

Literatura

- [1] S. Gibilisco, Schematy elektroniczne i elektryczne. Przewodnik dla początkujących. Helion, 2014
- [2] F. Mondada, E. Franzi, P. Ienne, Experimental Robotics III. Mobile Robot Miniaturization: A Tool for Investigation in Control Algorithms, 501–513, 1994.
- [3] K. Paprocki, Mikrokontrolery STM32 w praktyce. BTC, 2011.
- [4] B. Siciliano, O. Khatib, Handbook of Robotics. Springer, 2008.

Część II

Wydział Elektryczny

Modernizacja wirnika silnika synchronicznego wysokoobrotowego do napędu skrętarki drutu wolframowego

inż. Jakub Pawlak

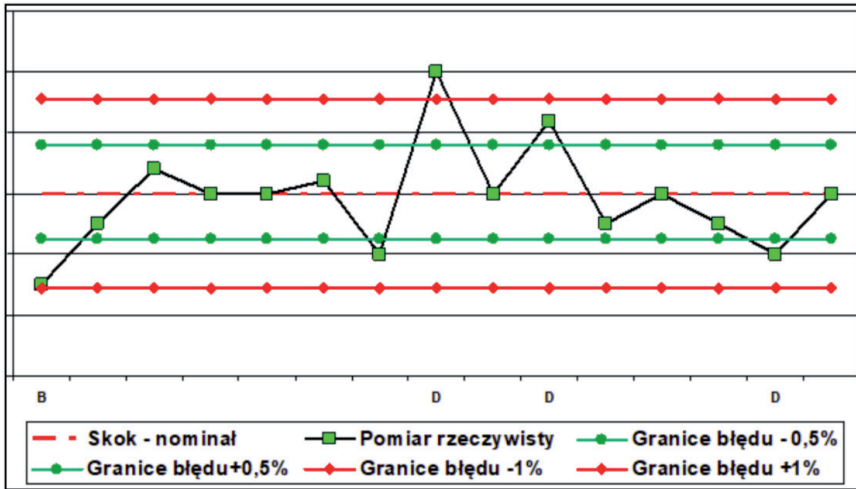
Elektrotechnika

dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

W procesie produkcji lamp żarowych bardzo ważne znaczenie ma produkcja komponentów metalowych do lamp, jednym z nich jest skrętka wolframowa. Praca rozwiązuje problem związany z napędem wysokoobrotowym stosowanym w maszynach produkujących skrętki z drutu wolframowego. Napędy stosowane w urządzeniach, produkujących skrętkę wolframową, powinny pracować ze stałą prędkością niezależną od obciążenia, wynoszącą 30 000 obr/min. W celu zapewnienia właściwego skoku skrętki. W przypadku błędnego skoku skrętek wolframowych komponenty te są brakowane. Problem z utrzymaniem stałego skoku skrętek wolframowych pojawia się wtedy gdy silnik nie jest w stanie utrzymać prędkości technologicznej i wypada z synchronizmu. Obecnie stosowane silniki po wypadnięciu z synchronizmu pracują z mniejszą prędkością, powodując straty w drogim materiale jakim jest wolfram, poprzez brakowanie wadliwych skrętek. Celem pracy jest rozwiązanie problemu błędnego skoku skrętek poprzez zaprojektowanie nowego napędu na bazie istniejącego silnika synchronicznego reluktancyjno-histerezowego. Nowy napęd powinien posiadać większy moment synchroniczny oraz łatwiejszą synchronizację, niż obecnie stosowany napęd. Praca zawiera projekt wirnika wraz z obliczeniami do nowego napędu, opis prototypu z fotografiami wraz z wynikami badań nowego napędu.

W procesie kontroli jakości skoku skrętek jako konsekwencja poprawnych obrotów silnika proces badawczy wykonuje się po całkowitym wyprodukowaniu skrętek i sprawdza się to pod mikroskopem optycznym. Graficznie procesy zapisuje się w systemie który również wizualizuje stabilność pracy silnika, który przedstawia rysunek 4.1 na którym widać że pomiar rzeczywisty przekracza krytyczną granicę błędu, co klasyfikuje skrętkę jako błędnie wykonaną.



Rysunek 4.1: Przykład niestabilności skoku skrętki generowanego przez silnik

Na poniższym rysunku przedstawiono przykład prawidłowo nieprawidłowo wykonanej skrętki.



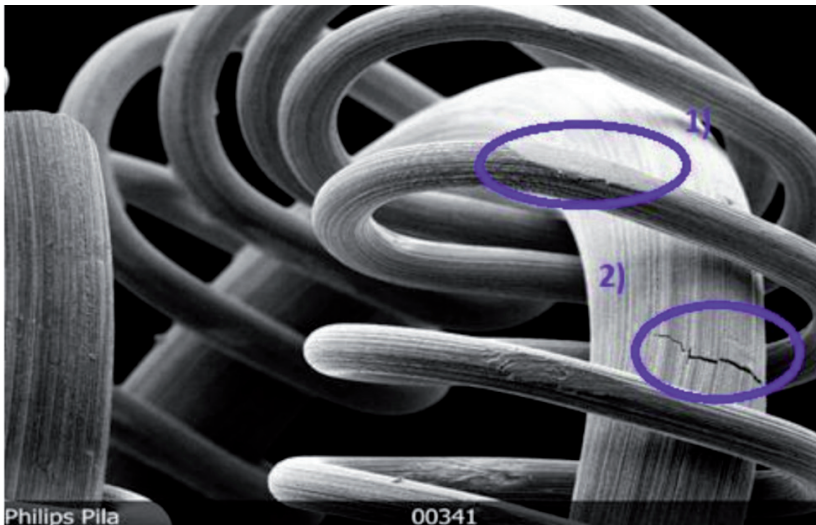
(a) nieprawidłowa



(b) prawidłowa

Rysunek 4.2: Przykład skrętki

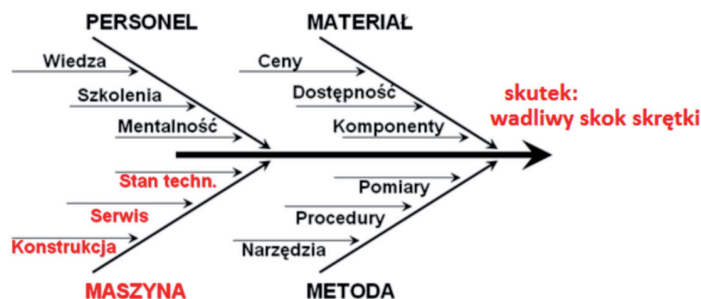
Proces technologiczny w którym występuje omawiany silnik polega na wykonywaniu skrętek wolframowych do żarówek. Prędkość obrotowa każdego z silników wynosi 30 000 obr/min, będąc uwarunkowana procesem technologicznym. Drugim z ważnych aspektów poruszonych w pracy było zaprojektowanie i wykonanie nowego wirnika do istniejącego silnika wysokoobrotowego, reluktancyjno-histerezowego z miedzianą klatką rozruchową, zaś trzecim elementem było sprawdzenie nowej konstrukcji i porównanie jej z pierwotną konstrukcją, gdyż jak wiadomo - żeby znać efekt musimy mieć punkt odniesienia. Proces projektowania rozpoczęto od analizy łańcucha przyczynowo skutkowego, tzw. Diagram rybiej ości lub diagram Ishikawy.



Rysunek 4.3: Diagram rybiej ości

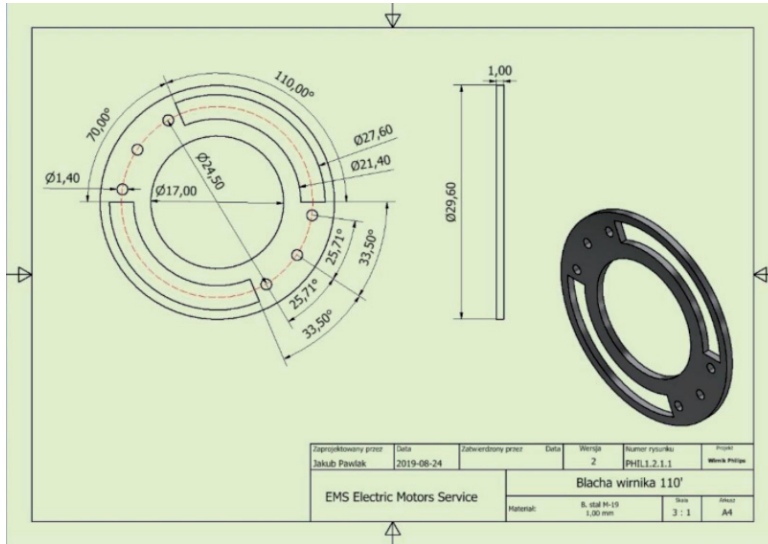
Diagram ten jest jednym z narzędzi do zarządzania jakością, dokładniej do analizy przyczynowo skutkowej powstałego problemu. Jako ludzie mamy skłonność do wykazywania jednego winnego, uznając inne problemy za nie istotne. Gdzie zazwyczaj istota problemu bywa bardziej złożona. Po diagramie – rozpoczyna się od określenia problemu – skutku. W naszym wypadku jest to wadliwy skok skrętki, następnie identyfikuje się wszystkie kategorie przyczyn które go spowodowały.– materiał, personel, metoda i maszyna.

Wybrany w trakcie realizacji projektu rozwiązaniem była wymiana wirnika na nowy, najmniejsza ingerencja w silnik. Zmieniając wirnik, na wirnik z magnesami trwałymi powinniśmy zarówno zwiększyć sprawność - silniki z magnesami trwałymi wykazują się ogólnie większą sprawnością w porównaniu do konstrukcji konkurencyjnych Projekt należało rozpocząć od przygotowania, czyli sprawdzenia parametrów obecnie stosowanego silnika, zapoznanie się z konstrukcją oraz parametrami wirnika i stojana. Kolejną częścią było zasięgnięcie odpowiedniej literatury, wstępne obliczenia, oraz wykonanie projektu blachy wirnika.



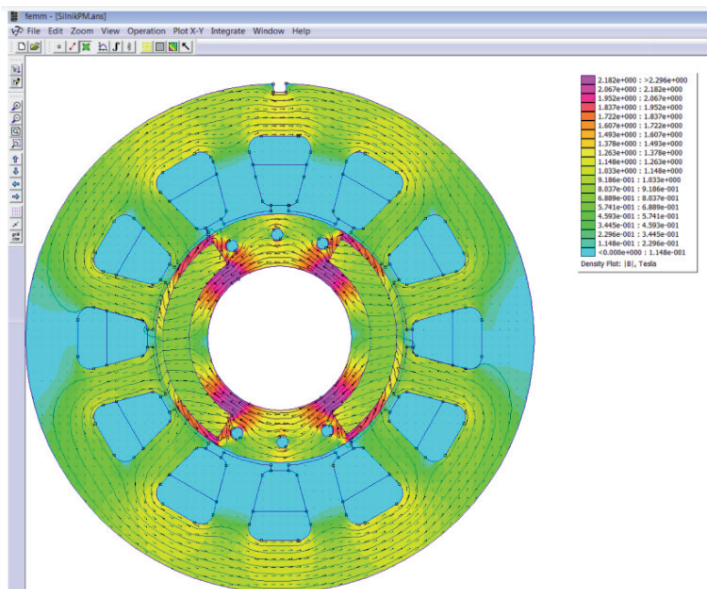
Rysunek 4.4: Blacha wirnika prototyp

Kolejnym krokiem był eksport pliku do DXF nowej blachy wirnika oraz stojana, w celu uruchomienia ich w programie do obliczeń połowych FEMM.



Rysunek 4.5: obliczenia w programie femm

Następnie należało wykonać prototyp, wykroić blachę, zamówić magnesy i przystąpić do badań. Przebadać silnik którego prędkość obrotowa wynosi 30 000 obr/min nie jest łatwo, na PWR nie dysponujemy taką hamownią, więc stanowisko musiałem wykonać we własnym zakresie.



Rysunek 4.6: Render projektu stanowiska

Po sprzęgnięciu obu silników, wykonaniu badań, oraz analizie wyników wysnuto następujące wnioski: Nowy silnik posiada ponad 50% większą sprawność (51→78 %), 250% większy moment obrotowy (0.07→0.18 Nm),. Zmiana konstrukcji w taki sposób umożliwiła tanim kosztem znaczące polepszenie parametrów silnika, oraz wyeliminowanie produkcji wadliwych skrętek drutu wolframowego oraz problemów z synchronizacją, przy realnym zmniejszeniu poboru prądu przez układ napędowy do 65% wartości pobieranej pierwotnie przy takich samych warunkach pracy.

Literatura

- [1] Zbigniew Damm, Jednofazowy silnik synchroniczny reluktancyjny z rozruchem asynchronicznym, Zeszyty problemowe – maszyny elektryczne, Nr 80/2008 str. 36
- [2] Mieczysław Ronkowski, Michał Michna, Grzegorz Kostro, Filip Kutt, Maszyny elektryczne wokół nas, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011
- [3] Jorge O. Estima, A. J. Marques Cardoso, Efficiency analysis of Synchronous Reluctance Motors, University of Beira Interior, Covilha, Portugal, 2013
- [4] Microchip Technology Incorporated , Sensorless Field oriented control (FOC) for permanent magnet synchronous motors (PMSM), WebSeminars, 2007.

Sterowanie dystrybutorem do napojów za pomocą wybranego mikrokontrolera

inż. Piotr Szalega
Automatyka i Robotyka

dr inż. Piotr Derugo
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Głównym celem pracy było zaprojektowanie, zbudowanie i uruchomienie dystrybutora do napoi sterowanego z wykorzystaniem wybranego podczas fazy analityczno-koncepcyjnej mikrokontrolera. Skupiono się na stworzeniu przenośnego i kompaktowego produktu o wysokiej uniwersalności i podatności na modyfikacje przy zachowaniu optymalnej funkcjonalności oraz niezawodności. Oprócz opisu części projektowej praca obejmowała podejście do poruszanych zagadnień od strony teoretycznej i spojrzenie na niektóre tematy z szerszej perspektywy.

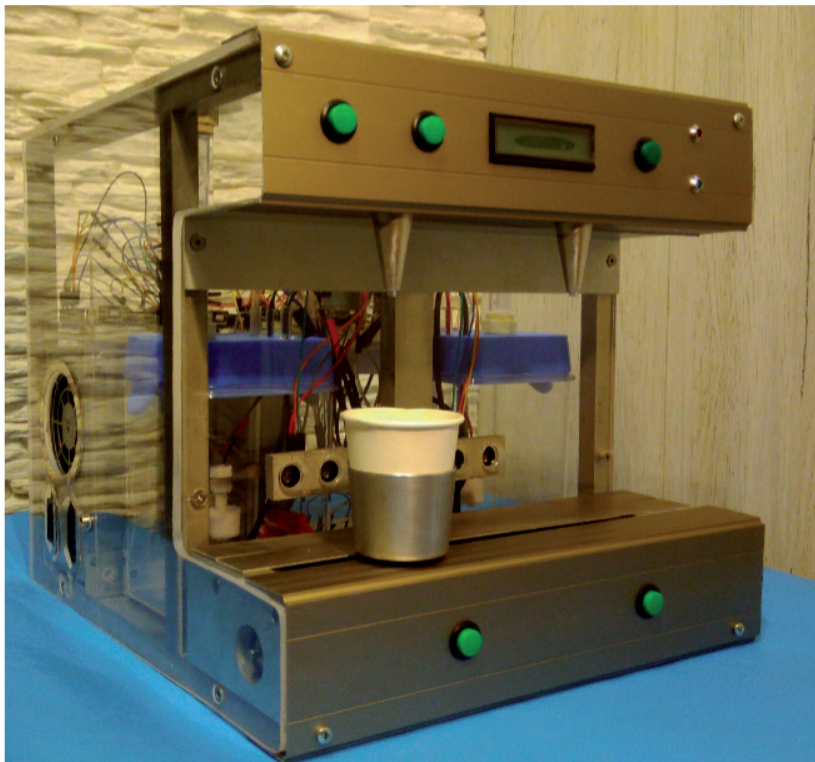
1.

W pracy można wyróżnić trzy główne części. W pierwszej z nich oprócz celu i zakresu pracy zawarto krótkie przedstawienie terminologii spotykanej do określania dystrybutorów do napoi jak i przykłady zastosowania tego typu urządzeń. Ponadto znalazło się tam obszernie wprowadzenie w tematykę dystrybutorów. Przedstawiono historię rozwoju od starożytności, aż po dzień dzisiejszy, opisano stosowane technologie, a także przeprowadzono przegląd rynku i producentów tego typu urządzeń. W tej części umieszczono również uzasadnienie wyboru platformy Arduino jako układu sterującego i krótkie teoretyczne wprowadzenie w zagadnienie mikrokontrolerów.

2.

Druga, zasadnicza część pracy obejmowała opis całego procesu tworzenia urządzenia, od doboru elementów aż po przybliżenie obsługi i działania już gotowego dystrybutora. Wśród założeń projektowych znalazły się między innymi takie pozycje jak: modułowa i solidna konstrukcja, możliwość wykorzystania urządzenia do celów spożywczych oraz budowa układu przemieszczającego kubek z napojem między stacjami nalewania. Do budowy dystrybutora użyte zostały 3 rodzaje czujników: czujniki odległości, poziomu

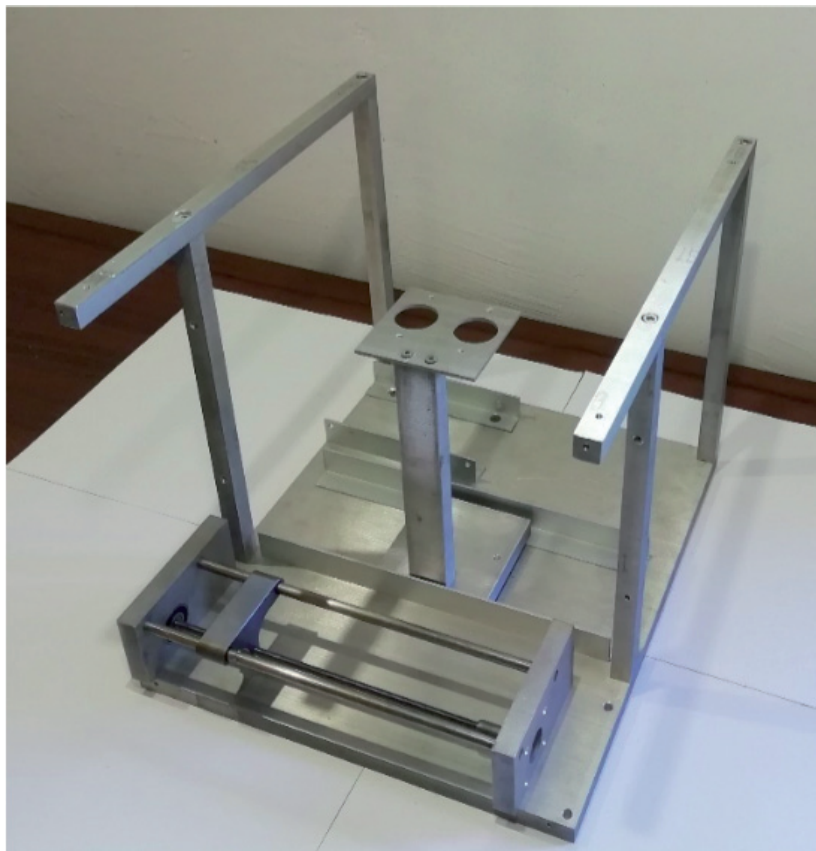
i temperatury. Możliwości ultradźwiękowych czujników zbliżeniowych zostały wykorzystane do wykrywania obecności suwaka modułu liniowego z kubkiem pod żadaną stacją nalewania napoju. Jeśli sensor nie wykryje kubka pod stanowiskiem, z którego ma zostać nalany napój, układ nie zezwoli na zadziałanie pomp i uchroni tym samym przed sytuacją dozowania poza podstawione naczynie. Czujniki poziomu i temperatury odpowiadają za informowanie użytkownika o poziomie i temperaturze dozowanej cieczy.



Rysunek 5.1: Dystrybutor do napojów wykonany w toku realizacji pracy dyplomowej

W projekcie zdecydowano się na użycie pomp perystaltycznych które w przeciwieństwie do standardowych rozwiązań zapewniają brak kontaktu cieczy z częściami mechanicznymi pompy. Było to podyktowane chęcią użycia urządzenia do celów spożywczych gdzie styczność dystrybuowanego napoju z czymkolwiek jest mocno niepożądana. Jeśli chodzi o konstrukcję dystrybutora to została ona oparta o płytę aluminiową grubości 15mm z której wykonano podstawę, stojak na pompy jak i słupki do których mocowane były przezroczyste ściany z textolitu. Dystrybutor wyposażony został w dwie stacje dozowania napojów między którymi transport odbywa się z wykorzystaniem modułu liniowego. Przekształcenie ruchu obrotowego na liniowy odbywa się poprzez obrót śruby zakończonej łożyskiem tocznym która przesuwa nieruchomą platformę (nadaje ruch jednostajny prostoliniowy) dzięki nagwintowanemu otworowi znajdującemu się w osi śruby. Za napęd odpowiada silnik krokowy mocowany do bocznej ściany modułu, a obszar pracy suwaka ograniczają wyłączniki krańcowe. Konstrukcja ta została zaprojektowana i wykonana całkowicie od podstaw i stanowi bardzo prosty acz autorski projekt rozwiązania tego

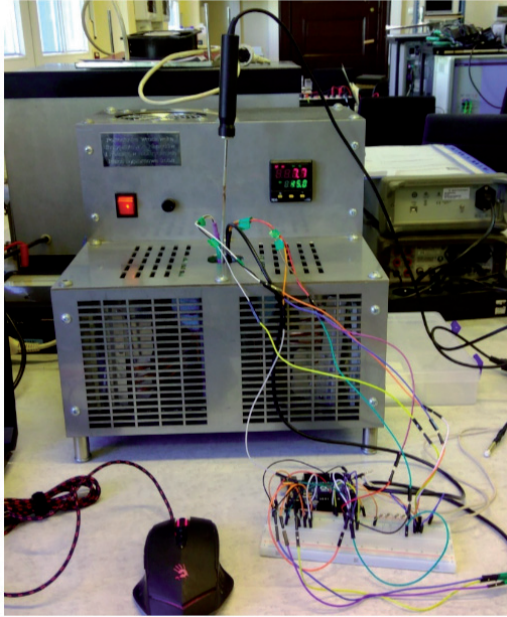
typu. Jest to jedna z najprostszych form napędu liniowego, gdzie zamiast śruby trapezowej lub kulowej wykorzystano zwykłą śrubę z trójkątnym gwintem metrycznym. Układ udowadnia tym samym, że w przypadku małych obciążeń i niewygórowanych oczekiwań możliwe jest wykorzystanie tego typu śrub z powodzeniem i uzyskiwanie zadowalających prędkości i dokładności przy sporej żywotności.



Rysunek 5.2: Widok ogólny konstrukcji dystrybutora wraz z modułem liniowym

3.

Ostatnia, trzecia część pracy poświęcona została badaniu czujników temperatury, dyskusji otrzymanych wyników, a także teoretycznemu wprowadzeniu w tą tematykę. Pod uwagę wzięto 3 czujniki: cyfrowy DC18B20, analogowy LM35DZ NS i platynowy Pt 500. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem Arduino Uno i oprzyrządowania udostępnionego dzięki uprzejmości kierownika Laboratorium Przetwarzania i Analizy Sygnałów Elektrycznych wydziału elektrycznego Politechniki wrocławskiej. Otrzymane wyniki udowodniły, że w zakresie 0-100°C sensor DS18B20 uzyskuje wartości najbardziej zbliżone do przyrządu wzorcowego. Tym samym został on wybrany do użycia w dystrybutorze do pomiaru temperatury cieczy.



Rysunek 5.3: Stanowisko do badania czujników temperatury w Laboratorium Przetwarzania i Analizy Sygnałów Elektrycznych

4.

W końcowej części pracy oprócz podsumowania znalazł się opis problemów napotkanych w toku realizacji projektu których z racji dość dużej złożoności urządzenia nie dało się całkowicie uniknąć.

Literatura

- [1] Evans M., Noble J., Hochenbaum J., Arduino w akcji poznaj możliwości Arduino, Helion, 2014
- [2] <http://home.agh.edu.pl/~bartus/index.php?> (dostęp grudzień 2019)
- [3] <http://www.cyfronika.com.pl/dok/kr1564a.pdf>
- [4] <http://www.silniki.pl/download/podstawowe>
- [5] <http://www-users.mat.umk.pl/~lielow/PTM/Wyklady/> (dostęp grudzień 2019)

Ocena efektywności energetycznej instalacji fotowoltaicznej dla gospodarstwa agroturystycznego

inż. Anna Ostrowska

Elektrotechnika

dr inż. Kazimierz Herlender

Katedra Energoelektryki

Niniejsza praca ma na celu ocenić efektywność energetyczną instalacji fotowoltaicznej zainstalowanej w przykładowym gospodarstwie agroturystycznym. Wybrany obiekt badań to odbiorca, który po poszerzeniu instalacji o fotowoltaikę może zostać prosumentem (według Ustawy z dnia 20 lutego 2015r. O OZE). Ocena polega na skonfrontowaniu efektywności energetycznej w temacie rozwiązań technicznych i analizy ekonomicznej dla konkretnego rodzaju odbiorcy – odbiorcy mający charakterystyczne dla usług zapotrzebowanie na energię, w skali doby i roku. Starano się wykazać, że odpowiednie zaplanowanie, realizacja techniczna oraz oszacowanie wielkości instalacji PV bezpośrednio wpływa na efektywność energetyczną instalacji.

Do wykonania analizy i oceny wykonano stanowisko pomiarowe do pomiaru zapotrzebowania energii oraz jakości energii elektrycznej. Pomiary wykonano w danym okresie dla pracy konwencjonalnej instalacji elektrycznej bez udziału odnawialnych źródeł energii, a następnie obserwowano produkcję energii przez instalację fotowoltaiczną i zużycie energii, kiedy to źródło odnawialne współpracowało z instalacją na zasadzie on-grid. Na podstawie tych danych przeprowadzono analizę i sformułowano wnioski.

Tematyka pracy lawiruje między odnawialnymi źródłami energii i audytami energetycznymi przedsiębiorstw. Jednak ze względu na charakter prowadzonej działalności gospodarczej, przepisy prawa nie wymagają przeprowadzania audytu energetycznego, dlatego tak ważne jest, by odbiorca energii dobrowolnie postarał się o spełnienie odpowiednich standardów. Uwzględniono również możliwość dofinansowania inwestycji, ze środków unijnych i ich wpływ na realizację inwestycji.

Przy popularnej aktualnie tematyce źródeł odnawialnych, inwestorzy nie są świadomi, jak odpowiednia realizacja i dopasowanie rodzaju źródła odnawialnego do krzywej zapotrzebowania są niezbędne do zwiększenia efektywności energetycznej. Instalacja fotowoltaiczna, ze względu na swoje źródło energii, czyli słońce, ma charakterystyczną dla siebie krzywą wytwarzania. Dla odbiorcy typu prosument, najkorzystniej jest wykorzystać jak najwięcej energii bezpośrednio podczas wytwarzania tej energii przez PV, czyli

powinno być jak największe bilansowanie energii. Z punktu widzenia KSE, jeżeli odborca w większym stopniu pokrywa swoje zapotrzebowanie na energię z instalacji fotowoltaicznej w czasie rzeczywistym, stanowi mniejsze obciążenia dla systemu. Jednak jeżeli instalacja wytwarza energię, a prosument nie jest w stanie wykorzystać na bieżąco energii słońca, to do systemu kierowana jest duża ilość energii, która musi być odpowiednio rozdysponowana przez system. Dla systemu wprowadzane małe moce stanowią problem, który jest szeroko omawiany w literaturze, w niniejszej pracy skupiono się jednak tylko na korzyściach prosumenta.

Analiza techniczna instalacji opiera się na problemach rozpoznanych w literaturze i skupia się na doborze urządzeń, usytuowania instalacji, otoczenia instalacji, aparatów i instalacji współtowarzyszących. Wyszczególnione aspekty oceny technicznej podane są poniżej. Dane rozwiązanie ocenia się jako pozytywne bądź negatywne.

- Generator PV:
 - sprawność,
 - tryb pracy (on-grid/off-grid),
 - sposób połączeń,
 - zabezpieczenie przed blokowaniem paneli /hot-spot'ami/ (zastosowanie diody bajpas).
- Usytuowanie generatora:
 - pionowe/poziome położenie paneli (wpływ zacielenia/śniegu na pracę),
 - wysokość nad połacią dachu-potrzeba wentylacji wokół paneli,
 - odległość od krawędzi dachu – zacielenie przez zalegający śnieg,
 - kąt nachylenia paneli, kierunek światła,
 - odchylenie paneli od powierzchni równoległej do połaci dachu.
- Atmosfera - stopień zanieczyszczenia powietrza,
- Otoczenie:
 - obecność obiektów kubaturowych tworzących cień,
 - obecność drzew,
 - wartość albedo otaczającego terenu.
- Falownik:
 - sprawność,
 - tryb działania (on-grid/off-grid) - zabezpieczenia,
 - zakres obciążenia,
 - wentylacja urządzenia.
- Automatyka licznika energii elektrycznej,

- Solar-tracker,
- Zastosowanie magazynu energii (bateria akumulatorów/sieć),
- Instalacja odgromowa.

Analizę ekonomiczną wykonano uwzględniając koszty realizacji inwestycji oraz koszty utrzymania jej w perspektywie 15 lat. Oszacowano inwestycję również dla hipotetycznej sytuacji, kiedy to moc instalacji fotowoltaicznej była by przeszacowana bądź niedoszacowana i jakie niesie to ze sobą skutki ekonomiczne. Dodatkowo sprawdzono jakie możliwości dla odbiorców sprowadza ustawa o OZE i warunki rozliczania się prosumenta z dostawcą energii. Dla poszczególnych przypadków obliczono czas zwrotu inwestycji. W kosztach wzięto pod uwagę koszty związane z obsługą konsumenta przez dostawcę energii oraz koszty utrzymania wynikające z utrzymania instalacji fotowoltaicznej w stanie użyteczności.

Z przeprowadzonych analiz płyną następujące wnioski:

Analiza techniczna pozwala stwierdzić, że na pomniejszenie produkcji PV wpływa brak systemu nadążnego. Znaczące straty może spowodować brak instalacji odgromowej.

Rozszerzenie definicji prosumenta o małych i średnich przedsiębiorców, pozwoliło inwestorowi skorzystać z korzystnych rozwiązań rozliczeń energii. Badana instalacja zwróci się w ciągu 8 lat. Bez dofinansowania okres zwrotu przedłużyłby się do 13 lat.

Prawidłowy dobór profilu produkcji do profilu odbioru, zwiększa zysk związany z inwestycją. Dobrana instalacja fotowoltaiczna powinna pokrywać zapotrzebowanie instalacji odbiorczej. Przewymiarowanie powoduje znaczne straty.

Literatura

- [1] F. Wolańczyk, Jak wykorzystywać darowaną energię. O kolektorach słonecznych i ogniach fotowoltaicznych, Krosno: Wydawnictwo KaBe, 2011.
- [2] J. Paska, Wytwarzanie rozproszonej energii elektrycznej i ciepła, I red., Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [3] „Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. Dz. U. 2015 poz. 478”.
- [4] E. Klugmann-Radziemska, Fotowoltaika w teorii i praktyce, Legionowo: Wydawnictwo BTC, 2010.
- [5] G. Wojciechowski i Ł. Grudzień, „Efektywność energetyczna i system zarządzania energią w przedsiębiorstwach produkcyjnych,” 2018.

Modulacja szerokości impulsów trójpoziomowego falownika napięcia

mgr inż. Damian Radek
Elektrotechnika

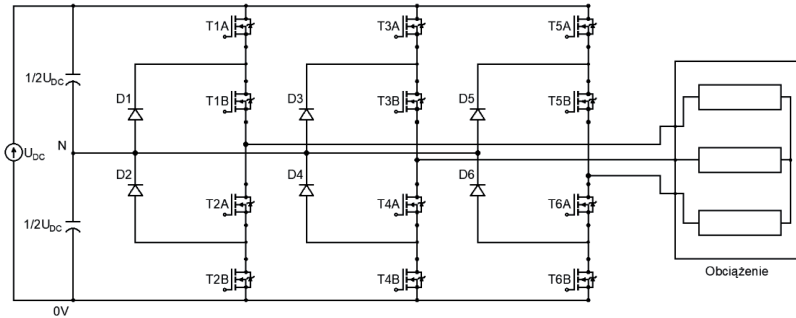
dr inż. Grzegorz Tarchała
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Celem pracy jest zaprojektowanie układu modulacji szerokości impulsów dla trójpoziomowego falownika napięcia. Zakres pracy zawiera analizę literaturową wybranych rozwiązań, stworzenie modelu symulacyjnego falownika trójpoziomowego w wybranym oprogramowaniu, pozwalającym na modelowanie układów energoelektronicznych, wykonanie projektu układu sterowania falownikiem oraz testy dla wybranych rodzajów obciążeń. Zakres pracy zawiera także analizę otrzymanych wyników.

Falownik sześciółącznikowy jest nazywany dwupoziomowym. Może on przełączać się pomiędzy dwoma wartościami napięcia. Alternatywą dla takiego stanu rzeczy są topologie falowników wielopoziomowych. Koncepcja wielopoziomowego falownika została wprowadzona w 1975 roku. Opiera się ona na układzie złożonym z kilku łączników półprzewodnikowych z kilkoma źródłami napięcia stałego. Jako liczbę poziomów należy rozumieć liczbę określonych wartości napięcia, możliwych do wygenerowania przez pojedynczą gałąź przekształtnika. Odpowiednia sekwencja łączy pozwala uzyskać żądany przebieg napięcia o schodkowatym kształcie fali, którego wartość składa się z szeregu poziomów. Liczba możliwych poziomów zależna jest od liczby źródeł napięcia stałego na wejściu układu. Jedną z najczęściej wykorzystywanych topologii jest falownik trójpoziomowy z diodami poziomującymi przedstawiony na rysunku 7.1.

Napięcie na każdym z kondensatorów jest zbliżone do połowy napięcia zasilającego. Napięcie na każdym z łączników, dzięki diodom poziomującym, nie przekracza połowy napięcia zasilającego. Dlatego, wykorzystując tranzystory o takiej samej charakterystyce, możliwe jest zasilenie odbiorników dwukrotnie wyższym napięciem niż możliwe by to było w tradycyjnej dwupoziomowej topologii. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że pomimo tego, że każdy z tranzystorów blokuje takie samo napięcie, dla diod sytuacja wygląda inaczej. Napięcie na diodach nie rozkłada się równomiernie a każdy ich poziom narażony jest na inne wartości napięcia. Przy dużej liczbie poziomów może zaistnieć potrzeba łączenia diod szeregowo, aby zwiększyć ich sumaryczne napięcie blokowania. Ogranicze-

nia te spowodowały, że falownik napięcia z diodami poziomującymi wykorzystywany jest w przemyśle głównie w wersji trójpoziomowej.



Rysunek 7.1: Schemat ideowy trójpoziomowego falownika z diodami poziomującymi

Aby uniknąć zwarć szyny zasilającej wzdłuż gałęzi fazowych falownika, zezwala się na pracę każdej z gałęzi tylko w trzech możliwych kombinacjach stanu łączników, przedstawionych w tabeli 2.1.1. Tabela ta przedstawia zależność łączników które powinny zostać załączone, aby uzyskać przedstawione poziomy napięć pojedynczej gałęzi falownika. Stan „1” oznacza załączenie łącznika, podczas gdy stan „0” oznacza, że łącznik jest wyłączony. Przedstawione napięcia są odniesione do dolnej szyny zasilającej falownika. Trzy różne stany dają efekt w postaci trzech różnych poziomów napięcia, jakie możliwe są do uzyskania. Jak można zauważyć, każdy z łączników jest sparowany z innym, który zawsze ma stan przeciwny. Takimi łącznikami są pary T1A-T2A oraz T1B-T2B. Analogicznie jest dla pozostałych dwóch gałęzi.

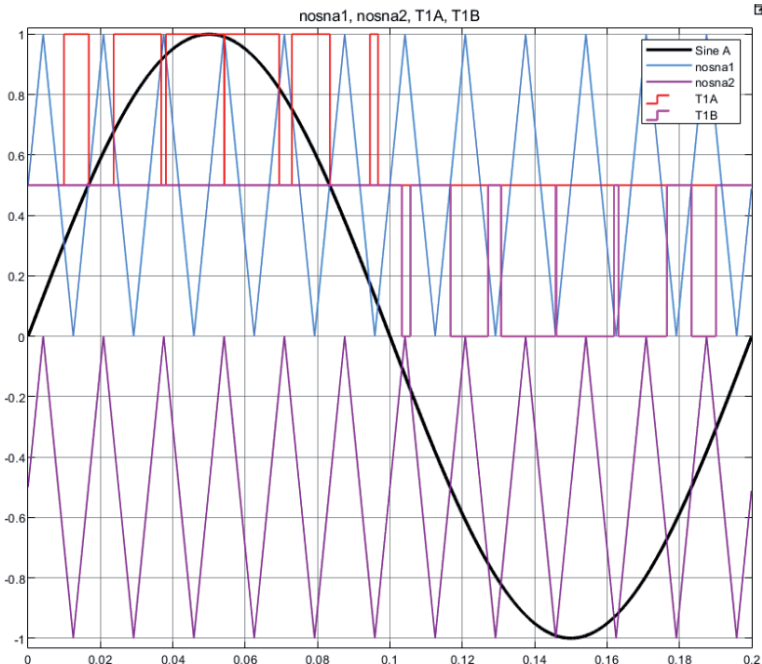
Tabela 7.1: Poziomy napięć pomiędzy złączem fazy A trójpoziomowego falownika z diodami poziomującymi a ujemnym zaciskiem szyny DC oraz odpowiadające im stany łączników

$U_A - U_B$	Stany łączników			
	T1A	T1B	T1C	T1D
U	1	1	0	0
$\frac{1}{2}U$	0	1	1	0
0	0	0	1	1

Niewątpliwą zaletą przedstawionej topologii jest fakt, że wszystkie fazy posiadają wspólny punkt neutralny oraz dzielą to samo źródło zasilania. Jest to bardzo praktyczne z punktu widzenia zastosowania jako przekształtnik dwukierunkowy (ang. Back-To-Back). Inną zaletą jest stosunkowo wysoka sprawność przy modulacji z niską częstotliwością przełączeń. Wadą tej topologii jest fakt, że napięcie na kondensatorach może wymagać dodatkowej kontroli gdy układ jest niesymetrycznie obciążony, lub gdy kondensatory mają zbyt niską pojemność. W zbudowanym układzie zastosowano sinusoidalną modulację szerokości impulsów. Głównym celem tej modulacji jest uzyskanie odpowiednich sygnałów sterujących tranzystorami, pozwalających na wygenerowanie sygnału wyjściowego odpowiadającego fali modulującej. W topologii dwupoziomowej fala modulująca jest po-

równywana z trójkątną lub piłokształtną falą nośną o dużej częstotliwości. W zależności od tego, czy w danym momencie fala modulująca ma większą wartość, czy też mniejszą od fali nośnej, odpowiednie sygnały wystawiane są na odpowiadające im łączniki. Technika ta została rozszerzona do falowników wielopoziomowych. W trójpoziomowym falowniku zamiast jednej fali nośnej jak to ma miejsce w topologii dwupoziomowej, stosuje się dwie. Pierwsza znajduje się w strefie górnej części sinusoidy, druga zaś w strefie dolnej. Ilustruje to rysunek 7.2. Czarnym kolorem została przedstawiona fala modulująca, fale nośne reprezentowane są kolorami niebieskim oraz fioletowym. Kolorem czerwonym oraz różowym przedstawiono napięcia sterujące tranzystorami T1A oraz T1B.

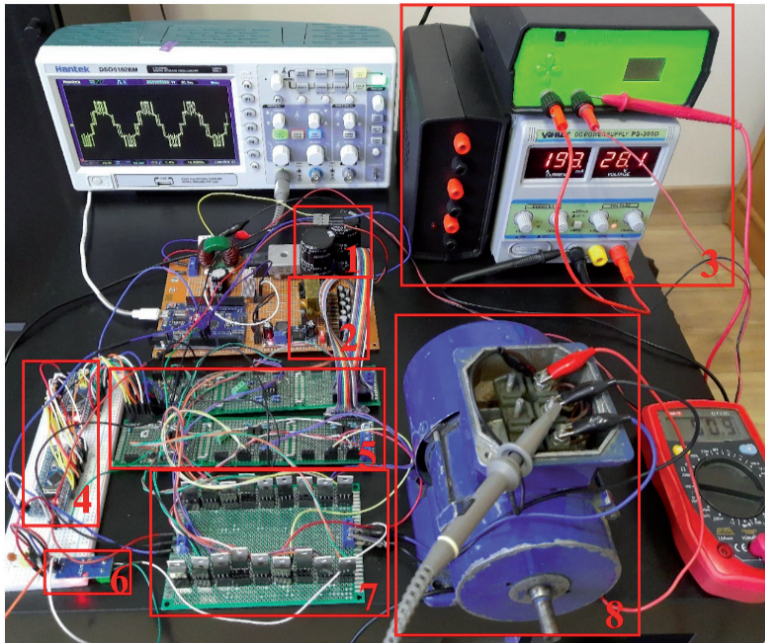
Częstotliwość fal modulujących oraz nośnych to odpowiednio 5 Hz oraz 60 Hz. Tak niska wartość częstotliwości fal modulujących wynika z konieczności uzyskania odpowiedniej wartości momentu elektromagnetycznego zastosowanego silnika będącego obciążeniem, gdyż układ jest zasilany obniżonym napięciem o wartości 80 V. Wartość momentu zmniejsza się wraz z obniżaniem napięcia. Obniżenie częstotliwości pozwala skompensować wpływ obniżonego napięcia. Niska wartość częstotliwości fal nośnych wynika z ograniczeń mikrokontrolera użytego w zbudowanym układzie badawczym. Aby uzyskać lepsze wyniki, zamiast mikrokontrolera należy zastosować układ FPGA (ang. Field-Programmable Gate Array) lub specjalistyczny procesor sygnałowy. Badania symulacyjne potwierdziły, że zwiększenie częstotliwości fal nośnych pozwala uzyskać przebiegi prądu silnika o zmniejszonej zawartości wyższych harmonicznych.



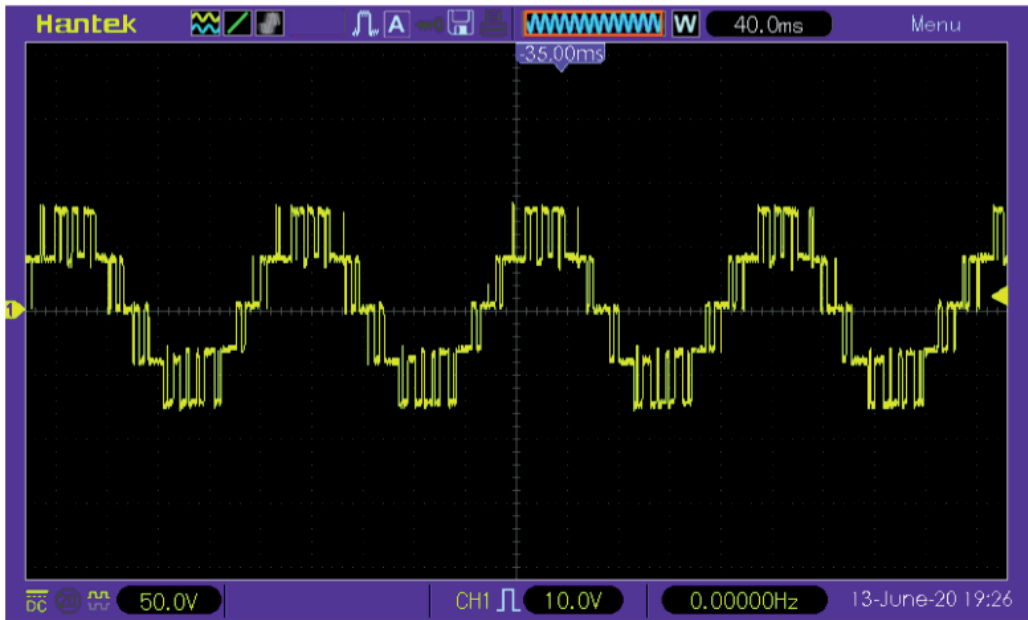
Rysunek 7.2: Przebiegi fali modulującej A, fal nośnych oraz stany T1A oraz T1B w symulacji zaprojektowanej w środowisku MATLAB Simulink

Zbudowany układ przedstawiono na rysunku 7.3. Został on zrealizowany na prototy-

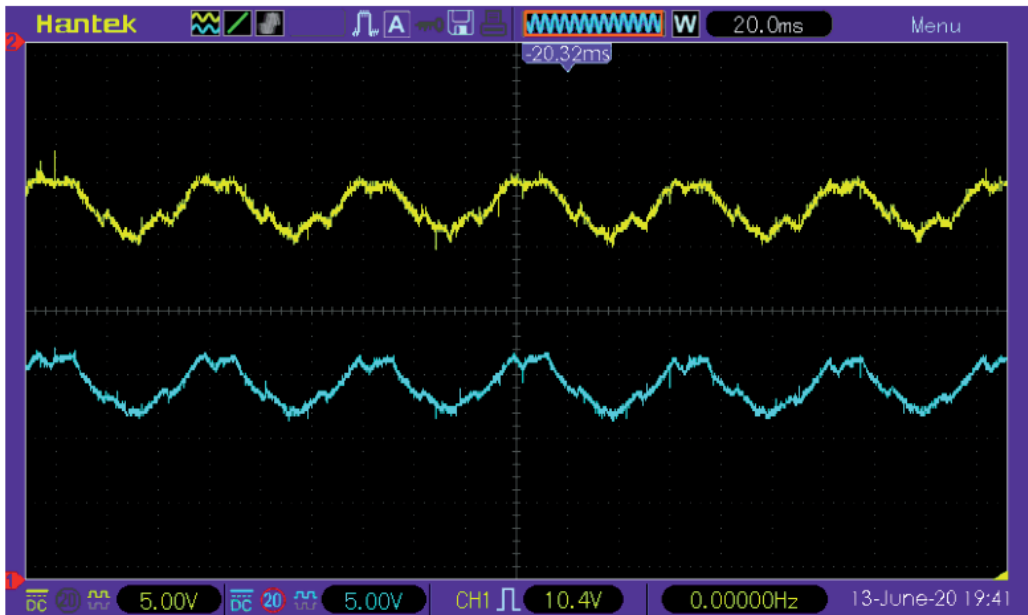
powych płytkach PCB. Mikrokontrolery zostały umieszczone na prototypowej płytce stykowej. Numerem jeden oznaczono kondensatory dzielące napięcie wejściowe, znajdujące się na płycie PCB modułu zasilającego. Moduł zasilający w celu umożliwienia w przyszłości podłączenia pod napięcie sieciowe, dodatkowo wyposażono w dławik drutowy, mostek prostowniczy oraz przełącznik sterujący. Numerem dwa oznaczono rdzeń transformatora, na który nawinięto czternaście separowanych uzwojeń. Jedno pracuje jako uzwojenie pierwotne, dwanaście z nich służy do zasilania sterowników bramek tranzystorów, ostatnie uzwojenie przewidziano do zasilania mikrokontrolerów. Numerem trzy oznaczono zestaw zasilaczy, pozwalających osiągnąć wymagane napięcie po połączeniu ich szeregowo. Numerem cztery oznaczono mikrokontrolery odpowiedzialne za modulację oraz za dodanie odpowiednich czasów martwych. Numerem pięć oznaczono moduł sterowników tranzystorów. Numerem sześć oznaczono moduł pomiaru prądu ACS712 o czułości 185 mV/A. Numerem siedem oznaczono moduł wyjściowy falownika, składający się z dwunastu tranzystorów IRF740 oraz sześciu diod MUR860. Numerem osiem oznaczono silnik asynchroniczny pełniący rolę obciążenia. Wyniki uzyskane podczas badań eksperymentalnych potwierdziły wykonane na potrzeby pracy badania symulacyjne. Rysunek 7.5 przedstawia układ pod obciążeniem w postaci silnika asynchronicznego. Pobierany prąd powoduje zmiany napięcia na kondensatorach wejściowych, co przedstawiono na rysunku 6. Zmiana napięcia na kondensatorach wejściowych powoduje zniekształcenie przebiegów wyjściowych. Rozwiązaniem tej sytuacji może być wykorzystanie zamiast kondensatorów, dwóch źródeł napięcia. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie układu stabilizującego napięcie na kondensatorach.



Rysunek 7.3: Zbudowany układ falownika trójpoziomowego z diodami poziomującymi



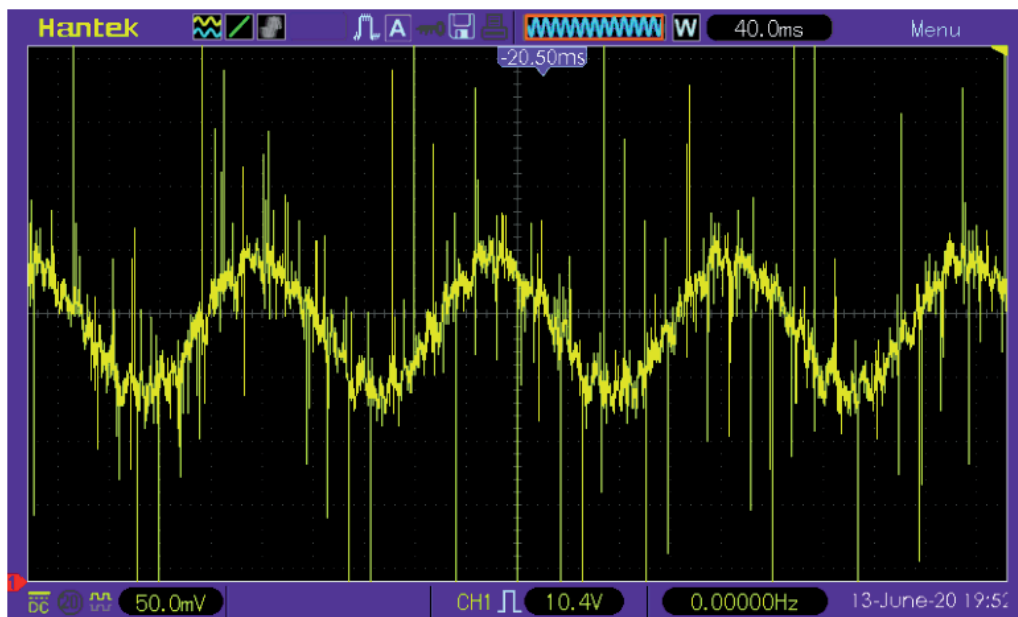
Rysunek 7.4: Przebieg napięcia pomiędzy fazami A oraz B badanego układu z obciążeniem w postaci silnika asynchronicznego



Rysunek 7.5: Przebieg napięcia na kondensatorach wejściowych pod obciążeniem w postaci silnika asynchronicznego

Rysunek 7.6 przedstawia przebieg prądu fazy A przy obciążeniu silnikiem asynchronicznym. Zakłócenia widoczne na przebiegu są spowodowane dużym zakresem wykorzy-

stanego czujnika prądu oraz stosunkowo niską czułością wynoszącą 185 mV/A.



Rysunek 7.6: Przebieg prądu w fazie A badanego układu z obciążeniem w postaci silnika asynchronicznego

Celem autora pracy było pogłębienie wiedzy na temat falowników napięcia oraz ogólnopojętej energoelektroniki. Zbudowano działający, funkcjonalny układ przy minimalnym udziale gotowych komercyjnych rozwiązań. Poruszono i wyjaśniono wiele interesujących zagadnień, które to nie zostały zawarte w niniejszym streszczeniu.

Literatura

- [1] M. H. Rashid. Power Electronics Handbook. Elsevier, 2011.
- [2] A. Kempki, R. Smoleński. Prądy łożyskowe w układach napędowych z falownikami PWM. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006
- [3] T. Biskup, H. Kołodziej, D. Paluszczak, J. Sontowski, J. Michalak, M. Zygmanski. Przekształtnik 3-poziomowy NPC 3,3 kV do integracji z silnikiem klatkowym. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2015 (106)
- [4] R. Stala. Natural capacitor voltage balance in multilevel flying capacitor converters. A review of research achievements. Power electronics and drives, Vol. 1(36), No. 2, 2016
- [5] Q. M. Attique, Y. Li, K. Wang. A Survey on Space-Vector Pulse Width Modulation for Multilevel Inverters. CPSS Transactions on power electronics and applications, vol. 2, no.3, september 2017

Opracowanie układu automatycznego przykręcania śrub z wykorzystaniem sterownika PLC i serwonapędów ACOPOS

mgr inż. Tomasz Giełzak
Automatyka i Robotyka

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

Celem pracy było opracowanie koncepcji i wykonanie modelu układu pozwalającego na zautomatyzowanie dokręcania śrub z zadaniem momentem elektromagnetycznym. W ramach pracy dyplomowej powstało urządzenie do automatycznego przykręcania śrub z zadaniem momentem elektromagnetycznym. Składa się ono z sterownika PLC oraz dwóch serwonapędów ACOPOS firmy BR. Urządzenie to ma symulować proces zakręcania śrub pokrywy. Będzie ono uzupełniać ofertę edukacyjną Laboratorium Automatyki Przemysłowej.

Głównym celem pracy było sprawdzenie, czy serwonapędy PMSM serii ACOPOS firmy BR umożliwiają przykręcanie śrub z zadaniem momentem. Aby zapewnić możliwość zbadania zachowania napędów, należało opracować oraz wykonać model urządzenia zdolnego do automatycznego dokręcania śrub z zadaniem momentem elektromagnetycznym.

Projekt urządzenia poprzedziły przygotowania teoretyczne. Przegląd literatury, dotyczącej silników elektrycznych, potwierdził, że optymalnym wyborem będą napędy z magnesami trwałymi cechujące się bardzo dobrymi właściwościami dynamicznymi oraz możliwością precyzyjnego sterowania. Kolejnym etapem pracy było wykorzystanie w projekcie istniejącego stanowiska laboratoryjnego. Aby zaadoptować do przyszłego urządzenia istniejące serwonapędy, należało użyć indywidualnie zaprojektowanych elementów. Umożliwił to program Inventor, pozwalający na modelowanie elementów 3D. Tak wygenerowane modele zostały wydrukowane za pomocą drukarki 3D i złożone w jedno urządzenie do zautomatyzowanego przykręcania śrub z zadaniem momentem. Założenia projektowe dotyczące budowy modelu były dostosowane do wspierania Uczelnianego Laboratorium Automatyki Przemysłowej. Z tego względu urządzenie cechuje się kompaktowymi wymiarami oraz prostą zasadą działania.

Do sterowania napędami użyto sterownika serwonapędów ACOPOS MICRO 100D, który działał pod kontrolą sterownika PLC CP3586 rodziny X20. W pracy wykorzystano

także ekran HMI, który służył jako panel sterowniczy do zarządzania pracą urządzenia.

Do zaprogramowania urządzenia posłużyło oprogramowanie Automation Studio – autorskie rozwiązanie firmy BR. Narzędzie to pozwala na obsługę całego cyklu projektowego: konfiguracji sprzętowej, programowania, symulacji, wdrażania, serwisu i konserwacji. Na szczególną uwagę zasługuje moduł symulacji pozwalający nie tylko na wirtualne uruchomienie programów, ale umożliwiający także wizualizację wszystkich komponentów automatyki, będących w ofercie firmy BR. Ważną częścią oprogramowania jest bardzo rozbudowany dział pomocy (ang. Help), zawierający nie tylko zasady funkcjonowania poszczególnych elementów, ale także dokumentację techniczną wszystkich produkowanych urządzeń oraz przykładowe programy.

Sterowanie serwonapędami z poziomu sterownika PLC jest możliwe dzięki standardowi Motion Control. Sterowanie ruchem jest bardzo ważnym zagadnieniem współczesnej automatyki. Aktualne projekty urządzeń zakładają bardzo wysokie dokładności, nieróżniące się znacząco od systemów sterowania CNC, dlatego producenci systemów napędowych zapewniają pełną ofertę produktową wraz z narzędziami inżynierskimi dedykowanymi do systemów napędowych. Bardzo często oprogramowanie takie zawiera szeroką gamę komponentów do szybkiego konfigurowania napędów robotyki, CNC oraz aplikacji jednoosiowych. Podstawowe funkcje są już zaimplementowane w systemie, a od użytkownika wymaga się jedynie dostosowanie ich do danej aplikacji. Dla urządzenia do automatycznego przykręcania śrub z zadaniem momentem wykorzystano standardowe biblioteki Motion Control, znajdujące się w oprogramowaniu Automation Studio, a w ramach porównania użyto dwóch języków: LD oraz ST.

Przed przystąpieniem do badań należało przeprowadzić automatyczną optymalizację serwonapędów, aby zapobiec wzbudzeniu się serwomotorów, a tym samym niestabilności. Badania eksperymentalne potwierdziły możliwość zastosowania serwonapędów do zakręcania śrub z zadaniem momentem elektromagnetycznym, jednak ujawniły także niestabilność serwonapędu podczas sterowania ekstremalnego. Można było tego uniknąć, próbując ręcznie dostosować wartości filtrów w menu optymalizacji. Udowadnia to, jak ważnym zadaniem jest dobór parametrów do danej aplikacji.

Symulacja przykręcania śrub przez urządzenie ma na celu pokazanie studentom możliwości zaawansowanych technik sterowania Motion Control. Ukazuje to jak dużą wagę w przemyśle odgrywają nowoczesne napędy z magnesami trwałymi oraz jak ważny jest odpowiedni dobór elementów do danej aplikacji.

Wnioski

Postępująca automatyzacja daje producentom możliwość unowocześniania linii produkcyjnych poprzez zastępowanie pracy ludzkiej pracą maszyn. To założenie spełnia urządzenie do automatycznego przykręcania śrub z zadaniem momentem. Dzięki zastosowaniu takiego narzędzia produkty zyskują na powtarzalności oraz wydajności produkcji.

Głównym celem pracy było sprawdzenie, czy serwonapędy PMSM serii ACOPOS firmy BR umożliwiają przykręcanie śrub z zadaniem momentem. Projekt urządzenia poprzedziły przygotowania teoretyczne. Przegląd literatury dotyczącej silników elektrycznych, umożliwił dobór optymalnego typu napędu pod względem zastosowań urządzenia. Dodatkowy przegląd oferty firmy BR potwierdził, że zastosowanie sterownika PLC w połączeniu z

biblioteką Motion Control, zapewni prawidłową pracę układu.

Założenia projektowe dotyczące budowy modelu były dostosowane do wspierania Uczelnianego Laboratorium Automatyki Przemysłowej. Z tego względu urządzenie cechuje się kompaktowymi wymiarami oraz prostą zasadą działania.

Literatura

- [1] Glinka T. Maszyny elektryczne i transformatory, WNT Warszawa 2018;
- [2] Glinka T. Maszyny elektryczne wzbudzane magnesami trwałymi, WNT Warszawa 2018;
- [3] Pawlak M., Sterowniki Programowalne, e-skrypt, Wyd. Politechnika Wrocławska, Wrocław 2010, dostępny w Dolnośląskiej Bibliotece Cyfrowej;
- [4] www.br-automation.com/pl/produkty/motion-control/servo-motors/
- [5] BR Help Explorer – Automation Help 4.5.2.10.

Mikroprocesorowy zasilacz laboratoryjny prądu przemiennego

mgr inż. Piotr Kurowski
Elektrotechnika

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

Celem pracy jest zaprojektowanie oraz wykonanie trójfazowego źródła napięcia przemiennego, sterowanego za pomocą mikrokontrolera. Regulacja napięcia odbywać się będzie z wykorzystaniem autotransformatora laboratoryjnego. Praca została podzielona na dwie zasadnicze części. W początkowych rozdziałach omówione zostaną zagadnienia teoretyczne związane z regulacją napięcia przemiennego, jego przetwarzaniem na postać cyfrową, a także układami pomiarowymi parametrów energii elektrycznej. W dalszej części pracy zaprezentowany zostanie projekt mikroprocesorowego zasilacza laboratoryjnego prądu przemiennego, zaczynając od aspektów mechanicznych, poprzez układy elektroniczne oraz oprogramowanie aż do finalnego produktu. W końcowym rozdziale omówione zostaną przeprowadzone testy laboratoryjne poszczególnych elementów wchodzących w skład urządzenia.

1. Wstęp

Napięcie przemiennie jest powszechnie stosowane we wszystkich gałęziach życia codziennego oraz przemysłu. Zdecydowana większość urządzeń, nawet tych, które ostatecznie wykorzystują do pracy napięcie stałe jest zasilana napięciem przemiennym. Tak duża powszechność powoduje, że konieczne staje się badanie wpływu parametrów energii elektrycznej dostarczanej do odbiorników na ich pracę oraz tego w jaki sposób oddziałują one na sieć zasilającą.

Istotnym aspektem w tego rodzaju badaniach jest możliwość regulowania napięcia zasilającego i obserwacji wpływu jego wartości na zachowanie odbiornika. W laboratoriach w tym celu wykorzystuje się najczęściej autotransformatory sterowane manualnie w połączeniu z dodatkowymi miernikami oraz analizatorami parametrów energii. Obecnie na rynku trudno jest znaleźć urządzenia, które umożliwiają sterowanie wyjściowym napięciem przemiennym w sposób automatyczny, w zamkniętym układzie regulacji, a jednocześnie pozwalają na analizę podstawowych parametrów energii elektrycznej.

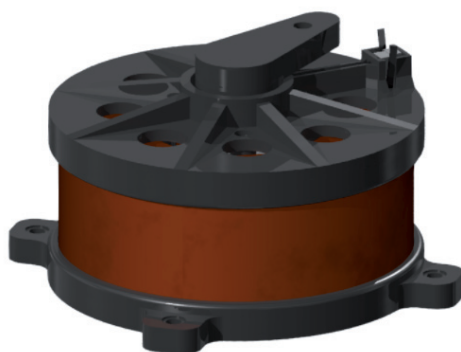
Ten fakt zainspirował autora pracy do próby stworzenia uniwersalnego, mobilnego, 3- fazowego stanowiska zasilającego – pomiarowego. Brak podobnych urządzeń spowodował, że wiele elementów takich jak obudowa czy układ regulacji napięcia, musiały zostać zaprojektowane i wykonane od podstaw. Wykorzystane w tym celu zostały nowoczesne, inżynierskie narzędzia projektowe w połączeniu z technologiami pozwalającymi na tworzenie nieseryjnych elementów. Należy tutaj przede wszystkim wymienić technologię druku 3D oraz numerycznie sterowane obrabiarki CNC.



Rysunek 9.1: Widok wykonanego urządzenia

2. Regulacja napięcia przemiennego

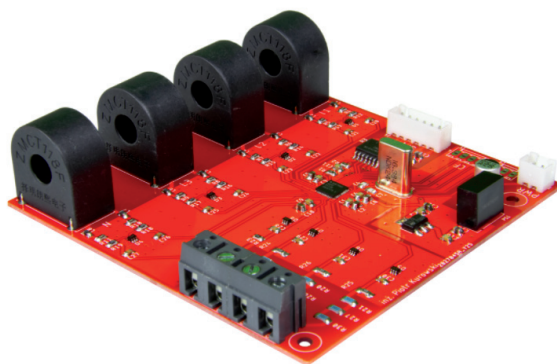
Podstawowym elementem urządzenia jest układ pozwalający na regulację wartości napięcia przemiennego. W tej roli wykorzystano autotransformator wraz z wykonanym w technologii druku 3D mechanizmem, umożliwiającym zmianę położenia szczotek autotransformatorów z wykorzystaniem napędu elektromechanicznego. W roli napędu wybrano silnik DC z przekładnią, który z punktu widzenia układu sterującego umożliwia prostą regulację prędkości oraz kierunku obrotowego.



Rysunek 9.2: Projekt mechanizmu regulacji położenia szczotek autotransformatorów

3. Część elektroniczna urządzenia

Jednym z najważniejszych i jednocześnie najbardziej rozbudowanym elementem urządzenia jest zespół układów elektronicznych sterujących pracą całego urządzenia. Układy te zostały wykonane w postaci kilku płytek PCB pełniących poszczególne funkcje.



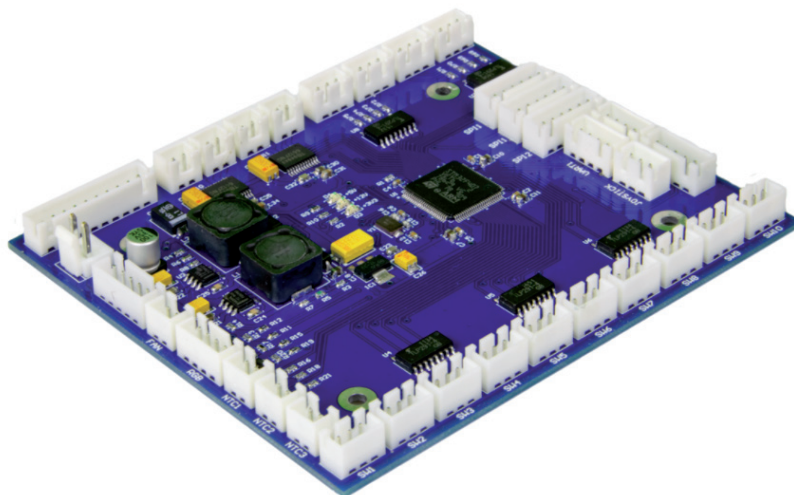
Rysunek 9.3: Moduł pomiarowy w oparciu o układ scalony ADE7880

Jednym z założeń projektowych było umożliwienie pomiaru parametrów energii elektrycznej. W tym celu zaprojektowano moduł pomiarowy w oparciu o układ ADE7880 firmy Analog Devices. Jest to układ specjalizowany, przeznaczony do pomiaru parametrów energii elektrycznej w sieci 3-fazowej. Umożliwia on pomiar napięć, prądów, mocy, współczynników THD a także analizę zawartości poszczególnych harmonicznych w sygnałach napięciowych oraz prądowych. Widok wykonanej płytki PCB przedstawiono na rysunku 9.3.

Ze względu na specyficzny charakter układu, w którym masa musi być bezpośrednio połączona z przewodem neutralnym sieci, konieczne było zastosowanie rozwiązania zapewniającego galwaniczne oddzielenie masy tego modułu od reszty urządzenia. Zadanie to zrealizowano w oparciu o przetwornicę izolowaną. Z podobnych przyczyn konieczne było odseparowanie komunikacji. Wykorzystano tutaj specjalizowany układ scalony

ADUM1401, który zapewnia izolację na poziomie 2,5 kV, jednocześnie umożliwiając komunikację z prędkościami dochodzącymi do 90 Mbps.

Główna płytką sterująca oparta jest o mikrokontroler STM32F407VET6. Jej zadaniem jest zbieranie informacji z wszelkiego rodzaju układów wejściowych tj. modułów pomiarowych, przycisków, wyświetlacza, czujników temperatury. Na podstawie tych danych układ podejmuje decyzje o wysterowaniu poszczególnych wyjść. Sterowanie pracą silników regulujących położenie szczotek autotransformatorów odbywa się z wykorzystaniem scalonych mostków typu H.



Rysunek 9.4: Płytką główną

Oprócz wymienianych modułów elektronicznych w urządzeniu znajduje się również układ softstart umożliwiający ograniczenie prądu rozruchowego autotransformatorów oraz układ optoizolacji sygnałów analogowych, umożliwiający w bezpieczny sposób podłączenie oscyloskopu do podglądu przebiegów napięcia oraz prądu.

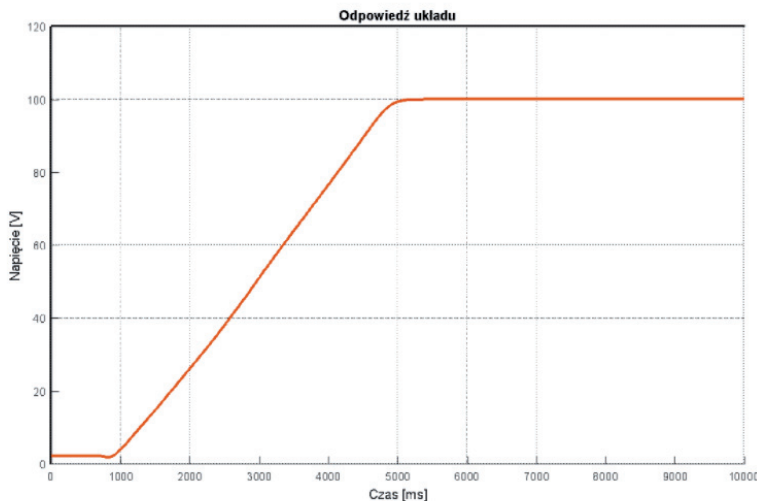
4. Sterowanie pracą urządzenia

Komponentem służącym do sterowania pracą urządzenia oraz zapewniającym możliwość podglądu wartości zmierzonych przez układy pomiarowe jest 7-calowy wyświetlacz dotykowy. Dopełnienie funkcjonalności wyświetlacza stanowi enkoder obrotowy, za pomocą którego w precyzyjny sposób można sterować wybranymi parametrami. Załączenie poszczególnych wyjść oraz inne najistotniejsze funkcje urządzenia sterowane są z poziomu fizycznych przycisków, umieszczonych poniżej wyświetlacza. W górnej części panelu sterującego znajduje się przycisk bezpieczeństwa, umożliwiający odłączenie zasilania urządzenia w stanach wymagających szybkiego, niezawodnego wyłączenia napięcia.



Rysunek 9.5: Widok pulpitu sterowniczego

Ustawianie zadanej wartości napięcia można również wykonać z wykorzystaniem joysticka. Regulacja może odbywać się w trybie ciągłym lub w trybie wymagającym zatwierdzenia ustawionej wartości przez użytkownika. Poniżej przedstawiono rzeczywistą odpowiedź układu regulacji na zadanie wyjściowej wartości napięcia na poziomie 100 V.



Rysunek 9.6: Odpowiedź układu na skok zadanej wartości napięcia do poziomu 100 V

Możliwość regulacji trójfazowego napięcia przemiennego w sposób automatyczny stwarza duże możliwości zastosowań w wielu badaniach laboratoryjnych. W połączeniu ze zintegrowanym pomiarem parametrów energii elektrycznej urządzenie może stanowić kompleksowe rozwiązanie do zastosowań laboratoryjnych, a dzięki mobilnej konstrukcji również w sytuacjach wymagających przenośnego urządzenia zasilającego - pomiarowego.

5. Podsumowanie

Głównym celem pracy było zaprojektowanie oraz wykonanie mikroprocesorowego zasilacza laboratoryjnego prądu przemiennego. Zadanie to wymagało przanalizowania wielu aspektów teoretycznych, takich jak sposoby regulacji napięcia przemiennego, metody przetwarzania napięć i prądów, a także zapoznania się z układami służącymi do cyfrowych pomiarów parametrów energii eklektycznej. Przeprowadzona analiza pozwoliła na wybór poprawnych i optymalnych rozwiązań w fazie projektowej.

W części praktycznej pracy wykonano mikroprocesorowy zasilacz laboratoryjny prądu przemiennego. Spełnia ono wszystkie założenia projektowe. Stworzenie tego projektu wymagało szerokiej wiedzy z różnych dziedzin, zaczynając od aspektów konstrukcyjnych oraz mechanicznych, poprzez rozmaite układy elektroniczne, skończywszy na programowaniu mikrokontrolerów. W pracy zastosowano wiele autorskich rozwiązań m.in. wykonany przy pomocy drukarki 3D mechanizm odpowiedzialny za kontrolę położenia szczotek autotransformatorów. Istotnym elementem pracy była część elektroniczna, w ramach której wykonano kilka płytek PCB, pełniących kluczowe role w funkcjonowaniu urządzenia.

Przeprowadzone testy laboratoryjne umożliwiły sprawdzenie wybranych elementów wchodzących w skład urządzenia i zweryfikowanie założeń teoretycznych. W większości wykazały one, że poszczególne układy są zaprojektowane i wykonane w prawidłowy sposób. Wyjątek stanowi tutaj układ zasilania modułu optoizolacji sygnałów analogowych, który jak się okazało posiadał niewystarczającą filtrację napięcia, przez co w sygnale wyjściowym pojawiał się znaczny poziom szumów.

Możliwość regulacji trójfazowego napięcia przemiennego w sposób automatyczny stwarza duże możliwości zastosowań w wielu badaniach laboratoryjnych. W połączeniu ze zintegrowanym pomiarem parametrów energii eklektycznej urządzenie może stanowić kompleksowe rozwiązanie do zastosowań laboratoryjnych, a dzięki mobilnej konstrukcji również w innych sytuacjach wymagających przenośnego urządzenia zasilającego - pomiarowego.

Literatura

- [1] Brzozowski, B. (2015). Badanie przetworników AC różnych typów - ćwiczenia laboratoryjne.
- [2] Czabanowski, R. (2010). Sensory i systemy pomiarowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [3] Ginter, M. (2011). Światłowodowy czujnik polarymetryczny do pomiaru prądu. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 274-276.
- [4] Lisowiec, A. (2014). Wpływ konstrukcji cewki Rogowskiego w technologii PCB na dokładność pomiaru prądu.
- [5] Szkółka, S. (2014). Cewka Rogowskiego jako nowoczesny element zabezpieczeń, układów sterowania i monitoringu. Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, 18-29.

Część III

Wydział Podstawowych
Problemów Techniki

Projekt mioelektrycznej protezy dłoni

inż. Katarzyna Sokół

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Andrzej Grobelny

Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki

Praca inżynierska dotyczy tematyki protezowania kończyny górnej. Opracowano projekt i budowę protezy dłoni sterowanej potencjałami bioelektrycznymi mięśni i nerwów. Zakres pracy obejmuje wykonanie konstrukcji mechanicznej protezy oraz opracowanie koncepcji sterowania. Podczas pracy nad projektem wykorzystano technologie addytywne, a dokładnie technikę druku FDM (Fused Deposition Modelling). Model 3D protezy dłoni został pobrany ze strony internetowej “InMoov - Open source 3D printed life size robot” [1]. Niezwykle ważnym elementem pracy nad projektem jest dobór odpowiedniego układu sterowania. Zabieg ten uwzględnia wybór czujnika, serwo mechanizmów, mikrokontrolera i zasilania układu oraz opracowanie algorytmu działania protezy. Dodatkowym elementem projektu jest zaprojektowanie oraz wykonanie czujnika do pomiaru aktywności mięśni (czujnika EMG).

Podczas realizacji pracy ogromną uwagę przywiązano zarówno do wdrożenia, jak i testowania samego układu. Wynikiem podjętych działań jest urządzenie kontrolowane za pomocą skurczów mięśni (EMG) wykrytych z elektrod umieszczonych na powierzchni skóry użytkownika. Sterowanie opracowaną dłonią jest możliwie jak najbardziej intuicyjne, proste dla osoby po urazie, a zarazem bezawaryjne. Temat konstrukcji protez dłoni sterowanych EMG jest zagadnieniem stosunkowo nowym. Z racji faktu, iż publikacje oraz książki zawierają w głównej mierze informacje teoretyczne, trywialne i wielokrotnie powielane, w pracy zamieszczono cenne sugestie i uwagi pod kątem praktycznym, których nie udało się znaleźć w ogólnodostępnych źródłach. Powstały one w wyniku w niespełna rocznych prac nad protezą.

Dłonie są najcenniejszym narzędziem pracy ludzi, jak również jednym z ośrodków informacji z otoczenia. Umożliwiają chwytanie, manipulowanie przedmiotami oraz wykonywanie czynności życia codziennego (z ang. Activities of Daily Living – ADLs) [2]. Utrata ręki jest nie tylko przyczyną utraty sprawności ruchowej, ale także powodem szoku psychicznego związanego z depresją i odczuwaniem bólu fantomowego. To traumatyczne wydarzenie pozostawia dramatyczne konsekwencje w życiu codziennym pacjenta [3].

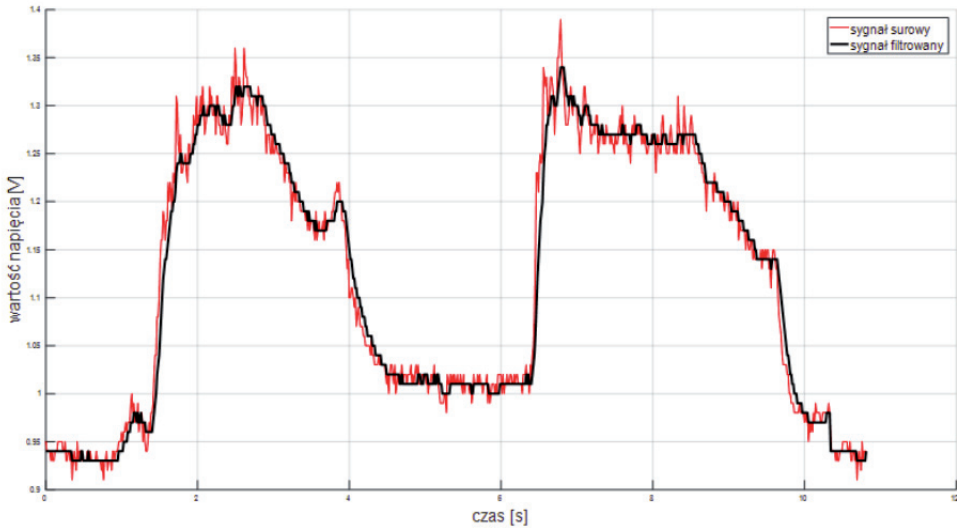
Rozwój dziedzin nauki z pogranicza medycyny i techniki, takich jak inżynieria biomedyczna, stanowi siłę napędową innowacyjnych metod leczniczych. Dzięki temu utrata kończyny nie musi świadczyć o wyroku kalectwa. Efektem ostatnich badań jest rozwój protetycznych rąk w znacznym stopniu biomimetycznych i zręcznych. Projekt mioelektrycznej protezy dłoni ma na celu przywrócenie w jak największym stopniu funkcjonalności kończyny oraz zapewnienie użytkownikowi intuicyjnej kontroli. Podstawową koniecznością jest również dopasowanie wymiarów i masy protezy do naturalnej dłoni użytkownika. Równie ważnymi założeniami konstrukcyjnymi są: trwałość, wydajność oraz niski koszt urządzenia. Obniżenie kosztów wytworzenia protezy umożliwiłoby poprawę jakości życia osób niepełnosprawnych, których nie stać na dostępne na rynku drogie rozwiązania. Konstrukcja opisywanej protezy dłoni została wykonana z polilaktydu (PLA) za pomocą technologii FDM. Metoda FDM (z ang. Fused Deposition Modeling), polega na „ekstrudowaniu” topionego w wysokiej temperaturze materiału warstwa po warstwie. Istotnym jest, że do tego celu wykorzystuje się termoplasty, uzyskujące przy odpowiedniej temperaturze i ciśnieniu postać półpłynną dającą się wytłaczać z dyszy [4]. Zdecydowano się na filament PLA, ponieważ jest biokompatybilny oraz uznano go za wystarczający pod kątem wytrzymałościowym do tego typu modelu.

Mioelektryczna proteza dłoni opisywana w niniejszej pracy sterowana jest potencjałami bioelektrycznymi mięśni i nerwów. Biosygnale odnoszą się ogólnie do wszystkich sygnałów rejestrowanych z ciała ludzkiego. Mogą być elektryczne jak elektromiogram (EMG) czy elektroencefalogram (EEG), bądź nieelektryczne. Akwizycja i analiza tych sygnałów stanowią podstawę do badań diagnostycznych jak również mogą służyć do kontroli bioprotez [5]. Badanie elektromiograficzne (EMG) polega na rejestracji przewodzenia potencjałów generowanych podczas aktywacji jednostki ruchowej. Z kolei elektromiogram jest zapisem zmian tych miopotencjałów [6].

Aktywność mięśniowa użytkownika generuje sygnał analogowy wzmacniany i filtrowany przez czujnik EMG. Następnie sygnał ten jest wykorzystywany przez mikrokontroler do generowania impulsów sygnału modulowanego szerokością (z ang. Pulse-Width Modulation, PWM). To napędza serwomechanizmy, powodując zgięcie palców proporcjonalne do amplitudy miopotencjałów.

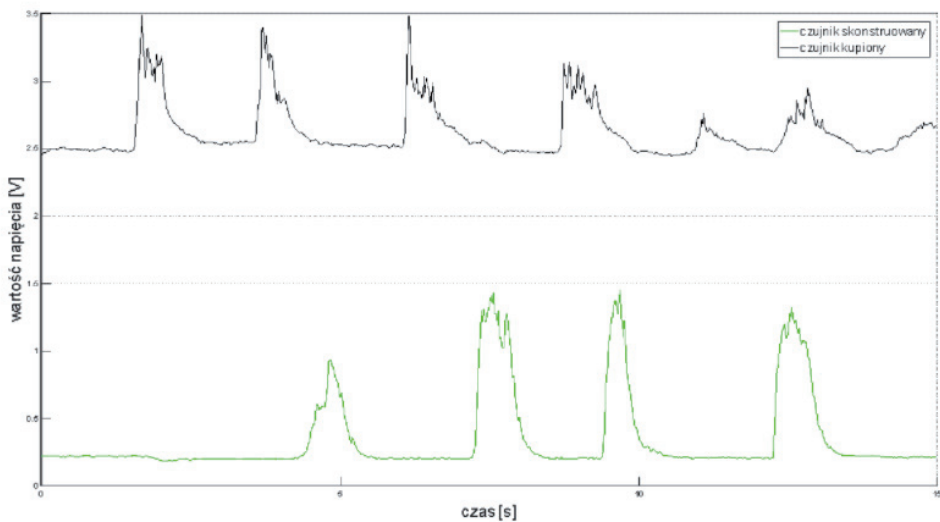
Sygnał wejściowy z czujnika EMG, pobierany za pomocą trzech elektrod powierzchniowych monitorowany jest przez mikrokontroler Arduino Uno. To on pełni kontrolę nad całym urządzeniem. W celu ustalenia wymaganego działania w odpowiedzi na pobierany sygnał i wygenerowania stosownych sygnałów sterujących dla serwomechanizmów wykonuje szereg komend i obliczeń. Każdy serwomechanizm odpowiada za ruch jednego palca. Zakresy wartości kątów, które są możliwe do zrealizowania przez serwomechanizmy, nie powodując uszkodzenia protezy dobrane są doświadczalnie, indywidualnie dla każdego palca.

Aby upłynnić pracę silników zastosowano filtr cyfrowy dolnoprzepustowy. Filtr ten sprawdza się najlepiej i w największym stopniu usuwa szumy z elektromiogramu. Na rysunku 10.1. przedstawiono działanie filtra podczas akwizycji sygnałów EMG, sygnał surowy (czerwony) oraz po filtrowaniu (czarny).



Rysunek 10.1: Dane uzyskane z pomiarów aktywności mięśnia zginacza powierzchniowego palców przygotowane w programie MATLAB (opracowanie własne)

Opracowany czujnik charakteryzuje się dobrą odpornością na zakłócenia zewnętrzne. W konfrontacji z dostępnym na rynku czujnikiem uzyskuje on dokładniejsze wyniki. Na tej podstawie można stwierdzić, że tor filtrowania sygnału został prawidłowo dobrany. Porównanie sygnałów uzyskanych za pośrednictwem obu czujników przedstawiono na rysunku 10.2.

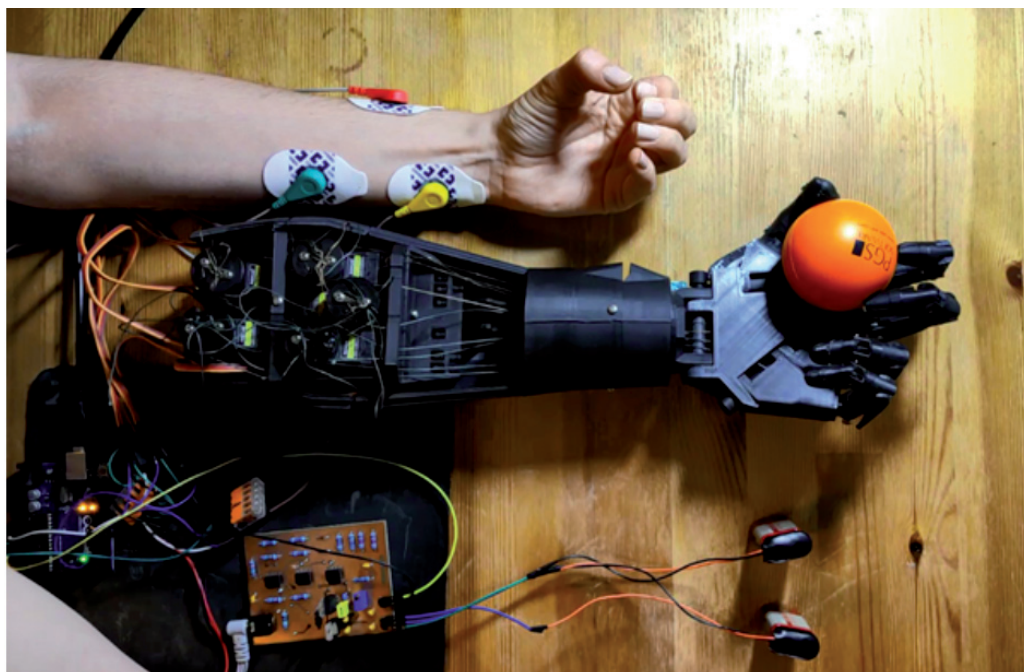


Rysunek 10.2: Zestawienie sygnałów uzyskanych z pomiarów aktywności mięśni przedramienia podczas zaciskania dłoni przygotowane w programie MATLAB dla różnych czujników (opracowanie własne)

Dodatkowym atutem konstruowanego czujnika jest zamontowany w obwodzie wzmacniacza potencjometr, który umożliwia skorygowanie amplitudy sygnału wyjściowego i dostosowanie jej do zakresu przetwornika analogowo-cyfrowego. Dzięki temu płytką Arduino Uno nie jest jedynym możliwym urządzeniem przeznaczonym do akwizycji i interpretacji mierzonych miopotencjałów. Ponadto regulowane wzmocnienie czujnika może być dopasowane do pomiarów różnych rodzajów włókien mięśniowych w różnych obszarach ciała.

Aktywacja protezy w sposób proporcjonalny do siły mięśniowej umożliwia użytkownikowi bardzo instynktowną kontrolę. Sygnałem sterującym jest algebraiczna suma potencjałów mięśniowych przedramienia pobierana w obszarze lokalizacji mięśnia zginacza powierzchniowego palców. Takie rozmieszczenie elektrod powierzchniowych sprawia, że zachowanie protezy jest zgodne z ruchem badanej dłoni. Zginanie palców u zdrowej dłoni powoduje adekwatne i tożsame w czasie przemieszczenia palców dłoni protetycznej. Aparat umożliwia jedynie zmianę pozycji wszystkich palców równocześnie, nie mniej jednak pozwala to na chwytanie niezbędne do wykonania wielu czynności codziennego życia. Nie jest to jedyne możliwe rozmieszczenie elektrod do rejestracji sygnałów kontrolnych protezy. W przypadku amputacji fragmentu ciała o większym zakresie niż w pierwotnym założeniu projektu, pobór sygnału może odbywać się z innych partii mięśniowych.

Widok zrealizowanego projektu przedstawiono na rysunku 10.3. Jest to wersja prototypowa, wytworzona na cele badań opracowanego systemu, z tego powodu nie jest to proteza mobilna. Rysunek przedstawia zarówno część układu mocowaną do użytkownika służącą do akwizycji sygnału sterującego, jak również elementy efektora aparatu protetycznego.



Rysunek 10.3: Chwytanie realizowane przez skonstruowaną protezę dłoni (opracowanie własne)

Cel pracy, którym jest projekt i budowa protezy dłoni sterowanej potencjałami bioelek-

trycznymi mięśniami i nerwami został zrealizowany w pełni. Dużym wyzwaniem jest stworzenie niebanalnego projektu od podstaw. Opracowanie konstrukcji mechanicznej zdolnej do imitacji ruchów biologicznej dłoni, a także odpowiednio wytrzymałej i wydajnej od dawna stanowi problem inżynierów. Dodatkowe ograniczenia jakimi są rozmiary i masa konstrukcji wydają się być niemożliwe do pokonania w tworzeniu mobilnego urządzenia. Zdecydowano się na wydruk 3D gotowego modelu dłoni przede wszystkim ze względu na ograniczenie czasowe wykonania pracy. Zaprojektowanie od podstaw fizycznej budowy tak złożonego aparatu nie byłoby możliwe do wykonania przy tak obszernej liczbie zadań realizowanych w opracowaniu podjętego tematu. Wykonanie precyzyjnej konstrukcji dłoni do testowania układu innymi metodami niż wydruk 3D byłoby niełatwym zadaniem. Procedura doboru systemu sterowania jest szczególnie istotna, aby urządzenie mogło zastąpić utraconą kończynę. W pracy dużą uwagę przywiązano do jakości kontroli nad protezą. Wprowadzone innowacje takie jak skonstruowany czujnik EMG, czy filtrowanie szybkozmiennych składowych sygnałów mięśniowych filtrem dolnoprzepustowym idealnie sprawdzają się w precyzyjnej manipulacji protezą. Badanie zachowania protezy w odpowiedzi na sygnały rejestrowane samodzielnie wykonanym czujnikiem EMG oraz nowatorskim, rynkowym rozwiązaniem było dodatkowym elementem pracy. Działanie aparatu protezy sterowanego sygnałami wychwytywanymi poprzez wykonany czujnik okazało się być bardziej rzetelne w stosunku do zamiarów użytkownika, a co się z tym wiąże kontrola nad nim była łatwiejsza. Efekt końcowy pozbawiony jest wad towarzyszących podczas testów na zakupionym czujniku, proteza nie reaguje na sygnały zakłócające z otoczenia, a jej działanie jest płynne.

Bibliografia

- [1] "InMoov - Open source 3D printed life size robot" <https://inmoov.fr/hand-and-forarm/> [dostęp: 29.10.2020]
- [2] C. L. MacKenzie and T. Iberall, *The Grasping Hand* (Vol. 104), Elsevier, 1994.
- [3] „Agencja Oceny Technologii Medycznych i Taryfikacji Wydział Taryfikacji”, http://www.aotm.gov.pl/www/wp-content/uploads/taryfikacja/2016/projekty-taryf/raporty/40/WT.521.17.2016_H72_H74_raport.pdf [dostęp: 04.06.2019]
- [4] <http://centrumdruku3d.pl/technologie-fdm-rozdzial-1-co-to-jest-i-na-czym-polega/> [dostęp: 10.11.2019]
- [5] *Advanced Biosignal Processing* A. Na t-Ali (Ed.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
- [6] „Fizjologiczne podstawy badań elektrofizjologicznych obwodowego układu nerwowego”, dr hab. n. med. Rafał Rola *Neurologia po Dyplomie* 2012; 7 (4): 44-49

Projekt urządzenia do ciągłego pomiaru parametrów fizjologicznych kierowcy

inż. Dominik Dziułka

Inżynieria Biomedyczna

dr inż. Andrzej Grobelny

Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki

Celem pracy jest zaprojektowanie urządzenia do ciągłego monitorowania wybranych parametrów fizjologicznych kierowcy w czasie rzeczywistym. Aby cel mógł zostać spełniony, zakres poniższej pracy dyplomowej obejmuje wybór monitorowanych parametrów fizjologicznych, dobór odpowiednich metod pomiarowych, zaprojektowanie schematu elektrycznego, projekt oraz wykonanie płytki PCB (ang. Printed Circuit Board), zaprogramowanie urządzenia, wykonanie interfejsu graficznego użytkownika oraz wykonanie pomiarów.

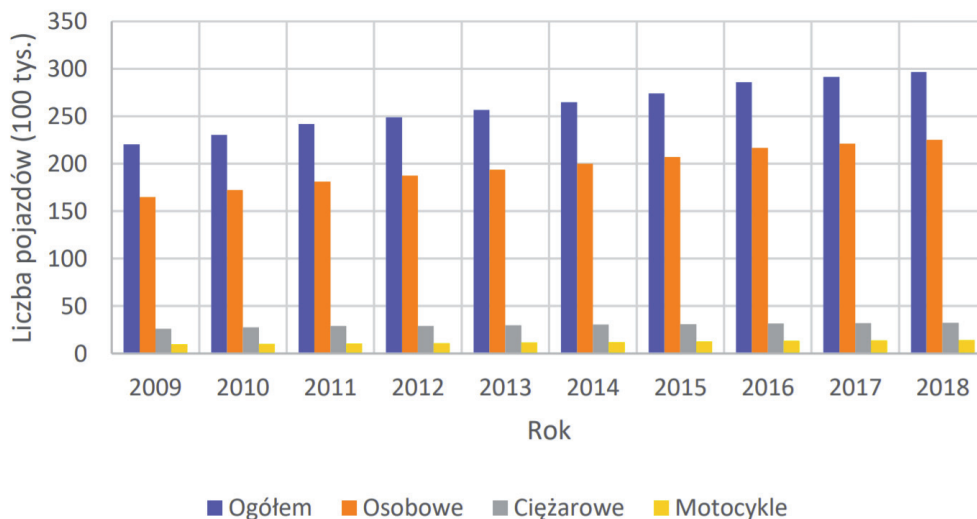
1. Wstęp

Transport drogowy wciąż jest jednym z najpopularniejszych sposobów podróżowania oraz przewożenia towarów. Z raportu Głównego Urzędu Statystycznego w roku 2018 praca przewozu pasażerów transportem lotniczym w Polsce wynosiła 20 838 milionów pasażerokilometrów. Transport kolejowy wykonał pracę przewozu 21 043 milionów pasażerokilometrów, natomiast transport drogowy wykonał pracę 16 969 milionów pasażerokilometrów. Jednakże z transportu drogowego skorzystało 336 511 tysięcy osób, kolejowego 309 722 tysięcy a lotniczego 11 258 tysięcy. Wynika z tego, że ponad 50% osób wybiera transport drogowy jako formę komunikacji, jednakże to transport kolejowy jest popularniejszy na dłuższych dystansach. W przypadku transportu drogowego w statystyce nie zostały ujęte przewozy komunikacją miejską oraz za pośrednictwem firm i podmiotów zatrudniających do 9 osób.

Innym czynnikiem jest transport towarów, w 2018r. według szacunków transportem drogowym przewieziono 1 873 022 tysięcy ton ładunków, co daje około 85% wszystkich przewiezionych towarów. Na drugim miejscu znajduje się transport kolejowy z wartością 249 260 tysięcy ton przewiezionych towarów [1].

Dodatkowo na Polskich drogach w 2018 roku poruszało się 29 656 238 zarejestrowanych pojazdów, z czego aż 22 514 047 to samochody osobowe, a 3 249 961 to samochody

ciężarowe [2]. Na poniższym wykresie przedstawiono liczbę pojazdów silnikowych w latach 2009-2018 (Rys. 11.1).



Rysunek 11.1: Liczba pojazdów silnikowych w latach 2009-2018

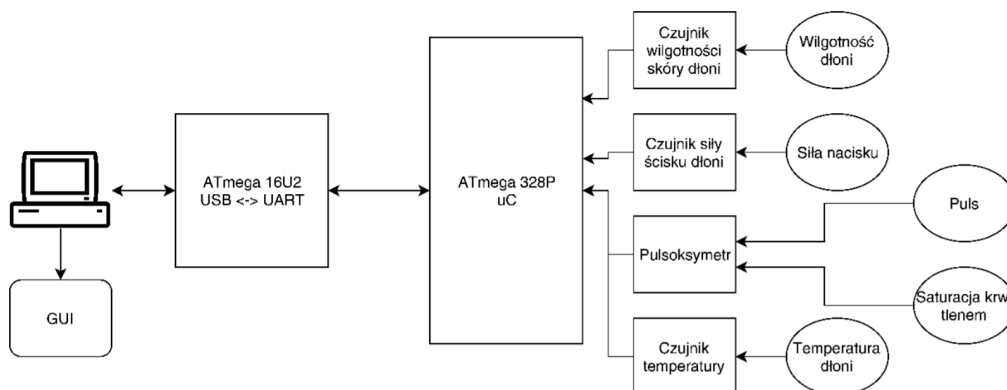
Widoczny jest wyraźny trend wzrostu liczby pojazdów silnikowych. W roku 2018 zgłoszono 436 414 kolizji oraz 31 674 wypadków, w których 2 862 osób poniosło śmierć a 37 359 zostało rannych. Poza stratami związanymi z utratą zdrowia czy życia, ważnym aspektem zdarzeń drogowych są straty materialne związane z naprawami uszkodzeń czy produkcją nowych części. Jedną z przyczyn wypadków drogowych jest zmęczenie lub zaśnięcie za kierownicą samochodu [2]. Dodatkowym ważnym czynnikiem zwiększającym ryzyko zagrożenia bezpieczeństwa jest podwyższony poziom stresu kierowcy, który może wpłynąć na szybkość reakcji czy ich precyzję.

Projektowane urządzenie ma za zadanie pomiar parametrów fizjologicznych kierowcy podczas jazdy. Poniżej wypunktowano podstawowe założenia jakie muszą zostać spełnione:

- Pomiar musi odbywać się w czasie rzeczywistym z możliwością wyeksportowania danych do pliku w formacie CSV. Dodatkowo użytkownik powinien mieć możliwość ustawienia wartości progowych, po przekroczeniu których dostaje wyraźną informację o znajdowaniu się poza zakresem.
- Do przejrzystego odczytywania danych, graficzny interfejs użytkownika powinien posiadać możliwość wizualizacji parametrów w czasie rzeczywistym.
- Pomiar temperatury, saturacji krwi tlenem oraz pulsu powinny posiadać możliwie najwyższą dokładność, aby ograniczyć błędy w interpretacji danych.
- w przypadku pomiaru wilgotności skóry oraz siły ścisku dłoni wysoka dokładność nie jest wymagana, ponieważ badana jest raczej zmiana wartości niż ich konkretny poziom.

- Urządzenie powinno być zasilane za pomocą komputera osobistego, który również wykorzystywany jest do odczytywania wyników pomiaru.
- Urządzenie powinno posiadać możliwie jak najmniejsze wymiary zewnętrzne.

Ogólny schemat blokowy urządzenia przedstawiono na rysunku poniżej (Rys. 11.2).



Rysunek 11.2: Schemat blokowy projektowanego urządzenia

2. Monitorowane parametry

2.1. Temperatura ciała

W czasie utrzymywania homeostazy w organizmie temperatura ciała człowieka mieści się w zakresie 36-37°C (w zależności od płci, fazy cyklu miesięczkowego itd.). Czynniki zaburzające termoregulację u człowieka mogą również wpływać na jego stan psychiczny oraz zdolności poznawcze.

2.2. Puls

Podczas normalnej pracy serca można wyszczególnić powtarzający się cykl zwany cyklem hemodynamicznym serca. Składa się on z dwóch faz, podczas których zachodzi szereg zjawisk pozwalających na sprawną cyrkulację krwi po organizmie. Układ współczulny posiada również wpływ na pracę serca, można więc na podstawie pulsu zmierzyć parametry fizjologiczne człowieka. Jedną z mierzonych wielkości jest nierównomierność pulsu (ang. Heart Rate Variability) HRV. Aby zmierzyć HRV należy skupić się na odstępach czasowych w występowaniu załamków R. Na podstawie nieregularności ich występowania można określić poziom zmęczenia kierowcy. W zależności od zastosowanej metody analizy można uzyskać 68,8% dokładności, 62,5% czułości oraz 75% swoistości w wykrywaniu zmęczenia kierowcy. Niestety wymaga to dłuższego pomiaru trwającego nawet dwie minuty. Czas ten można skrócić wykorzystując funkcje falkowe. Jednocześnie, dzięki zastosowaniu metody falkowej można zwiększyć dokładność, czułość oraz swoistość nawet do 95% [3].

2.3. Saturacja krwi tlenem

W terminologii medycznej wyróżnia się dwie przypadłości związane z niewystarczającą ilością tlenu. Hipoksemia jest stanem, w którym w krwi tętniczej znajduje się obniżona ilość tlenu, natomiast hipoksja jest zjawiskiem szerszym, obejmującym swoim zjawiskiem tkanki lub nawet całego organizmu. Poziom natlenowania krwi jest więc bardzo ważnym parametrem, który może wiele powiedzieć na temat ogólnego stanu kierowcy. Prawidłowa wartość SpO₂ dla zdrowego wynosi pomiędzy 94% a 99% [4].

2.4. Wilgotność skóry dłoni

U człowieka występuje wzmószona aktywność gruczołów potowych związana z mechanizmem termoregulacji lub występowaniem stresu [?]. W przypadku projektowanego urządzenia, rozpatrywane jest drugie zjawisko. Pomiar wilgotności dłoni ma więc na celu określenie zmian poziomu stresu kierowcy, który może zdecydowanie wpłynąć na podejmowane decyzje podczas prowadzenia pojazdu, a co za tym idzie zmniejszyć bezpieczeństwo jazdy.

2.5. Siła ścisku dłoni

Do określenia poprawności trzymania dłoni na kierownicy mierzona jest siła ścisku dłoni. W sytuacji, gdy kierowca trzyma zbyt lekko kierownicę lub nie trzyma jej w ogóle wzrasta ryzyko niezamierzonych zmian kierunku jazdy związanych z czynnikami zewnętrznymi. Do takich czynników należą między innymi: nachylenie poprzeczne drogi, stan warstwy ścieralnej drogi czy przerwania ciągłości ogumienia. W takich przypadkach kierowca nie panuje w pełni nad prowadzonym pojazdem, przez co potrzebuje więcej czasu na podjęcie prawidłowych działań w celu odzyskania kontroli. Dodatkowo pomiar siły nacisku pozwala na określenie stopnia zmęczenia kierowcy podczas prowadzenia pojazdu. Jednocześnie zwiększona siła ścisku kierownicy może sugerować podwyższony poziom stresu, podobnie jak w podrozdziale 5.4 spowodowany aktywnością układu współczulnego, który powoduje napięcie mięśni szkieletowych.

3. Projekt urządzenia

3.1. Mikrokontroler

W urządzeniu wykorzystany został mikrokontroler ATmega 328P producenta ATMEL. Głównym zadaniem mikrokontrolera jest zbieranie danych pochodzących z czujników analogowych oraz przetworników cyfrowych, następnie obróbka tych danych i wysłanie ich za pomocą interfejsu UART do mikrokontrolera ATmega 16U2, który wykorzystany został w roli konwertera, aby wykorzystując standard USB, umożliwić komunikację z komputerami osobistymi. Dodatkowo do komunikacji z przetwornikami temperatury oraz pulsoksymetrami wykorzystany został interfejs I²C, natomiast do pomiaru wilgotności oraz siły nacisku wykorzystane zostały cztery piny 10 bitowego przetwornika analogowo cyfrowego.

3.2. Przetwornik temperatury

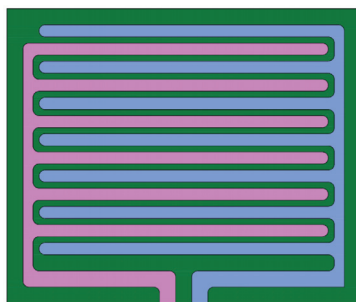
Do pomiaru temperatury wykorzystany został przetwornik temperatury Si7051 producenta Silicon Labs. W układzie scalonym przetwornika znajduje się analogowy czujnik temperatury wraz z konwerterem analogowo-cyfrowym. Ponieważ w projektowanym urządzeniu wykorzystane są dwa przetworniki o tym samym adresie konieczne jest zastosowanie klucza MOSFET na liniach SCK dochodzących do wybranego przetwornika. Do wykonania takiego klucza wybrano tranzystor BSS138, ponieważ jest łatwo dostępny oraz tani. Tranzystor ten posiada maksymalne czasy włączenia i wyłączenia na poziomie 20 ns. Zakładając, że pełny cykl włączenia i wyłączenia trwa 40 ns pozwala to na pracę z częstotliwością maksymalną 25 MHz, przy czym w przypadku przetwornika Si7051 maksymalna częstotliwość linii zegara wynosi 400 kHz.

3.3. Pulsoksymetr

Ze względu na minimalizację rozmiarów oraz dostępność bibliotek, do pomiaru tętna i saturacji wykorzystano gotowy przetwornik MAX30100 producenta Maxim Integrated. Układ scalony przetwornika posiada dwie diody, jedną czerwoną o długości fali emitowanego światła wynoszącej 660 nm oraz drugą podczerwoną o długości fali emitowanego światła wynoszącej 880 nm. Zasada pomiaru tętna przez przetwornik opiera się na absorpcji światła czerwonego przez krew znajdującą się w naczyniach krwionośnych. Krew utlenowana posiada inny przebieg krzywej absorpcji niż krew odtlenowana.

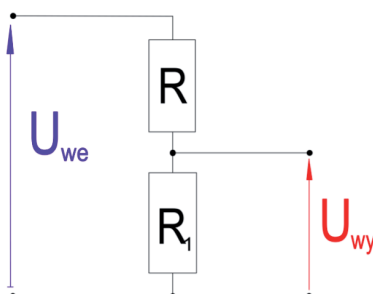
3.4. Czujnik wilgotności

Ze względu na niedostępność gotowych rozwiązań na rynku czujnik wilgotności został wykonany własnoręcznie. Projektując czujnik wilgotności skóry korzystano z zastosowania zjawiska Féré'go [6]. Pole pomiarowe czujnika składa się z dwóch, przeplatanych ze sobą elektrod miedzianych pokrytych cienką warstwą cyny, która ma za zadanie zabezpieczyć powierzchnie elektrod przed korozją elektrochemiczną w związku z bezpośrednim kontaktem z potem. Dzięki takiemu zabezpieczeniu można znacząco spowolnić degenerację elektrody, a co za tym idzie zmienność przewodzenia na styku elektrody ze skórą w czasie. Na poniższym schemacie zaprezentowano sposób rozmieszczenia elektrod na polu pomiarowym (Rys. 11.3).



Rysunek 11.3: Projekt pola pomiarowego czujnika wilgotności

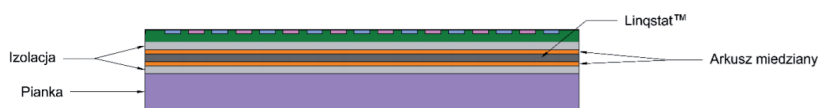
Wyprowadzenia czujnika wilgotności poprowadzone zostały do wtyków na płytce PCB urządzenia, gdzie podłączony został w układzie rezystancyjnego dzielnika napięcia (Rys. 11.4).



Rysunek 11.4: Rezystancyjny dzielnik napięcia

3.5. Czujnik siły nacisku

Na rynku można znaleźć przetworniki, które zbudowane są z dwóch elektrod, pomiędzy którymi znajduje się arkusz Linqstatu™. Jest to materiał zbudowany z cienkiego arkusza polietylenowego, który nasycony jest grafitem, dzięki czemu wykazuje przewodność powierzchniową oraz objętościową [?]. Jest to najlepsze rozwiązanie do zastosowania w projektowanym urządzeniu. Wśród dostępnych na rynku przetworników wiele cechuje się niewielkimi rozmiarami lub brakiem możliwości dobrania odpowiedniego kształtu, przez co zdecydowałem się na samodzielne zaprojektowanie i wykonanie takiego przetwornika. Składa się on z pola pomiarowego wykonanego ze sprężystego podłoża, na którym spoczywają dwie płaskie elektrody, między którymi znajduje się warstwa Linqstatu™. Elektrody zaizolowane są z dwóch stron warstwą tworzywa wykazującego własności dielektryczne. Na rysunku poniżej widoczny jest przekrój pola pomiarowego (Rys. 11.5).



Rysunek 11.5: Przekrój projektowanego czujnika nacisku

Czujnik siły nacisku zintegrowany jest z czujnikiem wilgotności, aby zminimalizować wymiary pól pomiarowych urządzenia. Przekształcanie siły nacisku na wartość napięcia odbywa się na tej samej zasadzie, co w przypadku czujnika wilgotności, z wykorzystaniem rezystancyjnego dzielnika napięcia.

3.6. Komunikacja z użytkownikiem

Zebrane przez mikrokontroler dane z czujników wysyłane są przez interfejs USB do komputera osobistego gdzie wyświetlane są w graficznym interfejsie użytkownika.

Bibliografia

- [1] Raport GUS „Przewozy ładunków i pasażerów w 2018r.”
- [2] Komenda Główna Policji „Wypadki drogowe w Polsce w 2018 roku”
- [3] Gang Li , Wan-Young Chung, „Detection of Driver Drowsiness Using Wavelet analysis of Heart Rate Variability
- [4] <https://www.amperordirect.com/pc/help-pulse-oximeter/z-interpreting-results.html>
[Dostęp: 15.12.2019]
- [5] Dawson M. E., Schell A. M., Filion D. L., „The electrodermal system”
- [6] Widacki J., „Discoverers of the Galvanic Skin Response”
- [7] Broszura informacyjna Linqstat™ MVCF-Series producenta CapLinq.

Projekt symulatora mikrogravitacji do badań bioinżynieryjnych

inż. Amanda Solaniuk

Inżynieria Biomedyczna

dr hab. Krystian Kubica

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Celem pracy jest projekt układu symulującego stan mikrogravitacji oraz analiza możliwości prowadzenia badań na układach biologicznych umieszczonych w zaprojektowanym symulatorze. Stworzony układ będzie, w stosunku do nielicznych projektów komercyjnych, dostępny cenowo dla projektów oraz kół naukowych, a także użytku autora pracy. W pracy przedstawiono wykorzystywane obecnie rodzaje symulatorów mikrogravitacji. Opisano projekt autorskiego symulatora mikrogravitacji opartego na odwrotnej platformie napędowej robota samobalansującego. Praca opisuje poszczególne składowe projektu takie jak bloki zaprojektowanej elektroniki symulatora, podstawową mechanikę działania urządzenia, metodę działania programu obsługującego symulator RPM. Zaproponowano eksperyment bioinżynieryjny, możliwy do wykonania na zaprojektowanym urządzeniu.

1. Wstęp

Inspiracją tematu pracy jest obecny rozwój technologii kosmicznych oraz plany powstania kolonii pozaziemskich, które wymagają szczególowej znajomości długotrwałego wpływu mikrogravitacji na organizmy żywe.

Pojęcie mikrogravitacji (również określanej mianem nieważkości oraz G) nie oznacza braku oddziaływania sił grawitacji, lecz wskazuje, że dane wartości oddziaływującej siły grawitacji na obiekty są znikome.

Badania przeprowadzane w warunkach mikrogravitacji umożliwiły lepsze zrozumienie aspektów zdrowia ludzkiego, takich jak starzenie się, urazy oraz choroby. Kilka biologicznych badań przyniosło bardzo ważne wyniki, w tym lepsze zrozumienie podstawowych procesów fizjologicznych zwykle maskowanych przez siły grawitacji oraz rozwój nowych technologii medycznych napędzanych potrzebą wspierania zdrowia astronautów. Postępy w dziedzinie telemedycyny, modele chorób, systemy psychologicznego reagowania na stres, odżywiania, zachowania komórek oraz zdrowia środowiskowego to tylko kilka przykładów korzyści uzyskanych dzięki unikalnemu środowisku mikrogravitacji. Znaczenie

wpływu mikrogravitacji nie tylko przyczynia się do rozwoju systemów kontroli środowiska i podtrzymania życia (ECLSS) podczas pobytu w kosmosie, ale również stwarza wielkie możliwości rozwoju bioinżynierii oraz medycyny.

Problemem prowadzenia badań w danych warunkach jest mała dostępność placówek badawczych (między innymi Międzynarodowa Stacja Kosmiczna ISS) czy też wysokie koszty zapewnienia warunków mikrogravitacji za pomocą umieszczania obiektów na orbitach okołoziemskich. Symulatory mikrogravitacji to aparatura, która umożliwi szybszy rozwój badań nad zjawiskiem symulowanej mikrogravitacji oraz jej wpływem na obiekty w warunkach ziemskich, bez konieczności kosztownego transportu na orbitę okołoziemską.

Powstało wiele urządzeń, które w różnych aspektach (odciążenie przy pomocy wody, sumowanie wektora gravitacji, wirowanie) symulują warunki mikrogravitacji. Maszyna do losowego pozycjonowania (RPM) została opracowana w celu przeprowadzania drobnych eksperymentów oraz badań w stanie symulowanej mikrogravitacji.

Aby wytworzyć w warunkach ziemskich stan mikrogravitacji należy losowo zmieniać położenie badanej próbki tak, by uzyskać równomierną zmianę orientacji wektora normalnego dowolnego fragmentu płaszczyzny badanego obiektu względem wektora oddziaływań grawitacyjnych z masą Ziemi. Możliwe jest takie dobranie warunków pracy symulatora, że średnia grawitacja spada szybko poniżej 0,1 g i stabilizuje się poniżej 0,03 g w ciągu 2 godzin pracy. Przy tej koncepcji kompensowane są dwa punkty leżące naprzeciw siebie (zmiana znaku). Na początku eksperymentu niewiele punktów położenia ma wpływ na średnią, czyniąc ją wrażliwą na wszelkie odchylenia. Efekty kinematyczne w dużym stopniu zależą od położenia próbki względem środka kuli oraz prędkości obrotowej. Ponieważ prędkość obrotowa jest niewielka, efekt kinematyczny taki jak siła odśrodkowa jest znikomy. Odpowiednia kalibracja rotacji w 3 niezależnych osiach umożliwi znaczną zmianę wartości siły grawitacji „odczuwalnej” przez dany obiekt, za pomocą siły grawitacji w celu odtworzenia warunków mikrogravitacji.

Randomizacja wektora grawitacji Ziemi pozwala na ciągłą redystrybucję sił grawitacji, tak że komórki rosną w podobnym środowisku jak w narządach/tkankach. Komórki hodowane w tych warunkach nie będą już osadzać się, co pozwoli na dookólny wzrost komórek.

Konstrukcja na bazie prostopadłych niezależnie napędzanych ram, aby zmniejszyć kierunkowe działanie siły grawitacji, stosuje algorytm losowego spaceru, w którym każda z ram RPM obracają się ze stałą prędkością, ale kierunek obrotu jest odwracany w losowo wybranych punktach czasowych. Zmiana prędkości obrotów w przeciwne kierunki odbywa się przy stałym przyspieszeniu kątowym. Zasilanie urządzeń na wewnętrznej (czujniki pomiarowe wykorzystywane do eksperymentów, inkubator wewnętrzny) oraz zewnętrznej (dla przykładu pobieranie informacji z wewnętrznej ramy i dalsze ich przekazywanie) ramie, a także komunikacja w czasie rzeczywistym, są przesyłane za pośrednictwem pierścieni ślizgowych. Do kontroli jakości ruchu wykorzystuje się Akcelerometry 3D, które są mocowane do wewnętrznej ramy.

Konstrukcja RPM na bazie kuli jest wsparta na dwóch swobodnie obracających się punktach kontaktowych. Trzecim punktem kontaktowym jest koło połączone z silnikiem,

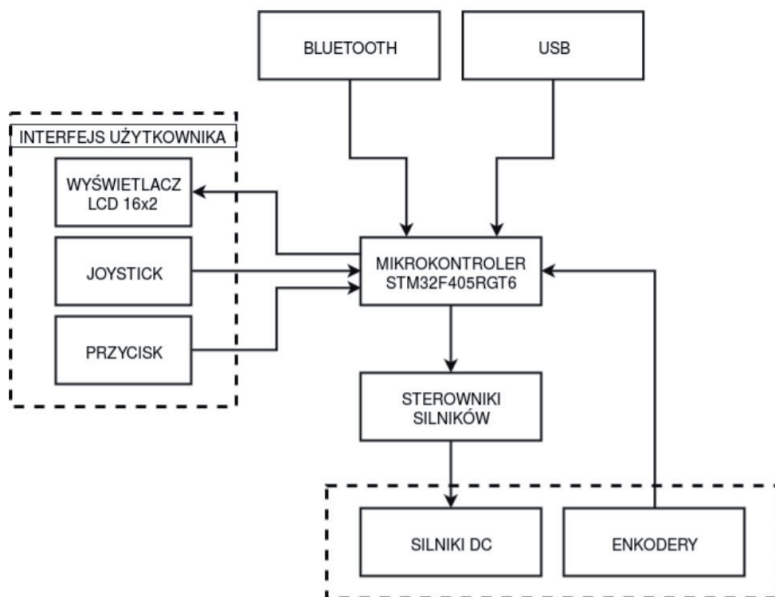
który powoduje obrót dużej kuli. Orientację tego silnika i koła napędowego można zmieniać za pomocą drugiego silnika. sterowanie tymi silnikami umożliwia losową rotację kuli, co powoduje ciągłą zmianę orientacji kuli z zawieszonym układem próbkowania. Ta koncepcja wirującej kuli do symulacji mikrogravitacji została wdrożona w 2001 r. przez zespół studentów z Dutch Space. Dostęp do wnętrza kuli, w środku której zawieszona była badana próbka, był możliwy poprzez odłączenie dwóch połówek. Chociaż system działał i można było z łatwością utworzyć losowy obrót za pomocą opisanego układu napędowego, projekt ten nie doprowadził do powstania oczekiwanego produktu, ponieważ trudno było stworzyć segmentową kulę o idealnie gładkiej powierzchni zewnętrznej. Idealna kula jest wymagana, aby umożliwić obrót próbki bez wibracji i przyspieszeń liniowych. W tej koncepcji trudno było również zapewnić komunikację z wnętrzem kuli (zasilanie badanego układu oraz przesyłanie danych z i do otoczenia zewnętrznego).

Konstrukcja RPM na bazie ram, ze względu na łatwiejszy dostęp do badanego materiału, w stosunku do konstrukcji na bazie kuli, jest wykorzystywana przez zespoły badawcze do badania wpływu symulowanej mikrogravitacji na przebieg eksperymentów biologicznych oraz bioinżynierskich. Ze względu na prostszą konstrukcję RPM na bazie kuli wybrano takie rozwiązanie jako podstawę stworzenia projektu autorskiego. Zdecydowano również na zmodyfikowanie konstrukcji. Podtrzymująca podstawa z silnikami została zaprojektowana jako odwrócona podstawa ballbota (robota samobalansującego) z wykorzystaniem kół omnikierunkowych (szwedzkich) w celu zmniejszenia tarcia podczas obrotów kuli a za czym idzie płynniejszego ruchu konstrukcji

Podstawowym założeniem projektu jest zbudowanie funkcjonalnej maszyny do losowego pozycjonowania, która będzie poprawnie symulowała stan mikrogravitacji. Niskie koszty jej wykonania powinny umożliwić dostępność dla kół naukowych bądź do użytku własnego oraz jej waga oraz gabaryty zapewnią jej przenośność. W związku z tym projektowane urządzenie powinno spełniać kilka podstawowych założeń dotyczących elektroniki, mechaniki oraz biologii.

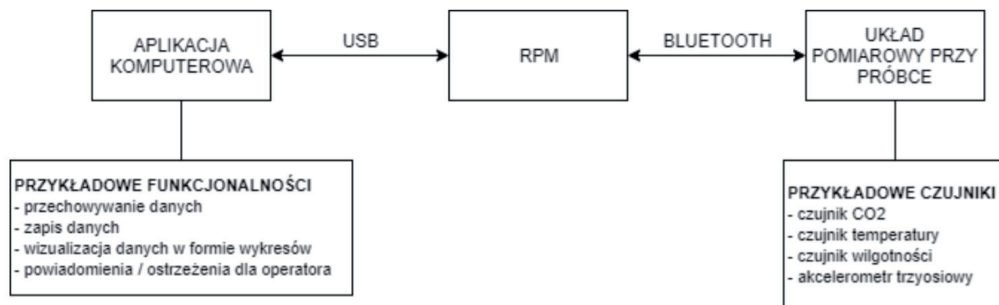
2. Krótki opis pracy

Pierwszym krokiem w realizacji projektu maszyny RPM było ustalenie założeń projektowych oraz ich podstawie stworzenie schematu ideowego całego urządzenia.



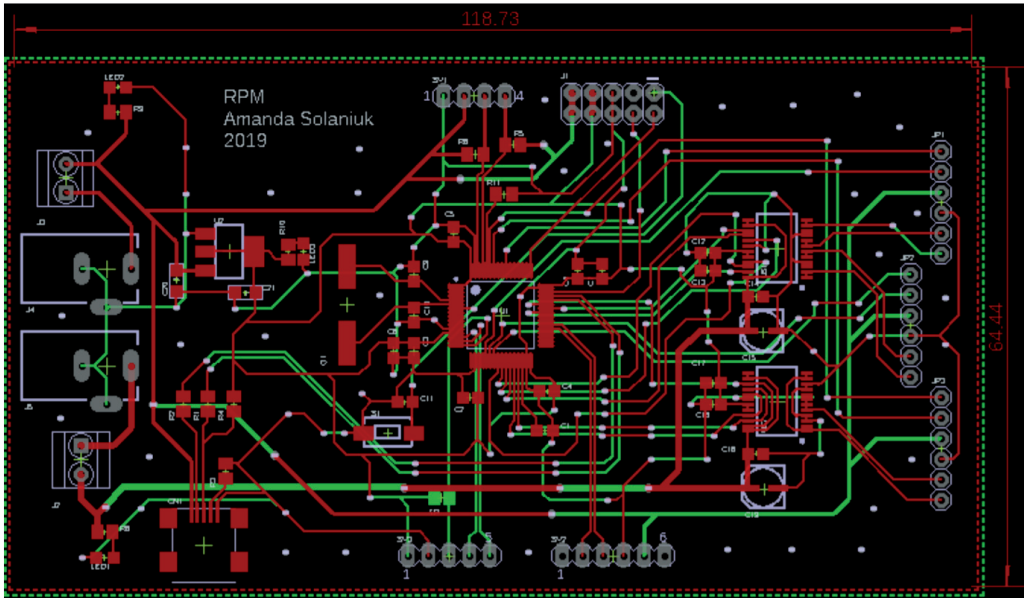
Rysunek 12.1: Uproszczony schemat blokowy układu elektronicznego do urządzenia RPM zapewniający podstawową funkcjonalność urządzenia. Opracowanie własne

2.1. Komunikacja RPM z urządzeniami zewnętrznymi



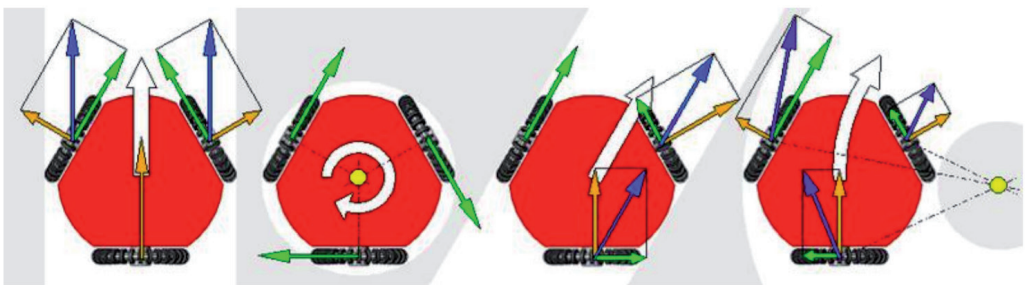
Rysunek 12.2: Przykład systemu wykorzystującego możliwości komunikacji przy pomocy USB oraz Bluetooth. Opracowanie własne

W celu sfinalizowania projektu układu elektronicznego zaprojektowano rozkład elementów oraz połączenia ścieżek na płytce PCB.



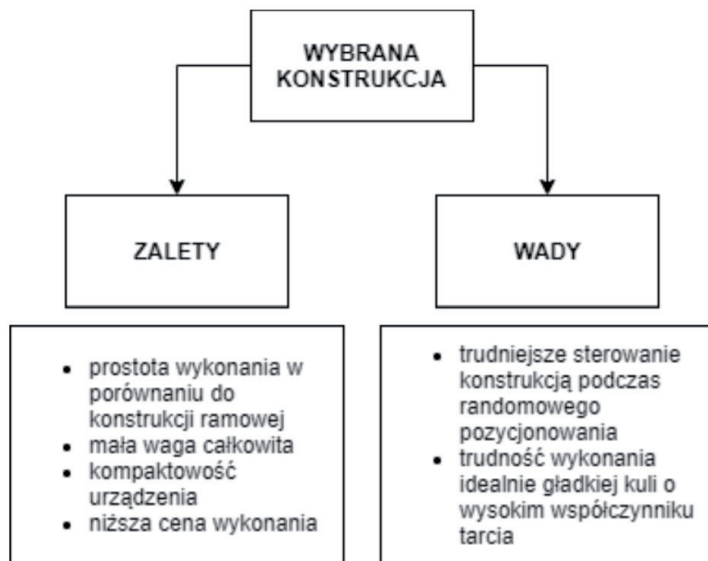
Rysunek 12.3: Widok dwuwarstwowej płytki drukowanej (czerwony – warstwa górna, zielony – warstwa dolna) wraz z umiejscowieniem elementów oraz wymiarem płytki. Zaprojektowane przy wykorzystaniu programu EAGLE. Opracowanie własne

Podstawą konstrukcji RPM na bazie kuli jest kula osadzona na platformie napędowej, zainspirowanej działaniem platformy napędowej robota samobalansującego. Dana platforma jest układem napędowym składającym się z trzech kół ustawionych pod kątem 120 względem siebie, co umożliwia ruch w dowolnym kierunku za pomocą tylko trzech silników.



Rysunek 12.4: Wektory prędkości ruchu robota poruszającego się na kołach omnikierunkowych

Poniżej wymienione zostały wady oraz zalety (Rys. 12.5) wybranej, do projektu urządzenia RPM, konstrukcji na bazie kuli.



Rysunek 12.5: Zalety oraz wady konstrukcji na bazie kuli. Opracowanie własne

Symulatory mikrogravitacji, tylko w 2019 roku, posłużyły powstaniu wielu prac naukowych w dziedzinach bioinżynieryjnych, są wykorzystywane jako substytuty eksperymentów na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej albo w celu porównania wyników z ISS do wyników z RPM.

2.2. Możliwości badań na zaprojektowanym symulatorze

Próbki montowane w zaprojektowanym symulatorze są ograniczone głównie gabarytami oraz wagą. Wymiary próbki, powinny mieścić się we wnętrzu głównej kuli, środek masy układu powinien znajdować się w centrum głównej kuli konstrukcyjnej oraz sam eksperyment nie powinien zaburzać pracy urządzenia RPM.

Mówiąc o wymiarach próbki należy rozumieć sumacyjne wymiary próbki wraz z układem pomiarowobadawczym każdego zaprojektowanego eksperymentu (możliwość modyfikowania otoczenia symulatora (umieszczenie RPM w inkubatorze) oraz wnętrza kuli (umieszczenie inkubatora we wnętrzu głównej kuli konstrukcyjnej)).

Zaprojektowany układ daje możliwości zmiany mocowania badanej próbki adekwatnie do potrzeb prowadzącego badania.

Propozycje próbek / układów do badań na symulatorze:

- Hodowla komórkowa płaska – szalka Petriego,
- Przestrzenna hodowla komórkowa – scaffold wykonany z biomateriału,
- Układy do badania mikro przepływów – Lab-On-a-Chip (LOC).

3. Ocena wykonanego projektu oraz konstrukcji

- Cena wykonania pojedynczej maszyny RPM wynosi poniżej 1000 [zł] co jest niższym kosztem niż szacowano wstępnie,
- Niska waga (poniżej 3 [kg]) oraz gabaryty zaprojektowanego urządzenia zapewniają jego mobilność,
- Spełnienie pełnej funkcjonalności maszyny symulującej mikrogravitację przy jednoczesnym zapewnieniu mobilności urządzenia.

4. Możliwe zastosowania

- Prowadzenie badania długotrwałego wpływu symulowanej mikrogravitacji na hodowle komórkowe,
- Prowadzenie badań nad zaburzeniem geotropizmu małych roślin,
- Badanie wpływu symulowanej mikrogravitacji na małe układy elektroniczne oraz mechaniczne (mechanika płynów).

Literatura

- [1] T. Bonfiglio et al., “Simulated microgravity induces nuclear translocation of Bax and BCL-2 in glial cultured C6 cells,” vol. 5, no. May, 2019
- [2] S. Brungs et al., “Facilities for Simulation of Microgravity in the ESA Ground-Based Facility Programme,” *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 28, no. 3, pp. 191–203, 2016
- [3] Z. Chen et al., “Effect of Weightlessness on the 3D Structure Formation and Physiologic Function of Human Cancer Cells,” vol. 2019, pp. 1–17, 2019
- [4] C. Dietz, M. Infanger, A. Romswinkel, F. Strube, and A. Kraus, “Apoptosis Induction and Alteration of Cell Adherence in Human Lung Cancer Cells under Simulated Microgravity,” *Int. J. Mol. Sci. Artic.*, vol. 20, p. 3601, 2019.
- [5] A. R. Hargens and L. Vico, “Long-duration bed rest as an analog to microgravity,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 120, no. 8, pp. 891–903, 2016.
- [6] R. Hemmersbach, S. M. Strauch, D. Seibt, and M. Schuber, “Comparative studies on gravisensitive protists on ground (2D and 3D clinostats) and in microgravity,” *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 18, no. 3–4, pp. 257–259, 2006.
- [7] M. Krüger, M. Wehland, S. Kopp, and M. Infanger, “Life-Cell Imaging of F-Actin Changes induced by 6 min of Microgravity on a TEXUS,” no. January 2018, 2017

Część IV

Wydział Elektroniki,
Mikrosystemów i Fotoniki

Układ zasilania dla miniaturowego kwadrupolowego separatora jonów

inż. Bartosz Pośpiech

Elektronika i Telekomunikacja

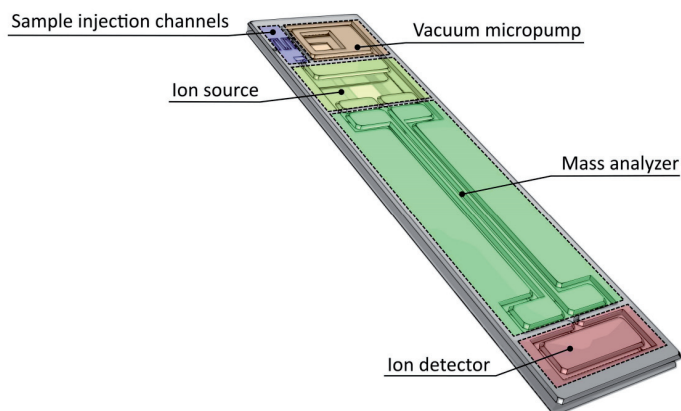
dr hab. inż. Tomasz Grzebyk

Katedra Mikrosystemów

Celem pracy było opracowanie układu zasilania do miniaturowego spektrometru mas konstruowanego na Politechnice Wrocławskiej na wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki w Katedrze Mikrosystemów w ramach grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju POL-SINIV/2/2018. Gotowa konstrukcja umożliwi analizę składu dowolnych mieszanin gazowych i wykorzystywana będzie między innymi w systemach monitorujących ilość szkodliwych gazów w procesach produkcyjnych. Urządzenie takie może zastąpić dedykowane dla jednego typu gazu czujniki elektrochemiczne, przedstawiając całe spektrum badanej mieszaniny gazowej z dużo większą dokładnością. Budowany układ cechuje się wysokim potencjałem badawczym oraz znacznym stopniem innowacyjności.

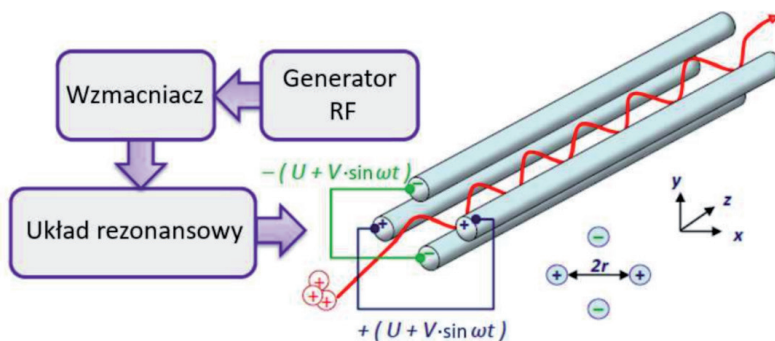
1. Wstęp

Spektrum masowe uzyskuje się w wyniku jonizacji badanej próbki doprowadzonej do źródła jonów w postaci gazowej. Jeżeli badana próbka jest np. cieczą uprzednio musi ona zostać odparowana w chromatografie cieczowym. Następnie określany jest stosunek masy do ładunku poszczególnych jonów - w wypadku urządzenia konstruowanego na wydziale jest to kwadrupolowy analizator masy. Po odfiltrowaniu jony docierają do detektora, skąd pobierany jest sygnał (wartość prądu jonowego), który po odpowiedniej obróbce wyświetlany jest na ekranie komputera w formie zrozumiałej dla technika obsługującego aparaturę – tzw. widmo masowe. Stosunek masy do ładunku określany jest na podstawie korelacji stosunku stałego napięcia polaryzującego filtr jonowy do napięcia przemiennego z mierzonym w tej samej chwili prądem jonowym.



Rysunek 13.1: Koncepcja budowy spektrometru MEMS: mikropompa próżniowa, układ dozowania próbki, źródło jonów, analizator mas, detektor

Filtr kwadropolowy zbudowany jest z 4 elektrod o przekroju cylindrycznym. Dwie przeciwległe elektrody są ze sobą połączone. Do połączonych par podawany jest sygnał radiowy o przeciwnej polaryzacji dla każdej z nich i napięcie stałe o takiej samej wartości, ale o przeciwnym znaku. W kwadropolu jony przemieszczają się wzdłuż prętów filtra „Z” oscylując w osiach X oraz Y.



Rysunek 13.2: Polaryzacja filtru kwadropolowego

Zmieniając stosunek stałego napięcia polaryzującego do napięcie przemiennego wybierane są jony, które są w stanie przelecieć przez filtr i dotrzeć do detektora.

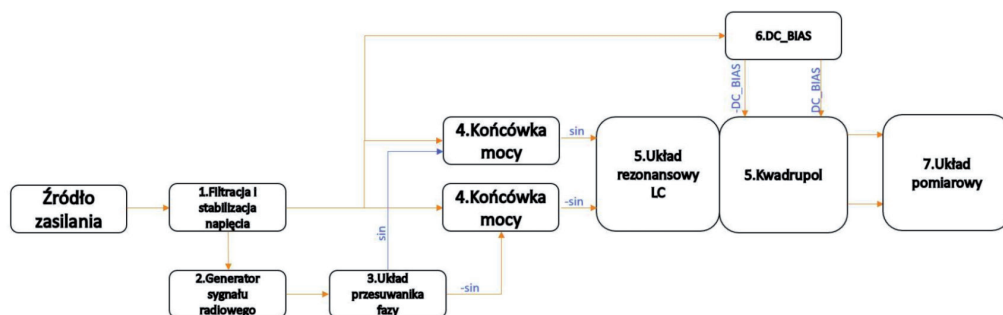
Parametry projektowanego układu muszą spełniać wymagania poprawnej polaryzacji miniaturowego filtra jonów – wynikają one z równań Mathieu. Obostrzenia te to:

- Częstotliwość pracy toru radiowego $f = 8 \text{ MHz}$,
- Amplituda V sygnału RF $U = 250 \text{ V}$,
- Napięcia stałe U zawierające się w przedziale $100 \text{ U } 100 \text{ V}$,
- Możliwość płynnej regulacji poszczególnych napięć

2. Projekt układu elektronicznego

W związku ze specyficznymi wymaganiami dotyczącymi zasilania miniaturowego kwadrupolowego filtra jonów wykonano dedykowany układ elektroniczny. Odpowiada on za generację wymaganych napięć polaryzujących filtr jonowy. Napięcie przemiennie o wymaganej częstotliwości generowane jest przez stabilizowany termicznie kwarcowy generator, a następnie jego amplituda jest zwiększana przez szeregowy układ rezonansowy RLC. Napięcia stałe generowane są przez przetwornice impulsowe. Pozostałe bloki znajdujące się na płycie zasilacza odpowiadają za płynną regulację i stabilizację wartości napięć polaryzujących oraz wytwarzanie wymaganych napięć zasilających poszczególne komponenty elektroniczne, dzięki czemu może być zasilony z dowolnego źródła napięcia stałego. Jest to istotne dla układów miniaturowych, w których dąży się również do miniaturyzacji źródeł zasilania i zmniejszenia poboru mocy.

W układzie zasilacza możemy wyróżnić podstawowe bloki niezbędne do jego poprawnego działania, przedstawia to poniższa ilustracja:



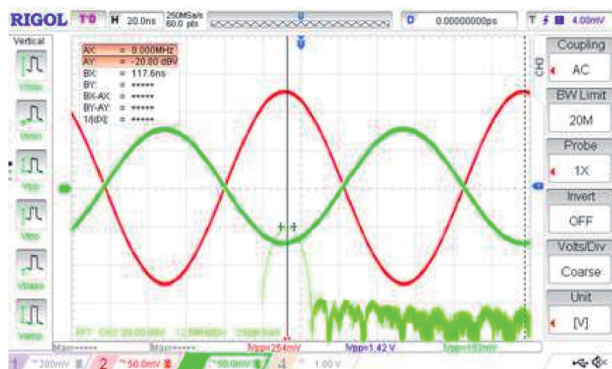
Rysunek 13.3: Schemat blokowy układu zasilającego, (opracowanie własne)

Blok filtracji i stabilizacji napięcia odpowiada za generację i stabilizację napięć potrzebnych do prawidłowego działania układu. Bloki generatora sygnału radiowego 2, oraz przesuwania fazy 3 odpowiadające za generację sygnału wysokiej częstotliwości, regulację amplitudy tego sygnału, oraz przesunięcie w fazie o π , w celu uzyskania przebiegu symetrycznego pozostawiono bez zmian ze względu na ich poprawne działanie w wersji pierwszej. Sygnał symetryczny trafia do końcówki mocy 4 zasilającej układ rezonansowy 5. Blok DC_BIAS 6 zapewnia odpowiednie napięcia stałe służące do odpowiedniego spolaryzowania kwadrupola. Układ pomiarowy 7 umożliwi pomiar aktualnego napięcia występującego na kwadrupolu.

3. Weryfikacja działania

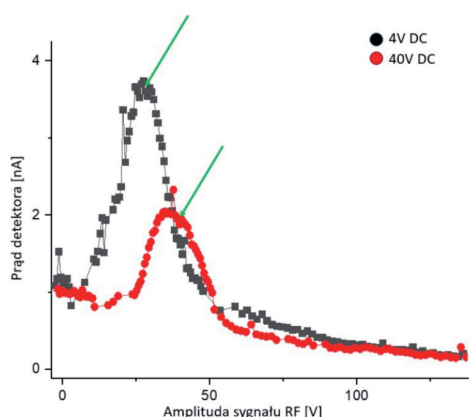
Pomiary elektryczne wykonanych bloków układu zasilającego wskazały na ich poprawne działanie i brak podatności na zmianę parametrów generowanych napięć w obecności jonów. W celu weryfikacji poprawności działania miniaturowego kompletnego spektrometru mas strukturę kwadrupola wraz z źródłem jonów i detektorem (wykonanymi w technologii MEMS) umieszczono w komorze próżniowej, w której zjonizowano resztkowe gazy

atmosferyczne. Zmieniając wartość napięcia przemiennego dla stałej wartości napięcia stałego, rejestrowano wartość prądu jonowego. Dla różnych wartości napięcia stałego charakterystyki są wyraźnie przesunięte względem siebie, co potwierdza poprawne działanie MEMSowego spektrometru mas.



Rysunek 13.4: Pomiar generowanej częstotliwości sygnały radiowego, (opracowanie własne)

Charakterystyka przedstawiona na rysunku 94 obrazuje zmianę prądu jonowego na detektorze przy zamianie napięć polaryzujących kwadropolowy filtr jonowy (zmieniano amplitudę sygnału RF dla dwóch różnych wartości napięcia stałego). Widać na niej obszary stabilizacji frakcji jonów o podobnych masach (wzrost prądu jonowego, zaznaczony strzałkami). Przesunięcie pomiędzy charakterystykami wynika z faktu, że chcąc utrzymać stabilny obszar pracy, dla danego napięcia stałego, należy indywidualnie dobrać odpowiednie napięcie zmienne. Widać również, że obszar stabilności przy napięciu niższym jest większy (wyższa wartość prądu) niż przy napięciu wyższym. Wyniki te mają potwierdzenie w teorii i wskazują na prawidłowe działanie kompletnego miniaturowego spektrometru mas, w tym zaprojektowanego układu elektronicznego.



Rysunek 13.5: Przykładowa zarejestrowana charakterystyka prądu jonowego przy różnych wartościach napięć polaryzujących

4. Podsumowanie

Przedmiotem pracy było wykonanie kompletnego układu zasilania dla miniaturowego spektrometru mas. We wstępie przedstawiono rozwiązania technologiczne opisane w literaturze, które pomogły lepiej zrozumieć zasadę działania takich układów i były punktem wyjścia do opracowanie własnego układu. W dalszej części pracy opisano w sposób szczegółowy dwa zaprojektowane układy wraz z propozycjami ich usprawnień.

Pierwszy z zaprojektowanych układów wykorzystujący transformator do zwiększania napięcia wyjściowego, po konsultacji z pozostałymi członkami zespołu, został odrzucony ze względu na jego wysoki koszt wykonania. Ostatecznie zdecydowano się na układ oparty o obwód rezonansowy. Opracowano poszczególne bloki funkcyjne takie jak: układ generacji i symetryzacji sygnału radiowego, układy generujące i stabilizujące wymagane napięcia stałe oraz układ symulujący działanie regulacji automatycznej. Wykonano symulacje, zaprojektowano odpowiednie płytki obwodów drukowanych oraz przetestowano ich działanie. Zmierzono właściwości elektryczne kwadrupola i kompletnego układu rezonansowego. Przeprowadzono szereg pomiarów potwierdzających poprawność działania zasilacza.

Wykonana została również struktura testowa, na której umieszczono kompletny miniaturowy spektrometr mas, układ rezonansowy wraz z układem pomiarowym. Pomiarzy na kompletnym miniaturowym spektrometrze mas przeprowadzone z wykorzystaniem wykonanego urządzenia wskazują na poprawne filtrowanie jonów. Oznacza to, że kwadrupolowy filtr jonowy polaryzowany jest w sposób prawidłowy.

Podczas uruchamiania układu elektronicznego ujawniono pewne błędy konstrukcyjne, przeprowadzono również analizę działania wykonanego urządzenia i na tej podstawie zaproponowano zmiany konstrukcyjne podnoszące funkcjonalność gotowego systemu. Wydaje się, że udoskonalanie układu zasilania zapewni optymalne i w pełni zautomatyzowane działanie kompletnego miniaturowego spektrometru.

Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych prac nad rozwojem miniaturowego spektrometru mas, w tym wymaganych układów elektronicznych.

Literatura

- [1] P. Szyszka, „A concept of MEMS mass spectrometer,” 2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE), June 2018, pp.1-4, pp. 1-4, 2018.
- [2] I. Cermak, „Compact radio-frequency power supply for ion and particle guides and traps,” Review of Scientific Instruments, nr 76, 2004.
- [3] M. Gebbia, „Low ESR Capacitors: Fact or Fiction?,” ENC, nr 95, 2001.
- [4] Littelfuse, „PRF-1150 1KW 13.56MHz class E RF generator evaluation module,” Littelfuse, 2019.
- [5] Mini-Circuits, „More than Just a Phase: Understanding Phase Stability in RF Test Cables,” Styczeń 2017.

Zminiaturyzowane laboratorium do hodowli grzybów w stanie nieważkości

inż. Tymon Janisz
Mechatronika

dr hab. inż. Tomasz Grzebyk
Katedra Mikrosystemów

Celem pracy było wytworzenie urządzenia lab-on-a-chip do hodowli grzyba gatunku *C. macrocarpum*, następnie zbadanie jak warunki symulowanej mikrogravitacji wpłyną na rozwój założonej hodowli.

1. Wstęp

W niniejszej pracy omówiono wieloetapowy proces wytworzenia autorskiego urządzenia typu lab-on-a-chip, służącego do hodowli grzybów gatunku *Cladosporium macrocarpum*. Wytworzony lab-chip posłużył badaniu wpływu warunków symulowanej mikrogravitacji na rozwój hodowli.

Po krótkim wprowadzeniu, zaprezentowano przegląd literatury poruszającej wykorzystanie mikrolaboratoriów chipowych do hodowli komórek i różnorodnych mikroorganizmów, a także rozwiązania używane w lab-chipach biologicznych, które znalazły zastosowanie na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej i w modułach satelitów.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono etapy pracy własnej: począwszy od badań nad wyborem właściwego materiału lab-chipa, przez dobór odpowiedniego gatunku grzyba, pierwsze implementacje lab-chipów hodowlanych, kończąc opisem gotowego urządzenia poddanego testom w warunkach symulowanej mikrogravitacji.

Ostatni rozdział poświęcono na dyskusję wyników oraz wnioski.

2. Dobór materiału

Jednymi z najpopularniejszych materiałów wykorzystywanych przy produkcji lab-chipów są krzem, szkło oraz polimery, np. PDMS. Z uwagi na specyfikę opracowywanego lab-chipa, wymagany był materiał przezroczysty, odpowiedni do czytelnej obserwacji mikroskopowej. W związku z powyższym kryterium, wykluczono możliwość zastosowania krzemu. Pozostałe dwa materiały (szkło i PDMS) poddano testom, w celu wybrania opty-

malnego podłoża do przeprowadzenia hodowli. Lista wad i zalet tych materiałów została zaprezentowana poniżej:

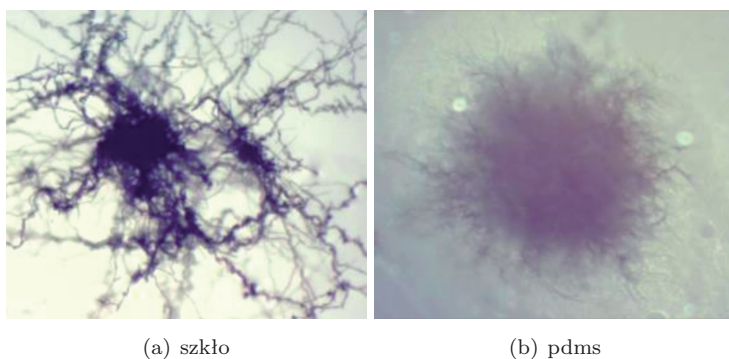
1. PDMS:

- zalety:
 - półprzepuszczalność dla gazów,
 - łatwość wytwarzania,
 - elastyczność.
- wady:
 - skomplikowany proces bondingu do innych podłoży,
 - mniejsza trwałość,
 - trudniejsza obserwacja mikroskopowa (matowienie).

2. szkło:

- zalety:
 - transparentność,
 - obojętność chemiczna,
 - trwałość i odporność na wysokie temperatury.
- wady:
 - wieloetapowy proces wytwarzania,
 - nieprzepuszczalność dla gazów.

Na poniższym rysunku przedstawiono wyniki mikroskopowej obserwacji hodowli grzyba na porównywanych powyżej podłożach.



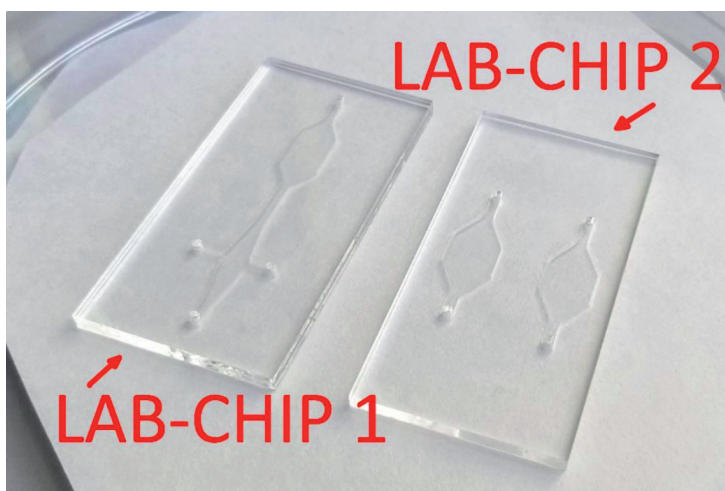
(a) szkło

(b) pdms

Rysunek 14.1: Wyniki mikroskopowej obserwacji

3. Konstrukcja lab-chipa

Chipy składały się z dwóch podłoży szklanych o wymiarach 50 x 25 mm. W dolnym podłożu znajdowały się mikrocele hodowlane oraz kanały mikrofluidyczne, przez które doprowadzono pożywkę do mikroceli. Kanały miały także zapewnić dostęp powietrza hodowanym grzybom. Mikrocele oraz kanały zostały wytworzone metodą mokrego trawienia szkła na głębokość $150\mu\text{m}$. Górne podłoże pełniło rolę wieka dla mikroceli hodowlanych. Nie trawiono w nim żadnych struktur, lecz wykonano otwory przy użyciu wiertarki precyzyjnej. Umożliwiło to dozowanie próbki biologicznej do kanałów mikrofluidycznych, znajdujących się w dolnym podłożu.



Rysunek 14.2: Gotowe lab-on-a-chipy 1 i 2 zaraz po wytworzeniu

Chip nr 1 składał się z dwóch mikroceli połączonych mikrokanalem. Cella o romboidalnym kształcie miała służyć do hodowli grzyba na pożywce stałej PDA, a cella o kształcie sześcioboku pełnić miała rolę celi hodowlanej z wykorzystaniem pożywki płynnej. Dwa dodatkowe kanały wychodzące z celi numer 1 miały spełniać funkcję portów do wprowadzenia pożywki oraz zapewniać dostęp tlenu dla hodowanego grzyba. Po wyhodowaniu grzyba w celi numer 1 na pożywce stałej PDA, kanałem I miała zostać wprowadzona pożywka płynna Czapek Dox. Przepływ miał spowodować oderwanie się zarodników od wyhodowanego grzyba i ich przemieszczenie do celi pomiarowej numer 2. Tam odbywać miała się hodowla z wykorzystaniem pożywki płynnej. To rozwiązanie pozwoliłoby na wielokrotną analizę rozwoju zarodników. Cella numer 1 pełniłaby rolę magazynu z wyhodowanym grzybem. Poprzez przepływ medium następowałaby wymiana hodowli ze starej na nową (przepływ usuwa starą hodowlę zastępując świeżymi zarodnikami hodowanymi w celi I). Pozwoliłoby to na prowadzenie kolejnych eksperymentów bez konieczności ręcznego zaszczepiania nowej hodowli.

Lab-chip numer 2 wykorzystywał tylko płynne medium. W porównaniu z poprzednim modelem, charakteryzował się mniej złożoną budową i funkcjonalnością. Wytrawiono w nim dwie równoległe cele pomiarowe o kształcie sześcioboku, z której każda posiadała dwa kanały doprowadzające medium. Zasada działania lab-chipa została tutaj uproszczona. Kanałami A doprowadzano zawiesinę zawierającą pożywkę oraz fragmenty grzybni. Gdy mieszanina wypełniła całą celę chip, był gotowy do prowadzenia obserwacji. Dodatkowa cella pełniła rolę zabezpieczenia, na wypadek niepowodzenia hodowli w celi numer 1. Cella numer 2 mogła też służyć do zmiany parametrów hodowli np. wprowadzenia odczynników chemicznych, zmiany pożywki itp., co pozwalałoby na prowadzenie bardziej zróżnicowanych eksperymentów. Po skończonej hodowli próbkę biologiczną można usunąć poprzez zapewnienie przepływu wody DI lub alkoholu etylowego, co znacznie ułatwia regenerację chipa.

4. Mikrogravitacja

Końcowy eksperyment zakładał prowadzenie jednocześnie dwóch hodowli z wykorzystaniem opracowanego wcześniej lab-on-a-chipa. Jedna z nich pełniła funkcję referencji, drugą natomiast umieszczono w urządzeniu, które miało za zadanie imitować warunki mikrogravitacji. Warunki symulowanej mikrogravitacji zostały uzyskane przy pomocy urządzenia RWV (Rotary Wall Vessel) udostępnionego dzięki uprzejmości Katedry i Zakładu Biologii Molekularnej i Komórkowej Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu.

Rotary Wall Vessel jest urządzeniem zaprojektowanym przez NASA do symulowania warunków mikrogravitacji komórek biologicznych. Składa się z masywnej obudowy i obrotowego trzpienia, na który zakładany jest bęben. Wyposażony jest on w całości wypełnione medium, w których umieszcza się badane komórki. Zasada działania RWV opiera się na powolnym, stałym obrocie bębna. Lab-chip doczepiony do bębna powoduje, że komórki w nim umieszczone ulegają ciągłemu swobodnemu spadkowi. Obrót jest na tyle powolny, że badane komórki, nie znajdując punktu zaczepienia na ściankach celi pomiarowej, tworzą trójwymiarowe skupiska, kontynuując „swobodny spadek”. Proces ten odwzorowuje aspekty prawdziwej mikrogravitacji. Jak dotąd, urządzenie znalazło zastosowanie głównie przy badaniu komórek biologicznych (nowotworowych, macierzystych), jednakże wykorzystanie zarodników grzybów jako obiektu badanego, z racji swoich niewielkich rozmiarów (ok. $5\ \mu\text{m}$ długości), umożliwia osiągnięcie podobnych warunków symulacji. Urządzenie, z którego korzystano podczas doświadczenia wyprodukowane zostało przez firmę SYNTHCON inc. na licencji NASA.



Rysunek 14.3: Urządzenie RWV z naklejonym badanym lab-chipem i lab-chipem referencyjnym

Jak zauważono, zarodniki poddane symulowanej mikrogravitacji kiełkowały znacznie bardziej niż te, umieszczone w lab-chipie referencyjnym.

5. Podsumowanie

Praca zakładała wytworzenie urządzenia lab-on-a-chip do hodowli grzybów i przetestowania hodowli w warunkach symulowanej grawitacji. Punktem wyjściowym do opracowania projektu lab-chipa był przegląd literatury poruszającej tematykę hodowli różnorodnych organizmów (w tym grzybów) na LOC oraz ich testów przeprowadzonych w warunkach obniżonego ciężenia.

Konsultacje przeprowadzone z Katedrą Ochrony Roślin Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu pozwoliły wybrać gatunki grzybów mogący posłużyć jako obiekty do badań w symulowanej mikrogravitacji: *F. culmorum*, *P. expansum* i *C. macrocarpum*, z których ze względu na relatywnie wysoka odporność na promieniowanie UV oraz gamma wybrano *C. macrocarpum* jako potencjalny gatunek do hodowli w przestrzeni kosmicznej.

Na podstawie przeanalizowanych projektów i rozwiązań zamieszczonych w literaturze, a także specyfiki hodowli wybranego gatunku – przeprowadzono testy dwóch potencjalnych materiałów (szkła i PDMS) do konstrukcji urządzenia LOC. Z uwagi na nieprawidłowy rozwój grzybni na strukturach PDMS do wytworzenia lab-chipa wykorzystano wyłącznie szkło borokrzemowe. Kolejnym etapem było opracowanie pierwszych iteracji docelowego urządzenia lab-on-a-chip. Po wstępnych testach stwierdzono, że kluczowym elementem przy hodowli grzybów mikroskopowych w zamkniętych szklanych strukturach mikrofluidycznych, jest dostęp powietrza do hodowli oraz odpowiedni stosunek ilości zarodników do objętości pożywki. Wyniki uzyskane podczas próbnych hodowli na pierwszych wytworzonych LOC pozwoliły udoskonalić ostateczną wersję urządzenia, a zaszczerpione na nim hodowle rozwijały się w sposób prawidłowy.

Uzyskanie pozytywnych wyników w realiach ziemskich pozwoliło podjąć próby hodowli na LOC w warunkach symulowanej mikrogravitacji. Symulowana grawitacja została uzyskana dzięki urządzeniu Rotary Wall Vessel (RWV). Czas symulacji wynosił 48h po tym czasie przeanalizowano pod mikroskopem lab-chip referencyjny oraz symulowany. Otrzymane wyniki pozwoliły ustalić, że w warunkach symulowanej grawitacji grzyb *C. macrocarpum* rozwijał się znacznie szybciej niż ten pozostawiony w warunkach ziemskiego ciężenia. Co ciekawe, największy rozrost grzybni zaobserwowano w celach pomiarowych znajdujących się dalej od środka obrotu maszyny RWV, co było dosyć niespodziewanym zjawiskiem, gdyż oczekiwano podobnych wyników we wszystkich trzech celach. Aby dokładniej zbadać niniejsze zjawisko należałoby przeprowadzić więcej testów na większej liczbie lab-chipów.

Czas poświęcony na opracowanie urządzenia nie pozwolił w pełni rozwinąć jego możliwości. W obecnej formie lab-chip umożliwia wyłącznie ręczne założenie hodowli i obserwację jej pod obiektywem tradycyjnego mikroskopu. W przyszłości projekt można rozszerzyć o dodatkową aparaturę pomiarową. Czujnik radiacji, miniaturowe kamery mikroskopowe, system regeneracji chipa i wymiany hodowli – to tylko niektóre z urządzeń i systemów mogące zwiększyć możliwości wytworzonego LOC i przeistoczyć go w pełni funkcjonujące samodzielne laboratorium chipowe.

Literatura

- [1] Lee SJ, Lee SY, Micro total analysis system (micro-TAS) in biotechnology, *Appl Microbiol Biotechnol* (2004) 64: 289–299 str. 1-2
- [2] Michał Laskowski, Mikrofluidyka – technologia miniaturyzacji laboratorium, LAB Laboratoria, Aparatura, Badania, 2011 str. 1-2
- [3] Status of the MEMS Industry 2019 Market and Technology Report – Sample, YOLE Developpement, 2019; slajd 17-19, <http://www.yole.fr> dostęp: 06.01.2020 22:001.
- [4] K. Soga, K. Wakabayashi, S. Kamisaka, T. Hoson, Stimulation of elongation growth and xyloglucan breakdown in *Arabidopsis hypocotyls* under microgravity conditions in space, *Planta* 2002.
- [5] W. A. Shiroma, L K. Martin I in.; *CubeSats: A Bright Future for Nanosatellites*, Central European Journal of Engineering, 2011, str. 1-2.
- [6] Claire E. Stanley i in., *Soil-on-a-Chip: Microfluidic platforms for environmental organismal studies*, Lab on a chip 2015, str. 1, 5-9
- [7] C. Kitts, K. Ronzano, I in., Flight Result from the GeneStat-1 Biological Microsatellite Mission, 21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007 str. 1-4, 6-10
- [8] W. Kubicki, *Technologia i właściwości chipu mikrofluidycznego do elektroforetycznej analizy niejednorodnego materiału genetycznego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2011

Projekt i wykonanie stanowiska pomiarowego do charakteryzacji materiałów, struktur i mikrogeneratorów termoelektrycznych

inż. Szymon Wójcik
Mechatronika

prof. dr hab. inż. Andrzej Dziejcz
Katedra Mikrosystemów

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego charakteryzację materiałów, struktur i mikrogeneratorów termoelektrycznych w dużym gradiencie temperatury. Układ ma umożliwiać zmiany nastaw dla zasilania elementów generujących gradient temperatury oraz pomiary temperatury zarówno na elementach przekazujących ciepło jak i na badanych strukturach termoelektrycznych. Wyniki pomiarów mają być zapisywane automatycznie, w sposób prosty do dalszej obróbki i analizy.

Efektom pracy nad stanowiskiem jest układ umożliwiający regulację napięcia zasilania dla elementów generujących różnicę temperatur, czteropunktowy pomiar temperatury, pomiar napięcia na strukturach termoelektrycznych za pomocą sond oraz zapis danych temperaturowych na komputerze w czasie rzeczywistym.

1. Wstęp

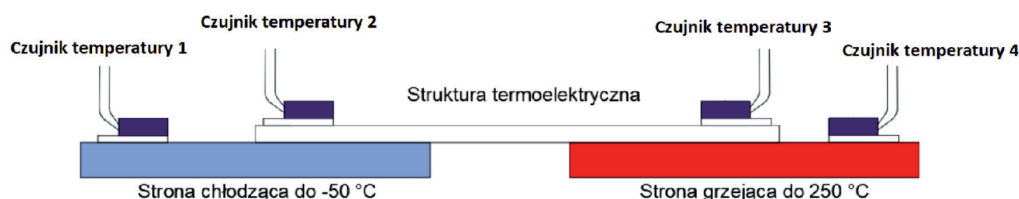
Zadaniem stanowiska było zapewnienie dużej różnicy temperatury między dwoma końcami płytki z niesionymi ramionami termostosu w celu wywołania zjawiska Seebacka w obwodzie naniesionych materiałów. Aby osiągnąć zamierzony cel sformułowano koncepcję projektu oraz kilka założeń. W kwestii koncepcji postanowiono zastosować element chłodzący jedną stronę struktury termoelektrycznej i element grzejący drugą stronę. Struktura termoelektryczna miała leżeć bezpośrednio na powierzchni elementu chłodzącego oraz grzejącego. Założenia projektu:

- uzyskanie gradientu do 300°C,
- chłodzenie jednej strony do -50°C,
- grzanie drugiej strony do 250°C,

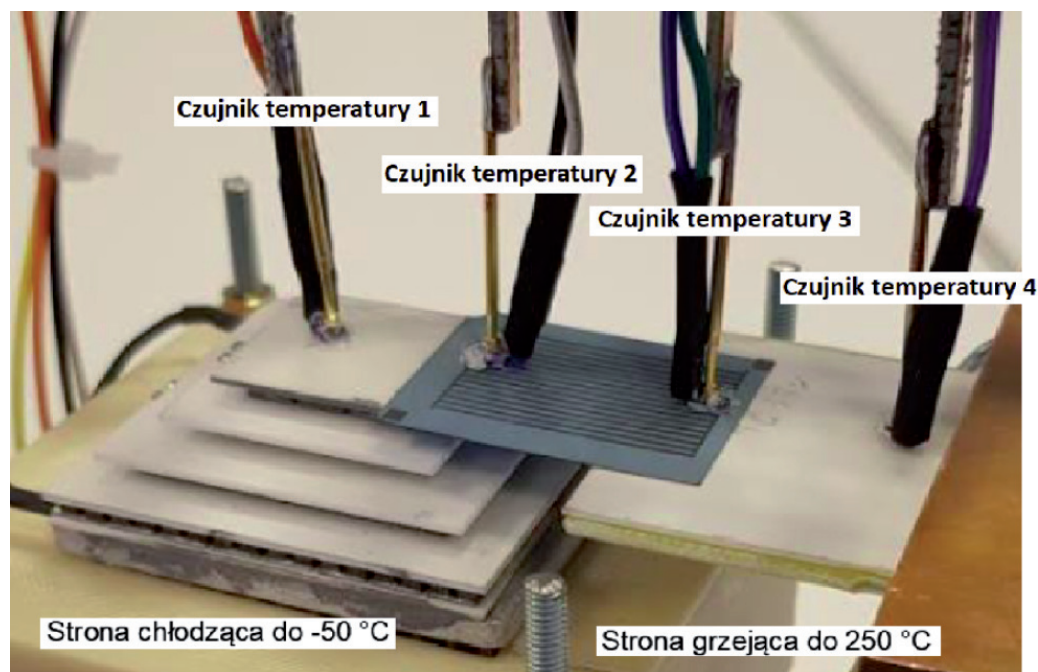
- pomiar temperatury w 4 punktach (na elemencie chłodzącym, grzejącym oraz bezpośrednio na strukturze termoelektrycznej po stronie chłodzonej i grzanej),
- automatyczny zapis danych pomiarowych na komputerze w czasie rzeczywistym,
- prezentacja danych w formie wykresu w czasie rzeczywistym.

2. Wykonanie

Jako element chłodzący zastosowano ogniwo Peltiera firmy Ecogen model TB-4-(127-71-31-17)-1,65, które podczas testów osiągnęło satysfakcjonujący wynik -36°C przy zasilaniu 12V. Do realizacji grzania wykonano projekt grzejnika grubowarstwowego, który następnie poddano procesowi sitodruku i wypalania. Grzejnik z pastą firmy ESL na bazie roztworu stałego PdAg uzyskał satysfakcjonujący wynik 245°C przy zasilaniu 12V.



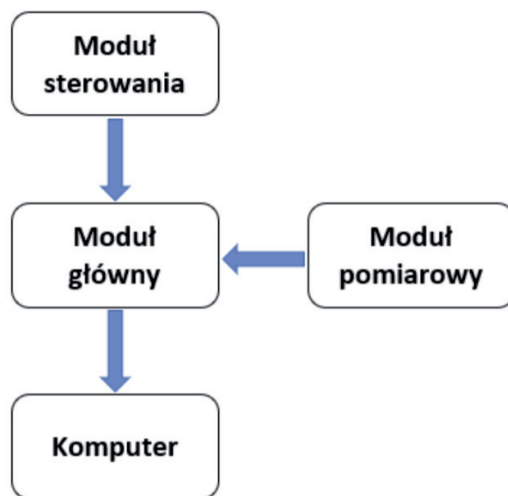
Rysunek 15.1: Koncept pomiaru i generowanie gradientu



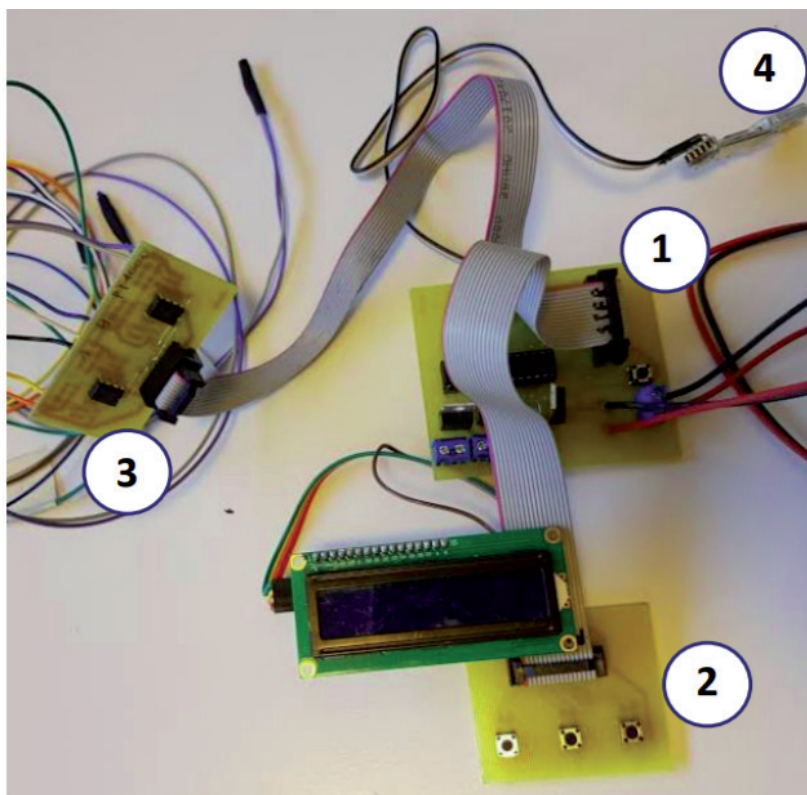
Rysunek 15.2: Pomiar i generowanie gradientu - wykonanie

Do realizacji funkcji logicznych stanowiska, zaprojektowano w programie Eagle, a następnie wytrawiono i polutowano 3 moduły łączone magistralami:

- moduł główny,
- moduł sterowania,
- moduł pomiarowy.



Rysunek 15.3: Wymiana informacji

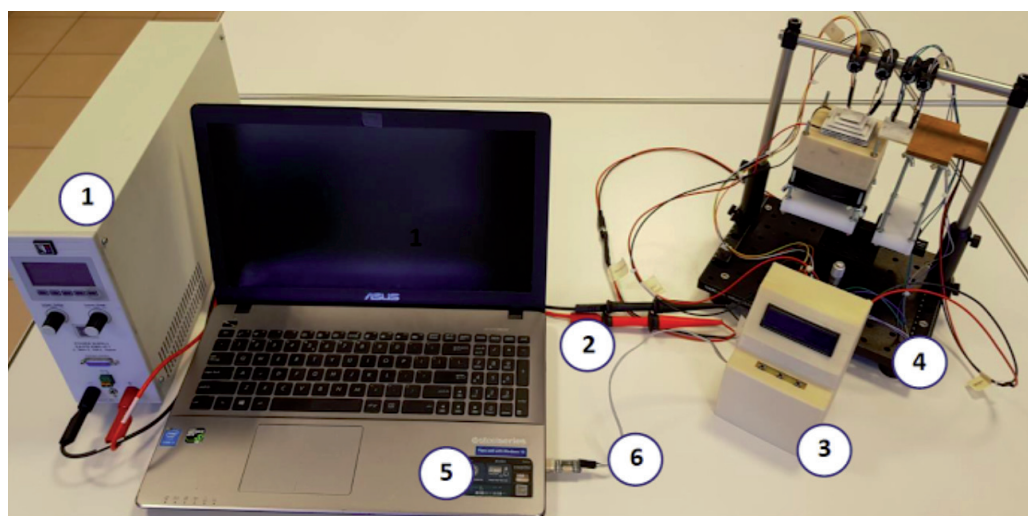


Rysunek 15.4: Połączone moduły; 1 - moduł główny; 2 - moduł sterowania; 3 - moduł pomiarowy, 4 - przewód USB do komunikacji z komputerem

Zadaniem modułu głównego opartego o mikrokontroler Atmega 328, było zbieranie danych pomiarowych, odczyt rozkazów wydawanych przyciskami, załączanie i wyłączenie tranzystorów dla ogniwa Peltiera oraz grzejnika, wysyłanie paczek danych do komputera z informacjami o zmierzonej temperaturze. Moduł sterowania posiadał 3 przyciski oraz wyświetlacz ciekłokrystaliczny na którym można było wybrać jeden z kilku trybów pomiarowych. Moduł pomiarowy posiadał 4 czujniki PT1000. Odczyt poprawnej temperatury został wykonany przy pomocy mostka wheatstone'a, gdzie w jednej gałęzi znajdował się czujnik PT1000, a następnie dwie gałęzie (o stałej rezystancji i o zmiennej rezystancji) były podłączone do wzmacniacza różnicowego. Wartości rezystorów zostały dobrane na podstawie symulacji w programie LTSpice, wyznaczając jak największy przedział napięć (w celu zapewnienia dużej rozdzielczości pomiarowej).

Do stanowiska wykonano 2 programy, jeden na mikroprocesor, a drugi na komputer. Mikroprocesor w efekcie zbiera sygnały z modułu sterowania i modułu pomiarowego, a następnie podejmuje odpowiednie decyzje pozwalając na pełną kontrolę przez operatora stanowiska. Program na komputer został wykonany w środowisku Visual Basic dla pliku excel. Dane z mikroprocesora są co sekundę wysyłane na komputer przez port USB, a następnie wklejane w coraz to niższe wiersze arkusza kalkulacyjnego. Na ich podstawie wykreslane są charakterystyki temperaturowe dla czterech czujników PT1000.

Ukończone stanowisko składa się z szeregu elementów, które pozwalają na realizację układowi zakładanych czynności (rys. 3.11). Ze względu na negatywny wpływ bloków miedzianych na parametry układu, pomiar odbywa się na powierzchni ogniwa oraz grzejnika. W skład stanowiska wchodzi następujące elementy: 1 - zasilacz laboratoryjny, ustawiony na 12V z ograniczeniem prądowym 10 A; 2 - przewody zasilające; 3 - sterownik stanowiska pomiarowego; 4 - układ pomiarowy; 5 - komputer zbierający dane; 6 - przewód USB do komputera.



Rysunek 15.5: Stanowisko pomiarowe do charakteryzacji materiałów, struktur i mikrogeneratorów termoelektrycznych.

3. Podsumowanie

Efektom projektu jest stanowisko pomiarowe składające się z dwóch elementów generujących gradient temperatury. Jeżeli chodzi o chłodzenie to jest to ogniwo Peltiera. Natomiast element grzejny stanowi rezystor grubowarstwowy. Cały układ jest kontrolowany przez mikroprocesor oraz czujniki, dzięki którym mierzona jest temperatura w czterech punktach stanowiska zaś wskazania czujników są wysyłane do komputera.

Teoretyczny gradient temperatury możliwy do uzyskania w tym konkretnie zaproponowanym układzie ogniwo Peltiera - grzejnik grubowarstwowy to około 290°C. Najważniejszym aspektem układu jest to, że temperatura zimnych końców struktur lub mikrogeneratorów może być poniżej 0°C. Może to prowadzić do obserwacji nowych właściwości struktur termoelektrycznych.

Ze względu na małą sprawność układu z bločkami miedzianymi, przy których gradient wyniósł około 100°C, ostatecznie odrzucono ten pomysł. Miedź mimo bardzo dobrej przewodności cieplnej powinna mieć stosunkowo niewielkie wymiary. Do stanowiska pomiarowego został zastosowany zbyt duży kawałek miedzi, nieodpowiedni do wymiarów ogniwa oraz grzejnika. Efektem tego było rozpraszanie ciepła w objętości miedzi. Zmniejszenie tych wymiarów powinno znacznie polepszyć efektywność transportu ciepła przez miedź.

Efektywny gradient uzyskany w czasie testów dla ogniwa oraz grzejnika bez bloków miedzianych wyniósł 237°C co jest satysfakcjonującym wynikiem.

Ze względu na potencjał stanowiska możliwe jest w przyszłości usprawnienie układu oraz jego modyfikacja pozwalająca na nowe funkcjonalności. Przykładowymi usprawnieniami mogą być:

- zautomatyzowany pomiar napięcia,
- precyzyjny pomiar temperatury z wykorzystaniem pirometrów,
- zastosowanie efektywniejszych elementów generujących różnicę temperatury,
- rozszerzenie układu o system stabilizacji temperatury na określonym poziomie,

Jak można zauważyć, opcji na rozwój stanowiska jest bardzo dużo i każda z nich pozwoli na usprawnienie przyszłych pomiarów lub ich wykonywanie z większą precyzją.

Literatura

- [1] K. Behnia, Fundamentals of thermoelectricity, Oxford University Press, Oxford, 2015
- [2] A. Trenczek-Zajac, Efekty termoelektryczne w ciałach stałych, Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego, AGH, Kraków, 2016
- [3] R. Pniewski, R. Kowalik, E. Sadowski, Ogniwo Peltiera w zastosowaniach praktycznych, Autobusy, vol. 18 (2017) nr 12, s. 1241-1244
- [4] M. Lisowski, P. Czop, Projektowanie, wytwarzanie i eksploatacja układów mechatronicznych, e-skrypt AGH, Kraków, 2016

- [5] S. Dziewięcki, Automatyczne stanowisko do charakteryzacji parametrów termoelektrycznych struktur wielowarstwowych, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2014
- [6] B.M. Wilamowski, J.D. Irwin, Fundamentals of industrial electronics, CRC Press, Boca Raton, 2011
- [7] M. Kardaś, Mikrokontrolery AVR- podstawy programowania, Atmel, Szczecin, 2013

Badanie właściwości elektrycznych cienkich warstw na bazie tlenków półprzewodnikowych

mgr inż. Patrycja Pokora
Elektronika i Telekomunikacja

dr hab. inż. Damian Wojcieszak
Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu dodatku kobaltu na wybrane właściwości elektryczne, optyczne oraz topografię powierzchni cienkich warstw Ti-Co oraz (Ti,Co)Ox, wytworzonych wysokoenergetyczną metodą rozpylania magnetronowego z targetów o różnym składzie. Pomiary przeprowadzono w Laboratorium Technologii Próżniowych i Diagnostyki Nanomateriałów w Katedrze Mikroelektroniki i Nanotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Targety na bazie tytanu i kobaltu wykonano metodą SPS (ang. spark plasma sintering) i zostały one wytworzone w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach. Przedmiotem badań były metaliczne oraz tlenkowe cienkie warstwy, wytworzone z targetów o różnej zawartości tytanu i kobaltu tj.: 95% at. Ti : 5% at. Co, 85% at. Ti : 15% at. Co, 50% at. Ti : 50 at. Co.

1. Motywacja

Praca poświęcona jest materiałom cienkowarstwowym na bazie tlenków półprzewodnikowych przeznaczonych do zastosowania w elektronice. W szczególności, zawiera ona opis wybranych właściwości tlenków na bazie tytanu i kobaltu wytwarzanych m.in. na potrzeby tzw. transparentnej elektroniki. Należą one do grupy tzw. nowych materiałów. Ich właściwości nie zostały jeszcze w pełni poznane i wykorzystane. Są one uważane za perspektywiczne dla elektroniki z uwagi na możliwość wytworzenia na ich bazie przezroczystych materiałów półprzewodnikowych o p-typie przewodnictwa elektrycznego. Warto podkreślić, że cienkie warstwy na bazie dwutlenku tytanu domieszkowanego kobaltem wykazują m.in. właściwości ferromagnetyczne w temperaturze pokojowej, co jest przydatne do tzw. zastosowań spintronicznych. Poza tym, tego typu materiały wykazują również właściwości charakterystyczne dla tzw. rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych (DMS – ang. Dilute Magnetic Semiconductors), co czyni je obiecującymi kandydatami do produkcji nowoczesnych urządzeń magnetooptycznych.

2. Metody pomiarowe

Zakres prac badawczych wykonanych w ramach pracy obejmował:

- pomiary grubości i topografii powierzchni powłok za pomocą profilometru optycznego, na podstawie których określono szybkość nanoszenia cienkich warstw i ich chropowatość,
- badania właściwości optycznych za pomocą metody transmisji światła, na podstawie których określono współczynnik transmisji warstw (T_{500}), położenie krawędzi optycznej absorpcji (λ_{cutoff}), a także szerokość optycznej przerwy energetycznej (E_g^{opt}),
- badania charakterystyk prądowo – napięciowych, które posłużyły do wyznaczenia rezystancji powierzchniowej, a także rezystywności powłok.

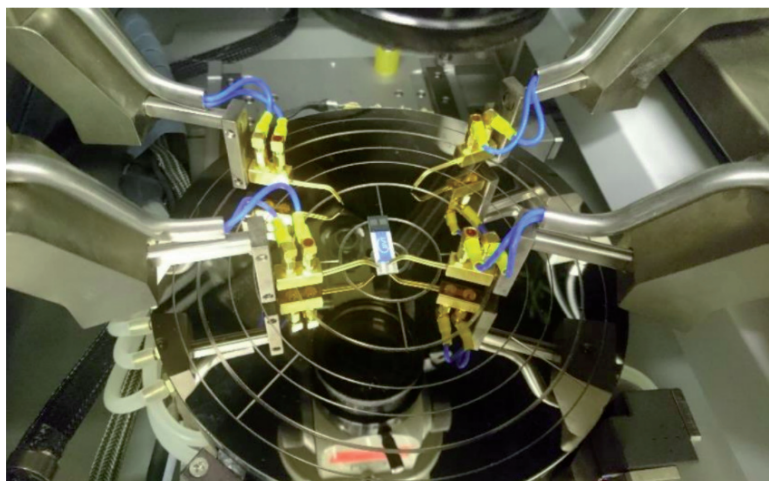
W ramach pracy wykonano badania i analizę właściwości optycznych i elektrycznych powłok cienkowarstwowych na bazie tlenków tytanu i kobaltu. Powłoki wytworzono metodą rozpylania magnetronowego w Laboratorium Technologii Próźniowych i Diagnostyki Nanomateriałów, w Katedrze Mikroelektroniki i Nanotechnologii (K70) Politechniki Wrocławskiej. Jest to metoda powszechnie stosowana w przemyśle do wytwarzania różnego rodzaju powłok (przewodzących, półprzewodnikowych i dielektrycznych). Cienkie warstwy wytworzono przez rozpylanie targetów Ti-Co o różnej zawartości tytanu i kobaltu tj.: $Ti_{95} : Co_5$, $Ti_{85} : Ti_{15}$, $Ti_{50} : Co_{50}$. Targety te zostały wykonane metodą SPS (ang. Spark Plasma Sintering) w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach.

Wprowadzenie do zagadnień związanych z właściwościami i obszarem zastosowania nanomateriałów cienkowarstwowych na bazie tlenków tytanu i kobaltu stanowi zamieszczony w pracy przegląd literatury. Został on opracowany ze szczególnym uwzględnieniem roli składu materiałowego powłok oraz parametrów procesów ich wytwarzania, a także zawiera informację o potencjalnym obszarze zastosowania tego typu materiałów.

Zakres prac badawczych wykonanych w ramach pracy obejmował pomiary grubości i topografii powierzchni powłok za pomocą profilometru optycznego, na podstawie których określono szybkość nanoszenia cienkich warstw i ich chropowatość. Kolejnym etapem były badania właściwości optycznych za pomocą metody transmisji światła, na podstawie których określono współczynnik transmisji warstw (T_λ), położenie krawędzi optycznej absorpcji (λ_{cutoff}), a także szerokość optycznej przerwy energetycznej (E_g^{opt}). Oprócz tego wykonano badania charakterystyk prądowo – napięciowych, które posłużyły do wyznaczenia rezystancji powierzchniowej i rezystywności powłok.

3. Wyniki pomiarowe

Poniższy rysunek przedstawia zdjęcie badanej próbki podczas pomiaru charakterystyk I-V.



Rysunek 16.1: Próbką podczas pomiaru charakterystyk I-V za pomocą charakterografu

Uzyskane wyniki pokazały, że skład targetu miał istotny wpływ na szybkość nanoszenia powłok, a także na ich właściwości optyczne i elektryczne. W szczególności, wraz ze wzrostem ilości kobaltu w targecie poziom transmisji $T_{\lambda=550\text{nm}}$ warstw tlenkowych zmniejszał się (z 78% do 59%), położenie optycznej krawędzi absorpcji (λ_{cutoff}) przesunęło się w stronę dłuższych fal (z 279 nm do 289 nm), a szerokość E_g^{opt} zmalała z 3,13 eV do 1,93 eV. Z kolei rezystywność warstw (ρ) wzrosła z $1,1 \cdot 10^8 \text{ cm}$ do $2,7 \cdot 10^8 \text{ cm}$. Oznacza to, że dobór odpowiedniego składu materiałowego targetu Ti:Co pozwala wytwarzać powłoki o odmiennych właściwościach, dzięki czemu mogą one znaleźć praktyczne zastosowanie w różnych obszarach elektroniki.

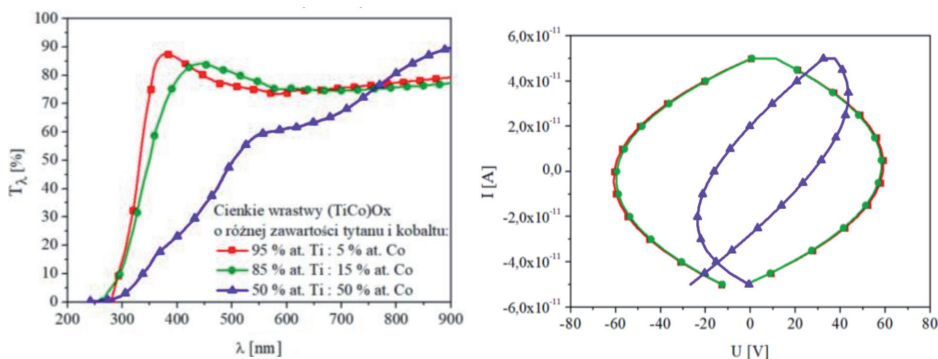
W poniższej tabeli przedstawiono zestawienie wartości wybranych parametrów optycznych i elektrycznych cienkich warstw (Ti, Co)Ox naniesionych metodą rozpylania magnetonowego z targetów o różnym składzie.

Tabela 16.1: Zestawienie wybranych parametrów optycznych i elektrycznych

Skład targetu	T_{550}	λ_{cutoff}	E_g^{opt}	R_{ρ}	ρ
Ti:Co	[%]	[nm]	[eV]	$\cdot 10^{13}$ []	$\cdot 10^8$ [cm]
95:5	75	279.1	3.13	1.796	1.155
85:15	78	287.7	2.78	1.747	1.228
50:50	59	289.1	1.93	1.713	2.685

gdzie: T_{550} - współczynnik transmisji dla długości fali $\lambda=550\text{nm}$, λ_{cutoff} - położenie długości fali odcięcia, E_g^{opt} - optyczna przerwa energetyczna, R_{ρ} - rezystancja powierzchniowa, ρ - rezystywność.

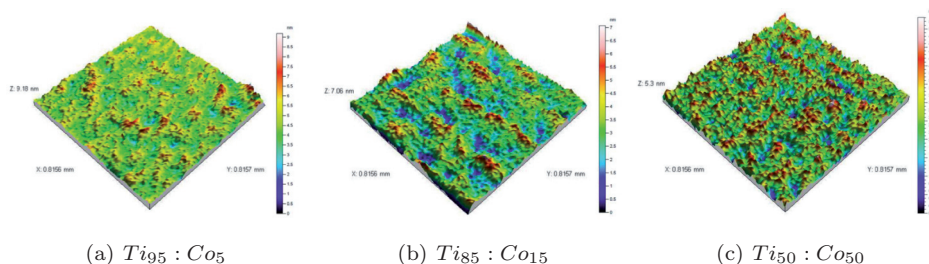
Na poniższym rysunku przedstawione zostały charakterystyki zebrane w trakcie wykonywania badawczej części projektu.



(a) Charakterystyki transmisji światła cienkich warstw (Ti,Co)Ox (b) Charakterystyka I-V cienkich warstw (Ti,Co)Ox

Rysunek 16.2: Wyznaczone charakterystyki

Na poniższym rysunku przedstawione zostały profile topografii powierzchni cienkich warstw (Ti,Co)Ox wytworzonych z targetów o różnym składzie materiałowym.



(a) $Ti_{95} : Co_5$

(b) $Ti_{85} : Co_{15}$

(c) $Ti_{50} : Co_{50}$

Rysunek 16.3: Trójwymiarowe profile topografii

4. Podsumowanie

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że parametry topografii powłok metalicznych mają przeciwną zależność niż powłok tlenkowych. Wysokość średniokwadratowej powierzchni (Sq) ma tendencję malejącą dla warstw metalicznych Ti-Co, natomiast dla powłok tlenkowych (Ti,Co)Ox rosnącą wraz z większą zawartością kobaltu w targecie. Średnia chropowatość cienkich warstw wytworzonych z targetów o zawartości 15 % at. Co wynosi 0,8 nm dla powłoki metalicznej, a w przypadku tlenkowej $Sq = 1,1$ nm.

Pozostałe powłoki metaliczne i tlenkowe na bazie tytanu i kobaltu charakteryzowały się jednakową wartością parametru Sq wynoszącą 0,9 nm. Analiza właściwości optycznych powłok tlenkowych, pokazała że charakteryzowały się one dużą przezroczystością zwłaszcza dla warstw wykonanych z targetów o zawartości 5 oraz 15% at. Co dla których współczynnik transmisji światła T_{550} wynosił odpowiednio 75 oraz 78%. Z kolei powłoki otrzymane z targetów z największą ilością kobaltu miały $T_{550} = 59\%$, co świadczy o nieco mniejszej przezroczystości. Natomiast położenie fali odcięcia rosło z 279,1 nm do 289,1

nm wraz ze wzrostem ilości Co w targecie. Z kolei optyczna przerwa energetyczna zmniejszała się wraz ze wzrostem ilości kobaltu w targecie. Wartość E_g^{opt} dla cienkich warstw wykonanych z targetów Ti95Co5, Ti85Co15, Ti50Co50 wynosiła odpowiednio 3,13 eV, 2,78 eV oraz 1,93 eV. Z kolei właściwości elektryczne, takie jak rezystancja powierzchniowa (R_ρ) i rezystywność (ρ) również ulegały zmianie w zależności od ilości kobaltu w targecie. Rezystancja powierzchniowa malała wraz ze wzrostem ilości Co w targecie, natomiast wartość rezystywności rosła. Uzyskane wyniki są zgodne z danymi zawartymi w literaturze przedmiotu.

Podsumowując można powiedzieć, że dobór odpowiedniej ilości kobaltu w targecie Ti-Co ma duży wpływ na właściwości metalicznych i tlenkowych powłok.

Literatura

- [1] K. Hara, T. Horiguchi, T. Kinoshita, K. Sayama, H. Arakawa, Influence of electrolytes on the photovoltaic performance of organic dye-sensitized nanocrystalline TiO₂ solar cells, *Solar Energy Materials Solar Cells*, Vol. 70 (2001), s. 151
- [2] P. Alexandrov, J. Koprinarova, D. Todorov, Dielectric properties of TiO₂-films reactively sputtered from Ti in an RF magnetron, *Vacuum*, Vol. 47 (1996), s. 1333
- [3] T. Fukumura, Y. Yamada, H. Toyosaky, T. Hasegawa, H. Koinuma, M. Kawasaki, Exploration of oxide-based diluted magnetic semiconductors toward transparent spintronics, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 223 (2004), s. 62
- [4] M. J. Jacson, J. Kopac, M. Balazic, D. Bombac, M. Brojan, F. Kosel, Titanium and Titanium Alloy Applications in Medicine, Springer International Publishing Switzerland, Vol. 15 (2019), s. 475
- [5] Danuta Kaczmarek, Modyfikacja wybranych właściwości cienkich warstw TiO₂, Oficyna Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008
- [6] S. Husain, L. A. Alkhtaby, E. Giorgetti, A. Zoppi., M. Muniz Miranda, Influence of cobalt doping on the structural, optical and luminescence properties of sol-gel derived TiO₂ nanoparticles, *Philosophical Magazine*, 2017 Vol. 97:1, s. 17
- [7] Alamgir, W. Khan, S. Ahmad, M. Mehedi Hassan, A. H. Naqvi, Structural phase analysis, band gap tuning and fluorescence properties of Co doped TiO₂ nanoparticles, *Optical Materials*, Vol. 38 (2014), s. 278

Opracowanie technologii i badanie właściwości trójwymiarowych elektrod na potrzeby celi elektrochemicznej wykonanej w oparciu o druk 3D

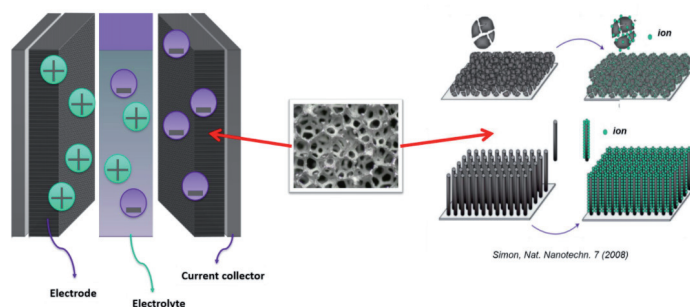
mgr inż. Piotr Śliwiński
Elektronika i Telekomunikacja

dr inż. Karolina Laszczyk
Katedra Mikrosystemów

Celem niniejszej pracy było opracowanie geometrii oraz technologii wytwarzania trójwymiarowych elektrod dla SC wykorzystującego zjawisko podwójnej warstwy elektrycznej, korzystając przy tym z druku 3D jako taniej oraz dynamicznie rozwijanej technologii, gwarantującej dużą elastyczność w projektowaniu geometrii urządzenia. Do osiągnięcia celu należało zaprojektować, wytworzyć i zbadać co najmniej kilka urządzeń o różnorodnym kształcie i odmiennej metodzie aplikacji materiału elektrodowego, a także zanalizować i porównać otrzymane wyniki z SC produkowanymi komercyjnie. Jako wysokopowierzchniowy materiał elektrodowy wykorzystano zawieszinę jednościennych nanorurek węglowych w wodzie oraz izopropanolu. W roli elektrolitu zdecydowano się użyć kwas siarkowy(VI), ze względu na jego powszechność w pracach o podobnej tematyce.

1. Wstęp

Superkondensatory (SC, ang. supercapacitors), są urządzeniami magazynującymi podobnie do baterii, akumulatorów czy kondensatorów. Charakterystycznym elementem ich budowy są elektrody z materiałów o znacznej powierzchni właściwej. W większości przypadków SC magazynują energię w wyniku ładowania i rozładowywania na granicy między elektrodą i elektrolitem, na której to tworzy się podwójna warstwa elektryczna. Porównując superkondensatory z bateriami, stwierdzić można, że mają one znacznie wyższą gęstość mocy, szybsze czasy ładowania oraz znacznie większą żywotność. Superkondensatory charakteryzują się możliwością magazynowania energii z krótkich jej impulsów, przez co idealnie nadają się do odzyskiwania energii z otoczenia. Za przykład posłużyć może system hamowania rekuperacyjnego KERS (ang. kinetic energy recovery system) stosowany w niektórych samochodach.

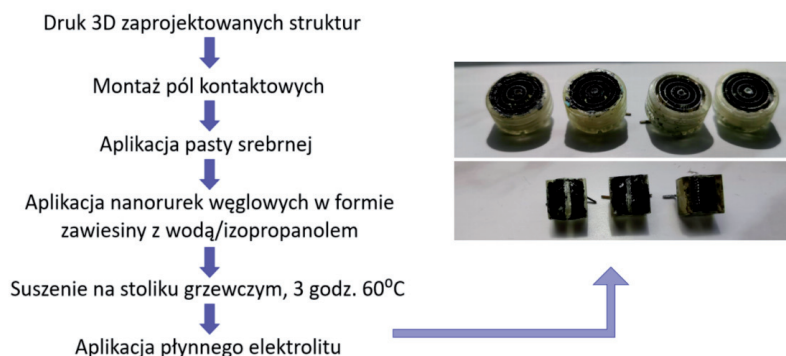


Rysunek 17.1: Schemat działania superkondensatora

2. Wytwarzanie

Superkondensatory wykonane zostały za pomocą druku 3D, metodą DLP (ang. Digital light processing). Budowanie modelu polega na polimeryzacji (fotoutwardzaniu) żywicy światłoczułej za pomocą światła projektora. Ruchomy stół roboczy, pełniący rolę podstawy, zanurzony jest całkowicie w żywicy. Porusza się on skokowo w osi Z, wyciągając model i pozwalając na naświetlenie kolejnej warstwy. Technologia ta pozwala na tworzenie modeli o skomplikowanej budowie, wymagających dużych dokładności. Użyto drukarki Anycubic Photon (Anycubic, Chiny) SLA/DLP, która pozwala wytwarzać warstwy o grubości $25\text{--}100\mu\text{m}$ i rozdzielczości w osiach XY $47\mu\text{m}$. Elektrody węglowe nanoszone były w formie płynnej zawiesiny, za pomocą pipety na wydrukowane wcześniej elementy. Analogicznie przewodząca pasta srebrna, której konsystencja również zbliżona jest do płynnej, aplikowana była za pomocą strzykawki. Kolejnym krokiem było utwardzanie poprzez wygrzewanie całości w celu odparowania rozpuszczalników.

Finalnie otrzymano SC, których elektrody węglowe oraz MCC są utwardzone. Po dodaniu elektrolitu superkondensatory były gotowe do badań. Rysunek poniżej obrazuje kroki technologiczne w kolejności chronologicznej prowadzące do uzyskania gotowych SC w wariantach okrągłym oraz prostokątnym.

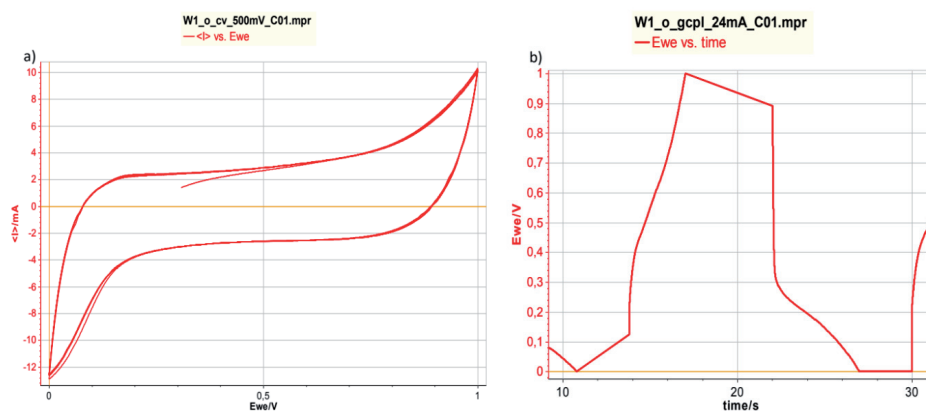


Rysunek 17.2: Kroki technologiczne wytworzenia SC z wykorzystaniem druku 3D

3. Wyniki

Urządzenia przebadane zostały przy pomocy zaawansowanej aparatury badawczej – potencjostatu/galwanostatu SP200 firmy Biologic wykorzystując standardowe metody charakteryzacji elektrochemicznej: cyklowoltamperometrię, galwanostaticzne ładowanie/rozładowanie i elektrochemiczną spektroskopię impedancyjną. Badano w ten sposób siedem urządzeń: cztery o geometrii okrągłej oraz trzy prostokątnej. Cztery na trzy urządzenia działały poprawnie. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości pojemności oraz pojemności specyficznej (w odniesieniu do objętości urządzenia).

Przykładowa charakterystyka cyklowoltoamperometryczna oraz krzywa galwanostaticzna dla superkondensatora okrągłego z nanorurkami z zawiesziny z wodą przedstawione zostały poniżej.



(a) charakterystyka cyklowoltoamperometryczna

(b) krzywa galwanostaticzna

Rysunek 17.3: Wyznaczone charakterystyki dla superkondensatora

Uzyskane na podstawie przedstawionych powyżej charakterystyk wartości pojemności dla poszczególnych struktur przedstawione zostały w tabeli poniżej.

Tabela 17.1: Wartości pojemności dla poszczególnych struktur

Nr	Zawiesina	Elektrolit	Objętość SC (wewnętrzna) cm^3	Pojemność μF	Pojemność specyficzna $\frac{\mu F}{cm^3}$
1_OW	H_2O	3.6M H_2SO_4	1.98	25000 – 215000F	12626 – 108586
2_OW	H_2O			—	—
3_OI	IPA			3560	1798
4_OI	IPA		5700	2879	
5_PW	H_2O		0.66	—	—
6_PI	IPA			—	—
7_PI	IPA			1000	1515

4. Wnioski

Dzięki wcześniejszym próbom mającym na celu ustalenie możliwości technicznych Druku 3D DLP, udało się ustalić optymalne parametry druku i wymiary poszczególnych elementów SC, co poskutkowało pomyślnym wykonaniem czterech superkondensatorów typu okrągłego i trzech typu kwadratowego. Dzięki zaawansowanej aparaturze badawczej – potencjostatowi/galwanostatowi SP200 firmy Biologic – pomiary były bardzo dokładne i pozwoliły uzyskać rzetelne wyniki. Superkondensatory scharakteryzowano z wykorzystaniem takich metod jak: cyklowoltamperometria, galwanostatyczne ładowanie/rozładowanie i elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna. Pomiary wykazały poprawne działanie większości SC. Nie udało się wytworzyć SC o sprawności porównywalnej z rozwiązaniami komercyjnymi. Wykryto zachodzenie niepożądanych w superkondensatorze podwójnej warstwy elektrycznej, reakcji typu redox. Osiągnięta pojemność również nie spełniała oczekiwań, powodem czego najprawdopodobniej była wysoka rezystancja wewnętrzna elementów wytworzonych superkondensatorów. Dla przyszłych prac nad tym tematem warto zastosować iteracyjną metodę prototypowania, polegającą na wprowadzaniu poprawek i natychmiastowe badanie urządzenia potencjostatem/galwanostatem w celu utrzymania odpowiedniego kierunku prac. Przydatne okazałyby się również badania obrazowe struktury elektrod. Szczególnie obiecujące wyniki otrzymano dla superkondensatora okrągłego z CNT aplikowanymi z zawiesiny z izopropanolem, która umożliwia prosty proces aplikacji. Mimo użycia elektrolitu płynnego, na niskie wyniki pojemności wpływ mogła mieć niewystarczająca zwilżalność elektrod przez elektrolit. Powodem mogła być niesprzyjająca temu struktura objętościowa elektrody CNT.

Na podstawie otrzymanych wyników można wysunąć kilka ścieżek które należałoby obrać w przyszłości. Przede wszystkim, trzeba opracować sposób aplikowania materiału elektrodowego, pozwalający uzyskać strukturę o optymalnych rozmiarach porów, umożliwiając tym samym dobry transport jonów oraz zmniejszyć odległość między elektrodami.

Rozwój urządzeń magazynujących energię jest priorytetem w czasach ogólnodostępnej elektroniki i podczas dążenia do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Superkondensatory charakteryzują się właściwościami, dzięki którym idealnie nadają się do zastosowań w takich dziedzinach jak motoryzacja, przemysł, elektronika użytkowa czy energetyka odnawialnych źródeł energii.

Literatura

- [1] O. Hoegh-Guldberg, D. Jacob, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante et al., in: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani et al. (Eds.), *Global warming of 1.5°C*, IPCC Secretariat, International, 2018, pp. 175–311.
- [2] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani et al. (Eds.), *Global warming of 1.5°C*, IPCC Secretariat, International, 2018.
- [3] J.P. Staniszewski, R. Kucman, S. Galla, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 40 (2014) 95–98.

- [4] J.Menzel, Kondensatory hybrydowe o wysokich wartościach mocy i energii. ROZPRAWA DOKTORSKA, Poznań, 2016.
- [5] M. Aliofkhaezai (Ed.), Modern Electrochemical Methods in Nano, Surface and Corrosion Science, InTech, 2014.
- [6] P. Sharma, V. Kumar, Journal of Elec Materi 16 (2020) 2154.
- [7] W. Yang, J. Yang, J.J. Byun, F.P. Moissinac, J. Xu, S.J. Haigh, M. Domingos et al., Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.) 31 (2019) e1902725.

Wytwarzanie i właściwości kompozytu na bazie żywicy epoksydowej i nanocząstek na potrzeby druku 3D

mgr inż. Aleksandra Chudzyńska
Elektronika i Telekomunikacja

dr inż. Damian Nowak
Katedra Mikrosystemów

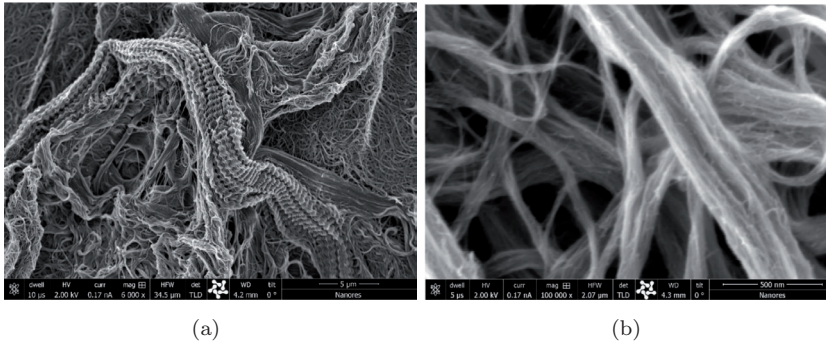
W ramach pracy dyplomowej, jako nowy materiał rozpatrywano kompozyt żywicy epoksydowej z nanocząstkami węglowymi na potrzeby druku 3D. Na podstawie dostępnej literatury w pracy przedstawiono aktualne postępy w projektowaniu nanokompozytów składających się z żywicy epoksydowej, która pełni rolę osnowy i nanorurek węglowych wykorzystanych jako nanonapełniacz. Na wstępie prac eksperymentalnych niezbędna była próba ustalenia proporcji zarówno osnowy jak i nanocząstek, które dadzą przewodzący kompozyt. Koniecznym było poznanie zachowania obu materiałów po zmieszaniu ze sobą i naświetleniu przenośną lampą UV (ang. Ultraviolet), bez użycia drukarki 3D, oraz wykonanie pomiarów elektrycznych uzyskanych struktur. Takie podejście pozwoliło przede wszystkim na oszczędzenie materiałów. Kolejnym etapem było wykonanie w programie Autodesk Inventor dwóch foremek do próbek testowych - pierwszą o różnych głębokościach (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm) oraz drugą o stałej głębokości (0,5 mm), do których za pomocą pipety wprowadzano kompozyt i naświetlano go pod lampą UV. Następnie zmierzono wartość rezystancji w celu określenia właściwości elektrycznych otrzymanych próbek. Dodatkowo wykonano obrazy SEM (ang. Scanning Electron Microscope) stosowanych nanorurek.

1. Wprowadzenie

Technologia druku 3D ma wiele zalet, tj. łatwość obsługi, niezawodność. Właściwości te umożliwiają wykonanie struktur do zastosowań od mikroelektroniki i mikrosystemów (np. struktury lab-on-chip) do wielkogabarytowych komponentów (np. skrzydła samolotu). Połączenie druku 3D z nanotechnologią daje nowe możliwości dla produkcji materiałów trójwymiarowych. Przez włączenie nanomateriałów (np. nanorurek węglowych) do procesu druku zwiększa się praktyczność produkowanego urządzenia, np. dzięki uzyskaniu lepszej przewodności elektrycznej.

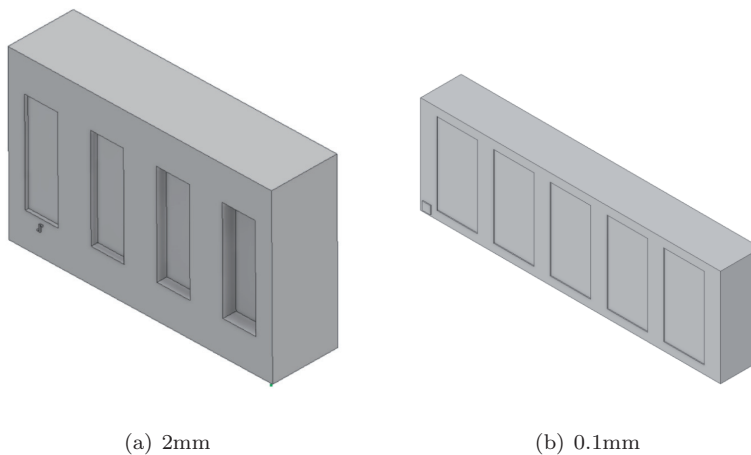
2. Badania

Celem pracy było przygotowanie metody wykonania kompozytu na bazie żywicy epoksydowej i nanocząstek oraz pomiar jego właściwości elektrycznych. Do wykonania kompozytu zastosowano jako zbrojenie jednościenne nanorurki węglowe (rys. 18.1), zaś jako osnowę - żywicę epoksydową stosowaną w DLP.



Rysunek 18.1: Obrazy SEM jednościennych nanorurek węglowych

Nanokompozyt wprowadzono do przygotowanych form o głębokości: 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm (rys. 18.2a) oraz 0,1 mm (rys. 18.2b).



Rysunek 18.2: Formy do struktur testowych

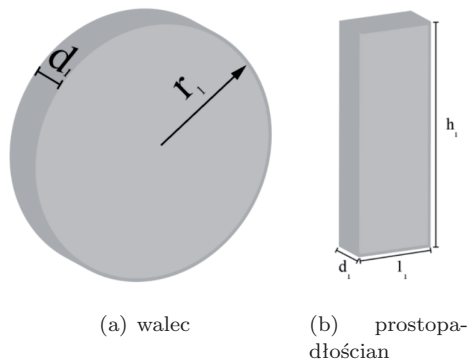
Przeprowadzone prace technologiczne wykazały:

- osadzanie nanorurek węglowych na dnie formy, powodując powstawanie wierzchniej warstwy izolującej,
- między osnową a zbrojeniem tworzył się bąbel powietrzny,
- żywica epoksydowa nie była utwardzona, co świadczy o braku reakcji polimeryzacji.

3. Propozycja prac technologicznych

Po wykonaniu wstępnych prac laboratoryjnych i omówieniu otrzymanych wyników, zaproponowano kluczowe zmiany w pracach laboratoryjnych, które posłużą do uzyskania przewodzących struktur nanokompozytowych wykonanych w procesie druku 3D techniką DLP (ang. Digital Light Processing). W celu otrzymania dobrze rozproszonych nanorurek należy skorzystać z mieszania magnetycznego i techniki ultrasonikacji. Wykorzystanie tych metod pomoże rozbić powstały konglomerat nanonapełniacza. Posługując się szeroko stosowanymi wzorami w badaniach przewodnictwa nanokompozytów polimerowych zawierających nanorurki węglowe jako nanonapełniacz wykonano przykładowe obliczenia przewodnictwa i progu perkolacji oraz sformułowano zależności wpływające na te parametry. Dodatkową propozycją dalszych prac badawczych jest wykorzystanie dwuskładnikowego nanonapełniacza w celu uzyskania większej przewodności struktur. Zastosowanie zbrojenia w formie dwóch różnych odczynników geometrycznych, np. grafenu z nanorurkami węglowymi, przyczyni się do zmniejszenia całkowitej zawartości cząstek w wyniku tworzenia regularnej sieci wspomagającej oba materiały.

Przed przystąpieniem do czynności laboratoryjnych należy wykonać projekt struktur, które chcemy otrzymać. Wymiary próbek powinny zostać dobrane pod możliwości aparatury pomiarowej firmy Ossila. Dopuszczalne wymiary do pomiaru metodą czteropunktową przedstawiono w tabeli poniżej.



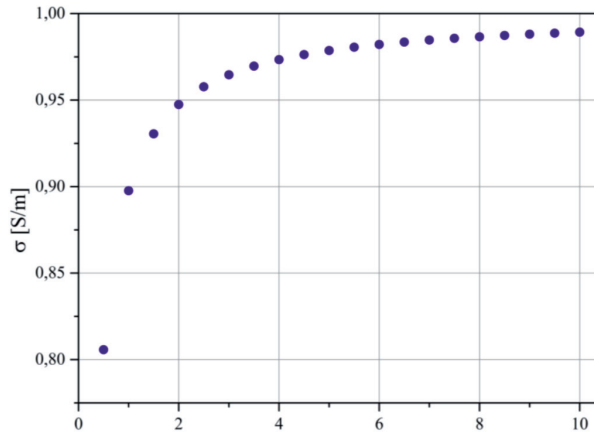
Rysunek 18.3: Propozycja nowych struktur testowych

Tabela 18.1: Propozycja nowych struktur testowych

Wymiar	d	r	h	l
Wartość [mm]	8	10	16	10

Przed drukowaniem nowych struktur techniką DLP, należy zastosować mieszanie magnetyczne zbrojenia oraz przeprowadzić kąpiel kompozytu w ultradźwiękach.

Przykładowe obliczenia przewodności elektrycznej dla zaproponowanych struktur z zawartością zbrojenia zmieniającego się od 0,5% do 10%.



Rysunek 18.4: Charakterystyka zmiany przewodności kompozytu w funkcji zawartości zbrojenia

4. Podsumowanie

Założeniem pracy było przygotowanie opisu metody wykonania i właściwości kompozytu na bazie żywicy epoksydowej i nanocząstek na potrzeby druku 3D. Na podstawie dostępnej literatury przedstawiono aktualne postępy w projektowaniu nanokompozytów składających się z żywicy epoksydowej, która pełni rolę osnowy i nanorurek węglowych wykorzystanych jako nanonapełniacz.

W ramach części projektowej opisano wykonane wstępne prace laboratoryjne oraz dołączono obrazy SEM dostępnych CNT, które docelowo zostaną wykorzystane w późniejszych pracach badawczych. Przeprowadzone procesy technologiczne wykazały liczne defekty powstające w trakcie utwardzania kompozytu, m.in.: na powierzchni próbek tworzyły się bąble powietrzne, nie zachodziła reakcja polimeryzacji żywicy epoksydowej oraz CNT osadzały się na dnie próbki. Dodatkowo wartość rezystancji struktur wskazywała na powstanie warstwy izolującej. Ponadto, zaproponowano nową ścieżkę prac technologicznych z wykorzystaniem, wcześniej niezastosowanej przy mieszaniu materiału, metody dyspersji CNT, wykonanie kompozytu hybrydowego oraz potencjalne możliwości zastosowania struktur.

Posługując się szeroko stosowanymi wzorami w badaniach przewodnictwa nanokompozytów polimerowych zawierających nanorurki węglowe jako nanonapełniacz wykonano przykładowe obliczenia przewodnictwa i progu perkolacji oraz sformułowano zależności wpływające na te parametry. Otrzymane wartości porównano z opublikowanymi w licznych pracach poświęconych NKP-CNT.

Wykonanie nanokompozytu na bazie żywicy epoksydowej i nanorurek węglowych metodą druku 3D, techniką DLP jest aktualnie bardzo niszową formą otrzymywania struktur przewodzących. Jednak może być obiecującą technologią do wykonania elementów mikroelektronicznych w jednym procesie. Ciągła optymalizacja parametrów badań laboratoryjnych może doprowadzić do uzyskania struktur o najbardziej pożądanym właściwościach elektrycznych.

Literatura

- [1] R. Bielawski, Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych, Rozprawa Doktorska, 2016, Warszawa
- [2] M. Monthieux, V. L. Kuznetsov, Who should be given the credit for the discovery of carbon nanotubes?, Carbon, 2006, Vol. 44, 1621–1623
- [3] R. Rao, C. L. Pint, A. E. Islam, Robert S. Weatherup, S. Hofmann, Carbon Nanotubes and Related Nanomaterials: Critical Advances and Challenges for Synthesis toward Mainstream Commercial Applications, ACS Nano, 2018, 1175611784.
- [4] S. Iijima, Carbon nanotubes: past, present, and future, Physica B, 2002, Vol. 323, 1–5
- [5] R. Xiang, T. Inoue, One-dimensional van der Waals heterostructures, Science, 2020, Vol.367, 537–542.
- [6] L.-C. Qin, Determination of the chiral indices (n,m) of carbon nanotubes by electron diffraction, Phys Chem Chem Phys, 2007, Vol. 9, 31–48
- [7] T. J. Sisto, L. N. Zakharov, B. M. Whitea, R. Jasti, Towards pi-extended cycloparaphenylenes as seeds for CNT growth: investigating strain relieving ring-openings and rearrangements, Chemical Science, 2016, Vol. 7, 3681–3688
- [8] A. Izadi-Najafabadi, D. N. Futaba, S. Iijima, K. Hata, Ion Diffusion and Electrochemical Capacitance in Aligned and Packed Single-Walled Carbon Nanotubes, J. AM. CHEM. SOC.2010, 132, 18017–18019.
- [9] W. S. Khan, N. N. Hamadneh, W. A. Khan, Polymer nanocomposites – synthesis techniques, classification and properties, Science and applications of Tailored Nanostructures,2016.



Oficyna Wydawnicza
Politechniki Wrocławskiej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
ISBN 978-83-7493-155-7